

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Denis Biassi

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO
ANÁLISE DA RESISTIVIDADE DE MATERIAIS
DE CAMADAS DE ISOLAMENTO
EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO

Porto Alegre

2016

DENIS BIASI

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO
ANÁLISE DA RESISTIVIDADE DE MATERIAIS
DE CAMADAS DE ISOLAMENTO
EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO

Projeto de diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DENIS BIASI

**ANÁLISE DA RESISTIVIDADE DE MATERIAIS
DE CAMADAS DE ISOLAMENTO
EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre,
Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Prof^ª. Dra. Gladis Bordin, UFRGS

Doutora pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil.

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Porto Alegre, Dezembro de 2016

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meu pai, Paulo Isair Scaravonatti, e minha mãe, Judite de Barros Scaravonatti que sempre me mostraram o valor do trabalho, da persistência e da importância de sempre procurar enxergar o melhor da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à meus pais, em especial, por todo suporte e todas as condições para chegar até aqui.

Aos professores que se esforçam todos os dias para melhorar a qualidade de ensino em nosso país.

Obrigado muito especial ao pessoal do laboratório NORIE (Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação) que gentilmente cederam suas instalações para realização de parte deste trabalho.

Aos meus colegas e principalmente meus amigos da UFRGS que também contribuíram para realização deste trabalho.

E por fim, no final dessa jornada, agradeço a Deus por ter me mantido no caminho até o final, e obrigado UFRGS por ter feito parte desse caminho.

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de estudar a resistividade dos materiais utilizados como camada superficial do solo no projeto de aterramento de uma subestação. A norma que rege o planejamento e projeto de aterramento de subestações no Brasil é a ABNT NBR-15751, disponibilizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. E de forma mais detalhada, a norma brasileira ABNT NBR-7117 aborda as características e formas de medição da resistividade e estratificação do solo. Em outros países, principalmente nos Estados Unidos da América, as normas utilizadas para os mesmos fins são aquelas desenvolvidas e disponibilizadas pelo Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos identificadas como IEEE-80 e IEEE-81.

Com base nas normas estabelecidas, são apresentadas as principais características de um projeto de aterramento, destacando aquelas mais importantes para análise em função da resistividade do solo. Os valores de tensão, a que podem ficar expostas as pessoas em uma subestação, são calculados com base nos valores de resistividade do solo e dos materiais da de sua camada superficial e esses são apresentados tanto na norma brasileira quanto na americana. Além dos valores tabelados, foi realizado um experimento de medições de resistividade incluindo materiais e tamanhos correspondentes àqueles apresentados nas normas.

Os valores de resistividade foram analisados de forma que se concluiu que os valores normalizados não podem ser utilizados como valores reais e sim aproximados, pois dependendo da potência de trabalho da subestação, valores mínimos de tensão permissíveis de exposição podem ser violados quando os valores de resistividade são superestimados, ou ao contrário, quando subestimados, acarretam na necessidade de uma malha de aterramento maior, influenciando no custo final do projeto.

Palavras-chave: Resistividade, Subestações, Camada Superficial, Solo, Materiais.

ABSTRACT

This final paper has the objective to study the resistivity of the materials used as surface layer of soil in the design of a substation ground. The standard governing the planning and design of substation grounding in Brazil is NBR-15751, made available by the Brazilian Association of Technical Standards. And in more detail, the Brazilian standard NBR-7117 deals with the characteristics and forms of measurement of soil resistivity and stratification. In other countries, especially in the United States of America, standards used for the same purposes are those developed and made available by the Institute of Electrical and Electronic Engineers identified as IEEE-80 and IEEE-81.

Based on the established norms, the main characteristics of a grounding project are presented, highlighting the most important ones for analysis as a function of soil resistivity. The voltage values to which people can be exposed in a substation are calculated based on the resistivity values of the soil and the materials of the surface layer, and these are presented in both the Brazilian and the American standard. In addition to the tabulated values, an experiment was carried out on resistivity measurements including materials and sizes corresponding to those presented in the standards.

The values of resistivity were analyzed in such a way that it was concluded that the normalized values can not be used as real values but rather approximate, because depending on the working power of the substation, minimum permissible exposure voltage values can be violated when the resistivity values are overestimated or, on the contrary, when underestimated, entail the need for a larger grounding loop, influencing the final cost of the project.

Keywords: Resistivity, Substations, Surface Layer, Soil, Materials.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	APRESENTAÇÃO	15
1.2	OBJETIVO	16
2	ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES	17
2.1	MALHA DE ATERRAMENTO	18
2.2	RESISTIVIDADE DO SOLO	19
2.2.1	Influência da Umidade	20
2.2.2	Influência da Temperatura	21
2.2.3	Influência da Estratificação	22
2.2.4	Material de superfície	23
2.2.5	Resistividade aparente do solo	23
3	MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SOLO	24
4	ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO	26
4.1	MEDIÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO MATEMÁTICO	26
4.2	MEDIÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO GRÁFICO	26
5	NÍVEIS DE SEGURANÇA	28
5.1	POTENCIAL DE TOQUE	28
5.2	POTENCIAL DE PASSO	30
5.3	CORREÇÃO DE POTENCIAIS DE TOQUE E PASSO	32
6	MATERIAIS DE RECOBRIMENTO DO SOLO	34
6.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS AGREGADOS	34
6.1.1	Rochas ígneas, magmáticas ou eruptivas	34
6.1.2	Rochas sedimentares	35
6.1.3	Rochas metamórficas	35
6.2	ROCHAS MAIS COMUNS	36
6.3	AGREGADOS MAIS COMUNS	39
6.3.1	Brita	39
6.3.2	Cascalho	40
6.4	ESQUEMA REPRESENTATIVO	41
7	TABELAS DE RESISTIVIDADE DE MATERIAIS	43
7.1	ANÁLISE DE TABELA DE RESISTIVIDADE - ABNT NBR-15751	43
7.2	ANÁLISE DE TABELA DE RESISTIVIDADE – IEEE-80	45

7.2.1	Análise sobre materiais sem indicação de valores.....	45
7.2.2	Análise sobre formato dos materiais	48
7.2.3	Análise sobre valores de resistividade apresentados para faixas de tamanhos....	49
7.2.4	Análise sobre valores de resistividade para variação de condições e formato	50
7.3	COMPARAÇÃO ENTRE AS TABELAS DE RESISTIVIDADE.....	51
8	MEDIDAS DE RESISTIVIDADE	52
8.1	CARACTERÍSTICAS DO LOCAL DE COLETA DE AMOSTRAS.....	52
8.2	TRIAGEM DO MATERIAL COLETADO	54
8.3	GRANULOMETRIA	55
8.4	ANÁLISE DAS AMOSTRAS	57
8.5	MONTAGEM DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO	58
8.5.1	Sistema de armazenamento de amostra	59
8.5.2	Instrumentos de medição.....	60
8.6	METODOLOGIA DE MEDIÇÃO.....	61
9	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
9.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
9.1.1	Análise referente a valores obtidos p/ amostras de britas.....	72
9.1.2	Análise referente a valores obtidos p/ amostras de faixas de tamanhos	73
9.1.3	Análise referente a valores obtidos p/ variação de condição e forma.....	74
9.1.4	Análise referente ao valor obtido para o corpo de prova de concreto	75
9.1.5	Análise gráfica dos resultados	76
10	CONCLUSÕES	80
11	REFERÊNCIAS	81

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ATERRAMENTO ELÉTRICO FEITO COM ELETRODO E SUA CONEXÃO	17
FIGURA 2: INFLUÊNCIA DA ESTRATIFICAÇÃO NA DISPERSÃO DA CORRENTE ELÉTRICA.....	23
FIGURA 3: DISTRIBUIÇÃO DE LINHAS DE CORRENTE ENTRE DOIS ELETRODOS.....	25
FIGURA 4: RESISTIVIDADE EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE AS HASTES	27
FIGURA 5: SOLO ESTRATIFICADO EM DUAS CAMADAS POR MÉTODO SIMPLIFICADO	27
FIGURA 6: REPRESENTAÇÃO ELÉTRICA PARA POTENCIAL DE CONTATO	29
FIGURA 7: CIRCUITO ELÉTRICO FORMADO ENTRE O PONTO DE CONTATO E O SOLO.....	30
FIGURA 8: REPRESENTAÇÃO ELÉTRICA PARA POTENCIAL DE PASSO	31
FIGURA 9: CIRCUITO ELÉTRICO FORMADO ENTRE O PONTO DE CONTATO E O SOLO.....	30
FIGURA 10: LINHAS DE POTENCIAL FORMADAS A PARTIR DE UMA DESCARGA ELÉTRICA	32
FIGURA 11: DETERMINAÇÃO GRÁFICA DO FATOR DE REDUÇÃO C.....	33
FIGURA 12: PONTOS DE CONSOLIDAÇÃO DO MAGMA DERRETIDO	35
FIGURA 13: EXEMPLO DE UM PROCESSO DE FORMAÇÃO DE ROCHAS SEDIMENTARES	36
FIGURA 14: IMAGEM DE UM GRANITO	37
FIGURA 15: IMAGEM DE UM ARENITO.....	37
FIGURA 16: IMAGEM DE UM CALCÁRIO	38
FIGURA 17: IMAGEM DE UM BASALTO	38
FIGURA 18: IMAGEM DE BRITAS.....	40
FIGURA 19: IMAGEM DE CASCALHO DE RIO.....	41
FIGURA 20: ESQUEMA REPRESENTATIVO DE CARACTERÍSTICAS E FATORES CLIMÁTICOS	41
FIGURA 21: DEDUÇÕES PARA VALORES NÃO INDICADOS – NORMA IEEE-80	47
FIGURA 22: ILUSTRAÇÃO DA ANÁLISE DE MATERIAIS SEM INDICAÇÃO DE FORMATO	48
FIGURA 23: ILUSTRAÇÃO DA ANÁLISE DE RESISTIVIDADE PARA VARIAÇÃO DE CONDIÇÃO E FORMATO.....	50
FIGURA 24: MAPA DAS PRINCIPAIS FORMAS DE RELEVO DO RIO GRANDE DO SUL	53
FIGURA 25: IMAGENS DO MUNICÍPIO DE SANTA TERESA E DO LOCAL DE COLETA	53
FIGURA 26: AMOSTRAS CLASSIFICADAS DE FORMA VISUAL E MANUAL	54
FIGURA 27: CLASSIFICAÇÃO MAUAL UTILIZANDO PENEIRAS DO LABORATÓRIO NORIE	55
FIGURA 28: AMOSTRA REPRESENTATIVA DO MATERIAL COLETADO	57
FIGURA 29: MATERIAIS DE ORIGEM MAGMÁTICA INTRUSIVA OU EXTRUSIVA	58
FIGURA 30: CONJUNTO PARA ARMAZENAMENTO E MEDIÇÃO DE AMOSTRA SECA	59
FIGURA 31: CONJUNTO PARA ARMAZENAMENTO E MEDIÇÃO DE AMOSTRA MOLHADA	60
FIGURA 32: PAQUÍMETRO 300MM E MEGÔHMETRO DIGITAL MODELO MG-3000	61
FIGURA 33: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: PÓ DE CASCALHO	62
FIGURA 34: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: CASCALHO 12,5MM	62
FIGURA 35: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: CASCALHO 19,0MM REGULAR.....	63
FIGURA 36: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: CASCALHO 19,0MM IRREGULAR.....	63

FIGURA 37: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: CASCALHO 25,0MM REGULAR.....	64
FIGURA 38: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: CASCALHO 25,0MM IRREGULAR.....	64
FIGURA 39: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: CASCALHO 31,0MM	65
FIGURA 40: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: CASCALHO 38,0MM	65
FIGURA 41: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: CASCALHO 50,0MM	66
FIGURA 42: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: CASCALHO TEXTURA CRISTALINA	66
FIGURA 43: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: BRITA BASALTO N°01	67
FIGURA 44: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: BRITA BASALTO N°02	67
FIGURA 45: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: BRITA BASALTO N°03	68
FIGURA 46: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: BRITA GRANITO N°02.....	68
FIGURA 47: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: CORPO DE PROVA DE CONCRETO.....	69
FIGURA 48: MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA AMOSTRA: CASCALHO 20-25MM.....	69
FIGURA 49: ILUSTRAÇÃO DA ANÁLISE DOS VALORES DE RESISTIVIDADE PARA FAIXAS DE TAMANHOS	73
FIGURA 50: COMPARAÇÃO ENTRE VALORES OBTIDOS PARA RESISTIVIDADE DO CORPO DE PROVA	75

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: CLASSIFICAÇÃO REFERENTE À TEXTURA DO AGREGADO	39
QUADRO 2: RESISTIVIDADE DE MATERIAIS – NORMA ABNT NBR-15751	44
QUADRO 3: RESISTIVIDADE DE MATERIAIS – NORMA IEEE-80	44
QUADRO 4: VALORES NÃO INDICADOS – NORMA IEEE-80	46
QUADRO 5: VALORES NÃO INDICADOS – NORMA IEEE-80	47
QUADRO 6: INDICAÇÃO DE ANÁLISE SOBRE RESISTIVIDADE PARA FAIXAS DE VALORES	49
QUADRO 7: COMPARAÇÃO ENTRE AS TABELAS DE RESISTIVIDADE DAS NORMAS CONSIDERADAS	51
QUADRO 8: RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO MANUAL COM PENEIRAS DO NORIE	56
QUADRO 9: INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	60
QUADRO 10: RESULTADOS DO EXPERIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DE RESISTIVIDADE	70
QUADRO 11: ASPECTOS DE CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS	71
QUADRO 12: RESULTADOS DAS MEDIÇÕES COM BRITAS	72
QUADRO 13: RESULTADOS DAS MEDIÇÕES PARA COMPARAÇÃO DE CONDIÇÃO E FORMA	74

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: TIPOS DE SOLOS E SEUS VALORES DE RESISTIVIDADES.....	19
GRÁFICO 2: RESISTIVIDADE DE SOLO ARENOSO EM FUNÇÃO DA UMIDADE	20
GRÁFICO 3: RESISTIVIDADE DE SOLO ARENOSO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	21
GRÁFICO 4: DETALHE PARA VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA NA MUDANÇA DE ESTADO	22
GRÁFICO 5: RESISTIVIDADE DOS AGREGADOS - CASCALHO (EXPERIMENTAL) E GRANITO (TEÓRICO)	76
GRÁFICO 6: RESISTIVIDADE DOS AGREGADOS - BRITA EXPERIMENTAL E TEÓRICA	77
GRÁFICO 7: RESISTIVIDADE DOS AGREGADOS - BRITA E CASCALHO LIMPOS	78
GRÁFICO 8: RESISTIVIDADE DOS AGREGADOS - BRITA E CASCALHO SUJOS	78

LISTA DE ABREVIACÕES

SE: Subestação

V: Tensão elétrica (Volts)

kV: Unidade de potencial (Quilovolts)

I: Corrente Elétrica

Hz: Unidade de frequência (Hertz)

Ω : Unidade de resistência elétrica (Ohm) Kg: Unidade de massa (Quilograma)

t: Tempo (em segundos)

s: Unidade de tempo (segundos) m: Unidade de distância (metros)

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR: Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas

V_{toque} : Potencial de toque

V_{passo} : Potencial de passo ρ : Resistividade do solo

ρ_s : Resistividade superficial do solo

ρ_a : Resistividade aparente do solo

I_{malha} : Corrente elétrica da malha

$^{\circ}\text{C}$: Unidade de temperatura (grau Celcius)

f: Frequência (Hz)

LT: Linha de Transmissão

DMG: Distância Média Geométrica RMG: Raio médio geométrico

AT: Alta Tensão

E_c : Eletrodo de corrente E_p : Eletrodo de potencial R: Resistência Elétrica (Ω)

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

O sistema elétrico brasileiro, apesar das incertezas com relação ao comportamento da economia, cresce constantemente, exigindo estudos com objetivo de ampliação e diversificação energética, além dos projetos que já estão em processo de aprovação ou mesmo de execução. Isso inclui usinas geradoras, linhas de transmissão, de distribuição e também subestações de energia elétrica. O mercado energético dos sistemas de potência preza por alguns requisitos básicos: qualidade, confiabilidade, segurança e atualmente, com apelo muito forte para o fator ambiental. Para isso, todos os segmentos responsáveis pelo abastecimento de energia são essenciais para alcançar o melhor equilíbrio entre tais aspectos. Um desses segmentos é constituído pelas subestações, cujo funcionamento tem como elemento fundamental, o sistema de aterramento.

Uma subestação apresenta requisitos básicos construtivos de funcionamento e segurança. Um desses requisitos é que o sistema de aterramento seja bem dimensionado e adequado às normas vigentes para o país. Isso garante a proteção dos equipamentos e das pessoas que trabalham no local, além de garantir o funcionamento adequado dos sistemas de proteção que dependem desse aterramento.

No projeto de uma subestação, o cálculo de dimensionamento do sistema de aterramento é um processo complexo que compreende a determinação de valores seguros para tensões de exposição às pessoas que ocupam o terreno da subestação. Esses valores dependem diretamente dos valores de resistividade do solo do terreno e se alteram conforme fatores climáticos detalhados neste trabalho.

Em uma subestação é comum a colocação de uma camada superficial de material de alta resistividade de forma que se possa garantir o isolamento e a manutenção dos valores de tensão de exposição dentro de uma faixa segura. Assim, valores de resistividade de materiais fornecidos pelas normas brasileira e americana são comparados entre si e com relação a valores de resistividade obtidos experimentalmente.

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre a resistividade dos materiais utilizados como camada superficial de isolamento do solo em terrenos ocupados por subestações. E a partir desse estudo, analisar as tabelas de resistividade disponibilizadas pelas normas que regem projetos de aterramento. Finalmente, comparar valores e comportamentos relativos à variação de resistividade entre normas e um experimento, de modo que, se verifique a necessidade do engenheiro ter um cuidado maior ao selecionar um determinado material para a camada superficial de isolamento durante a fase de projeto.

2. ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES

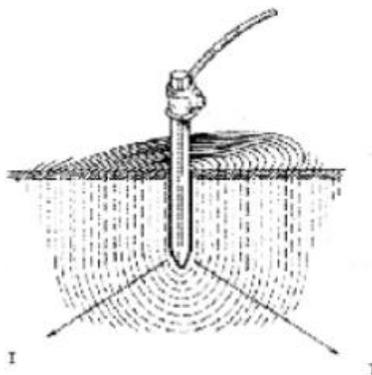
Aterramento é representado por um fio ou barra, normalmente de cobre, por onde escoam a corrente elétrica proveniente de uma falha, defeito ou mesmo descargas elétricas, em direção ao solo. Aterramento elétrico é realizado numa instalação de modo a garantir a segurança de pessoas e integridade de máquinas e equipamentos.

O conector de aterramento é ligado a equipamentos, fornecendo um caminho para a circulação de corrente quando há uma ligação indesejada destes com condutores vivos. Em sistemas elétricos, o cabeamento específico para a função oferece um caminho alternativo para descargas atmosféricas.

O sistema de aterramento, ao oferecer um percurso de baixa impedância de retorno para a corrente de falta, torna possível que os sistemas de proteção possam atuar rapidamente e de forma segura, assim protegendo os equipamentos da subestação.

Usualmente os valores adotados pelas concessionárias para resistência de malha de terra são de 1Ω para subestações (SEs) de Transmissão, e de 1 a 5Ω para (SEs) de Distribuição. Esses valores de resistência não são adotados como padrão entre as concessionárias e não devem ser um critério isolado, pois as condições de segurança dependem também de outros fatores como resistividade do solo e potenciais de curto-circuito no ponto da subestação, ou seja, os potenciais de passo e toque devem ser considerados. A Figura 1 apresenta um sistema simples de aterramento via eletrodo [1].

Figura 1: Aterramento elétrico feito com eletrodo e sua conexão.



Fonte: VISACRO FILHO (2002).

2.1. Malha de aterramento

Existem muitas maneiras de implementar o aterramento de um sistema elétrico, que pode ser por haste, placas e diversas configurações de cabos enterrados no solo, mas para o caso de subestações, normalmente são utilizadas redes de terra, ou seja, um conjunto de cabos de cobre enterrados no solo. O tamanho e a configuração dessas redes exigem o conhecimento de parâmetros como:

- resistividade do solo;
- corrente de curto-circuito máxima entre a fase e a terra;
- área de abrangência da subestação;
- tempo de defeito para a máxima corrente de curto-circuito fase-terra.

A configuração do aterramento de uma subestação é um sistema complexo, pois trata de alta potência, com tensões e correntes elevadas, e também demanda uma grande área de modo a manter os níveis de segurança. A configuração de aterramento utiliza várias técnicas de modo a se obter o resultado esperado.

A instalação do aterramento é enterrada sob a subestação. A rede de terra é conectada por cabos aos equipamentos e estrutura da subestação. A corrente que escoar pela malha de aterramento tem tendência a escoar pela periferia da malha, através de cabo e hastes[2], [3].

A seleção adequada do material constituinte do sistema de aterramento de uma subestação é essencial para obtenção de valores adequados de resistência aparente, além do que, deve garantir a integridade física dos componentes mesmo quando expostos à corrosão, esforços mecânicos ou eletromagnéticos e aumento excessivo de temperatura, no caso de manobras de correntes de falta.

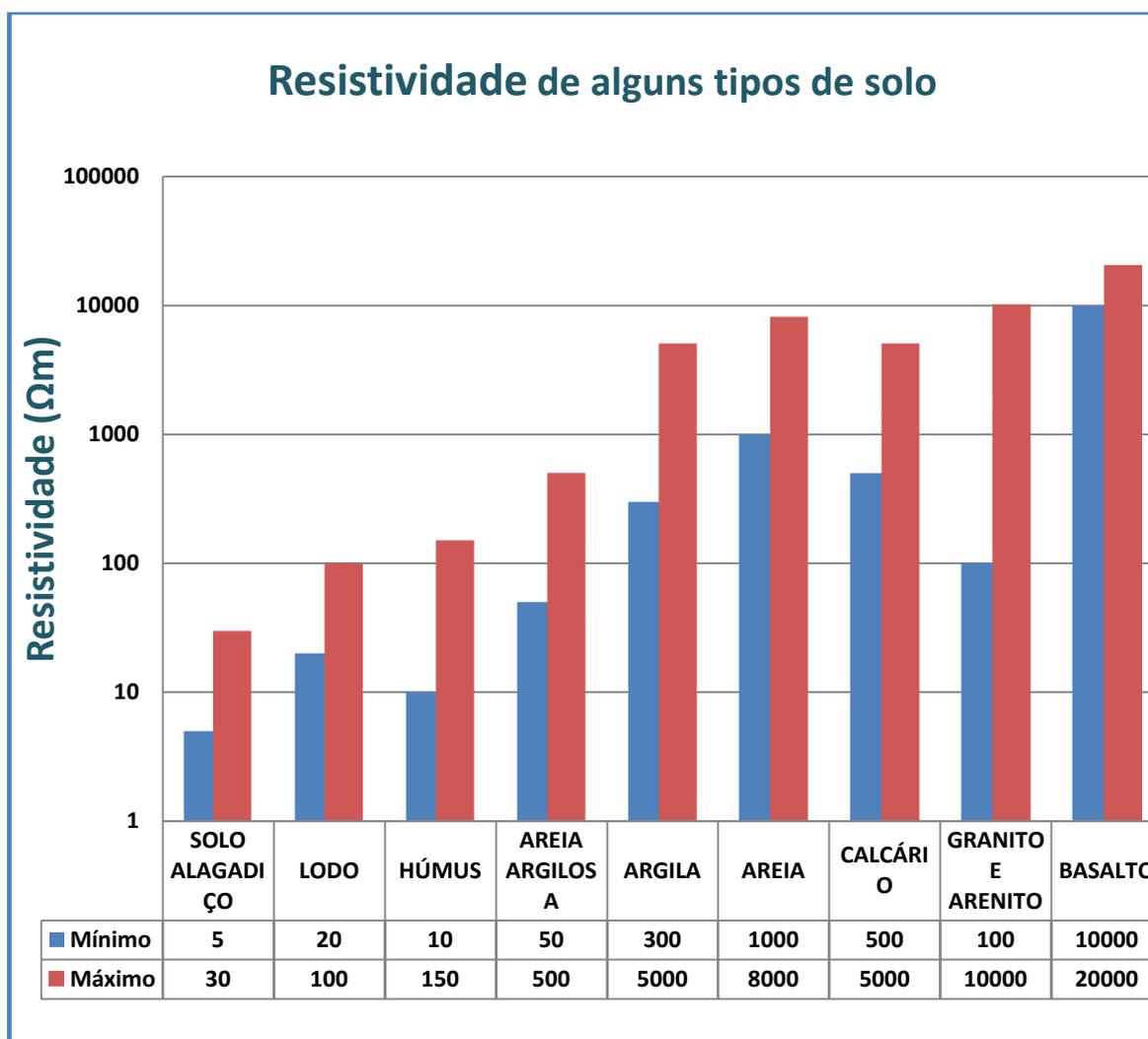
A rede de aterramento é composta por um quadriculado de cabos que geralmente é composta por fios cobre nu devido sua ótima condutividade elétrica, boa resistência mecânica e também resistente à corrosão. Caso seja necessário, pode-se utilizar aço protegido contra corrosão. Segundo as normas técnicas brasileiras, o diâmetro mínimo de um cabo de aterramento de uma subestação deve ser de 50 mm^2 para cobre e 38 mm^2 para aço [4].

2.2. Resistividade do solo

Os solos, geralmente, são constituídos por misturas de materiais isolantes (silicatos e óxidos) com sais minerais ionizáveis, água e carbono devido a decomposição de vegetais. A complexidade adicional causada pela característica não uniforme do solo é comum e em apenas alguns casos os valores de resistividade do solo permanecem constantes com o aumento da profundidade. A resistividade da terra varia não apenas com o tipo de solo, mas também de acordo com fatores como temperatura, umidade, teor de sal.

As diversas combinações dos fatores mencionados resultam em solos com características diferentes e logo, com valores de resistividade diferentes. O Gráfico 1 apresenta alguns tipos de solo e suas respectivas resistividades [2], [3].

Gráfico 1: Tipos de solos e seus valores de resistividades.



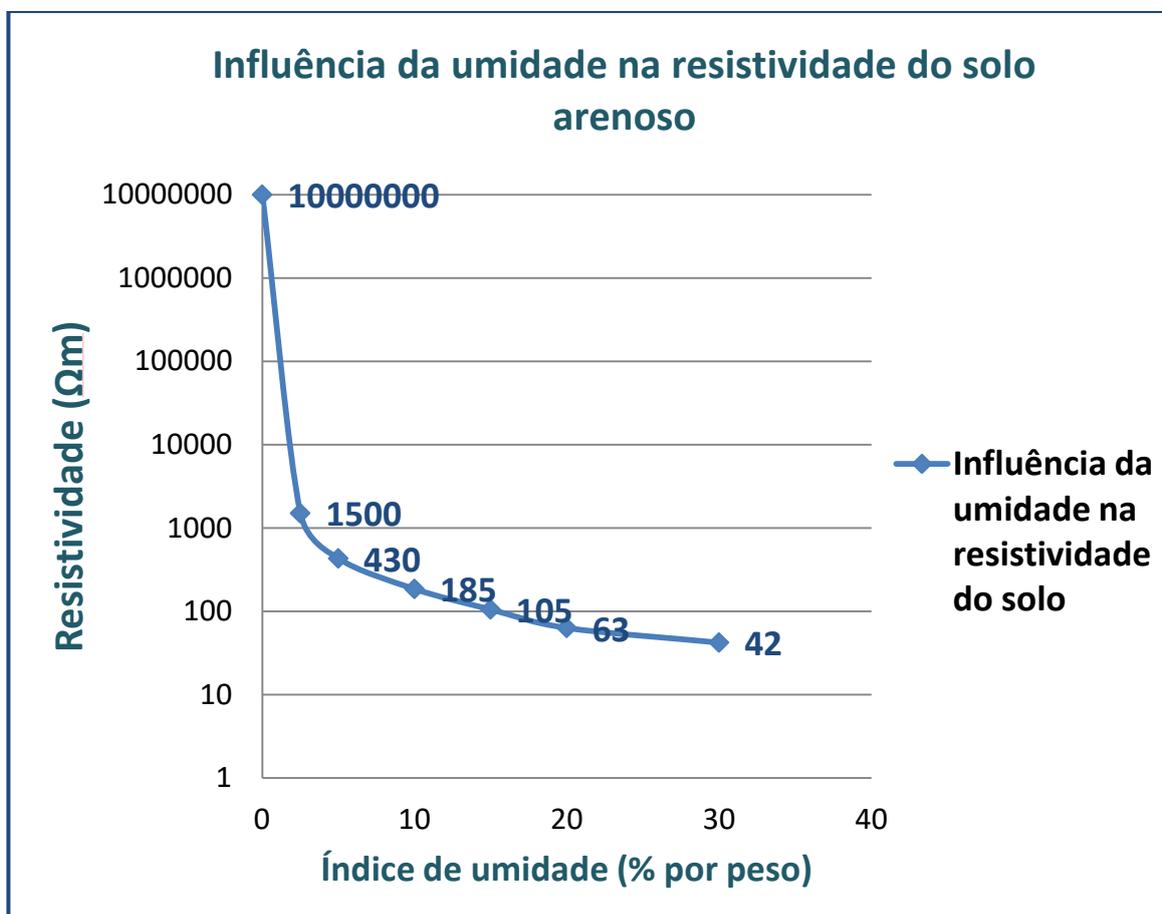
Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO (1998).

O projeto da malha de aterramento inicia-se com a determinação da resistividade do solo e para isso se fazem necessárias medições de resistência no terreno escolhido. Logo após, se obtém a resistividade aparente do solo através da determinação de sua estratificação. A resistividade aparente (ρ_a) é a resistividade vista pelo sistema de aterramento em integração com o solo, considerada a profundidade atingida pelo escoamento de corrente elétrica.

2.2.1. Influência da umidade

A resistividade sofre alterações de acordo com o teor de umidade retido, uma vez que a condução de cargas elétricas ocorre de forma iônica e uma maior percentagem de umidade faz com que sais, presentes no solo, se dissolvam, formando um meio eletrolítico favorável à passagem de corrente iônica. O Gráfico 2 apresenta as variações do valor de resistividade para um solo do tipo arenoso conforme seu índice de umidade [2], [3].

Gráfico 2: Resistividade de solo arenoso em função da umidade.



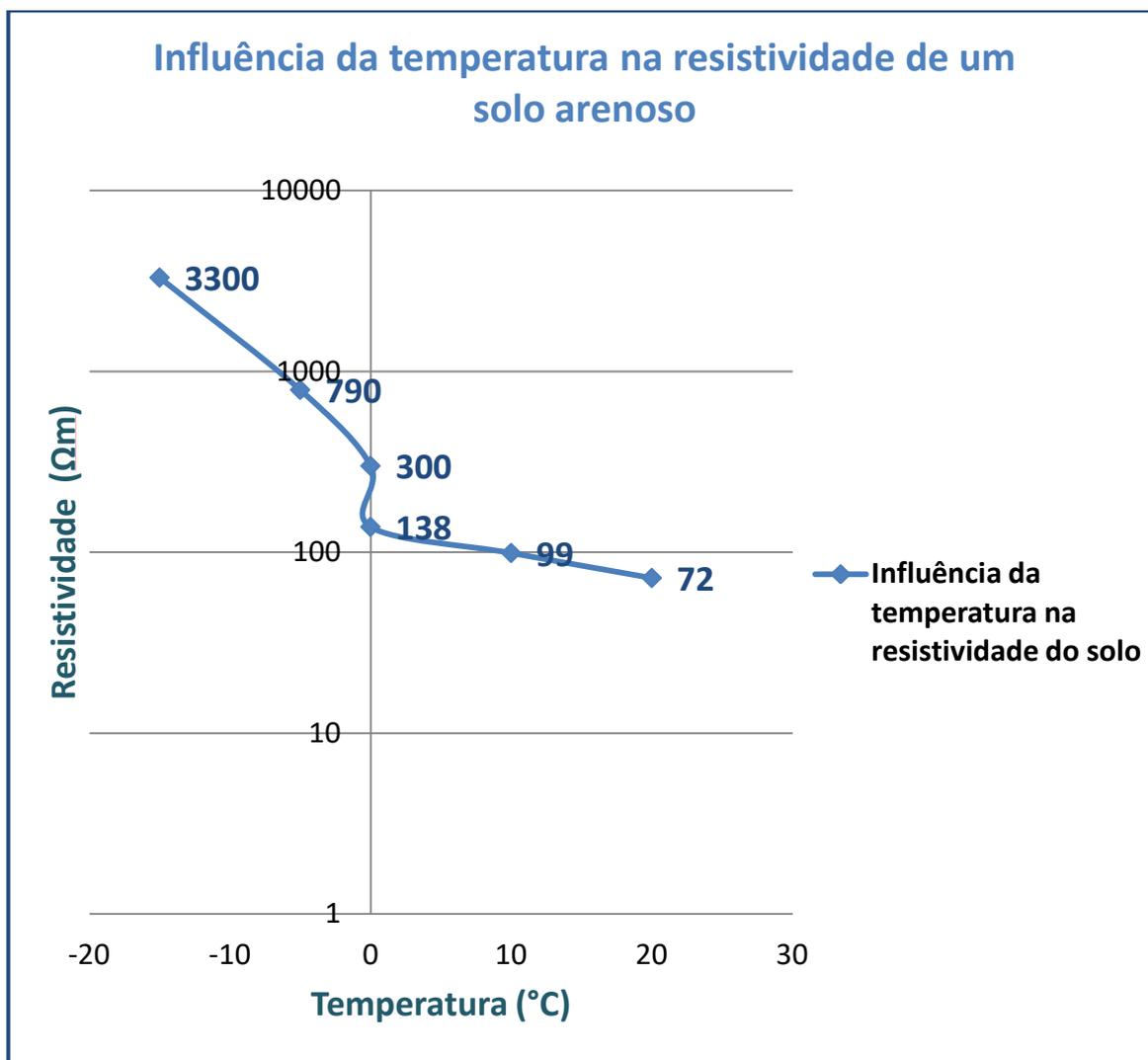
Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO (1998).

2.2.2. Influência da temperatura

O Gráfico 3 apresenta a variação de valores de resistividade que ocorrem para um solo arenoso quando apenas a grandeza de temperatura sofre alterações. Interessante notar o comportamento da resistividade a partir de um valor mínimo de temperatura, o qual, com decréscimo de temperatura, e a conseqüente contração ou aglutinação da água, é produzida uma dispersão nas ligações iônicas entre os Grânulos de terra no solo, resulta num maior valor de resistividade.

Com temperaturas elevadas, próximas dos 100°C, o estado de vaporização, deixando o solo mais seco, dificultando a condução de corrente, conseqüentemente, elevando o valor de sua resistividade [2], [3].

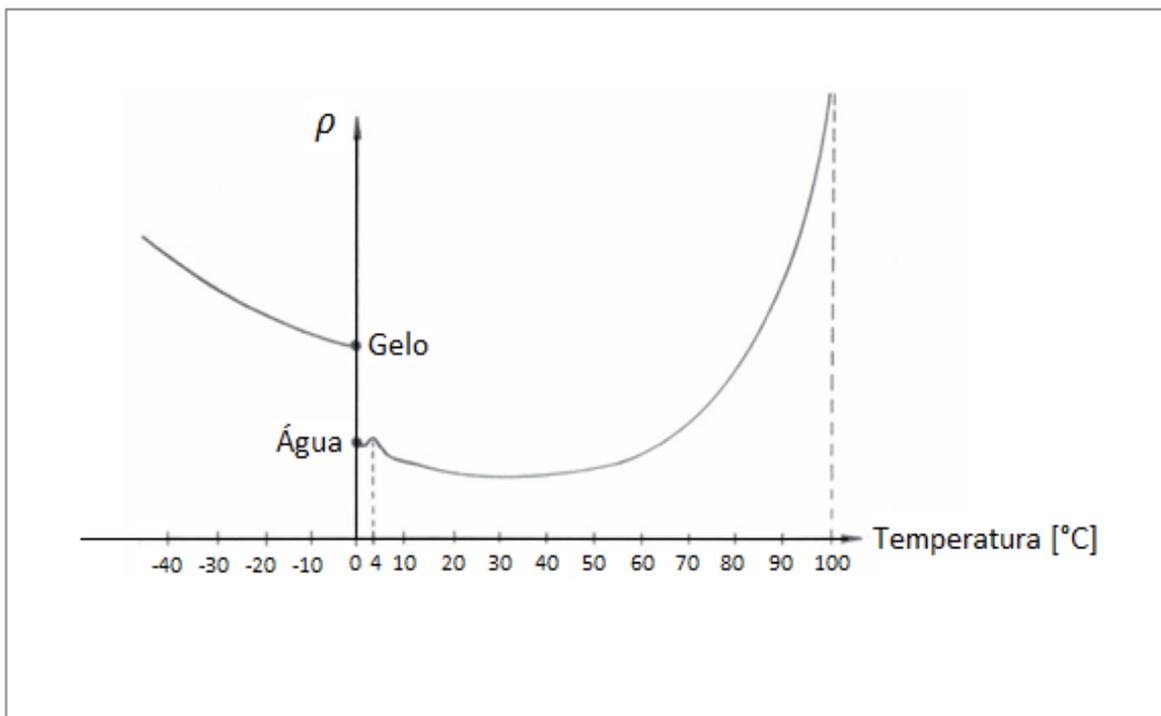
Gráfico 3: Resistividade de solo arenoso em função da temperatura.



Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO (1998).

O Gráfico 4 apresenta o comportamento particular da variação da propriedade da resistividade elétrica no limiar da variação da temperatura a 0°C.

Gráfico 4: Detalhe para variação da resistividade elétrica na mudança de estado.



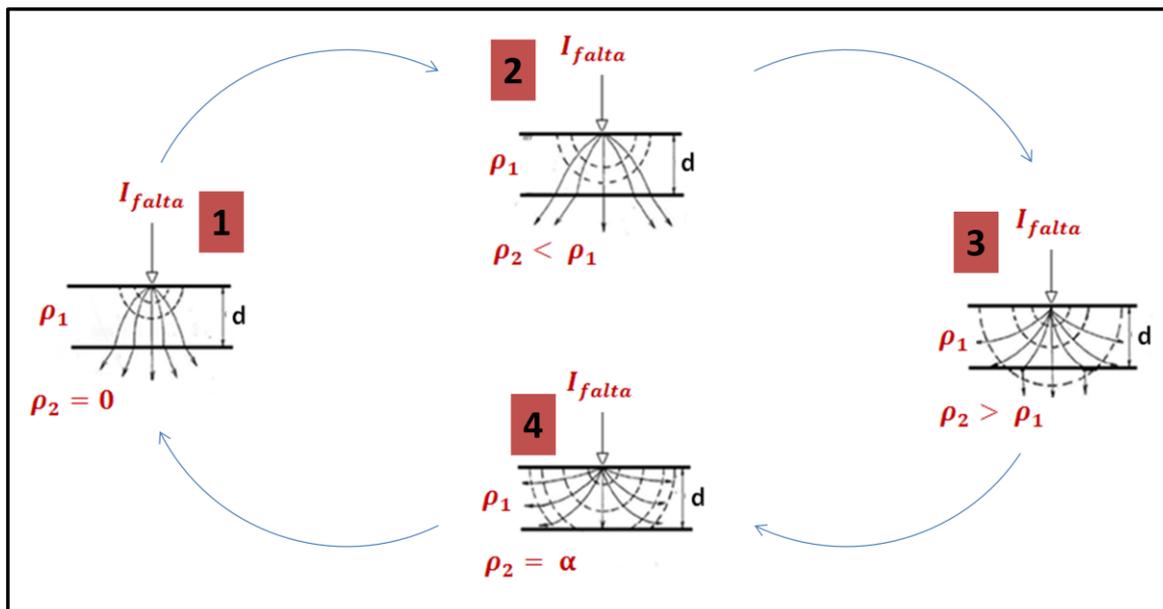
Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO (1998).

2.2.3. Influência da Estratificação

Os solos, conforme dito anteriormente, dificilmente são homogêneos, mas constituídos por várias camadas de resistividade e profundidade diferentes devido à formação geológica. Essas camadas, em geral, horizontais e paralelas à superfície do solo e mesmo quando não são, são considerados aproximadamente horizontais.

Como resultado da variação da resistividade das camadas do solo, a Figura 2 mostra um exemplo da variação da dispersão de corrente elétrica que passa pelo solo, considerando duas camadas e quatro casos em que suas resistividades são diferentes. As linhas pontilhadas são superfícies equipotenciais. As linhas cheias são as correntes elétricas fluindo no solo [2], [3].

Figura 2: Influência da estratificação na dispersão da corrente elétrica.



Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO (1998).

2.2.4. Material de superfície

Subestações geralmente utilizam uma camada de material de superfície que geralmente é brita, por sua versatilidade e economia. Uma camada de material de revestimento de alguns centímetros de profundidade é muito útil no retardo da evaporação da umidade do solo e, por conseguinte, limitar a secagem das camadas superficiais de solo em períodos de seca prolongada. O material de superfície deve ser de alta resistividade de forma a reduzir eventuais correntes de choque.

A gama de valores de resistividade de superfície da camada de material depende de muitos fatores, alguns dos quais são: tipos de rocha, tamanho, quantidade, retenção de umidade, etc. Além disso, fatores climáticos também influenciam na resistividade dos materiais. Assim, o material de superfície submetido a água do mar pode ter resistividade substancialmente inferior ao material da superfície utilizada em zonas áridas.

2.2.5. Resistividade aparente do solo

A resistividade aparente considera o sistema de aterramento em integração com o solo, o que resulta em um determinado comportamento para o escoamento das correntes elétricas dependendo da composição do solo e de suas respectivas camadas, bem como da geometria e do tamanho do sistema de aterramento.

3. MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SOLO

A determinação dos valores das resistividades do solo é de importância fundamental para o cálculo das características de um sistema de aterramento, subsidiando o desenvolvimento de projetos, bem como a determinação de seus potenciais de passo e toque.

Considerando a heterogeneidade do solo, há necessidade de procurar meios e métodos que determinem essas variações, sem que seja necessário lançar mão de prospecções geológicas. Assim sendo, foram desenvolvidos métodos de prospecção geométricos que se caracterizam pela facilidade operacional e precisão fornecidas.

Existem vários métodos de prospecção geométricos utilizados para medição de resistividade, porém, segundo a norma NBR-7117 utilizada para medição de resistividade e determinação de estratificação do solo, e também a norma IEEE-81 utilizada para medição de resistividade, impedância de aterramento e potenciais de superfície, o método mais indicado para esse fim quando se trata de grandes volumes de terra, é o método de quatro eletrodos com arranjo de Wenner. Este método utiliza dois eletrodos pelos quais se faz circular uma corrente elétrica, enquanto outros dois eletrodos detectarão uma diferença de potencial. Assim, pode-se mostrar que a resistividade do solo é proporcional ao quociente entre a tensão elétrica medida e a corrente elétrica injetada.

Para este método, considera-se o valor de resistência elétrica lida no aparelho como sendo relativa a uma profundidade a do solo, pois, segundo a norma brasileira NBR-7117, que determina a medição de resistividade do solo, pode-se dizer que metade da corrente injetada circula acima de uma profundidade igual à metade da distância entre os eletrodos e grande parte da corrente flui acima da profundidade igual à separação entre os eletrodos.

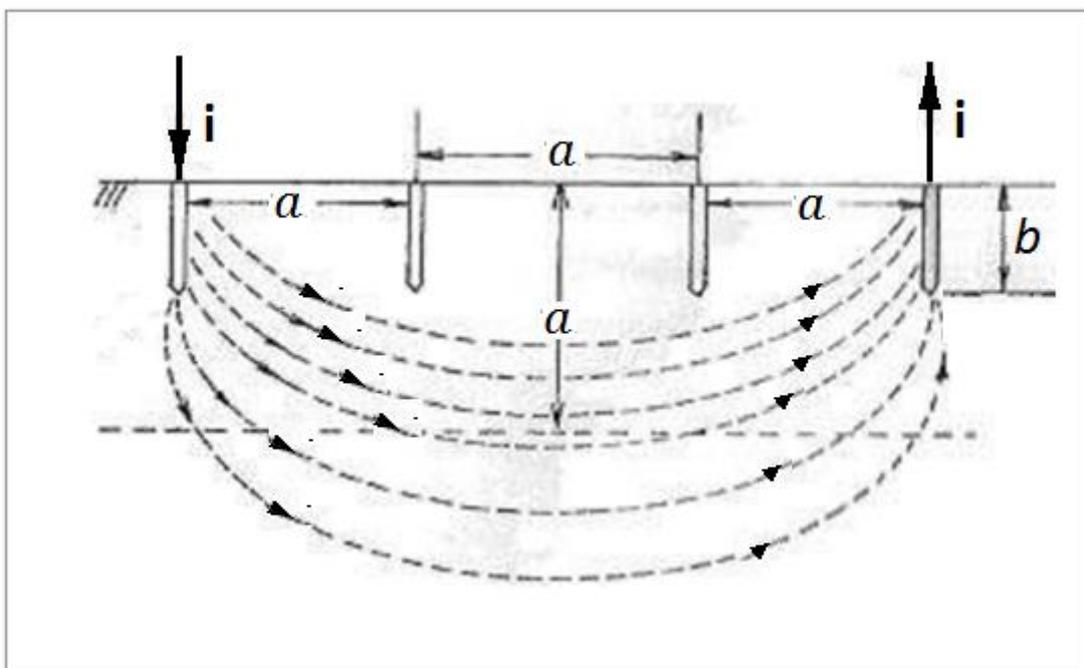
Para obtenção de um valor mais confiável, devem ser realizadas medições utilizando diversas configurações de espaçamento entre os eletrodos. Os espaçamentos recomendados são 2, 4, 8, 16 e 32 metros [7], [8], [9], [10]. O valor de resistividade ρ [Ωm] é calculado utilizando a Equação (1).

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

onde $R[\Omega]$ é o valor da resistência medida e indicada no medidor, $a[\text{m}]$ é a distância entre eletrodos adjacentes, $b[\text{m}]$ é a profundidade de cravação.

A Figura 3 ilustra a distribuição de linhas de corrente entre os dois eletrodos externos.

Figura 3: Distribuição de linhas de corrente entre dois eletrodos.



Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO (1998).

4. ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

O Método de Wenner para determinação da resistividade de uma camada do solo foi tratada na seção anterior, porém, a resistividade pode ser calculada para duas ou mais camadas do solo utilizando um método matemático ou gráfico.

4.1. Medição através do método matemático

A Equação (2) apresenta a equação utilizada para cálculo das camadas subjacentes. Os cálculos dos valores de resistividade considerando cada espaçamento a considerado (2, 4, 8, 16 e 32) devem ser repetidos e o somatório considera todas as camadas anteriores àquela que está sendo calculada [7], [8], [9], [10].

$$\rho(a) = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^N \left[\frac{k^n}{\sqrt{1+(2nh/a)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4+(2nh/a)^2}} \right] \right\} \quad (2)$$

onde h é a espessura da primeira camada, ρ_1 é a resistividade da primeira camada, n é o número da camada considerada no somatório, a é o espaçamento entre os eletrodos e k é o coeficiente de reflexão e N é o número total de camadas.

$$k = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)} \quad (3)$$

onde ρ_1 é a resistividade da primeira camada e ρ_2 é a resistividade da segunda camada.

4.2. Medição através do método gráfico

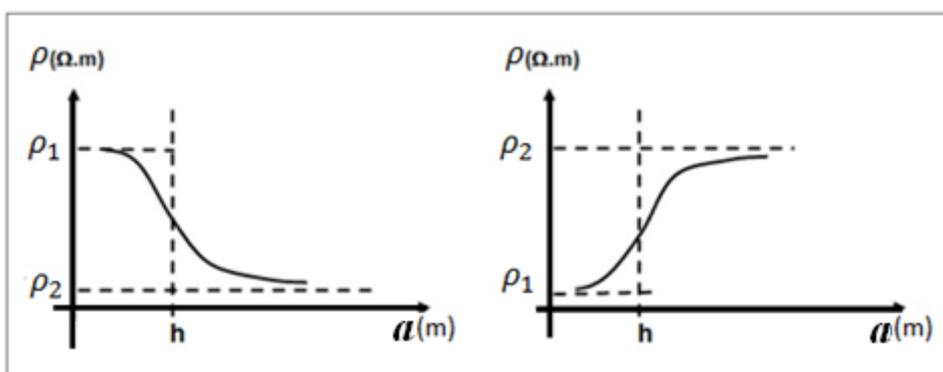
Uma forma mais prática de se prever a extratificação do solo é a utilização de um método gráfico. Com as medidas efetuadas pelo Método de Wenner e a curva $\rho \times a$ é possível fazer a estratificação do solo em duas ou mais camadas. Assim pode-se encontrar a resistividade do solo de cada camada e a sua respectiva profundidade [7], [8], [9], [10].

Segue o procedimento do Método Simplificado que é o mais utilizado para a Estratificação do Solo em Duas Camadas [7], [8], [9], [10]:

- Traçar a curva resistividade em função do espaçamento entre as hastes;
- Prolongar até o eixo das ordenadas o ponto mais próximo da curva;
- Traçar a assíntota para o final da curva;
- Determinar o valor médio entre ρ_1 e ρ_2 .

Este método oferece resultados razoáveis quando o solo puder ser estratificável em duas camadas e a curva $\rho \times a$ tiver umas das curvas típicas indicadas na Figura 4.

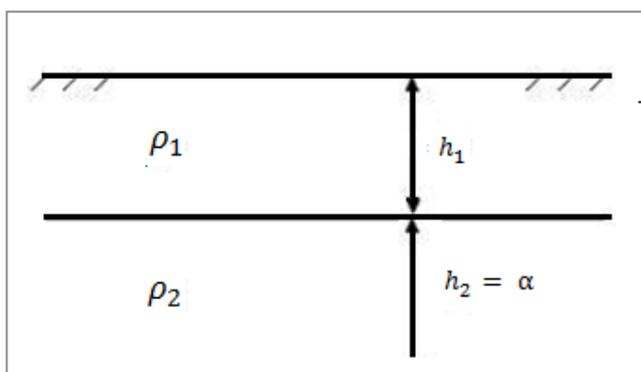
Figura 4: Resistividade em função do espaçamento entre as hastes.



Fonte: ABNT NBR-15751 (2009).

O terreno estratificado em duas camadas é apresentado na Figura 5.

Figura 5: Solo estratificado em duas camadas por Método Simplificado.



Fonte: ABNT NBR-15751 (2009).

5. NÍVEIS DE SEGURANÇA

Qualquer atividade biológica é estimulada ou controlada por impulsos de corrente elétrica. Se essa corrente fisiológica interna se somar a outra corrente de origem externa, devido a um contato elétrico, ocorre uma alteração das funções vitais normais no organismo humano, que pode levar o indivíduo à morte, dependendo da duração da corrente [3].

O principal objetivo de um sistema de aterramento de uma subestação é de manter os níveis de tensão de segurança para os pontos de contato entre equipamentos ou estruturas e as pessoas. Esses níveis são as diferenças de potenciais que podem ocorrer na subestação devido a um curto-circuito. O aterramento deve ser dimensionado para manter esses níveis num limite suportável pelo ser humano, e assim, evitar as perturbações mencionadas anteriormente. Os potenciais considerados são o Potencial de Toque e o Potencial de Passo.

Charles Dalziel concluiu que 99,5% das pessoas com peso de 50 kg ou mais podem suportar, sem a ocorrência de fibrilação ventricular, a corrente elétrica determinada pela Equação (4) [7], [8], [9], [10].

$$I_{choque} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (4)$$

Sendo:

$$0.03s \leq t \leq 3s$$

onde I_{choque} é a corrente que passa pelo corpo humano e t é o tempo de duração de passagem da corrente que deve estar dentro dos limites estabelecidos.

Esta expressão é usada para a obtenção do limite permissível e aceitável de corrente, para que não ocorra fibrilação, durante o tempo em que a pessoa fica submetida à tensão de toque ou passo.

5.1. Potencial de toque

É definido como a diferença de potencial entre o ponto da estrutura, situado ao alcance da mão de uma pessoa e um ponto no chão situado a 1 metro da base da estrutura.

O potencial de toque máximo permitido entre a mão e o pé para não causar fibrilação ventricular é o produzido pela corrente limite de Dalziel [1], [4].

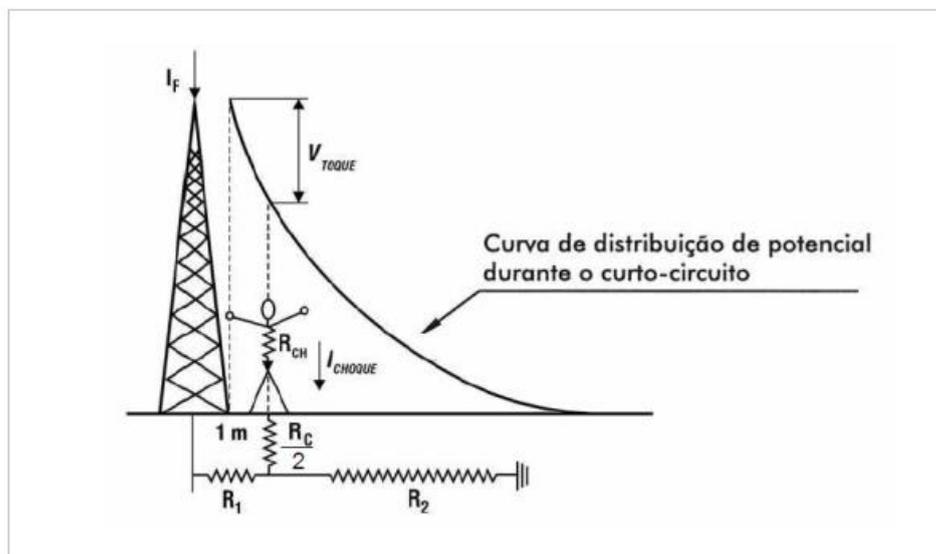
Assim, obtém-se pela Equação (5) [7], [8], [9], [10]:

$$V_{\text{toque máximo}} = \frac{116 + 0,116 \rho_s}{\sqrt{t}} \text{ [volts]} \quad (5)$$

onde ρ_s é a resistividade superficial do solo (Ωm) e t é tempo de duração de passagem da corrente que deve estar dentro dos limites estabelecidos.

A Figura 6 apresenta os elementos do circuito formado pelo corpo da pessoa, a estrutura metálica e o solo. A curva potencial indica o decaimento da tensão de toque conforme o afastamento do ponto de contato.

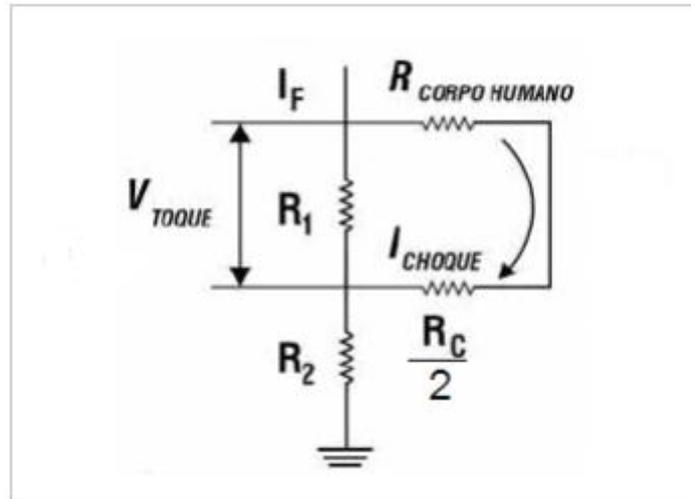
Figura 6: Representação elétrica para potencial de contato.



Fonte: EBAH. RISCO ELÉTRICO.

A Figura 7 apresenta o circuito elétrico formado pelos elementos representativos do corpo da pessoa, estrutura metálica e solo, onde, I_{choque} é a corrente elétrica que atravessa o corpo humano de resistência elétrica de R_{ch} . R_c é a resistência superficial de contato do solo e R_1 e R_2 são as resistências dos trechos considerados.

Figura 7: Circuito elétrico formado entre o ponto de contato e o solo.



Fonte: EBAH. RISCO ELÉTRICO.

5.2. Potencial de passo

É definido como a diferença de potencial existente entre os dois pontos situados no solo e distanciados de 1 metro, devido à passagem de corrente de curto-circuito pela terra. As tensões de passo ocorrem quando aparecem diferenças de potencial entre os membros de apoio (pés). Isto pode acontecer quando os membros se encontrarem sobre linhas equipotenciais diferentes [1], [4].

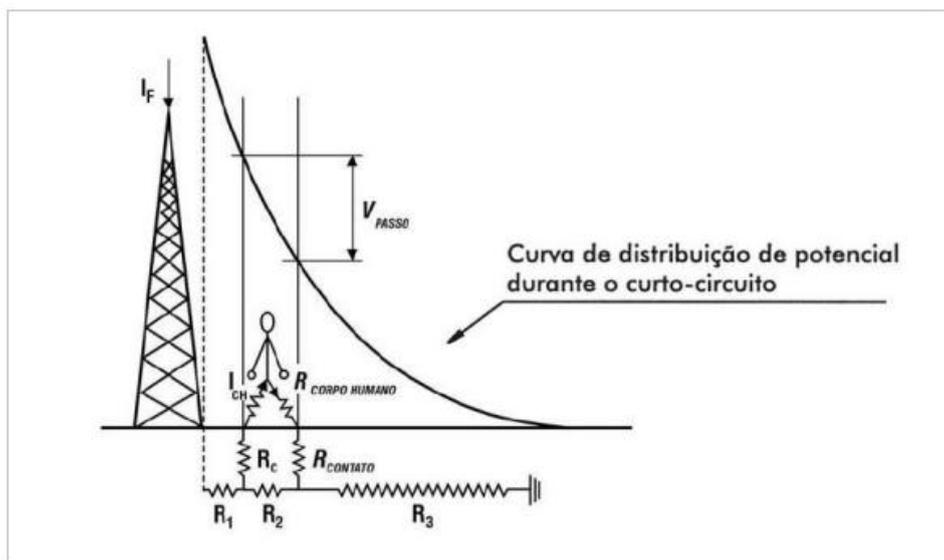
Assim, obtém-se pela Equação (6) [7], [8], [9], [10]:

$$V_{\text{passo máximo}} = \frac{116+0,696 \rho_s}{\sqrt{t}} \text{ [volts]} \quad (6)$$

onde ρ_s [Ωm] é a resistividade superficial do solo e t [s] é tempo de duração de passagem da corrente que deve estar dentro dos limites estabelecidos.

A Figura 8 apresenta os elementos do circuito formado pelo corpo da pessoa, a estrutura metálica e o solo. A curva potencial indica o decaimento da tensão de passo conforme o afastamento da estrutura metálica. I_{ch} é a corrente elétrica que atravessa o corpo humano. R_c é a resistência superficial de contato do solo e R_1, R_2 e R_3 são as resistências dos trechos considerados.

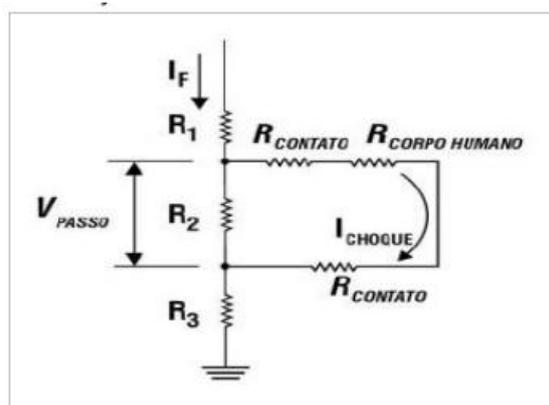
Figura 8: Representação elétrica para potencial de passo.



Fonte: EBAH. RISCO ELÉTRICO.

A Figura 9 apresenta o circuito elétrico formado pelos elementos representativos do corpo da pessoa, estrutura metálica e solo, onde, I_{choque} é a corrente elétrica que atravessa o corpo humano. $R_{contato}$ é a resistência superficial de contato do solo e R_1, R_2 e R_3 são as resistências dos trechos considerados.

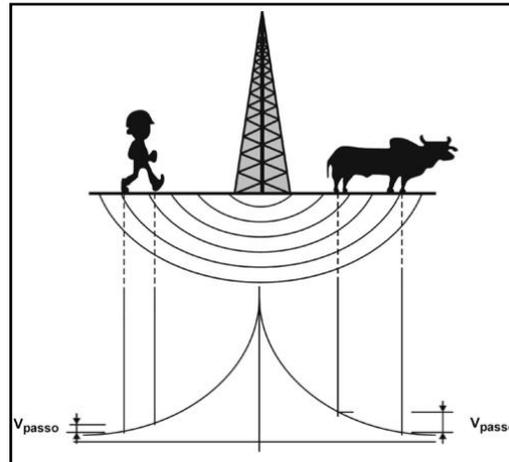
Figura 9: Circuito elétrico formado entre o ponto de contato e o solo.



Fonte: EBAH. RISCO ELÉTRICO.

A Figura 10 apresenta as linhas de potencial apresentadas durante uma descarga elétrica. A corrente sempre se distribui de forma concêntrica e uniforme de forma que atravessa perpendicularmente as superfícies equipotenciais [2].

Figura 10: Linhas de potencial formadas a partir de uma descarga elétrica.



Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO (1998).

5.3. Correção de potenciais de toque e passo

Por se tratar de um local perigoso, o solo da subestação é revestido por uma camada de material de revestimento que geralmente é brita, conferindo maior qualidade no nível de isolamento dos contatos dos pés com o solo. Esta camada representa uma estratificação adicional com a camada superficial do solo. Assim, torna-se necessário uma correção no parâmetro que contém ρ_s nas expressões de Potencial de Toque e de Passo.

A Equação (7) apresenta o cálculo para o fator de correção C_s que é utilizado nas novas Equações (8) e (9) para Potenciais de Toque e Passo máximos corrigidos [3].

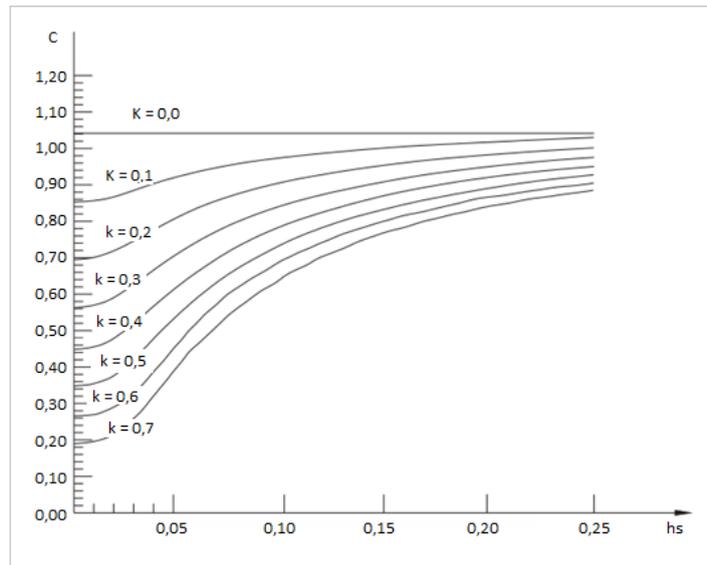
$$C_s(h_s, k) = \frac{1}{0,96} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h_s}{0,08})^2}} \right] \text{ [volts]} \quad (7)$$

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

onde h_s [m] é a profundidade da camada de revestimento, ρ_2 [Ωm] é a resistividade aparente do solo sem considerar a camada de revestimento e ρ_1 [Ωm] é a resistividade do material de recobrimento.

O fator C também pode ser determinado graficamente a partir da Figura 11 utilizando o valor k calculado e a profundidade da camada de revestimento [3].

Figura 11: Determinação gráfica do fator de redução C.



Fonte: COTRIM, A.A.M.B (1992).

Assim, as tensões de toque e passo máximas corrigidas são apresentadas pelas Equações (8) e (9):

$$V_{toque\ máximo} = \left[\frac{1000 + 1,5 C_s(h_s, k) \rho_s}{\sqrt{t}} \right] 0,116 [\text{volts}] \quad (8)$$

$$V_{passo\ máximo} = \left[\frac{1000 + 6 C_s(h_s, k) \rho_s}{\sqrt{t}} \right] 0,116 [\text{volts}] \quad (9)$$

onde h_s [m] é a profundidade da camada de revestimento, C_s [volts] é o fator de correção para potenciais máximos de toque e passo, ρ_s [Ωm] é a resistividade do material de recobrimento e t [s] é tempo de duração de passagem da corrente que deve estar dentro dos limites estabelecidos.

6. MATERIAIS DE RECOBRIMENTO DO SOLO

Os materiais utilizados no recobrimento do solo em instalações de subestações podem ser classificados de acordo com a origem, densidade e tamanho dos fragmentos. De acordo com a norma ABNT NBR-9935 [11], esses materiais estão enquadrados em uma classificação geral na qual recebem o nome de agregado [11], [12], [13].

6.1. Características gerais dos agregados

Com relação à origem, podem ser chamados de naturais ou artificiais. Naturais são os materiais extraídos em sua forma fragmentar, ou seja, na forma em que se encontram em sua fonte. Por exemplo, areia e cascalho. Já os artificiais são aqueles extraídos em forma de blocos e que precisam passar por processos de fragmentação, como a brita e areia britada.

Considerando a densidade, existem agregados leves; agregados normais (brita, areia, cascalho...) e agregados pesados (barita, magnetita...).

Quanto ao tamanho dos fragmentos, tem-se: agregados miúdos, que são os materiais com diâmetro mínimo de 0,075mm, especificada pela norma ABNT NBR 7211 [14], e diâmetro máximo superior até 4,8mm. Como exemplo de agregado miúdo tem-se: areias de origem natural, encontrada como fragmentos ou resultante do processo de britagem. Define-se ainda o agregado graúdo, ou pedregulho, os materiais com diâmetro mínimo de 4,8mm e máximo de 152mm, também especificado pela norma ABNT NBR 7211 [14]. Como exemplo de agregados graúdos tem-se: cascalho e brita.

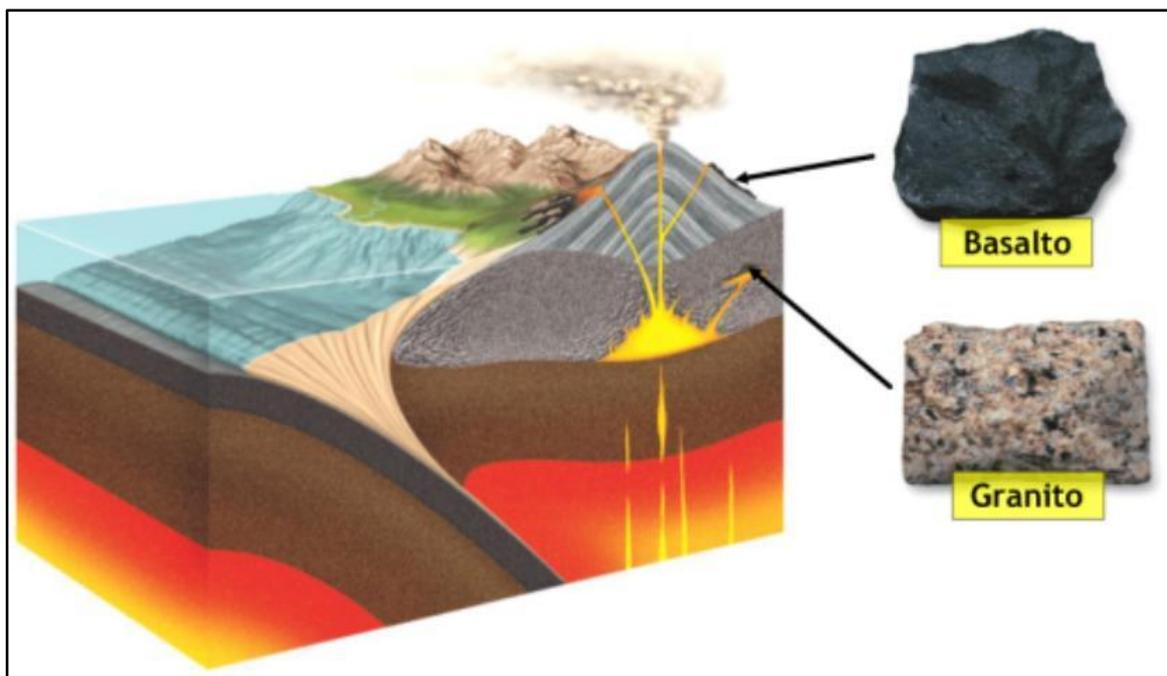
Os agregados são obtidos em rochas cristalinas ou depósitos naturais sedimentares. Os três tipos principais de rocha são classificados como segue.

6.1.1. Rochas Ígneas, magmáticas ou eruptivas

As rochas ígneas são o resultado da consolidação devido ao resfriamento do magma derretido podendo ser formadas abaixo da superfície, e então classificadas como rochas intrusivas, ou então, formadas próximo à superfície, sendo classificadas como rochas extrusivas. O magma pode ser obtido a partir do derretimento parcial de rochas pré-existentes no manto e na crosta terrestre [15].

A Figura 12 apresenta uma ilustração da erupção do magma derretido fluindo através das camadas internas do planeta, dois pontos resfriamento e os dois principais exemplos de rochas formadas.

Figura 12: Pontos de consolidação do magma derretido.



Fonte: GABRIEL CALDEIRA GOMES. GEOGRAFANDO.

6.1.2. Rochas sedimentares

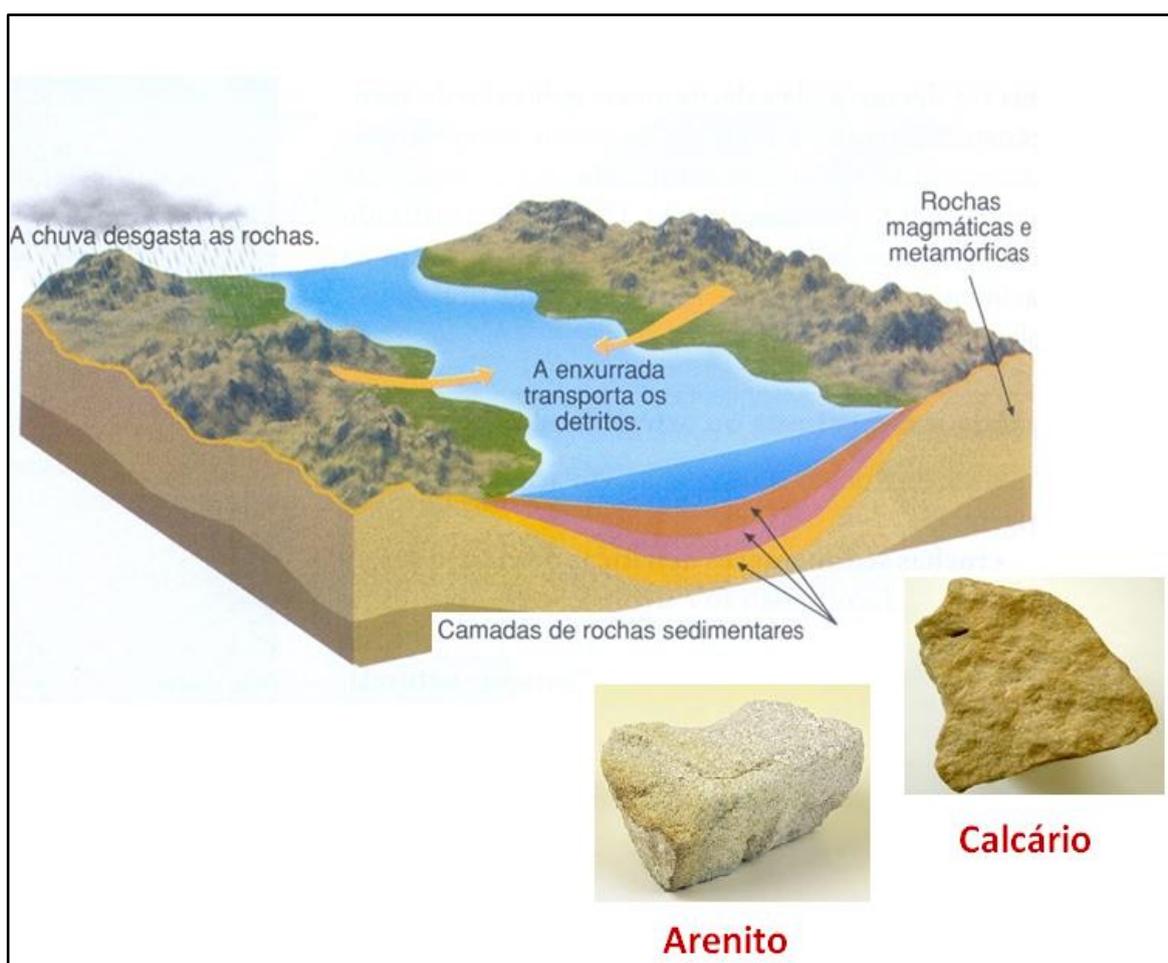
As rochas sedimentares são compostas por sedimentos transportados pela água, gelo ou vento e acumulados no fundo de lagos, oceanos e depressões na crosta terrestre. Cobrem aproximadamente 75% da superfície terrestre e 90% dos leitos marinhos [15].

6.1.3. Rochas metamórficas

As rochas metamórficas resultam da transformação da rocha original ao passar por transformações químicas e físicas devido à exposição a temperaturas elevadas e atuação de fluídos em zonas profundas da crosta terrestre [15].

A Figura 13 apresenta um exemplo de processo de sedimentação. A chuva desgasta as rochas e sedimentos são transportados pela enxurrada e se acumulam no fundo de um lago. As camadas de rochas sedimentares também podem ser formadas por sedimentos provenientes de rochas metamórficas. A figura 13 apresenta o calcário e o arenito como exemplos de rochas sedimentares.

Figura 13: Exemplo de um processo de formação de rochas sedimentares.



Fonte: CONTEUDO MEDIA GROUP. TODOESTUDO.

6.2. Rochas mais comuns

Várias são as rochas aptas a serem exploradas para a produção de agregados, porém, entre aquelas mais comuns estão o granito, o arenito, o gnaise, o calcário e o basalto.

O Granito é uma rocha ígnea intrusiva, com aproximadamente 75% de sílica; cristais de 1 a 5 mm, ou maiores; de cor cinza ou rosa. Sua taxa de ruptura sob compressão é de aproximadamente 90 MPa. Esta rocha geralmente fornece agregados de excelente qualidade, pois são resistentes, tem baixa porosidade e absorção de água [15].

A Figura 14 apresenta a imagem de um granito.

Figura 14: Imagem de um granito.



Fonte: ITAGRAN MARMORARIA.

O Arenito é uma rocha sedimentar proveniente da consolidação de sedimentos arenosos. Os arenitos apresentam características físicas muito dispersas. Só os muitos consistentes podem produzir agregados de qualidade satisfatória. A taxa de ruptura sob compressão é de 50 a 180 MPa [15].

A Figura 15 apresenta a imagem de um arenito.

Figura 15: Imagem de um arenito.



Fonte: PORTO EDITORA. INFOPÉDIA.

O Calcário é uma rocha sedimentar constituída de mais de 50% de carbonato de sódio e tem taxa de ruptura sob compressão de aproximadamente 160 MPa. Geralmente, produz agregados de qualidade satisfatória. Tende a produzir partículas planas ou alongadas [15].

A Figura 16 apresenta a imagem de um calcário.

Figura 16: Imagem de um calcário.



Fonte: ALLBIZ. COMÉRCIO VIA INTERNET.

O Basalto é uma rocha extrusiva, com aproximadamente 50% de sílica, de cor cinza ou preta. Tem taxa de ruptura sob compressão de 140 a 180 MPa. Esta rocha tem granulação fina e dura e fornece bons agregados [15].

A Figura 17 apresenta a imagem de um basalto.

Figura 17: Imagem de um basalto.



Fonte: PORTO EDITORA. INFOPÉDIA.

Pelas Figuras 14, 15, 16 e 17 é possível verificar diferenças visíveis com relação à textura superficial. O Quadro 1 apresenta a classificação dos tipos de textura superficial dos agregados que foram mencionados [16].

Quadro 1: Classificação referente à textura do agregado.

Textura	Característica	Exemplo
Lisa	Erodido pela água, ou devido à fratura de cristais finos ou lamelares.	seixo, ardósia, mármore
Granulosa	Fratura mostrando grãos uniformes mais ou menos arredondados.	Arenito
Áspera	Fratura áspera de rochas finas ou grosseiramente granuladas com cristais não facilmente visíveis.	basalto, calcário
Cristalina	Com constituintes cristalinos facilmente visíveis.	granito, gnaisse

Fonte: NEVILLE, ADAM (1997).

6.3. Agregados mais comuns

Os agregados mais utilizados como material de revestimento devido ao baixo custo, facilidade de instalação e bons resultados na isolação são o cascalho e a brita.

6.3.1. Brita

Material classificado como agregado de origem artificial, de tamanho graúdo. Tendo como área fonte as pedreiras que exploram rochas cristalinas com solos pouco espessos de cobertura, no estado físico sem muita alteração, de preferência aquela contendo rochas quartzo – feldspáticas como os granitos e gnaisses. Porém, às vezes, rochas como o basalto e calcários microcristalinos, também são explorados para essa finalidade [17], [18], [19].

Devido sua origem, possuem diversos formatos. Pedras de formato arredondado e superfícies lisas reduzem a porosidade entre os grãos e facilitam a fluidez de umidade.

Os tamanhos de britas são classificados pela Norma de materiais de pedras e agregados naturais, a NBR 7525 [20], e os tamanhos mais comuns para utilização para camada superficial são [20]:

Nº 1 – 4,8 a 12,5mm

Nº 2 – 12,5 a 25mm

Nº 3 – 25 a 50mm

A Figura 18 apresenta uma imagem onde aparecem os diversos tamanhos de brita, desde pó de brita até tamanho Nº5.

Figura 18: Imagem de britas.



Fonte: BLOG CONSTRUIR.

6.3.2. Cascalhos

O cascalho é a denominação genérica de seixos, originários de fragmentos de rochas preexistentes e se enquadram numa faixa granulométrica, variável de 2 a 256mm de diâmetro. É definido como depósito ou acumulação de fragmentos de rochas e/ou minerais mais grossos do que areia, principalmente com tamanho de seixos. É um agregado de origem natural e tamanho graúdo [17], [18], [19].

A Figura 18 apresenta uma imagem com os diversos tipos e tamanhos de cascalho de rio.

Figura 19: Imagem de cascalho de rio.

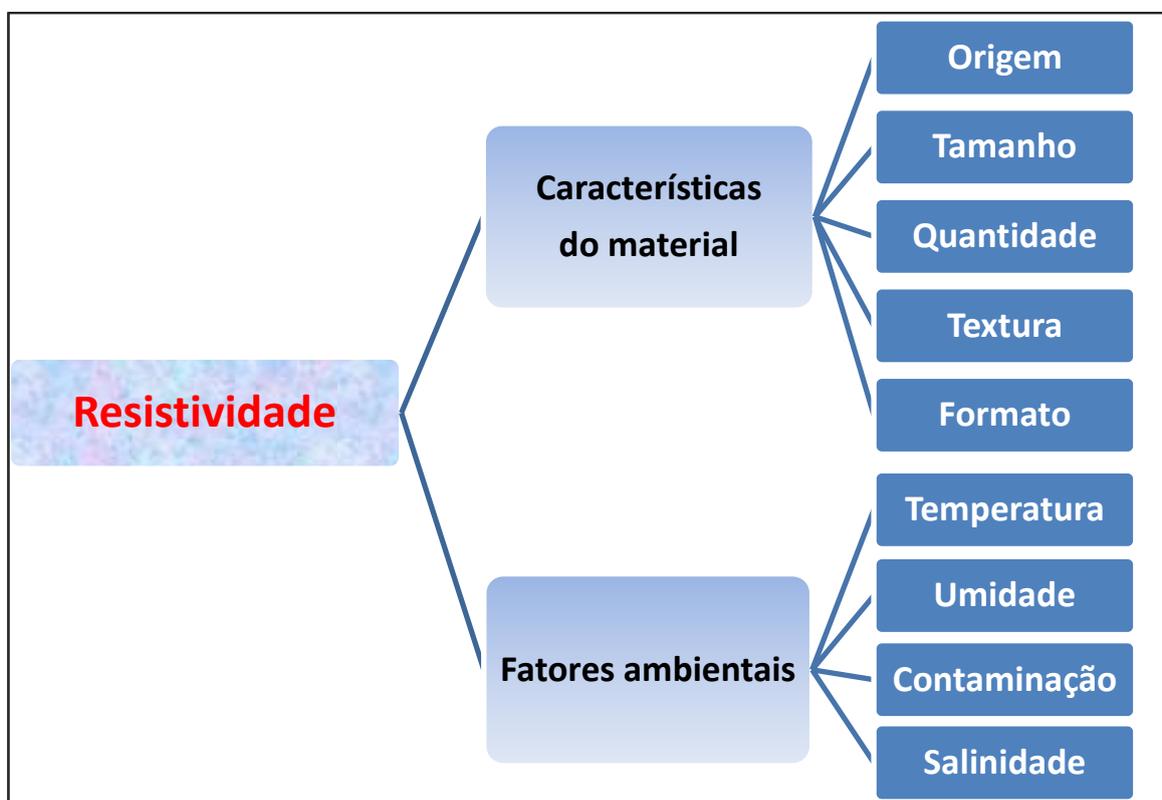


Fonte: ECO MARINE.

6.4. Esquema Representativo

A Figura 20 apresenta um esquema que permite visualizar as principais características e fatores climáticos que influenciam nos valores de resistividade das camadas superficiais de isolamento.

Figura 20: Esquema representativo de características e fatores climáticos.



Fonte: O autor.

O fator contaminação tem haver com a contaminação de pequenas partículas como lascas de pedra, pó de areia, terra. Esses contaminantes penetram na camada superficial de isolamento e preenchem aqueles pontos em que existem espaços vazios provocando uma diminuição na resistividade da mesma, o que é um fator indesejável, uma vez que diminui, ao mesmo tempo, a isolação da camada superficial.

A salinidade é um fator que depende da proximidade do local da subestação em relação ao mar. Ela propicia uma passagem mais facilitada da corrente iônica sobre a superfície do material da camada superficial de isolamento.

Com relação às características do material, é importante salientar que a resistividade da camada sofre influência em seu valor não apenas pela alteração de uma determinada característica, mas pode sim, ter seu valor aumentado ou diminuído de acordo com a interação entre elas. Isso significa que em uma determinada amostra, com uma certa quantidade de grânulos, dependendo do tamanho destes, o surgimento dos espaços entre eles podem aumentar ou diminuir, porém, o formato de cada grânulo também poderá ser uma característica determinante para a resistividade, pois dependendo da acomodação do material, a área de contato entre uma unidade e outra pode aumentar ou diminuir. Além disso, dependendo da textura dos grânulos, a aderência de contato pode sofrer variação dependendo do número de pontos de contato entre as superfícies.

7. TABELAS DE RESISTIVIDADE DE MATERIAIS

Com base no que se estabelece dentro das normas ABNT NBR-15751 e IEEE-80, a medição de resistividade do solo influi diretamente nos cálculos de tensão de passo e de toque, e do mesmo modo, a camada de material superficial do solo, que, conforme as Equações (7), (8) e (9), redefinem os valores de potenciais máximos de toque e de passo.

As coberturas de cascalho ou de outros materiais de superfície, segundo a norma IEEE-80, são utilizadas dentro de uma faixa de 0,05-0,15m de profundidade. No Brasil, segundo a norma ABNT NBR-15751, são utilizadas coberturas dentro da faixa de 0,5 e 1,5m.

Como pode ser visto nos Quadros 2 e 3, as normas NBR-15751 e IEEE-80 apresentam tabelas com os principais materiais utilizados para recobrimento e suas respectivas faixas de resistividade considerando os principais fatores de influência.

Conforme já mencionado, a umidade é um dos fatores que influenciam no valor de resistividade e esse é o principal fator considerado em tabela dentro das normas. Além da umidade, a norma americana IEEE-80 também faz menção ao estado do material que pode estar limpo ou com lascas de pedra e pó, pois o preenchimento de vazios e a compressão que a camada sofre com o passar do tempo passa a influenciar o seu isolamento.

Outros fatores também são considerados, como tipos de pedra, tamanho, contaminação atmosférica e outros. Então, por exemplo, se o material de superfície sofre pulverização marítima pode ter a sua resistividade substancialmente menor do que aquele utilizado em ambientes áridos. A norma IEEE-80 considera medições realizadas em diferentes regiões dos Estados Unidos, sendo que foram realizadas medições nos estados da Carolina do Norte e Geórgia localizados na região sudeste do país e banhados a leste pelo oceano Atlântico. Na costa oeste foram realizadas medições no estado da Califórnia. Por fim, foram realizadas medições no estado de Michigan a norte do país. Assim, dependendo do local, existe uma diversidade de outros fatores que acabam por influenciar as medições como o clima e a topografia de cada região.

7.1. Análise de tabela de resistividade - ABNT NBR-15751

A Norma NBR-15751 considera apenas a umidade como fator determinante para indicação de valores de resistividade para os três principais tipos de material utilizados: brita, concreto e asfalto, conforme pode ser visto no Quadro 2 [7].

Quadro 2: Resistividade de materiais - norma ABNT NBR-15751.

Descrição do material	Resistividade da amostra Ωm	
	Seco	Molhado
Brita N° 01-02-03		3000
Concreto	1200 a 280000	21 a 100
Asfalto	$2 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^6$

Fonte: ABNT NBR-15751 (2009).

Quadro 3: Resistividade de materiais - norma IEEE-80.

	Descrição do material	Local	Tamanho da amostra	Resistividade da amostra Ωm	
				Seco	Molhado
1	Brita de granito com lascas e pó	NC	-	$140 \cdot 10^6$	1300 água com terra - $45 \Omega m$
2	Brita de granito com lascas e pó	GA	40mm	4000	1200 água da chuva - $100 \Omega m$
3	Granito com lascas e pó	CA	20-25mm	-	6513 água com terra - $45 \Omega m$
4	Granito limpo	GA	25-50mm	$1,5 \cdot 10^6 - 4,5 \cdot 10^6$	5000 água da chuva - $100 \Omega m$
5	Granito limpo	GA	50-100mm	$2,6 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^6$	10000 água da chuva - $100 \Omega m$
6	Calcário limpo	MI	-	$7 \cdot 10^6$	2000-3000 água com terra - $45 \Omega m$
7	Granito limpo parecido com cascalho	-	20mm	$2 \cdot 10^6$	10000
8	Granito limpo parecido com cascalho ervilha	-	-	$40 \cdot 10^6$	5000
9	Granito limpo	NC	20mm	$190 \cdot 10^6$	8000 água com terra - $45 \Omega m$
10	Asfalto	-	-	$2,6 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^6$	10000 a $6 \cdot 10^6$
11	Concreto	-	-	$1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^9$	21 a 100

Fonte: IEEE-80 (2013).

7.2. Análise de Tabela de resistividade - IEEE-80

Ao contrário da tabela de resistividade apresentada pela NBR-15751, a IEEE-80 necessita que sejam feitas algumas observações de forma que se compreendam os valores de resistividade apresentados. Essa seção visa esclarecer alguns pontos que podem gerar dúvida no momento da utilização da tabela.

7.2.1. Análise sobre materiais sem indicação de valores

Os Quadros 4 e 5 apresentam pontos de análise indicados por um sinal de interrogação. Esses valores não foram indicados na tabela de resistividade de materiais da norma IEEE-80.

As linhas 1 e 2 apresentam valores de resistividade de amostras de brita de granito com contaminação de lascas e pó. O material da amostra da linha 1 não apresenta indicação de tamanho. Esse valor pode ser deduzido com base numa comparação de seus valores de resistividade com aqueles da linha 2 pertinentes ao mesmo material com tamanho de 40mm. Esses valores são maiores para o material da linha 1, logo, pode-se concluir que o tamanho esperado para esse material também seja maior que aquele da linha 2.

Também é interessante notar que o valor de resistividade da brita da linha 1, quando molhada, difere muito pouco da resistividade da brita da linha 2 de tamanho 40mm, o que indica, segundo a tabela, que tamanhos maiores que 40mm não surtirão um efeito muito melhor na isolação do solo.

As linhas 3, 4 e 5 apresentam valores de resistividade para 3 faixas de tamanho de um mesmo material numa sequência entre 20mm e 100mm, ou seja, o intervalo usual para tamanhos de agregados utilizados em camadas de superfície em subestações.

A segunda análise referente a materiais sem indicação é aquela do material da linha 3 que não indica valor de resistividade a seco para o material dentro da faixa de 20 a 25mm. O valor máximo dessa faixa pode ser estimado com base no valor mínimo da faixa de 25 a 50mm da linha 4, porém, com o cuidado de considerar a redução de resistividade correspondente à contaminação que existe no material da linha 3.

O Quadro 4 apresenta os materiais das linhas 1 e 3 em destaque para ressaltar as linhas com interrogações e nas linhas 2 e 4 são destacados os valores que servem de base para estimar aqueles valores desconhecidos. A Figura 21 ilustra as deduções realizadas para as interrogações indicadas no Quadro 4.

Quadro 4: Valores não indicados - norma IEEE-80.

Num	Descrição do material	Local	Tamanho da mostra	Resistividade da amostra Ωm	
				Seco	Molhado
1	Brita de granito com lascas e pó	NC	?	$140 \cdot 10^6$	1300 água com terra $45 \Omega m$
2	Brita de granito com lascas e pó	GA	40mm	4000	1200 água da chuva $100 \Omega m$
3	Granito com lascas e pó	CA	20-25mm	?	6513 água com terra $45 \Omega m$
4	Granito limpo	GA	25-50mm	$1,5 \cdot 10^6 - 4,5 \cdot 10^6$	5000 água da chuva $100 \Omega m$
5	Granito limpo	GA	50-100mm	$2,6 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^6$	10000 água da chuva $100 \Omega m$

Fonte: IEEE-80 (2013).

O Quadro 5 apresenta interrogações para materiais sem indicação de tamanho e para medições sem especificação do local de realização do experimento.

Asfalto e concreto não apresentam tamanho, pois, são apresentados em forma de um corpo de prova que pode ser, por exemplo, um cilindro, do qual se realiza a leitura da área da seção, comprimento e valor de resistência medido e aplica-se uma relação matemática que relaciona essas variáveis com o valor de resistividade.

Figura 21: Deduções para valores não indicados - norma IEEE-80.

Número	Descrição do material	Local	Tamanho da amostra	Resistividade seca $\Omega.m$	Resistividade molhada $\Omega.m$
1	Brita de granito com lascas e pó	NC	-	-	1300 água com terra 45 $\Omega.m$
2	Brita de granito com lascas e pó	GA	40mm	4000	1200 água da chuva 100 $\Omega.m$
3				-	6513 água com terra 45 $\Omega.m$
4				$1,5.10^6 - 4,5.10^6$	5000 água da chuva 100 $\Omega.m$
5				$2,6.10^6 - 3.10^6$	10000 água da chuva 100 $\Omega.m$

1300 $\Omega.m$ aqui é maior que 1200 $\Omega.m$ indicando que o tamanho é maior que 40mm.

Valor da resistividade à seco para 25mm na linha 3 pode ser tomado como $1,5.10^6 \Omega.m$. Mas cuidado, considere que este granito possui lascas e pó, logo, seu valor de resistividade deve ser um pouco menor que $1,5.10^6 \Omega.m$.

Fonte: IEEE-80 (2013).

Quadro 5: Valores não indicados - norma IEEE-80.

6	Calcário limpo	MI	?	7.10^6	2000-3000 água com terra 45 $\Omega.m$
7	Granito limpo parecido com cascalho	?	20mm	2.10^6	10000
8	Granito limpo parecido com cascalho ervilha	?	?	40.10^6	5000
9	Granito limpo	NC	20mm	190.10^6	8000 água com terra 45 $\Omega.m$
10	Asfalto	?	?	$2,6.10^6 - 30.10^6$	10000 a 6.10^6
11	Concreto	?	?	$1.10^6 - 1.10^9$	21 a 100

Fonte: IEEE-80 (2013).

O tamanho do calcário não indicado na linha 6 do Quadro 5, apesar de ser a única medição com este material, apresenta seu valor de resistividade dentro de uma faixa de 2000 à 3000 Ωm . Isso leva ao entendimento de que, independente do tamanho, todas as medições de resistividade se mantiveram dentro dessa faixa de valores. Esse comportamento pode ser consequência de sua formação de cerca de 50% de carbonato de sódio, proporcionando uma condutividade maior e predominante pelo interior do material.

O tamanho do material da linha 8 já está implícito na própria descrição: cascalho ervilha, que é do tamanho e formato de uma ervilha.

7.2.2. Análise sobre o formato dos materiais

As linhas 3, 4 e 5 apresentam valores de resistividade para granito sem especificação de formato (brita, cascalho, seixo ou outro). Porém, pode-se inferir que se trate de um pedregulho de forma similar àquele indicado para a linha 9 da Figura 22. A Figura 22 destaca ainda as imagens dos formatos do cascalho de formato tipo seixo de rio para a linha 7 e formato tipo ervilha para a linha 8.

Figura 22: Ilustração da análise de materiais sem indicação de formato.



Fonte: IEEE-80 (2013), ITAGRAN MARMORARIA, DREAMSTIME, ECO MARINE, O autor.

7.2.3. Análise sobre valores de resistividade apresentados para faixas de tamanhos

As linhas 3, 4 e 5 apresentam valores de resistividade para faixas de tamanho utilizando um mesmo material numa sequência entre 20mm e 100mm.

Ao analisar a resistividade de uma amostra de material que contém grânulos de tamanhos variados, quanto menor for a faixa de tamanho considerado, menor serão os espaços que surgirão entre os pontos da amostra. Ao considerar-se ainda a contaminação da amostra que preenche parcialmente esses espaços, pode-se dizer que a amostra da linha 3 deveria apresentar valor de resistividade menor que aquele da linha 4.

O Quadro 6 apresenta as linhas analisadas da tabela de resistividade da norma IEEE-80 com destaque para a questão do valor de resistividade que deveria ter seu valor reduzido na linha 4.

Quadro 6: Indicação de análise sobre resistividade para faixas de valores.

Número	Descrição do material	Local	Tamanho da amostra	Resistividade da amostra Ωm	
				Seco	Molhado
1	Brita de granito com lascas e pó	NC	-	$140 \cdot 10^6$	1300 água com terra 45 Ωm
2	Brita de granito com lascas e pó	GA	40mm	4000	1200 água da chuva 100 Ωm
3	Granito com lascas e pó	CA	20-25mm	-	6513 água com terra 45 Ωm
4	Granito limpo	GA	25-50mm	$1,5 \cdot 10^6 - 4,5 \cdot 10^6$	5000 água da chuva 100 Ωm
5	Granito limpo	GA	50-100mm	$2,6 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^6$	10000 água da chuva 100 Ωm
6	Calcário limpo	MI	-	$7 \cdot 10^6$	2000-3000 água com terra 45 Ωm

Fonte: IEEE-80 (2013), O autor.

7.2.4. Análise sobre valores de resistividade para variação de condições e formato

A Figura 23 ilustra o comportamento do valor da resistividade ao comparar duas transições entre três linhas de um mesmo tipo de material e de tamanho considerados iguais para esta análise. Na primeira transição, da linha 1 para a linha 9, ocorre um aumento de resistividade associado à mudança da condição contaminado para a condição limpo. Na segunda transição, da linha 9 para a linha 7, ocorre novo aumento de resistividade associado à mudança de formato.

Esses valores de transição estão coerentes, pois, ao eliminar a contaminação da amostra, a resistividade deverá aumentar e ao modificar o formato do material, a acomodação dos grânulos pode ser tal que diminua a área de contato entre eles, aumentando o valor de resistividade da amostra.

Figura 23: Ilustração da análise de resistividade para variação de condição e formato.

3	Granito com lascas e pó	CA	20-25mm		6513 água com terra 45Ωm
4	Granito limpo	GA		1,5.10 ⁶ - 4,5.10 ⁶	5000 água da chuva 100Ωm
5	Granito limpo	G	50-100mm	2,6.10 ⁶ - 3.10 ⁶	10000 água da chuva 100Ωm
6	Calcário limpo	MI	-	7.10 ⁶	2000-3000 água com terra 45Ωm
7	Granito limpo parecido com cascalho		20mm	2.10⁶	10000
8	Granito limpo parecido com cascalho ervilha	-		40.10 ⁶	5000
9	Granito limpo	NC	20mm		8000 água com terra 45Ωm

Fonte: IEEE-80 (2013), O autor.

7.3. Comparação entre as tabelas de resistividade

A norma brasileira NBR-15751 considera um único valor de resistividade para brita nº 1, 2 e 3 molhada como sendo $3.000 \Omega m$. A norma IEEE-80 considera uma faixa de valores de resistividade variando entre 1200 e $1300 \Omega m$ para britas. Nesse caso, tem de se levar em conta que a norma brasileira não especifica o tipo de material da brita, ao contrário da norma americana que menciona o granito.

O concreto a seco possui uma faixa de valores de resistividade bem diferente entre uma norma e outra, porém, os valores a molhado, que definem os limites mínimos mais importantes de resistividade, são os mesmos.

Para o asfalto, as normas possuem os mesmos valores de resistividade medidos, tanto para material seco como para molhado, o que pode indicar que os valores apresentados podem ter sido retirados da mesma fonte de informação.

O Quadro 7 apresenta as linhas dos materiais comparados entre as duas normas consideradas, bem como, as indicações relativas às observações realizadas.

Quadro 7: Comparação entre as tabelas de resistividade das normas consideradas.

Número	Descrição do material	Local	Tamanho da amostra	Resistividade da amostra Ωm	
				Seco	Molhado
1	Brita de granito com lascas e pó	NC	-	$140 \cdot 10^6$	1300 água com terra - $45 \Omega m$
2	Brita de granito com lascas e pó	GA	40mm	4000	1200 água da chuva - $100 \Omega m$
10	Asfalto	-	-	$2,6 \cdot 10^6$ - $30 \cdot 10^6$	10000 a $6 \cdot 10^6$
	Concreto	-	-	$1 \cdot 10^6$ - $1 \cdot 10^9$	21 a 100

Descrição do material	Resistividade da amostra Ωm	
	Seco	Molhado
Brita N° 01-02-03		3000
Concreto	1200 a 280000	21 a 100
Asfalto	$2 \cdot 10^6$ - $30 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^3$ - $6 \cdot 10^6$

8. MEDIDAS DE RESISTIVIDADE

A parte experimental deste trabalho objetiva realizar medições de resistividade em materiais diversos de forma que os resultados possam contribuir para a análise realizada sobre as tabelas de resistividade das normas brasileira e americana. Além disso, os resultados também contribuem para a análise dos níveis de segurança que podem ser analisados utilizando valores reais medidos em comparação daqueles obtidos utilizando valores tabelados.

8.1. Características do local de coleta de amostras

A coleta de amostras ocorreu nas margens do Rio das Antas no município de Santa Tereza na mesoregião Nordeste Rio-Grandense a uma distância aproximada de 110 km da capital Porto Alegre no Rio Grande do Sul. O rio tem suas nascentes no município de São José dos Ausentes, no extremo leste do Planalto dos Campos Gerais.

O relevo do Rio Grande do Sul assemelha-se ao do resto do Brasil, pois possui um substrato rochoso muito antigo, que há milhões de anos não sofre manifestações tectônicas expressivas. Por isso mesmo, o relevo é relativamente suave. O relevo do Rio Grande do Sul possui diferentes unidades, cada qual com suas altitudes, tipos de rochas e formas predominantes: o Planalto Sul-Rio-Grandense, o planalto Norte-Rio-Grandense, a depressão central, a planície litorânea e a campanha.

O município onde foi realizada a coleta pertence ao planalto Norte-Rio-Grandense. Essa área fica a nordeste do estado, onde se encontram as partes mais altas do estado, podendo chegar aos 1000 metros. Sem transição, as ondulações suaves dão lugar a paredões verticais e rochas basálticas.

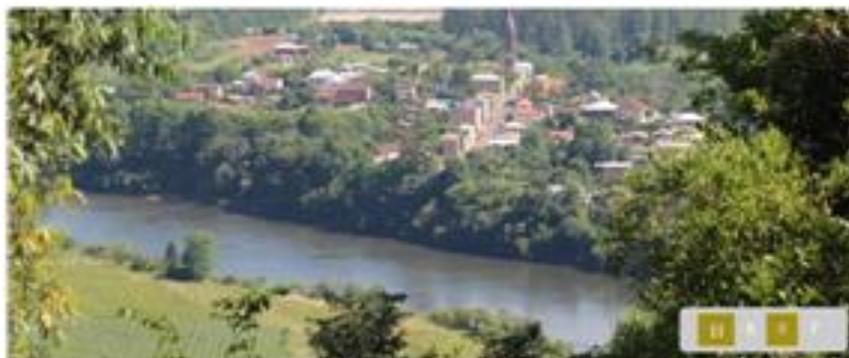
A Figura 24 apresenta a imagem de um mapa do relevo rio-grandense enquanto a Figura 25 mostra imagens da cidade e do ponto de coleta retiradas diretamente do site da prefeitura da cidade [21].

Figura 24: Mapa das principais formas de relevo do Rio Grande do Sul.



FONTE: MOREIRA, IGOR (2007).

Figura 25: Imagens do município de Santa Teresa e do local de coleta.



Fonte: PREFEITURA DE SANTA TERESA, SITE DA CIDADE.

8.2. Triagem do material coletado

A Figura 26 apresenta o resultado do processo de classificação inicial das amostras realizado de forma visual e manual sem auxílio de equipamentos para a separação. Tentou-se separar conjuntos de amostras conforme forma e tamanho, desde areia até tamanhos maiores de cascalho.

Figura 26: Amostras classificadas de forma visual e manual.



Fonte: O autor.

8.3. Granulometria

A segunda etapa foi a classificação granulométrica realizada no laboratório NORIE (Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação) da UFRGS. Foi adotado o sistema manual de peneiramento utilizando um conjunto de peneiras normalizado, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27: Classificação manual utilizando peneiras do laboratório NORIE.



Fonte: O autor.

As amostras foram peneiradas e separadas por número de peneira normalizado, sendo que, para alguns números classificados, a quantidade foi suficiente para fazer uma classificação visual considerando o formato e a origem.

O Quadro 8 apresenta o resultado da classificação manual realizada no NORIE com destaque para o cascalho de 19,0 e 25,0mm que foram obtidos no formato irregular e regular. A verificação dos valores de resistividade para esses dois casos consiste em verificar diferenças devido à acomodação dos grânulos das amostras.

Outra observação importante é com relação ao cascalho com faixa de valores entre 25 e 50mm de textura cristalina coletado apenas para comparação com o cascalho normal sem textura cristalizada.

Quadro 8: Resultado da classificação manual com peneiras do NORIE.

Tipo	R(Ω)	R_molhado (KΩ)	ρ (Ωm) seco	ρ (Ωm) molhado
Pó de cascalho				
12,5 mm (Cascalho irregular)				
19,0 mm (Cascalho irregular)				
19,0 mm (Cascalho regular)				
25,0 mm (Cascalho regular)				
25,0 mm (Cascalho irregular)				
31,0 mm (Cascalho irregular)				
38,0 mm (Cascalho irregular)				
50,0 mm (Cascalho irregular)				
25-50 mm (textura cristalina)				
20-25 mm (Cascalho misto)				
25-50 mm (Cascalho misto)				
Brita nº1 (basalto)				
Brita nº2 (basalto)				
Brita nº2 (granito)				
Brita nº3 (basalto)				

Fonte: O autor.

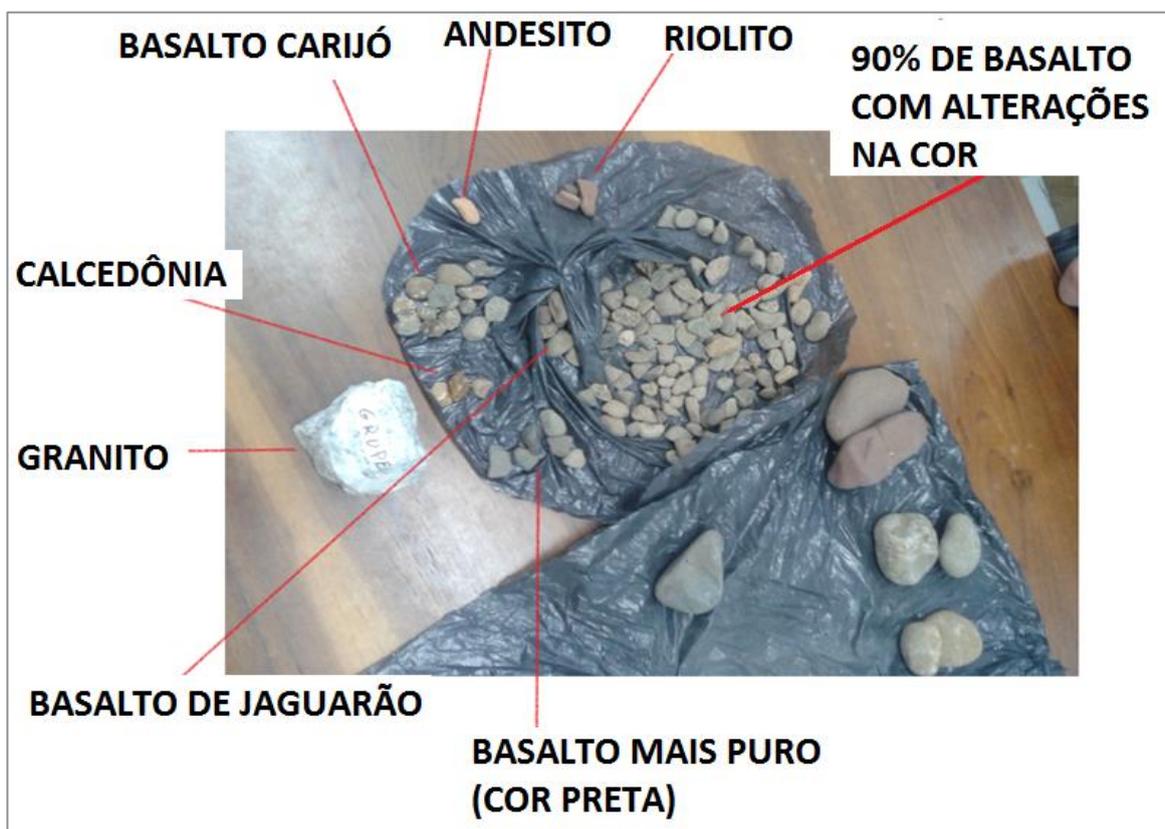
8.4. Análise das amostras

Uma parcela do material coletado foi analisada pelo Laboratório de Geologia Isotópica pertencente aos laboratórios do Instituto de Geociências – UFRGS.

A Figura 28 apresenta o apanhado mais representativo da quantidade total do material coletado. Na imagem são identificados os principais tipos de material e inclusive aquele que representa 90% do material coletado.

A pedra de granito mostrada pertence ao laboratório e foi colocada junto apenas para comparação com aquela considerada para o formato do granito na análise da tabela de resistividade da norma IEEE-80.

Figura 28: Amostra representativa do material coletado.



Fonte: O autor.

Da amostra analisada, cerca de 90% do material coletado aparenta ser de origem basáltica com algum tipo de alteração na cor devido à formação de óxido de ferro na superfície, o que torna a cor preta do basalto em uma cor mais clara alaranjada ou amarelada e também mais vulnerável a penetração de umidade.

A menor parcela, 10% do material, é formada por outros tipos de material. Basicamente, foi confirmado que todos os tipos de material analisados são de origem extrusiva, ou seja, formada depois da erupção de material, ao contrário do granito, que é formado abaixo da superfície, porém, um dos tipos analisados, o basalto Carijó, apresenta minerais mais grossos, expostos através de pintinhas brancas e também por uma cristalização superficial. Pode-se dizer que do total da amostra, esse seria o tipo que mais se assemelha ao granito. Uma amostra desse material já havia sido separada ainda na primeira triagem para uma melhor comparação com os valores apresentados na tabela de resistividade da IEEE-80.

A Figura 29 apresenta um apanhado geral de imagens de materiais de origem intrusiva e extrusiva no qual estão alguns daqueles presentes na amostra analisada.

Figura 29: Materiais de origem magmática intrusiva ou extrusiva.



Fonte: SLIDEPLAYER. ROCHAS.

8.5. Montagem do equipamento de medição

O equipamento de medição é composto por um aparelho de medição adequado para realizar leitura de altos valores de resistência elétrica e um conjunto composto por de duas cubas de armazenamento e duas placas de contato.

8.5.1. Sistema de armazenamento de amostra

O sistema utiliza uma cuba maior para retenção de líquidos e outra menor para receber a amostra. A cuba menor conta com a versão normal para amostras secas e a versão peneira para amostras molhadas. As duas placas de alumínio servem para realizar contato entre as extremidades da amostra acondicionada e a fiação nelas conectadas serve para adaptação ao aparelho de medição de resistividade.

A Figura 30 apresenta o conjunto para medição de amostras secas composto pelas cubas de armazenamento provido de placas de contato e a cuba de retenção de líquido.

Figura 30: Conjunto para armazenamento e medição de amostra seca.



Fonte: O autor.

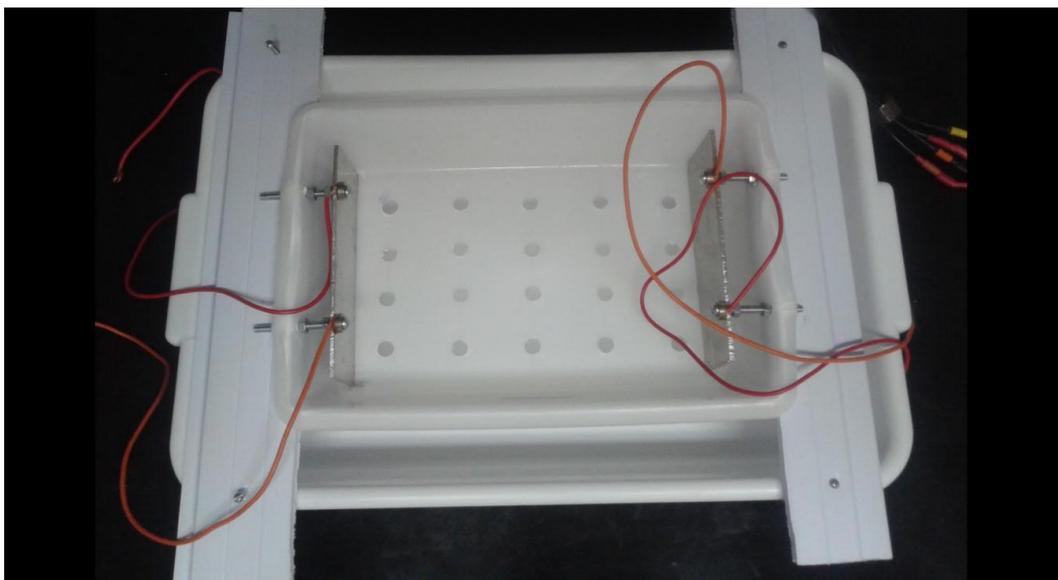
As dimensões de cada placa de alumínio são 142mm x 52mm e a distância entre elas é 217mm. Essas medidas são utilizadas para cálculo de resistividade do material armazenado através da Equação (10).

$$\rho(a) = \frac{RA}{L} \quad (10)$$

onde R é o valor da resistência medida com um aparelho adequado de medição, A é a área de uma das placas e L é a distância entre elas.

A Figura 31 apresenta a versão do conjunto de medição para amostra molhada que utiliza uma cuba de armazenamento furada para escoamento do líquido em excesso para a cuba de retenção. Os parafusos das placas são ajustáveis para que se possa ajustar a angulação correta e corrigir o paralelismo entre as placas.

Figura 31: Conjunto de armazenamento para medição de amostra molhada.



Fonte: O autor.

8.5.2. Instrumentos de medição

A Figura 32 apresenta um paquímetro de 300mm da Mitutoyo utilizado para medição da distância entre as placas de alumínio. A figura também mostra a imagem do megôhmetro digital modelo MG-3000 com escalas apresentadas no Quadro 9.

Quadro 9: Incertezas para megôhmetro MG-3000.

Medida	Escala Utilizada	Exatidão	Tensão de teste
Resistência	20 Ω	$\pm 2,0\% + 5d$	
Resistência	200 Ω	$\pm 1,5\% + 2d$	
Resistência	2k Ω	$\pm 1,5\% + 3d$	
Resistência	20M Ω	$\pm 1,5\% + 2d$	250VDC
Resistência	200M Ω	$\pm 2,5\% + 2d$	500VDC

Fonte: Manual ICEL MG-3000.

Corrente de curto circuito de 1ma.

Figura 32: Paquímetro 300mm Mitutoyo e Megôhmetro digital modelo MG-3000.



Fonte: SERIAL.

8.6. Metodologia de medição

O procedimento de medição foi realizado em duas etapas: medição a seco e medição a molhado. Para cada etapa, o material é acondicionado na cuba de armazenagem e utilizando o paquímetro para verificação, as placas são ajustadas de forma a corrigir o paralelismo e distância entre elas. Por fim, basta fazer a conexão dos cabos do aparelho de medição e realizar a leitura, sempre aguardando o tempo necessário para o valor de resistência se estabilizar.

Para realização da medição do material molhado, utiliza-se uma cuba de armazenamento furada para escoamento do líquido em excesso.

As Figuras de 32 a 39 apresenta a montagem de medição para cada amostra classificada na etapa de granulometria.

Figura 33: Medição de resistência elétrica para amostra: Pó de Cascalho.



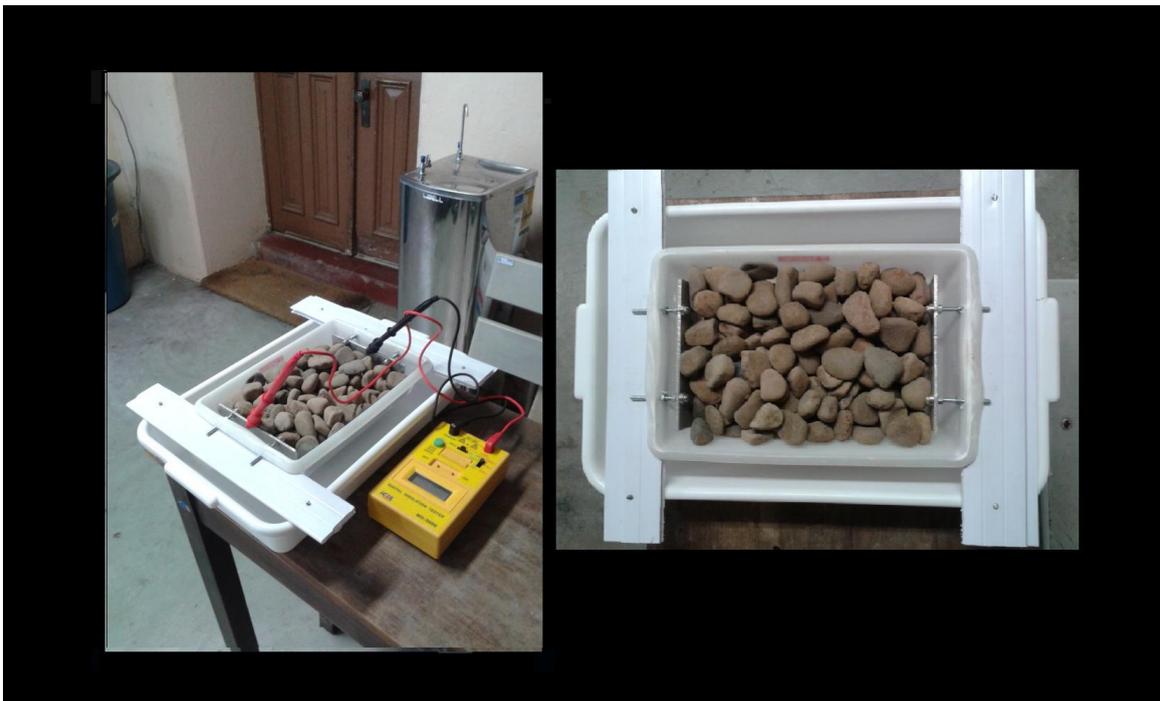
Fonte: O autor.

Figura 34: Medição de resistência elétrica para amostra: Cascalho 12,5mm.



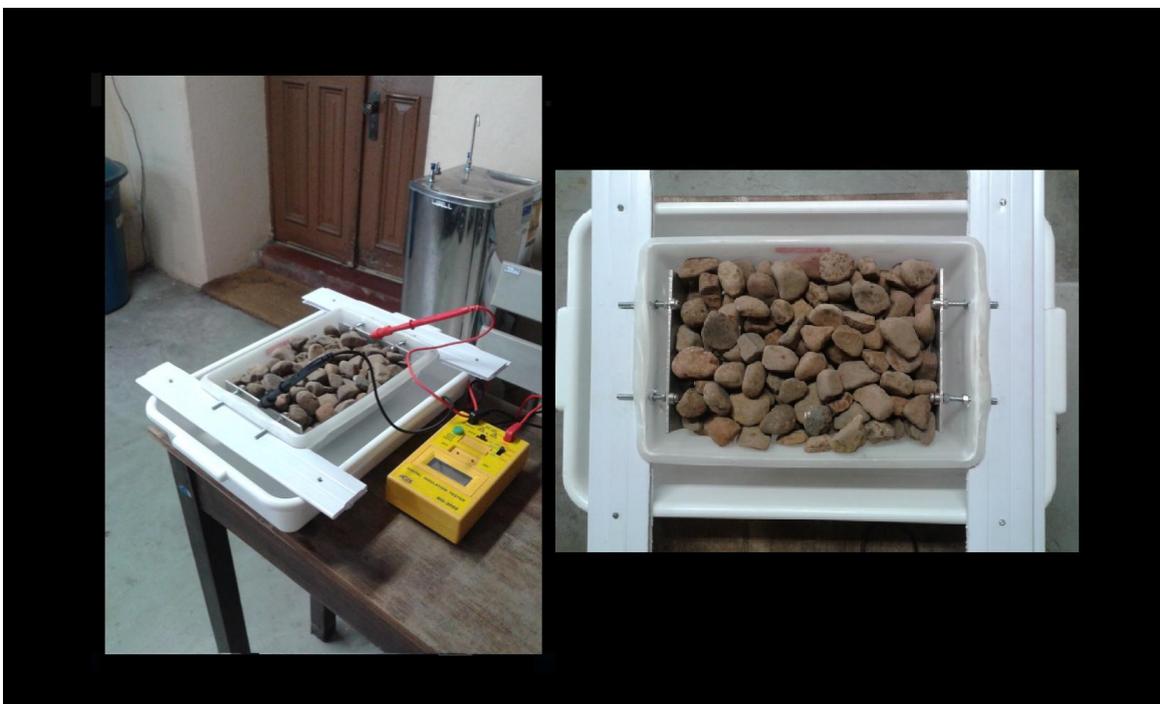
Fonte: O autor.

Figura 35: Medição de resistência elétrica para amostra: Cascalho 19,0mm regular.



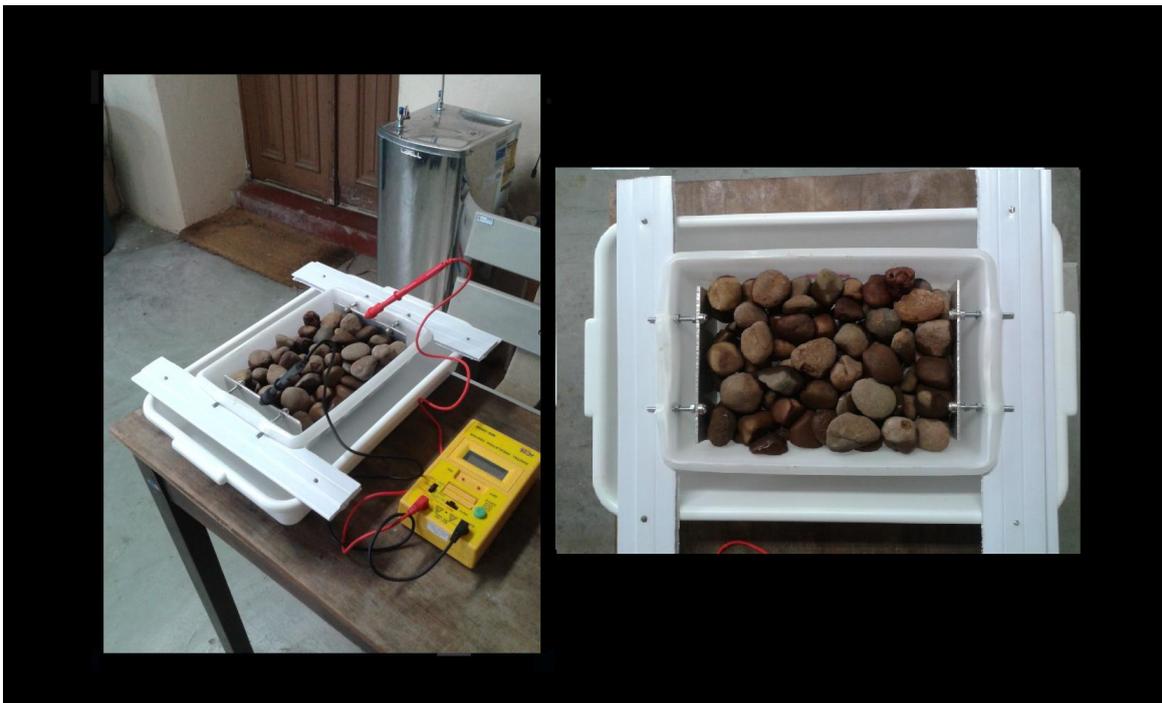
Fonte: O autor.

Figura 36: Medição de resistência elétrica para amostra: Cascalho 19,0mm irregular.



Fonte: O autor.

Figura 37: Medição de resistência elétrica para amostra: Cascalho 25,0mm regular.



Fonte: O autor.

Figura 38: Medição de resistência elétrica para amostra: Cascalho 25,0mm irregular.



Fonte: O autor.

Figura 39: Medição de resistência elétrica para amostra: Cascalho 31,0mm.



Fonte: O autor.

Figura 40: Medição de resistência elétrica para amostra: Cascalho 38,0mm.



Fonte: O autor.

Figura 41: Medição de resistência elétrica para amostra: Cascalho 50,0mm.



Fonte: O autor.

Figura 42: Medição de resistência elétrica para amostra: Textura cristalina.



Fonte: O autor.

Figura 43: Medição de resistência elétrica para amostra: brita basalto nº01.



Fonte: O autor.

Figura 44: Medição de resistência elétrica para amostra: brita basalto nº02.



Fonte: O autor.

Figura 45: Medição de resistência elétrica para amostra: brita basalto n°03.



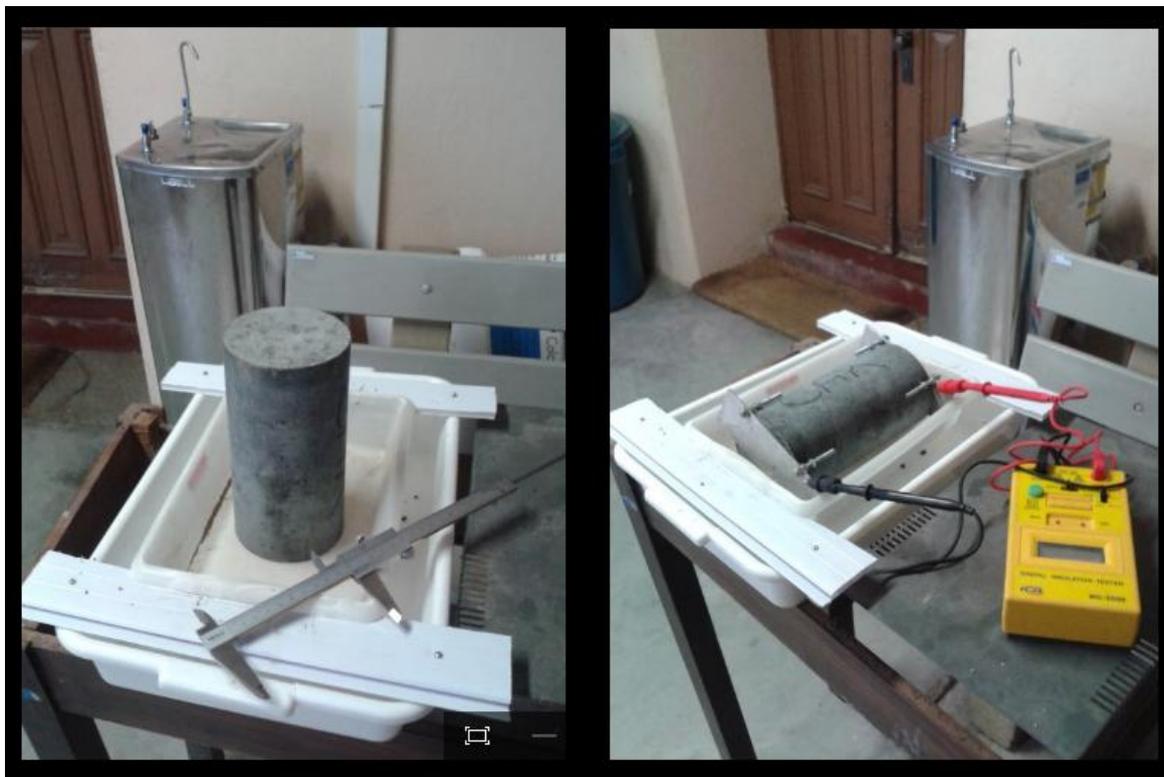
Fonte: O autor.

Figura 46: Medição de resistência elétrica para amostra: brita granito n°02.



Fonte: O autor.

Figura 47: Medição de resistência elétrica para amostra: Corpo de prova de concreto.



Fonte: O autor.

Figura 48: Medição de resistência elétrica para amostra: Cascalho 20-25mm.



Fonte: O autor.

9. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos no experimento com medições de resistividade foram repassados para o Quadro 10. As colunas **R** representam os valores de resistência medidos pelo megôhmetro nas modalidades seco e molhado, enquanto as colunas **ρ** representam os valores de resistividade dos materiais nas mesmas modalidades utilizando a Equação (10).

Quadro 10: Resultados do experimento para determinação de resistividade.

AGREGADO/TAMANHO ORIGEM/FORMATO/CONDIÇÕES	R_seco (M Ω)	R_molhado (K Ω)	ρ (Ω m) seco	ρ (Ω m) molhado
Pó de cascalho	37	20	1,26E+06	680,553
Cascalho 12,5mm (basalto Irregular limpo)	100	120	3,40E+06	4083,318
Cascalho 12,5mm (basalto Irregular sujo)	90	110	3,06E+06	3743,041
Cascalho 19,0mm (basalto Irregular limpo)	210	120	7,15E+06	4083,318
Cascalho 19,0mm (basalto Regular limpo)	215	140	7,32E+06	4763,871
Cascalho 25,0mm (basalto Regular limpo)	180	240	6,12E+06	8166,636
Cascalho 25,0mm (basalto Irregular limpo)	240	190	8,17E+06	6465,253
Cascalho 31,0mm (basalto Irregular limpo)	190	220	6,47E+06	7486,083
Cascalho 38,0mm (basalto Irregular limpo)	203	210	6,91E+06	7145,806
Cascalho 50,0mm (basalto Irregular limpo)	1000	250	3,40E+07	8506,912
Casc. 25-50mm (bas. Irreg cristalino limpo)	222	100	7,55E+06	3402,765
Cascalho 20-25mm (basalto misto sujo)	130	270	4,42E+06	9187,786
Cascalho 20-25mm (basalto misto limpo)	140	295	4,76E+06	10038,157
Cascalho 25-50mm (basalto misto sujo)	145	315	4,93E+06	10718,710
Cascalho 25-50mm (basalto misto limpo)	152	330	5,17E+06	11229,124
Corpo de prova de concreto	0,15	90	5,89E+03	3534,300
Brita n°1 (basalto limpo)	350	130	1,19E+07	4423,594
Brita n°1 (basalto sujo)	310	105	1,05E+07	3572,903
Brita n°2 (basalto limpo)	inf	500	Inf	17013,825
Brita n°2 (basalto sujo)	Inf	116	inf	3947,207
Brita n°3 (basalto limpo)	Inf	480	Inf	16333,272
Brita n°3 (basalto sujo)	Inf	270	Inf	9187,465
Brita n°2 (granito limpo)	inf	320	Inf	10888,848
Brita n°2 (granito sujo)	inf	110	inf	3743,041

LEGENDA:

Regular: Formato, tamanho e origem uniformes.

Irregular: No tamanho indicado, mas sem uniformidades, 90% basalto.

Misto: Tamanho na faixa indicada, sem uniformidades e 90% basalto.

Limpo: Isento de lascas, pó e areia.

Sujo: Com lascas, pó e areia.

Inf: Valores mto altos para serem lidos.

Fonte: O autor.

9.1. Análise dos resultados

Os experimentos com medição de resistência, apesar de simples em sua concepção, demandam certos cuidados na etapa de análise de resultados devido aos fatores que influenciam nos valores de medição, desde a composição química do material até o ambiente onde está sendo realizado o experimento de medição.

O experimento leva em conta os seguintes aspectos de classificação:

- Tipo de agregado.
- Formato característico da amostra.
- Origem ou tipo de material.
- Tamanho normalizado de peneira.
- Condições da amostra.

Quadro 11: Aspectos de classificação dos materiais.

TIPO DE AGREGADO	TIPO DE FORMATO (TEXTURA E FORMA)	TIPO/ORIGEM DE MATERIAL	TAMANHO DE PENEIRA	CONDIÇÕES DA AMOSTRA
CASCALHO	Regular (Textura e forma uniformes)	Basalto (100%)	Único	Limpo
	Irregular (Textura e forma não uniformes)	Basalto (90%) + 10% de outros	Único	Limpo
			Misto	Limpo
				Sujo
BRITA	Irregular (Textura uniforme e forma não uniforme)	Basalto	Único	Limpo
				Sujo
	Irregular (Textura uniforme e forma não uniforme)	Granito	Único	Limpo
				Sujo
CORPO DE PROVA (CONCRETO)	Regular Cilindrico (diâmetro 100mm e comprimento 200mm)	Padronizado	Único	Limpo

Fonte: O autor.

9.1.1. Análises referente a valores obtidos p/ amostras de britas

Essa subseção e as próximas visam fazer uma comparação entre os valores apresentados pelas tabelas de resistividades das normas e aqueles obtidos experimentalmente.

A primeira análise faz referência aos resultados de medição obtidos para as britas conforme apresenta o Quadro 12. As britas foram separadas por tamanho e origem para facilitar a compreensão dos resultados. Os valores de resistência para tamanhos n°2 e n°3 não puderam ser lidos pelo aparelho de medição devido ao seu alto valor. Esses casos estão indicados com um traço no Quadro 12.

Quadro 12: Resultados das medições com britas.

Tipo	R_seco(MΩ)	R_molhado(KΩ)	ρ (Ωm) - seco	ρ (Ωm) - molhado
Brita n°1 (basalto limpo)	350	130	1,19E+07	4423,6
Brita n°1 (basalto sujo)	310	105	1,05E+07	3572,9
Brita n°2 (basalto limpo)	-	500	-	17013,8
Brita n°2 (basalto sujo)	-	116	-	3947,2
Brita n°2 (granito limpo)	-	320	-	10888,8
Brita n°2 (granito sujo)	-	110	-	3743,0
Brita n°3 (basalto limpo)	-	480	-	16333,2
Brita n°3 (basalto sujo)	-	270	-	9187,4



Fonte: O autor.

Os valores de resistividade calculados para a condição molhado são apresentados na última coluna do Quadro 12. Pode-se perceber que os valores correspondentes ao material na condição sujo para os tamanhos n°1 e n°2 se aproximam significativamente do valor de 3.000Ωm de resistividade apresentado pela norma brasileira NBR-15751. A brita n°3 tem uma redução acentuada em sua resistividade ao trocar de condição, porém, não o suficiente para se aproximar do valor de 3.000Ωm, o que pode ser explicado pelo tamanho, formato e principalmente pela textura do material, uma vez que a brita apresenta uma textura mais áspera, o que dificulta uma acomodação de maior aderência entre as faces dos grânulos do material da amostra.

A princípio, a norma IEEE-80 utiliza granito como material, enquanto a norma NBR-15751 não especifica o material, porém, segundo o Laboratório de Geologia Isotópica–UFRGS, o que geralmente se utiliza no Brasil é a brita de basalto, assim, foi realizada uma medição com brita de granito n°2. Apesar da grande diferença entre os valores de resistividade a limpo entre as britas de basalto e granito, pode-se perceber que quando sujo, os valores de resistividade ficam mais próximos, indicando que não existiria diferença relacionada à origem do material da brita quando aplicada como camada superficial de isolamento em uma subestação, uma vez que, na condição real sempre existirá algum tipo de contaminante exercendo influência sobre a resistividade do material.

9.1.2. Análise referente a valores obtidos p/ amostras de faixas de tamanho

A Figura 49 apresenta uma imagem parcial da tabela analisada na seção 7.2.3 correspondente à variação de resistividade ao considerar duas amostras formadas por materiais classificados em faixas de tamanho. Foi argumentado que o valor de resistividade deveria aumentar ao passar da faixa de 20-25mm na condição contaminado para 25-50mm na condição limpo, porém, a tabela indica uma diminuição desse valor. A mesma figura apresenta as linhas correspondentes aos valores de resistividade obtidos com amostras de cascalho nas mesmas condições e faixas de tamanho.

Figura 49: Ilustração da análise dos valores de resistividade para faixas de tamanhos.

	Tipo	R_seco(MΩ)	R_molhado (KΩ)	ρ (Ωm) seco	ρ (Ωm) molhado
	25-50 mm (cascalho textura cristalina)	222	100	7,55E+06	3402,7
	20-25 mm (Cascalho misto c/ lasca e pó)	130	270	4,42E+06	9187,4
	20-25 mm (Cascalho misto limpo)	140	295	4,76E+06	10038,1
	25-50 mm (Cascalho misto c/lasca e pó)	145	315	4,93E+06	10718,7
	25-50 mm (Cascalho misto limpo)	152	330	5,17E+06	11229,1

3	Granito com lascas e pó	CA	20-25mm	-	6513 água com terra 45Ωm
4	Granito limpo	GA	25-50mm	1,5.10 ⁶ - 4,5.10 ⁶	5000 água da chuva 100Ωm
5	Granito limpo	GA	50-100mm	2,6.10 ⁶ - 3.10 ⁶	10000 água da chuva 100Ωm

Fonte: IEEE-80 (2013), O autor.

Ao comparar as linhas circuladas da tabela parcial de resultados, verifica-se um aumento no valor de resistividade ao comparar a faixa de 20-25mm com a faixa de 25-50mm concordando com o argumento de que o valor de resistividade deveria aumentar para uma amostra de tamanhos de grânulos maiores e na condição limpo.

Essa divergência pode ser explicada pelo fato de tratar-se de amostras com tamanhos variados, o que pode acarretar numa acomodação tal que a área de contato entre as unidades seja maior. Somado a isso, o fato do material granito possuir uma textura mais propícia à diminuição de resistividade do que aquela do cascalho utilizada no experimento.

A última análise com relação à Figura 49 é aquela relacionada ao material de textura cristalina que vem a confirmar aquilo que foi colocado no parágrafo anterior. Seu valor de resistividade é muito menor que aquele apresentado pela amostra de mesmo tamanho do material de cascalho sem textura especial.

9.1.3. Análise referente a valores obtidos p/ variação de condição e forma

Para essa análise, o Quadro 13 apresenta os resultados das medições para cascalho tamanho 12,5mm para verificação dos valores obtidos nas condições limpo e sujo; os tamanhos 19,0 e 25,0mm são apresentados para análise das condições regular e irregular utilizando o mesmo tamanho.

Quadro 13: Resultados das medições para comparação de condição e forma

Tipo	R_seco (M Ω)	R_molhado (K Ω)	ρ (Ω m) seco	ρ (Ω m) molhado
12,5 mm (Cascalho irregular limpo)	100	120	3,40E+06	4083,3
12,5 mm (Cascalho irregular sujo)	90	110	3,06E+06	3743,1
19,0 mm (Cascalho irregular)	210	120	7,15E+06	4083,3
19,0 mm (Cascalho regular)	215	140	7,32E+06	4763,8
25,0 mm (Cascalho regular)	180	240	6,12E+06	8166,6
25,0 mm (Cascalho irregular)	240	190	8,17E+06	6465,2

Fonte: O autor.

Segundo os resultados apresentados no Quadro 13, o cascalho irregular limpo de 12,5mm tem valor de resistividade maior que aquele na condição de contaminação por lascas e pó.

Para a análise da condição de formato, de acordo com o Quadro 13, as amostras de cascalho regular apresentaram valores de resistividade maiores que aquelas de formato irregular conforme pode ser observado para os tamanhos 19,0 e 25,0mm.

Esses resultados mostram que valores de resistividade considerados em tabela para amostras de um determinado tamanho podem sofrer variações de acordo com o formato dos grânulos, uma vez que a acomodação entre eles pode resultar em uma maior ou menor área de contato e por sua vez uma redução ou aumento dos valores de resistividade indicados.

9.1.4. Análise referente ao valor obtido para o corpo de prova de concreto

O concreto a seco possui uma faixa de valores de resistividade bem diferente entre uma norma e outra, porém, os valores a molhado, que definem os limites mínimos de resistividade, são os mesmos, 21 a 100 Ωm . Experimentalmente, porém, esse valor foi bem maior como pode ser visto na Figura 50 na comparação entre imagens parciais das tabelas e do resultado obtido.

Figura 50: Comparação entre valores obtidos para resistividade do corpo de prova.

Valor de resistividade obtido no experimento

Tipo	R_seco (M Ω)	R_molhado (K Ω)	ρ (Ωm) seco	ρ (Ωm) molhado
Corpo de prova de concreto	0,15	90	5,89E+03	3534,3

Valor de resistividade pela tabela norma IEEE-80

Número	Descrição do material	Local	Tamanho da amostra	Resistividade	
				Seco	Molhado
11	Concreto	-	-	1.10 ⁶ - 1.10 ⁹	21 a 100

Valor de resistividade pela tabela norma IEEE-80

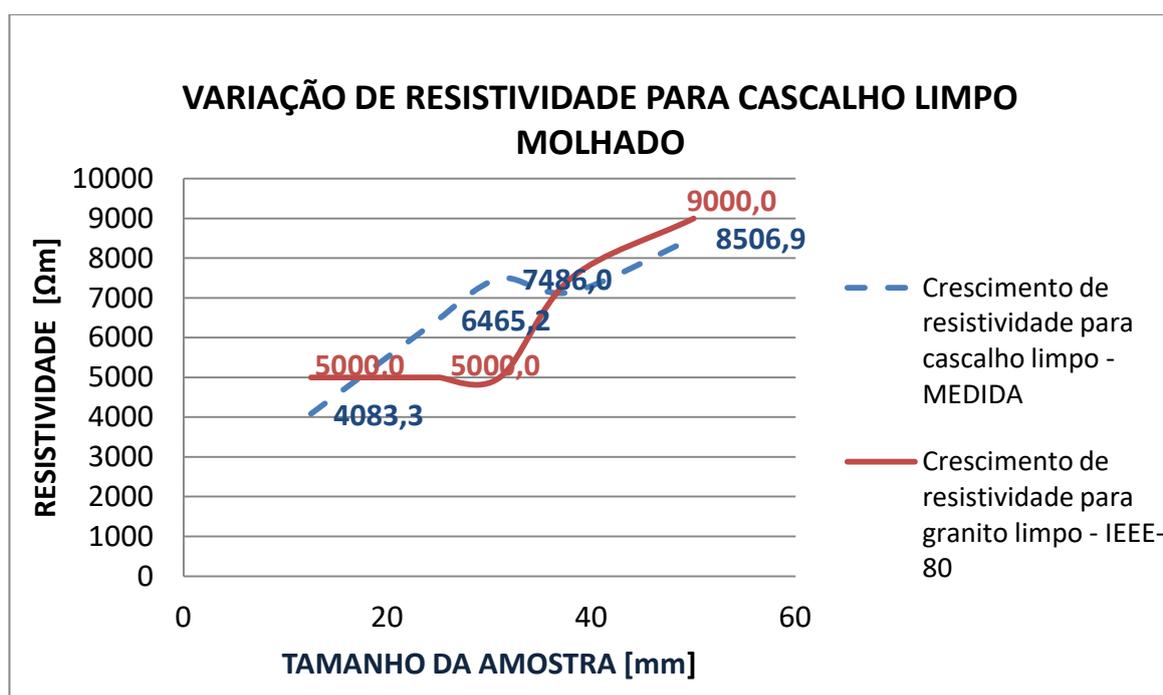
Descrição do material	Resistividade da amostra Ωm	
	Seco	Molhado
Concreto	1200 a 280000	21 a 100

9.1.5. Análise gráfica dos resultados

Conforme foi verificado nas discussões sobre os resultados do Quadro 9, várias análises podem ser feitas no sentido de se verificar qual material tem maior resistividade, como se comportam em ambientes úmidos, com sujeira, e outros. Nesta seção os resultados obtidos serão analisados graficamente de forma que se tenha uma visão mais nítida do comportamento dos materiais em sua utilização em camadas de proteção em subestações.

A primeira análise é com relação à variação da resistividade em relação ao tamanho. O Gráfico 5 apresenta a comparação entre a variação de resistividade para o cascalho limpo de basalto irregular e os valores teóricos retirados do Quadro 3 de resistividade de materiais fornecida pela norma IEEE-80. Esse gráfico visa comparar comportamento do material a ser utilizado com aquele que é normalizado.

Gráfico 5: Resistividade dos agregados - cascalho (experimental) e granito (teórico).

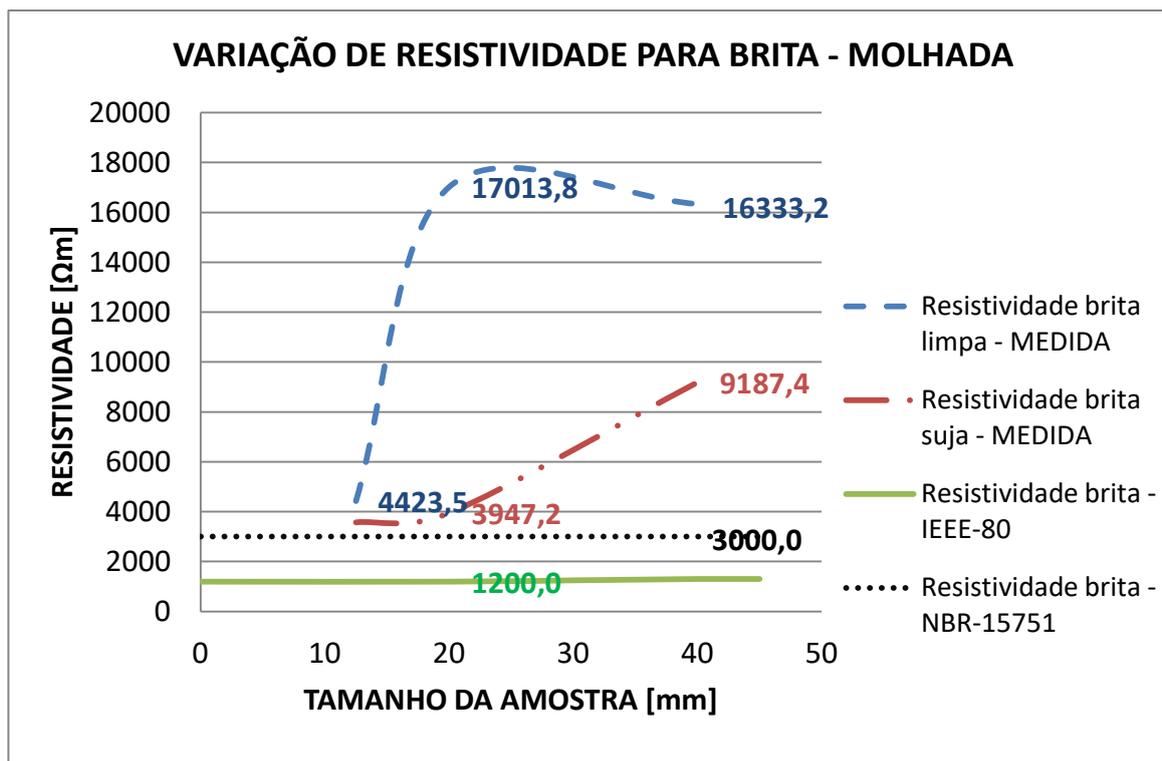


Fonte: O autor.

Percebe-se que para tamanhos menores, a resistividade do granito é menor, uma vez que existe maior superfície de contato, logo, a superfície do granito proporciona uma resistividade menor, porém, com o aumento do tamanho, essa característica é reduzida em relação aos espaços criados entre os agregados, o que sugere que as resistividades se igualem, tal como acontece, embora a resistividade do granito pareça maior.

O próximo agregado a ser analisado graficamente é a brita, e assim como feito para o cascalho, o Gráfico 6 apresenta o comportamento da brita molhada frente ao comportamento apresentado nas normas. Como a norma NBR-15751 não indica se as medições consideram um material limpo ou sujo, colocou-se as duas situações no gráfico.

Gráfico 6: Resistividade dos agregados - brita experimental e teórica.



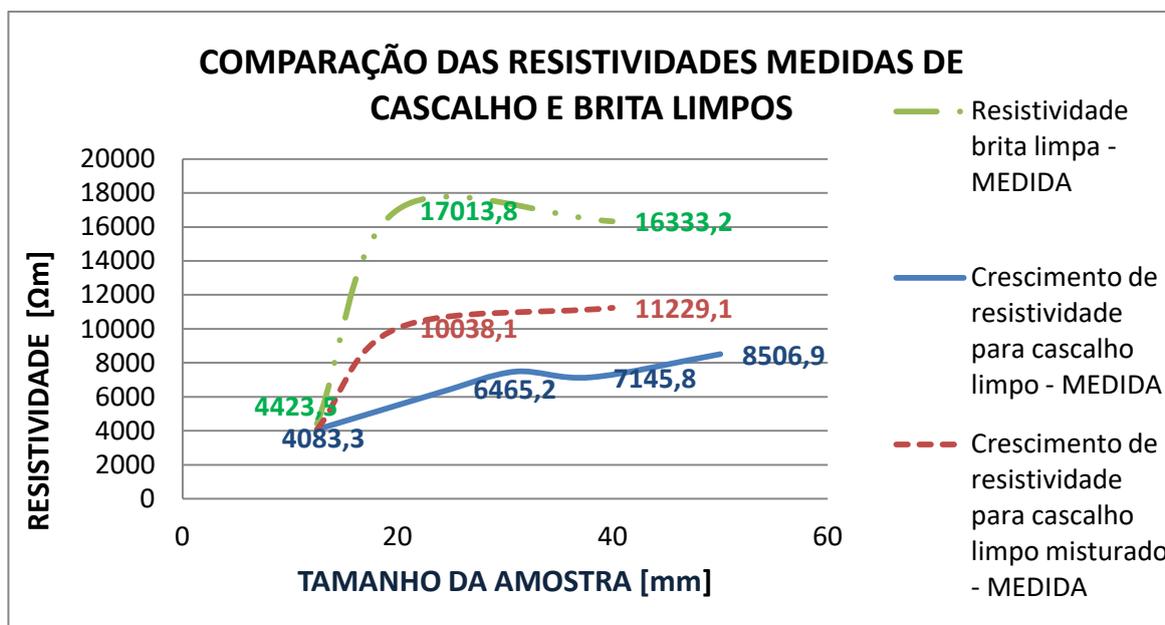
Fonte: O autor.

O Gráfico 6 ilustra a grande diferença entre os valores apresentados em norma e aqueles obtidos experimentalmente, porém, pode-se perceber que a brita com lascas, pó e areia tem grande influência na diminuição da resistividade.

A diferença de valores é considerável entre as normas também, pois a norma brasileira considera um valor único para os três tipos de brita como sendo 3000 Ωm , enquanto a norma americana considera no máximo 1300 Ωm . Uma explicação para isso pode ser justamente a aplicação de uma margem de segurança, afinal, dependendo do local, pó de brita e areia podem ter grande influência nos valores de resistividade como pode ser visto no Gráfico 6.

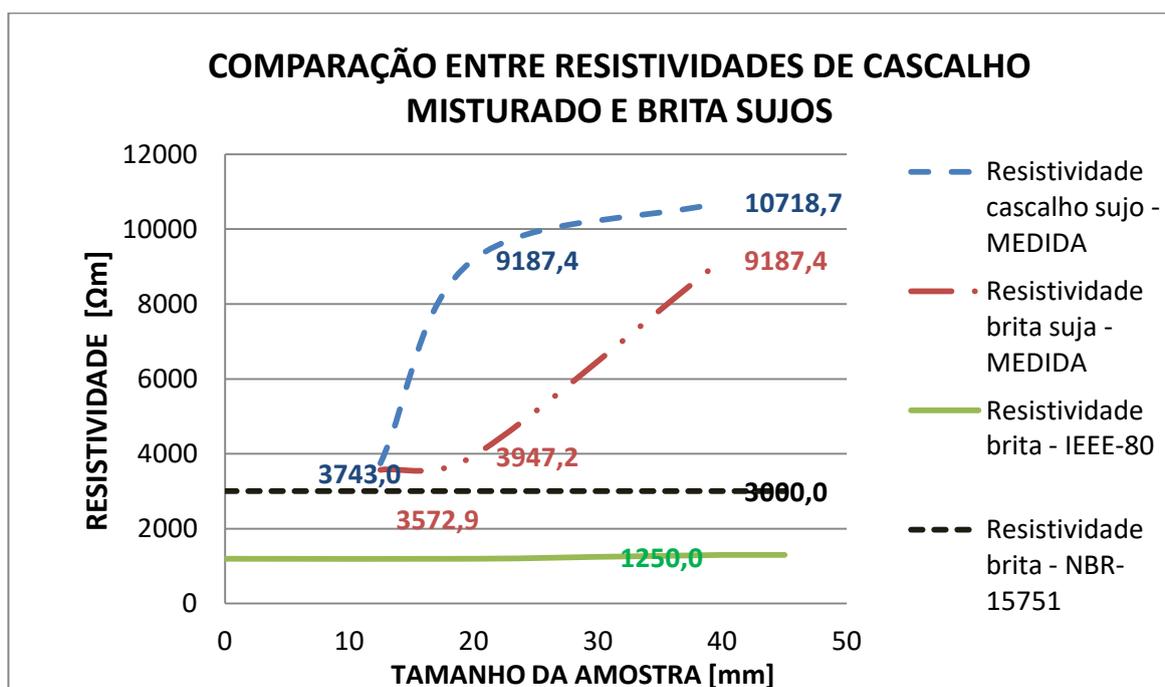
Em algumas situações pode ser necessária uma avaliação do melhor agregado a ser utilizado. Os Gráficos 7 e 8 apresentam uma comparação entre as características das resistividades de amostras de cascalho e brita nas condições a limpo e com contaminação de lascas e pó.

Gráfico 7: Resistividade dos agregados - brita e cascalho limpos.



Fonte: O autor.

Gráfico 8: Resistividade dos agregados brita e cascalho sujos.



Fonte: O autor.

O Gráfico 7 mostra que a característica de resistividade para material na condição a limpo e molhado é maior que aquela do cascalho. As características dos materiais que podem ser utilizadas para explicar esse comportamento são o formato e a textura dos materiais. Com um formato mais liso e arredondado, os grânulos de cascalho acabam obtendo uma melhor aderência e, por consequência, uma menor resistividade.

O Gráfico 8 apresenta as características para os mesmos materiais na condição de contaminação por lascas e pó. O resultado é uma característica que indica maiores valores de resistividade para o cascalho, ou seja, ao contrário do que apresenta o Gráfico 7. Essa inversão pode ser explicada novamente pelas características dos materiais. A textura mais áspera e irregular dos grânulos de brita acaba por acumular mais impurezas, o que acarreta em uma diminuição mais acentuada da resistividade da amostra.

10. CONCLUSÕES

Ao fim dos trabalhos de estudo e análise sobre resistividade de materiais utilizados como camada de proteção em aterramento de subestações, pode-se chegar a conclusão de que realizar uma análise detalhada de um material pode se tornar complexa, pois depende de muitas variáveis. Esse trabalho mostra que valores de resistividade repassados pelas normas devem ser tomados com cuidado, dependendo das variáveis do local, aqueles valores podem não representar a realidade e seu valor de resistividade pode ficar subdimensionado ou sobredimensionado.

Ao comparar graficamente os resultados, verificou-se que a margem de variação entre os valores de resistividade dos materiais dados em norma e aqueles medidos experimentalmente diminuem sensivelmente com o acréscimo de impurezas como lascas e pó de areia, porém, essa margem é sempre maior para o caso de britas, que mesmo com impurezas, ainda é bem maior que aquela apresentada no caso do cascalho.

Camadas de proteção para subestações são dimensionadas levando em conta o sistema de aterramento, logo, potenciais de toque e passo estão intimamente ligados à resistividade da camada de proteção, logo, como foi estudado nesse trabalho, alterações no estado do material acabam por influenciar na resistividade e esses fatores devem ser previstos durante a etapa de projeto.

Ao analisar as normas de aterramento e seus materiais utilizados, verificou-se que os valores adotados para resistividade de materiais são sempre menores do que realmente são, isso acaba funcionando como margem de segurança, garantindo que o material utilizado garanta o isolamento do solo. Porém, ao considerar uma resistividade menor para o material de isolamento, o sistema de cabos, área de abrangência e a própria geometria do sistema de aterramento acaba sendo sobredimensionada, o que em alguns casos pode ser significativo financeiramente, porém, em termos de segurança é sempre vantajoso.

11. REFERÊNCIAS

- [1] VISACRO FILHO, S. Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento. São Paulo: Artliber, 2002.
- [2] KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1998.
- [3] COTRIM, A.A.M.B. Proteção contra choques elétricos. Instalações elétricas. 3.ed. São Paulo: Makron Books, 1992. p. 130-202.
- [4] MAMEDE FILHO, J. Sistemas de aterramento. Instalações elétricas industriais. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC. 2001. p. 497-533.
- [5] MAMEDE FILHO, J. Proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis: aterramento. São Paulo: Érica, 1997.
- [6] SUNDE, E.D. Earth conduction effects in transmission systems. 2.ed. New York: Book Dover, 1968.
- [7] ABNT, A. B. D. N. T. - NBR 15751: Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos, p. 47. 2009.
- [8] ABNT, A. B. D. N. T. - NBR 7117: Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner). p. 15. 2012.
- [9] IEEE, T. I. O. E. A. E. E - IEEE Std 81: IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System. p. 7-42. 2012.
- [10] IEEE, T. I. O. E. A. E. E. - IEEE Std 80: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. p. 192. 2012.
- [11] ABNT, A. B. D. N. T. - NBR 9935: Agregados Terminologia. p. 4. 2011.

- [12] BAUER, L. A. Falcão. Materiais de Construção. Volume I. 5ª Edição. Livros Técnicos e Científicos Ed., Rio de Janeiro, 2000, 471 p.
- [13] BAUER, L. A. Falcão. Materiais de Construção. Volume II. 5ª Edição. Livros Técnicos e Científicos Ed., Rio de Janeiro, 2000, 480 p.
- [14] ABNT, A. B. D. N. T. - NBR 7211: Agregado para concreto – Especificação. 2005.
- [15] A.Gusmão Filho, Jaime. Solos, Da formação geológica ao uso na engenharia. 2.ed. Recife: UFPE. 2008.
- [16] NEVILLE, ADAM. Propriedades do concreto, II Edição, São Paulo, Pini, 1997.
- [17] ALECRIM, José Duarte (2002). Recursos minerais do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: METAMIG.
- [18] CHIOSSI, Nivaldo José (1979). Geologia aplicada à Engenharia; 2ª ed.; págs. 103-110.
- [19] OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A (2002). Geologia de Engenharia, 1ª ed., 3ª reimpressão, São Paulo. Pág. 331.
- [20] ABNT, A. B. D. N. T. - NBR 7525: Materiais de Pedra e Agregados Naturais. 1993.
- [21] MOREIRA, Igor O Espaço Rio-Grandense, Editora ática, 2007. P. 8.
- [22] EBAH. RISCO ELÉTRICO. Disponível em:
<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA4JgAG/risco-eletrico>>
Acesso em: 10/11/2016.
- [23] GABRIEL CALDEIRA GOMES. GEOGRAFANDO. Disponível em:
<<http://www.geografando.com/2013/12/rochas-igneas-magmaticas.html>>
Acesso em: 15/11/2016.

[24] CONTEUDO MEDIA GROUP. TODOESTUDO. Disponível em:

<<http://www.todoestudo.com.br/geografia/rochas-sedimentares> >

Acesso em: 15/11/2016.

[25] PORTO EDITORA. INFOPÉDIA. Disponível em:

<[https://www.infopedia.pt/\\$arenito-argiloso](https://www.infopedia.pt/$arenito-argiloso)>

Acesso em: 15/11/2016.

[26] ALLBIZ. COMÉRCIO VIA INTERNET. Disponível em:

<<http://www.br.all.biz/pedra-calcria-bgg1060257>>

Acesso em: 15/11/2016.

[27] WPZOOM. BLOG CONSTRUIR. Disponível em:

<<http://blog.construir.arq.br/tipos-de-brita-e-funcao> >

Acesso em: 16/11/2016.

[28] ECO MARINE. CASCALHO. Disponível em:

<http://www.ecomarine.com.br/index.php?manufacturers_id=89&sort=2a&page=2&>

Acesso em: 16/11/2016.

[29] PREFEITURA DE SANTA TERESA, SITE DA CIDADE. Disponível em:

<<http://www.santatereza.rs.gov.br/>>

Acesso em: 16/11/2016.

[30] SLIDEPLAYER. ROCHAS. Disponível em:

<<http://slideplayer.com.br/slide/2337874/>>

Acesso em: 17/11/2016.

[31] SERIAL. MEGÔHMETRO DIGITAL ICEL MG-3000. Disponível em:

<<http://www.serialonline.com.br/Produto-Instrumentacao-Megometros-Megohmetro-Digital-ICEL-MG-3000-versao-164-302.aspx>>

Acesso em: 17/11/2016.

[32] ICEL MANAUS, Manual de instruções do Megôhmetro Digital Modelo MG-3000,

14 p.