

ATERRAMENTO ELÉTRICO

Geraldo Kindermann
e
Jorge Mário Campagnolo

3^a edição
modificada e ampliada

SAGRA-DC LUZZATTO
Editores

GERALDO KINDERMANN

JORGE MÁRIO CAMPAGNOLO

Professores da Universidade Federal de Santa Catarina

ATERRAMENTO ELÉTRICO

3ª edição
modificada e ampliada

SAGRA - D.C. LUZZATTO
— Editores —

Porto Alegre

1995

SAGRA-DC LUZZATTO
LIVREIROS, EDITORES E DISTRIBUIDORES
Rua João Alfredo, 448 — Cidade Baixa
90050-230 — Porto Alegre, RS, Brasil
Telefone (051)227-5222 — Telefax (051)227-4438

PREFÁCIO DOS AUTORES

Acreditamos que a 3ª edição deste livro continue a preencher expressivamente lacuna existente na bibliografia sobre **Aterramento Elétrico**.

Procuramos fazer um livro que tem por objetivo principal agrupar e apresentar o assunto numa seqüência lógica, que tem sido ao longo do tempo aperfeiçoado a cada nova edição, para que o mesmo possa ser utilizado como livro texto em cursos de escolas profissionais de nível médio e superior, bem como fonte de consulta por engenheiros eletricitas ou para cursos específicos sobre **Aterramento Elétrico**.

Esperamos que as informações contidas neste livro contribuam como fonte de consulta à área de Engenharia Elétrica, pois seu conteúdo é amplo, auxiliando, principalmente, as áreas de Eletrotécnica, Distribuição e Sistemas Elétricos de Potência.

Este livro é fruto da experiência acumulada durante vários anos. Esta experiência foi adquirida através de trabalhos práticos, bibliográficos e trocas de informações entre profissionais de empresas, principalmente nos cursos ministrados na Universidade Federal de Santa Catarina em convênio com a ELETROBRÁS.

Os Autores.

Índice Geral

1	Introdução ao Sistema de Aterramento	1
1.1	Introdução Geral	1
1.2	Resistividade do Solo	2
1.3	A Influência da Umidade	3
1.4	A Influência da Temperatura	4
1.5	A Influência da Estratificação	5
1.6	Ligação à Terra	6
1.7	Sistemas de Aterramento	7
1.8	Hastes de Aterramento	7
1.9	Aterramento	8
1.10	Classificação dos Sistemas de Baixa Tensão em Relação à Alimentação e das Massas em Relação à Terra	8
1.11	Projeto do Sistema de Aterramento	12
2	Medição da Resistividade do Solo	13
2.1	Introdução	13
2.2	Localização do Sistema de Aterramento	13
2.3	Medições no Local	14
2.4	Potencial em Um Ponto	15
2.5	Potencial em Um Ponto Sob a Superfície de Um Solo Homogêneo	16

2.6	Método de Wenner	18
2.7	Medição Pelo Método de Wenner	20
2.8	Cuidados na Medição	21
2.9	Espaçamentos das Hastes	22
2.10	Direções a Serem Medidas	23
2.11	Análise das Medidas	24
2.12	Exemplo Geral	25
3	Estratificação do Solo	27
3.1	Introdução	27
3.2	Modelagem do Solo de Duas Camadas	28
3.3	Configuração de Wenner	29
3.4	Método de Estratificação do Solo de Duas Camadas	31
3.5	Método de Duas Camadas Usando Curvas	31
3.6	Métodos de Duas Camadas Usando Técnicas de Otimização	39
3.7	Método Simplificado para Estratificação do Solo em Duas Camadas	42
3.8	Método de Estratificação de Solos de Várias Camadas	47
3.9	Método de Pirson	47
3.10	Método Gráfico de Yocogawa	52
4	Sistemas de Aterramento	61
4.1	Introdução	61
4.2	Dimensionamento de Um Sistema de Aterramento com Uma Haste Vertical	61
4.3	Aumento do Diâmetro da Haste	64
4.4	Interligação de Hastes em Paralelo	66
4.5	Resistência Equivalente de Hastes Paralelas	68
4.5.1	Índice de Aproveitamento ou Índice de Redução (K)	70

4.6	Dimensionamento de Sistema de Aterramento Formado Por Hastes Alinhadas em Paralelo, Igualmente Espaçadas	71
4.7	Dimensionamento de Sistema de Aterramento com Hastes em Triângulo	76
4.8	Dimensionamento de Sistemas com Hastes em Quadrado Vazio	78
4.9	Dimensionamento de Sistema com Hastes em Quadrado Cheio	80
4.10	Dimensionamento de Sistema com Hastes em Circunferência	81
4.11	Hastes Profundas	83
4.12	Resistência de Aterramento de Condutores Enrolados em Forma de Anel e Enterrados Horizontalmente no Solo	88
4.13	Sistemas com Condutor Enterrado Horizontalmente no Solo	89
5	Tratamento Químico do Solo	93
5.1	Introdução	93
5.2	Característica do Tratamento Químico do Solo	93
5.3	Tipos de Tratamento Químico	94
5.4	Coefficiente de Redução Devido ao Tratamento Químico do Solo (K_t)	95
5.5	Variação da Resistência de Terra Devido ao Tratamento Químico	97
5.6	Aplicação do Tratamento Químico no Solo	98
5.7	Considerações Finais	101
6	Resistividade Aparente	103
6.1	Resistividade Aparente	103
6.2	Haste em Solo de Várias Camadas	105
6.3	Redução de Camadas	106
6.4	Coefficiente de Penetração (α)	107
6.5	Coefficiente de Divergência (β)	109
6.6	Resistividade Aparente para Solo com Duas Camadas	109
7	Fibrilação Ventricular do Coração Pelo Choque Elétrico	115

7.1	Introdução	115
7.2	Choque Elétrico	115
7.3	Funcionamento Mecânico do Coração	116
7.4	Funcionamento Elétrico do Coração	118
7.5	Fibrilação Ventricular do Coração Pelo Choque Elétrico	120
7.6	Desfibrilador Elétrico	121
7.7	Influência do Valor da Corrente Elétrica	123
7.8	Curva Tempo x Corrente	125
7.9	Limite de Corrente para Não Causar Fibrilação	125
7.10	Potencial de Toque	127
7.11	Potencial de Toque Máximo	129
7.12	Potencial de Passo	129
7.13	Potencial de Passo Máximo	130
7.14	Correção do Potencial de Passo e de Toque Máximo Admissível Devido à Colocação de Brita na Superfície	131
7.15	Medida de Potencial de Toque	132
7.16	Medida de Potencial de Passo	134
8	Malha de Aterramento	135
8.1	Introdução	135
8.2	Itens Necessários ao Projeto	135
8.3	Estratificação do Solo	136
8.4	Determinação da Resistividade Aparente	136
8.5	Dimensionamento do Condutor da Malha	137
8.6	Potenciais Máximos a Serem Verificados	139
8.7	Malha Inicial	140
8.8	Resistência de Aterramento da Malha	141
8.9	Potencial de Malha	142

8.10	Potencial de Passo na Malha	145
8.11	Limitações das Equações de V_{Malha} e V_{psM}	145
8.12	Potencial de Toque Máximo da Malha em Relação ao Infinito	146
8.13	Fluxograma do Dimensionamento da Malha de Terra	146
8.14	Potencial de Toque na Cerca Perimetral da Malha	149
8.15	Melhoria na Malha	150
8.16	Malha de Equalização	151
8.17	Exemplo Completo do Dimensionamento de Uma Malha de Terra	151
9	Medida da Resistência de Terra	159
9.1	Introdução	159
9.2	Correntes de Curto-Circuito pelo Aterramento	159
9.3	Distribuição de Corrente Pelo Solo	160
9.4	Curva de Resistência de Terra versus Distância	162
9.5	Método Volt-Amperímetro	163
9.6	Medição Usando o Aparelho Megger	164
9.7	Precaução de Segurança Durante a Medição de Resistência de Terra	166
10	Corrosão no Sistema de Aterramento	167
10.1	Corrosão	167
10.2	Eletronegatividade dos Metais	167
10.3	Reação de Corrosão	168
10.4	Corrosão no Sistema de Aterramento	172
10.5	Heterogeneidade dos Materiais que Compõem o Sistema de Aterramento	172
10.6	Heterogeneidade dos Solos Abrangidos Pelo Sistema de Aterramento	174
10.7	Heterogeneidade do Tipo e Concentração de Sais, e da Umidade no Sistema de Aterramento	175
10.8	Heterogeneidade da Temperatura do Solo	176

10.9	Aeração Diferencial	176
10.10	Ação das Correntes Elétricas Dispersas no Solo	177
10.11	Proteção Contra a Corrosão	178
10.12	Proteção Por Isolação de Um Componente	179
10.13	Proteção Catódica Por Ânodo de Sacrifício	179
10.14	Proteção Por Corrente Impressa	181
10.15	Religamento e a Corrosão	183
10.16	Considerações	183
11	Surtos de Tensão	185
11.1	Introdução	185
11.2	Campo Elétrico Gerado no Solo Pelo Surto de Corrente em Uma Haste	185
11.3	Gradiente de Ionização do Solo	186
11.4	Zona de Ionização no Solo	187
11.5	Finalidade da Haste	190
A	Tabelas de Hastes Paralelas, Alinhadas e Iguamente Espaçadas	191
B	Retorno da Corrente de Sequência Zero do Curto-Circuito	199
B.1	Correntes de Curto-Circuito pela Terra	199
B.2	Corrente de Malha	200
C	Resistência de Malha	203
C.1	Resistência de Malha de Terra	203
C.2	Análise da Resistência de Malha em Função de Parâmetros	205
	Bibliografia	209

Capítulo 1

Introdução ao Sistema de Aterramento

1.1 Introdução Geral

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

Esse cuidado deve ser traduzido na elaboração de projetos específicos, nos quais, com base em dados disponíveis e parâmetros pré-fixados, sejam consideradas todas as possíveis condições a que o sistema possa ser submetido.

Os objetivos principais do aterramento são:

- Obter uma resistência de aterramento a mais baixa possível, para correntes de falta à terra;
- Manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro de limites de segurança de modo a não causar fibrilação do coração humano;
- Fazer que equipamentos de proteção sejam mais sensibilizados e isolem rapidamente as falhas à terra;
- Proporcionar um caminho de escoamento para terra de descargas atmosféricas;
- Usar a terra como retorno de corrente no sistema MRT;
- Escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

Existem várias maneiras para aterrar um sistema elétrico, que vão desde uma

simples haste, passando por placas de formas e tamanhos diversos, chegando às mais complicadas configurações de cabos enterrados no solo.

Um dado importante, na elaboração do projeto do aterramento, é o conhecimento das características do solo, principalmente sua resistividade elétrica. Esta, além da importância para a engenharia elétrica, em termos de proteção e segurança, auxilia também outras áreas, tais como:

- Geologia; na localização de jazidas minerais e falhas nas camadas da Terra, lençol d'água, petróleo, gás, etc;
- Arqueologia; dando subsídio para descobertas arqueológicas.

1.2 Resistividade do Solo

Vários fatores influenciam na resistividade do solo. Entre eles, pode-se ressaltar:

- tipo de solo;
- mistura de diversos tipos de solo;
- solos constituídos por camadas estratificadas com profundidades e materiais diferentes;
- teor de umidade;
- temperatura;
- compactação e pressão;
- composição química dos sais dissolvidos na água retida;
- concentração de sais dissolvidos na água retida.

As diversas combinações acima resultam em solos com características diferentes e, conseqüentemente, com valores de resistividade distintos.

Assim, solos aparentemente iguais têm resistividade diferentes.

Para ilustrar, a Tabela 1.2.1 mostra a variação da resistividade para solos de naturezas distintas.

TIPO DE SOLO	RESISTIVIDADE [$\Omega.m$]
Lama	5 a 100
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Argila seca	1.500 a 5.000
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Areia molhada	1.300
Areia seca	3.000 a 8.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000

Tabela 1.2.1: Tipo de Solo e Respectiva Resistividade

1.3 A Influência da Umidade

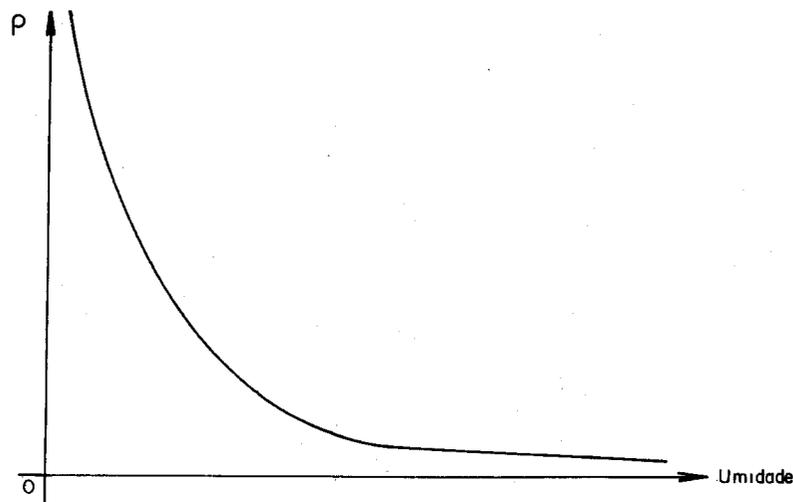
A resistividade do solo sofre alterações com a umidade. Esta variação ocorre em virtude da condução de cargas elétricas no mesmo ser predominantemente iônica. Uma percentagem de umidade maior faz com que os sais, presentes no solo, se dissolvam, formando um meio eletrolítico favorável à passagem da corrente iônica. Assim, um solo específico, com concentração diferente de umidade, apresenta uma grande variação na sua resistividade. A Tabela 1.3.1 mostra a variação da resistividade com a umidade de um solo arenoso.

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

Tabela 1.3.1: Resistividade de Um Solo Arenoso com Concentração de Umidade

Em geral, a resistividade (ρ) varia acentuadamente com a umidade no solo. Veja figura 1.3.1.

Conclui-se, portanto, que o valor da resistividade do solo acompanha os períodos de seca e chuva de uma região. Os aterramentos melhoram a sua qualidade com solo úmido, e pioram no período de seca.

Figura 1.3.1: ρ x Umidade Percentual Solo Arenoso

1.4 A Influência da Temperatura

Para um solo arenoso, mantendo-se todas as demais características e variando-se a temperatura, a sua resistividade comporta-se de acordo com a Tabela 1.4.1.

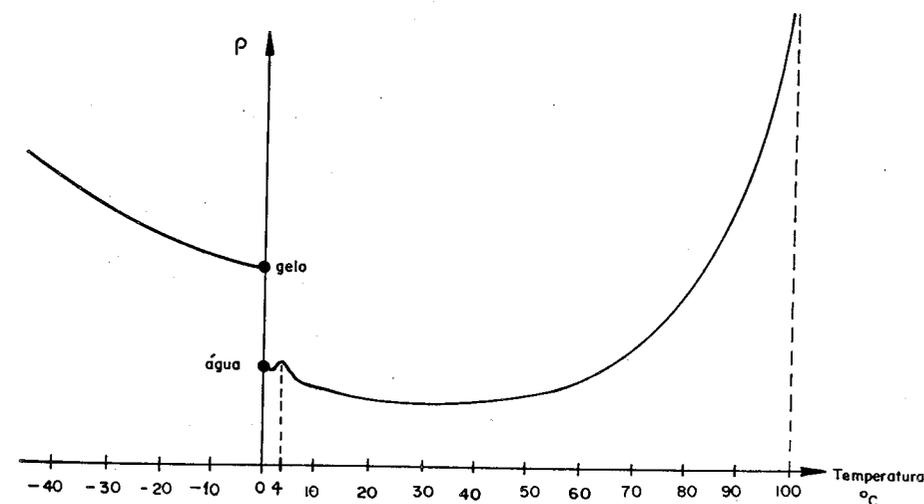
Temperatura ($^{\circ}C$)	Resistividade ($\Omega.m$) (solo arenoso)
20	72
10	99
0 (água)	138
0 (gelo)	300
- 5	790
-15	3.300

Tabela 1.4.1: Variação da Resistividade Com a Temperatura Para o Solo Arenoso

De uma maneira genérica, a performance de um determinado solo submetido à variação da temperatura pode ser expressa pela curva da figura 1.4.1.

A partir do $\rho_{\text{mínimo}}$, com o decréscimo da temperatura, e a conseqüente contração e aglutinação da água, é produzida uma dispersão nas ligações iônicas entre os grânulos de terra no solo, e que resulta num maior valor da resistividade.

Observe que no ponto de temperatura $0^{\circ}C$ (água), a curva sofre descontinuidade, aumentando o valor da resistividade no ponto $0^{\circ}C$ (gelo). Isto é devido

Figura 1.4.1: ρ x Temperatura

ao fato de ocorrer uma mudança brusca no estado da ligação entre os grânulos que formam a concentração eletrolítica.

Com um maior decréscimo na temperatura há uma concentração no estado molecular tornando o solo mais seco, aumentando assim a sua resistividade.

Já no outro extremo, com temperaturas elevadas, próximas de $100^{\circ}C$, o estado de vaporização deixa o solo mais seco, com a formação de bolhas internas, dificultando a condução da corrente, conseqüentemente, elevando o valor da sua resistividade.

1.5 A Influência da Estratificação

Os solos, na sua grande maioria, não são homogêneos, mas formados por diversas camadas de resistividade e profundidade diferentes. Essas camadas, devido à formação geológica, são em geral horizontais e paralelas à superfície do solo.

Existem casos em que as camadas se apresentam inclinadas e até verticais, devido a alguma falha geológica. Entretanto, os estudos apresentados para pesquisa do perfil do solo as consideram aproximadamente horizontais, uma vez que outros casos são menos típicos, principalmente no exato local da instalação da subestação.

Como resultado da variação da resistividade das camadas do solo, tem-se a variação da dispersão de corrente. A figura 1.5.1 apresenta o comportamento dos fluxos de dispersão de correntes em um solo heterogêneo, em torno do aterramento.

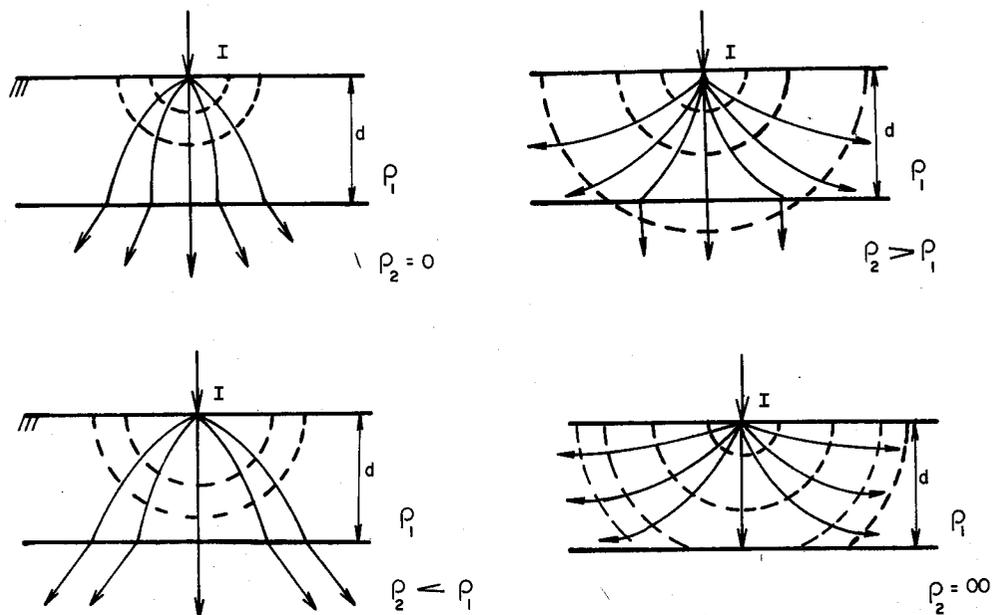


Figura 1.5.1: Estratificação do Solo em Duas Camadas

As linhas pontilhadas são as superfícies equipotenciais. As linhas cheias são as correntes elétricas fluindo no solo.

1.6 Ligação à Terra

Quando ocorre um curto-circuito envolvendo a terra, espera-se que a corrente seja elevada para que a proteção possa operar e atuar com fidelidade e precisão, eliminando o defeito o mais rapidamente possível.

Durante o tempo em que a proteção ainda não atuou, a corrente de defeito que escoou pelo solo, gera potenciais distintos nas massas metálicas e superfície do solo.

Portanto, procura-se efetuar uma adequada ligação dos equipamentos elétricos à terra, para se ter o melhor aterramento possível, dentro das condições do solo, de modo que a proteção seja sensibilizada e os potenciais de toque e passo fiquem abaixo dos limites críticos da fibrilação ventricular do coração humano.

A maneira de prover a ligação íntima com a terra é ligar os equipamentos e massas a um sistema de aterramento conveniente.

1.7 Sistemas de Aterramento

Os diversos tipos de sistemas de aterramento devem ser realizados de modo a garantir a melhor ligação com a terra.

Os tipos principais são:

- uma simples haste cravada no solo;
- hastes alinhadas;
- hastes em triângulo;
- hastes em quadrado;
- hastes em círculos;
- placas de material condutor enterradas no solo;
- fios ou cabos enterrados no solo, formando diversas configurações, tais como:
 - estendido em vala comum;
 - em cruz;
 - em estrela;
 - quadriculados, formando uma malha de terra.

O tipo de sistema de aterramento a ser adotado depende da importância do sistema de energia elétrica envolvido, do local e do custo. O sistema mais eficiente é, evidentemente, a malha de terra.

1.8 Hastes de Aterramento

O material das hastes de aterramento deve ter as seguintes características:

- ser bom condutor de eletricidade;
- deve ser um material praticamente inerte às ações dos ácidos e sais dissolvidos no solo;

- o material deve sofrer a menor ação possível da corrosão galvânica;
- resistência mecânica compatível com a cravação e movimentação do solo.

As melhores hastes são geralmente as cobreadas:

Tipo Copperweld: É uma barra de aço de secção circular onde o cobre é fundido sobre a mesma;

Tipo Encamisado por Extrusão: A alma de aço é revestida por um tubo de cobre através do processo de extrusão;

Tipo Cadweld: O cobre é, depositado eletroliticamente sobre a alma de aço.

É muito empregada também, com sucesso, a haste de cantoneira de ferro zincada.

1.9 Aterramento

Em termos de segurança, devem ser aterradas todas as partes metálicas que possam eventualmente ter contato com partes energizadas. Assim, um contato acidental de uma parte energizada com a massa metálica aterrada, estabelecerá um curto-circuito, provocando a atuação da proteção e interrompendo a ligação do circuito energizado com a massa.

Portanto, a partir do sistema de aterramento, deve-se providenciar uma sólida ligação às partes metálicas dos equipamentos. Por exemplo, em residências, devem ser aterrados os seguintes equipamentos: condicionador de ar, chuveiro elétrico, fogão, quadro de medição e distribuição, lavadora e secadora de roupas, torneira elétrica, lava-louça, refrigerador e freezer, forno elétrico, tubulação metálica, tubulação de cobre dos aquecedores, cercas metálicas longas, postes metálicos e projetores luminosos de fácil acesso.

Já na indústria e no setor elétrico, uma análise apurada e crítica deve ser feita nos equipamentos a serem aterrados, para se obter a melhor segurança possível.

1.10 Classificação dos Sistemas de Baixa Tensão em Relação à Alimentação e das Massas em Relação à Terra

A classificação é feita por letras, como segue:

Primeira Letra - Especifica a situação da alimentação em relação à terra.

T - A alimentação (lado fonte) tem um ponto diretamente aterrado;

I - Isolação de todas as partes vivas da fonte de alimentação em relação à terra ou aterramento de um ponto através de uma impedância elevada.

Segunda Letra - Especifica a situação das massas (carcaças) das cargas ou equipamentos em relação à terra.

T - Massas aterradas com terra próprio, isto é, independente da fonte;

N - Massas ligadas ao ponto aterrado da fonte;

I - Massa isolada, isto é, não aterrada.

Outras Letras - Forma de ligação do aterramento da massa do equipamento, usando o sistema de aterramento da fonte.

S - Separado, isto é, o aterramento da massa é feito com um fio (PE) separado (distinto) do neutro;

C - Comum, isto é, o aterramento da massa do equipamento é feito usando o fio neutro (PEN).

Exemplo 1.10.1: Sistema de alimentação e consumidor do tipo TN-S. Figura 1.10.1.

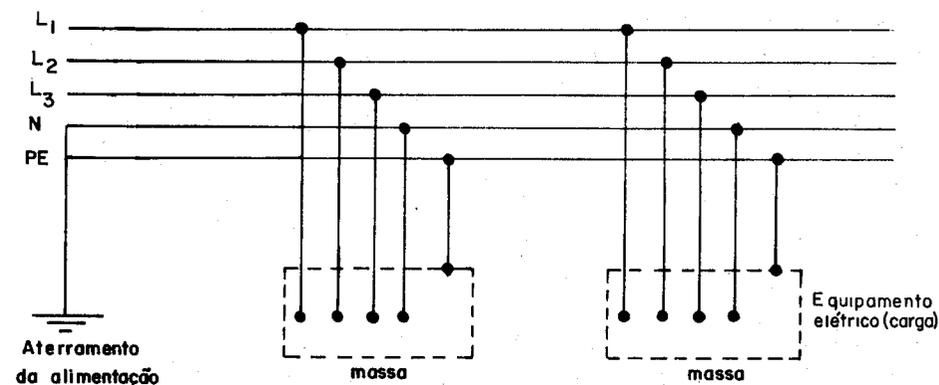


Figura 1.10.1: Sistema TN-S

Exemplo 1.10.2: Sistema tipo TN-C. Figura 1.10.2.

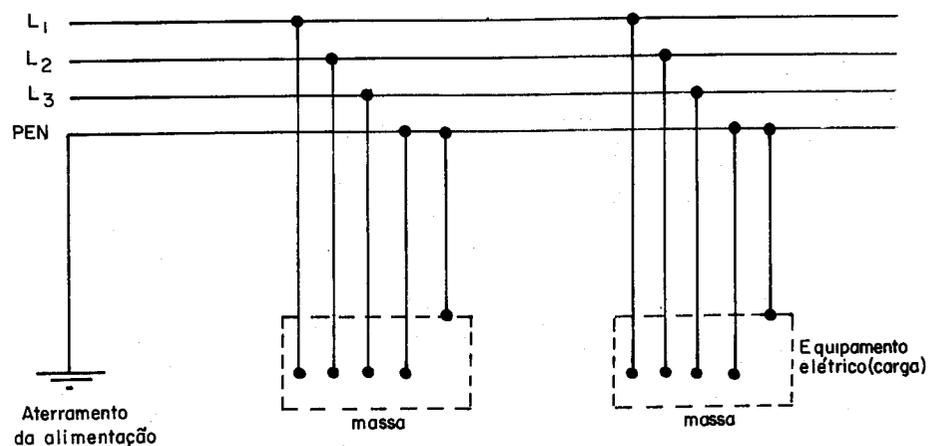


Figura 1.10.2: Sistema TN-C

Exemplo 1.10.3: Sistema TN-C-S - A fonte (alimentação) é aterrada (T), o equipamento tem o seu aterramento que usa um fio separado (S) que, após uma certa distância, é conectado ao fio neutro (C). Figura 1.10.3.

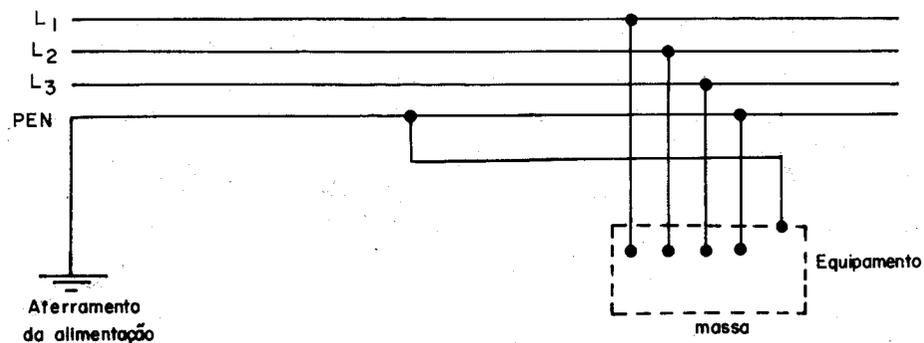


Figura 1.10.3: Sistema TN-C-S

Exemplo 1.10.4: Sistema TT - A fonte é aterrada (T) e a massa metálica da carga tem um terra separado e próprio (T). figura 1.10.4.

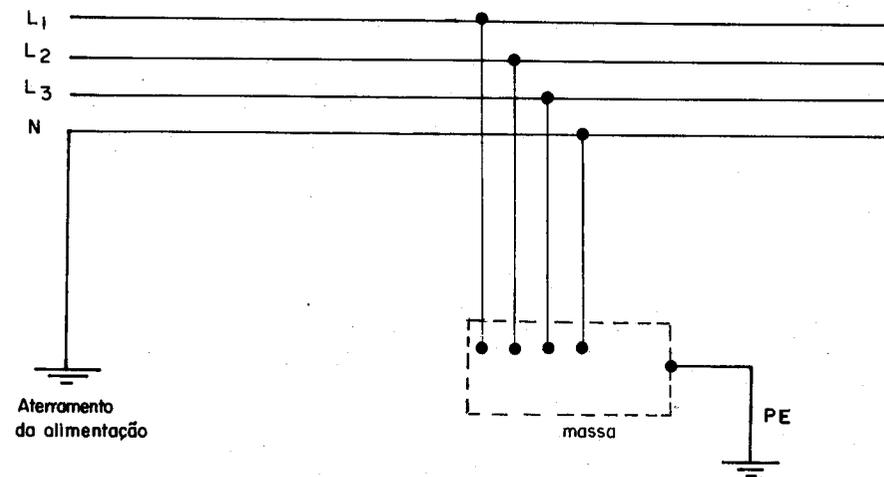


Figura 1.10.4: Sistema TT

Exemplo 1.10.5: Sistema IT - A fonte não está aterrada (I) ou aterrada por uma impedância considerável e a massa do equipamento da carga tem terra próprio (T). Figura 1.10.5.

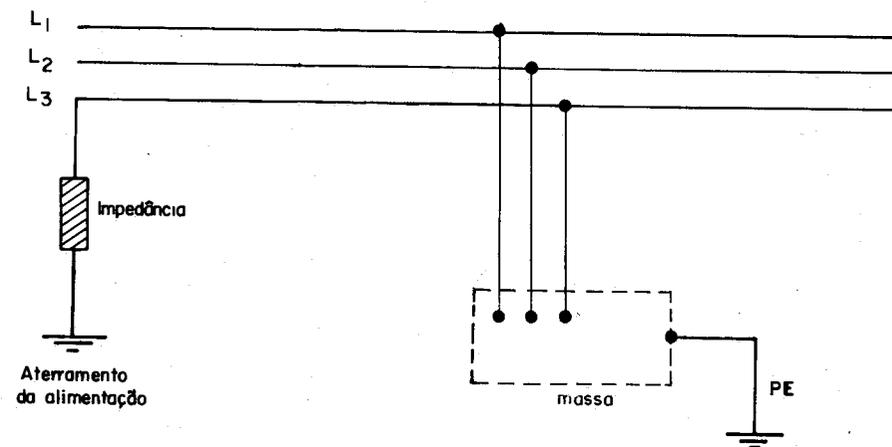


Figura 1.10.5: Sistema IT

1.11 Projeto do Sistema de Aterramento

O objetivo é aterrar todos os pontos, massas, equipamentos ao sistema de aterramento que se pretende dimensionar.

Para projetar adequadamente o sistema de aterramento deve-se seguir as seguintes etapas:

- a) Definir o local de aterramento;
- b) Providenciar várias medições no local;
- c) Fazer a estratificação do solo nas suas respectivas camadas;
- d) Definir o tipo de sistema de aterramento desejado;
- e) Calcular a resistividade aparente do solo para o respectivo sistema de aterramento;
- f) Dimensionar o sistema de aterramento, levando em conta a sensibilidade dos relés e os limites de segurança pessoal, isto é, da fibrilação ventricular do coração.

Todos os itens serão analisados no decorrer deste trabalho.

Capítulo 2

Medição da Resistividade do Solo

2.1 Introdução

Serão especificamente abordadas, neste capítulo, as características da prática da medição da resistividade do solo de um local virgem.

Os métodos de medição são resultados da análise de características práticas das equações de Maxwell do eletromagnetismo, aplicadas ao solo.

Na curva $\rho \times a$, levantada pela medição, está fundamentada toda a arte e criatividade dos métodos de estratificação do solo, o que permite a elaboração do projeto do sistema de aterramento.

2.2 Localização do Sistema de Aterramento

A localização do sistema de aterramento depende da posição estratégica ocupada pelos equipamentos elétricos importantes do sistema elétrico em questão. Cita-se, por exemplo, a localização otimizada de uma subestação, que deve ser definida levando em consideração os seguintes itens:

- Centro geométrico de cargas;
- Local com terreno disponível;
- Terreno acessível economicamente;
- Local seguro às inundações;
- Não comprometer a segurança da população.

Portanto, definida a localização da subestação, fica definido o local da malha de terra.

Já na distribuição de energia elétrica, os aterramentos situam-se nos locais da instalação dos equipamentos tais como: transformador, religador, seccionalizador, regulador de tensão, chaves, etc. No sistema de distribuição com neutro multi-aterrado, o aterramento será feito ao longo da linha a distâncias relativamente constantes.

O local do aterramento fica condicionado ao sistema de energia elétrica ou, mais precisamente, aos elementos importantes do sistema.

Escolhido preliminarmente o local, devem ser analisados novos itens, tais como:

- Estabilidade da pedologia do terreno;
- Possibilidade de inundações a longo prazo;
- Medições locais.

Havendo algum problema que possa comprometer o adequado perfil esperado do sistema de aterramento, deve-se, então, escolher outro local.

2.3 Medições no Local

Definido o local da instalação do sistema de aterramento, deve-se efetuar levantamento através de medições, para se obter as informações necessárias à elaboração do projeto.

Um solo apresenta resistividade que depende do tamanho do sistema de aterramento. A dispersão de correntes elétricas atinge camadas profundas com o aumento da área envolvida pelo aterramento.

Para se efetuar o projeto do sistema de aterramento deve-se conhecer a resistividade aparente que o solo apresenta para o especial aterramento pretendido.

A resistividade do solo, que espelha suas características, é, portanto, um dado fundamental e por isso, neste capítulo, será dada especial atenção à sua determinação.

O levantamento dos valores da resistividade é feito através de medições em campo, utilizando-se métodos de prospecção geoeletricos, dentre os quais, o mais conhecido e utilizado é o Método de Wenner.

2.4 Potencial em Um Ponto

Seja um ponto "c" imerso em um solo infinito e homogêneo, emanando uma corrente elétrica I. O fluxo resultante de corrente diverge radialmente, conforme figura 2.4.1.

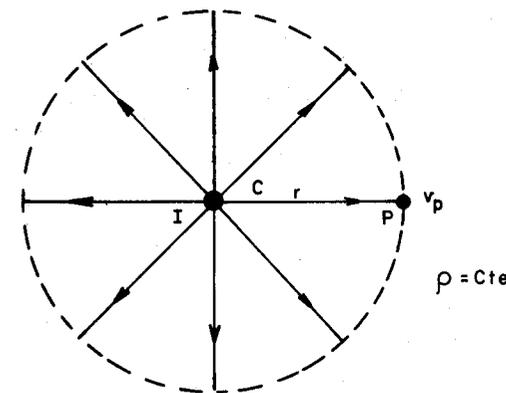


Figura 2.4.1: Linhas de Correntes Elétricas

O campo elétrico E_p no ponto p é dado pela Lei de Ohm local, abaixo:

$$E_p = \rho J_p \quad (2.4.1)$$

Onde:

$J_p \Rightarrow$ Densidade de corrente no ponto p

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

$$J_p = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (2.4.2)$$

Portanto,

$$E_p = \frac{\rho I}{4\pi r^2}$$

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

$$V_p = \int_r^\infty E dr \quad (2.4.3)$$

Onde:

$dr \Rightarrow$ é a variação infinitesimal na direção radial ao longo do raio r .

$$V_p = \int_r^\infty \frac{\rho I}{4\pi r^2} dr \quad ; \quad V_p = \frac{\rho I}{4\pi} \int_r^\infty \frac{dr}{r^2}$$

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (2.4.4)$$

2.5 Potencial em Um Ponto Sob a Superfície de Um Solo Homogêneo

Um ponto "c", imerso sob a superfície de um solo homogêneo, emanando uma corrente elétrica I , produz um perfil de distribuição do fluxo de corrente como o mostrado na figura 2.5.1.

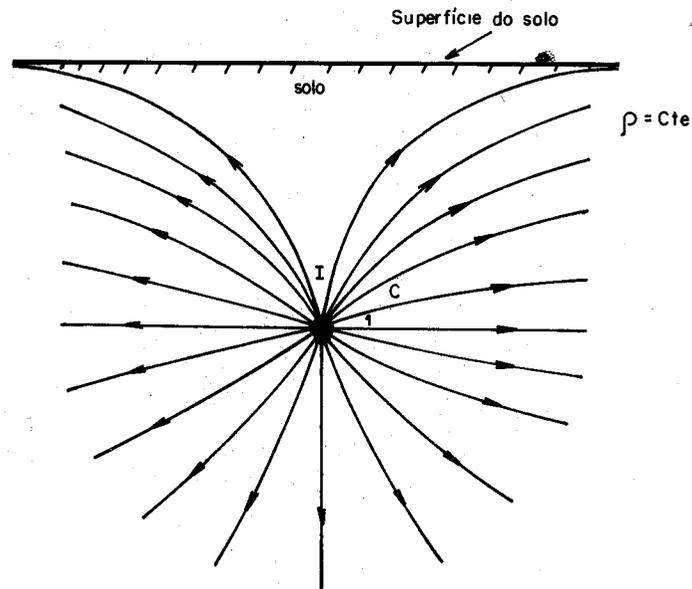


Figura 2.5.1: Linhas de Correntes Elétricas

As linhas de correntes se comportam como se houvesse uma fonte de corrente pontual simétrica em relação a superfície do solo. Figura 2.5.2.

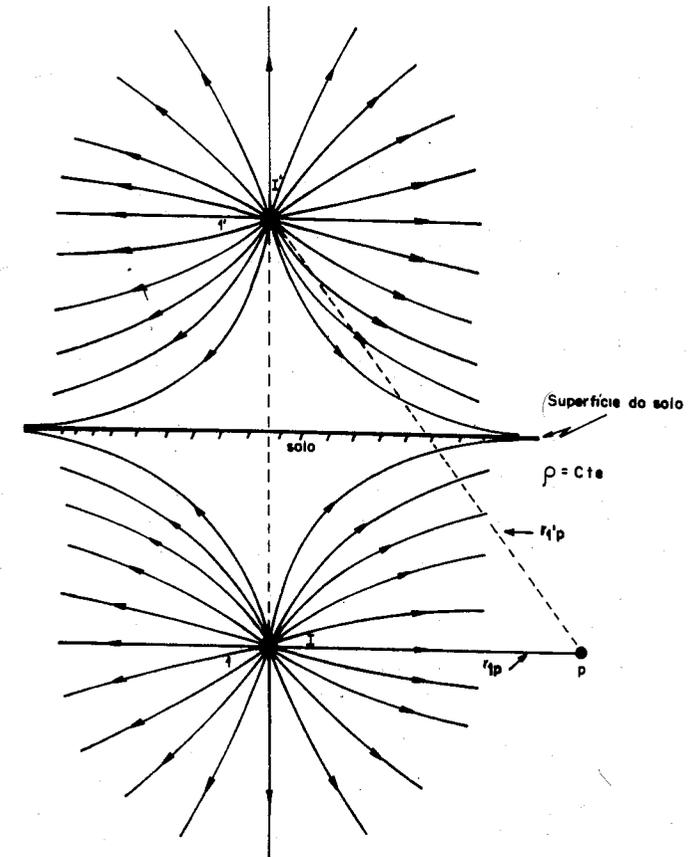


Figura 2.5.2: Ponto Imagem

O comportamento é idêntico a uma imagem real simétrica da fonte de corrente pontual. Portanto, para achar o potencial de um ponto p em relação ao infinito, basta efetuar a superposição do efeito de cada fonte da corrente individualmente, considerando todo o solo homogêneo, inclusive o da sua imagem. Assim, para calcular o potencial do ponto p , basta usar duas vezes a expressão 2.4.4.

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

Como:

$$I' = I$$

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{1p}} + \frac{1}{r_{1'p}} \right) \quad (2.5.1)$$

2.6 Método de Wenner

Para o levantamento da curva de resistividade do solo, no local do aterramento, pode-se empregar diversos métodos, entre os quais:

- Método de Wenner;
- Método de Lee;
- Método de Schlumberger - Palmer.

Neste trabalho será utilizado o Método de Wenner. O método usa quatro pontos alinhados, igualmente espaçados, cravados a uma mesma profundidade. Figura 2.6.1.

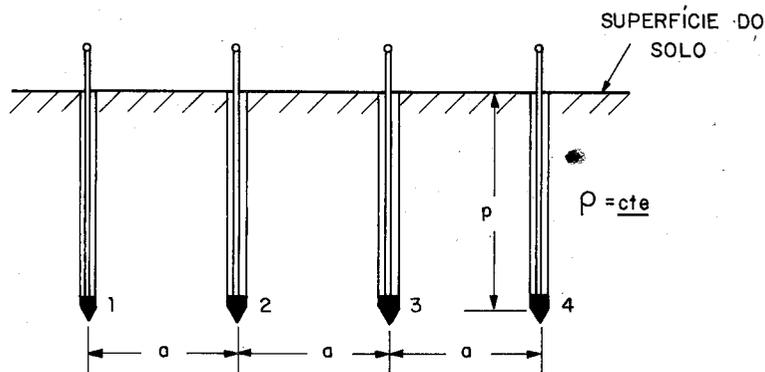


Figura 2.6.1: Quatro Hastas Cravadas no Solo

Uma corrente elétrica I é injetada no ponto 1 pela primeira haste e coletada no ponto 4 pela última haste. Esta corrente, passando pelo solo entre os pontos 1 e 4, produz potencial nos pontos 2 e 3. Usando o método das imagens, desenvolvido no item 2.5, gera-se a figura 2.6.2 e obtêm-se os potenciais nos pontos 2 e 3.

O potencial no ponto 2 é:

$$V_2 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (2.6.1)$$

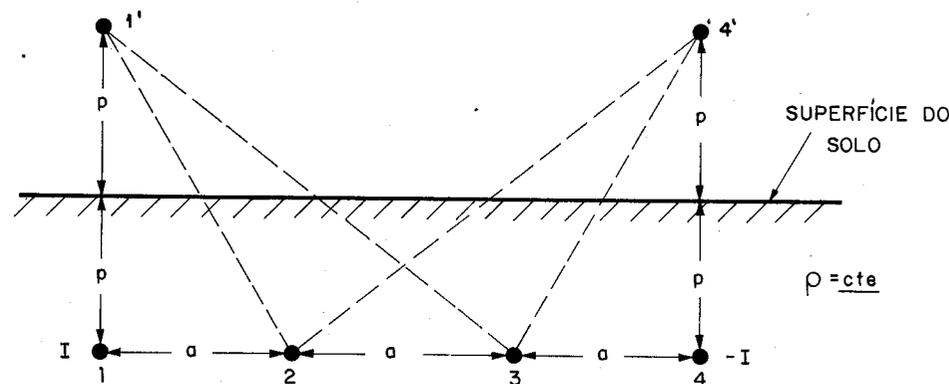


Figura 2.6.2: Imagem do Ponto 1 e 4

O potencial no ponto 3 é:

$$V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} \right] \quad (2.6.2)$$

Portanto, a diferença de potencial nos pontos 2 e 3 é:

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (2.6.3)$$

Fazendo a divisão da diferença de potencial V_{23} pela corrente I , teremos o valor da resistência elétrica R do solo para uma profundidade aceitável de penetração da corrente I .

Assim teremos:

$$R = \frac{V_{23}}{I} = \frac{\rho}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (2.6.4)$$

A resistividade elétrica do solo é dada por:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad [\Omega.m] \quad (2.6.5)$$

A expressão 2.6.5 é conhecida como Fórmula de Palmer, e é usada no Método de Wenner. Recomenda-se que:

$$\text{Diâmetro da haste} \leq 0,1 a$$

Para um afastamento entre as hastes relativamente grande, isto é, $a > 20p$, a fórmula de Palmer 2.6.5 se reduz a:

$$\rho = 2\pi a R \quad [\Omega.m] \quad (2.6.6)$$

2.7 Medição Pelo Método de Wenner

O método utiliza um **Megger**, instrumento de medida de resistência que possui quatro terminais, dois de corrente e dois de potencial.

O aparelho, através de sua fonte interna, faz circular uma corrente elétrica I entre as duas hastes externas que estão conectadas aos terminais de corrente C_1 e C_2 . Figura 2.7.1.

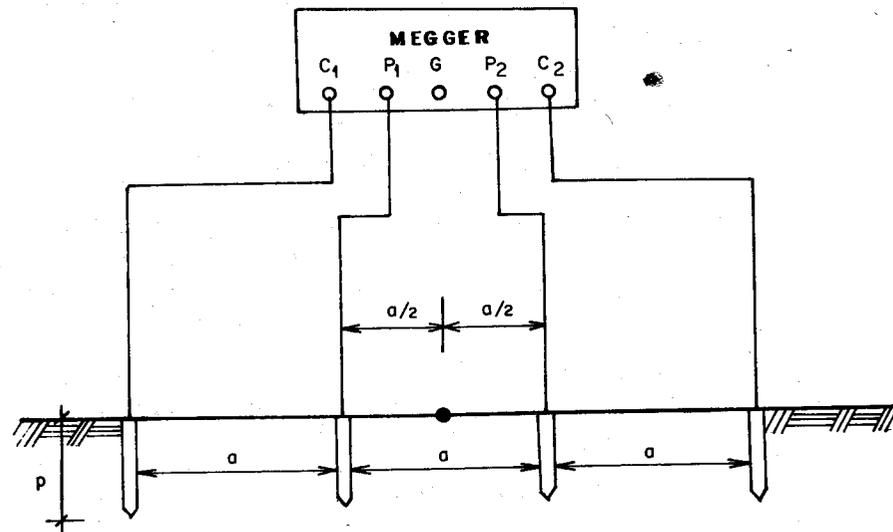


Figura 2.7.1: Método de Wenner

Onde:

R = Leitura da resistência em Ω no **Megger**, para uma profundidade "a"

a = Espaçamento das hastes cravadas no solo

p = Profundidade da haste cravada no solo

As duas hastes internas são ligadas nos terminais P_1 e P_2 . Assim, o aparelho processa internamente e indica na leitura, o valor da resistência elétrica, de acordo com a expressão 2.6.4.

O método considera que praticamente 58% da distribuição de corrente que passa entre as hastes externas ocorre a uma profundidade igual ao espaçamento entre as hastes. Figura 2.7.2.

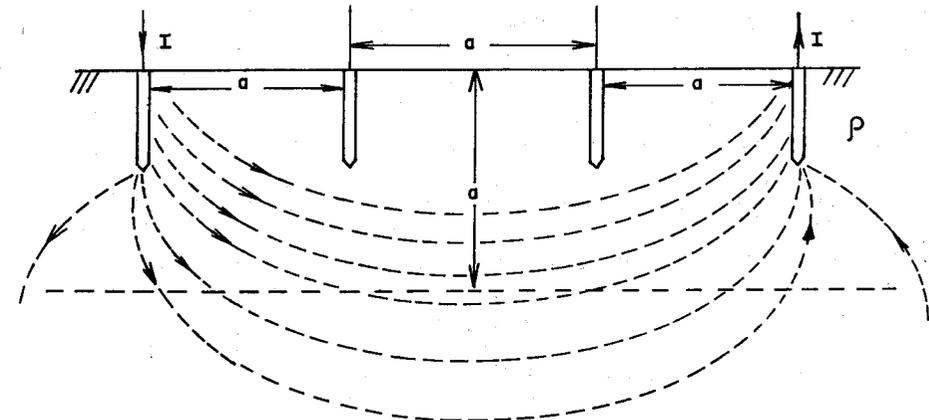


Figura 2.7.2: Penetração na profundidade "a"

A corrente atinge uma profundidade maior, com uma correspondente área de dispersão grande, tendo, em consequência, um efeito que pode ser desconsiderado. Portanto, para efeito do Método de Wenner, considera-se que o valor da resistência elétrica lida no aparelho é relativa a uma profundidade "a" do solo.

As hastes usadas no método devem ter aproximadamente 50cm de comprimento com diâmetro entre 10 a 15mm. O material que forma a haste deve seguir as mesmas considerações feitas no item 1.8.

Devem ser feitas diversas leituras, para vários espaçamentos, com as hastes sempre alinhadas.

2.8 Cuidados na Medição

Durante a medição devem ser observados os itens abaixo:

- As hastes devem estar alinhadas;
- As hastes devem estar igualmente espaçadas;
- As hastes devem estar cravadas no solo a uma mesma profundidade; recomenda-se 20 a 30cm;
- O aparelho deve estar posicionado simetricamente entre as hastes;
- As hastes devem estar bem limpas, principalmente isentas de óxidos e gorduras para possibilitar bom contato com o solo;
- A condição do solo (seco, úmido, etc) durante a medição deve ser anotada;
- Não devem ser feitas medições sob condições atmosféricas adversas, tendo-se em vista a possibilidade de ocorrências de raios;
- Não deixar que animais ou pessoas estranhas se aproximem do local;
- Deve-se utilizar calçados e luvas de isolamento para executar as medições;
- Verificar o estado do aparelho, inclusive a carga da bateria.

2.9 Espaçamentos das Hastes

Para uma determinada direção devem ser usados os espaçamentos recomendados na Tabela 2.9.1.

Espaçamento a (m)	Leitura R (Ω)	Calculado ρ [$\Omega.m$]
1		
2		
4		
6		
8		
16		
32		

Tabela 2.9.1: Espaçamentos Recomendados

Alguns métodos de estratificação do solo, que serão vistos no capítulo seguinte, necessitam mais leituras para pequenos espaçamentos, o que é feito para possibilitar a determinação da resistividade da primeira camada do solo.

2.10 Direções a Serem Medidas

O número de direções em que as medidas deverão ser levantadas depende:

- da importância do local do aterramento;
- da dimensão do sistema de aterramento;
- da variação acentuada nos valores medidos para os respectivos espaçamentos.

Para um único ponto de aterramento, isto é, para cada posição do aparelho, devem ser efetuadas medidas em três direções, com ângulo de 60° entre si, figura 2.10.1.

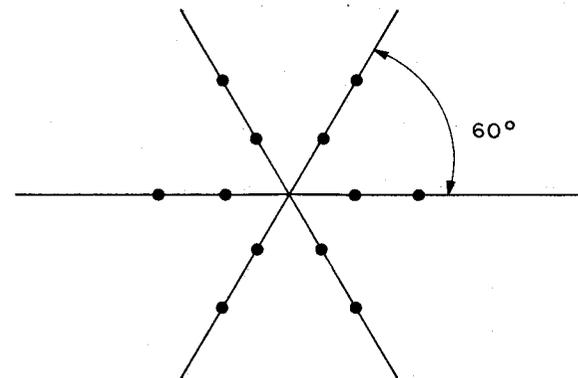


Figura 2.10.1: Direções do Ponto de Medição

Este é o caso de sistema de aterramento pequeno, com um único ponto de ligação a equipamentos tais como: regulador de tensão, religador, transformador, seccionizador, TC, TP, chaves à óleo e a SF_6 , etc.

No caso de subestações deve-se efetuar medidas em vários pontos, cobrindo toda a área da malha pretendida.

O ideal é efetuar várias medidas em pontos e direções diferentes. Mas se por algum motivo, deseja-se usar o mínimo de direções, então, deve-se pelo menos efetuar as medições na direção indicada como segue:

- na direção da linha de alimentação;
- na direção do ponto de aterramento ao aterramento da fonte de alimentação.

2.11 Análise das Medidas

Feitas as medições, uma análise dos resultados deve ser realizada para que os mesmos possam ser avaliados em relação a sua aceitação ou não. Esta avaliação é feita da seguinte forma:

1) Calcular a média aritmética dos valores da resistividade elétrica para cada espaçamento adotado. Isto é:

$$\rho_M(a_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i(a_j) \quad \forall \quad \begin{matrix} j = 1, q \\ i = 1, n \end{matrix} \quad (2.11.1)$$

Onde:

$\rho_M(a_j)$ \Rightarrow Resistividade média para o respectivo espaçamento a_j

n \Rightarrow Número de medições efetuadas para o respectivo espaçamento a_j

$\rho_i(a_j)$ \Rightarrow Valor da i -ésima medição da resistividade com o espaçamento a_j

q \Rightarrow Número de espaçamentos empregados

2) Proceder o cálculo do desvio de cada medida em relação ao valor médio como segue:

$$|\rho_i(a_j) - \rho_M(a_j)| \quad \forall \quad \begin{matrix} i = 1, n \\ j = 1, q \end{matrix}$$

Observação (a): Deve-se desprezar todos os valores da resistividade que tenham um desvio maior que 50% em relação a média, isto é:

$$\frac{|\rho_i(a_j) - \rho_M(a_j)|}{\rho_M(a_j)} \cdot 100 \geq 50\% \quad \forall \quad \begin{matrix} i = 1, n \\ j = 1, q \end{matrix}$$

Observação (b): Se o valor da resistividade tiver o desvio abaixo de 50% o valor será aceito como representativo.

Observação (c): Se observada a ocorrência de acentuado número de medidas com desvios acima de 50%, recomenda-se executar novas medidas na região correspondente. Se a ocorrência de desvios persistir, deve-se então, considerar a área como uma região independente para efeito de modelagem.

Com a nova tabela, efetua-se o cálculo das médias aritméticas das resistividades remanescentes.

3) Com as resistividades médias para cada espaçamento, tem-se então os valores definitivos e representativos para traçar a curva $\rho \times a$, necessária ao procedimento das aplicações dos métodos de estratificação do solo, assunto este, específico do capítulo seguinte.

2.12 Exemplo Geral

Para um determinado local, sob estudo, os dados das medições de campo, relativos a vários pontos e direções, são apresentados na Tabela 2.12.1.

Espaçamento a(m)	Resistividade Elétrica Medida ($\Omega.m$)				
	1	2	3	4	5
2	340	315	370	295	350
4	520	480	<u>900</u>	550	490
6	650	580	570	610	615
8	850	914	878	905	1010
16	690	500	550	480	602
32	232	285	196	185	<u>412</u>

Tabela 2.12.1: Medições em Campo

A seguir, apresenta-se a Tabela 2.12.2 com o valor médio de cada espaçamento e o desvio relativo de cada medida, calculados a partir da Tabela 2.12.1.

Espaçamento a(m)	Desvios Relativos (%)					Resistividade Média ($\Omega.m$)	Resistividade Média Recalculada ($\Omega.m$)
	1	2	3	4	5		
2	1,7	5,6	10,77	11,67	4,79	334	334
4	11,56	18,36	<u>53,06</u>	6,46	16,66	588	510
6	7,43	4,13	5,78	0,82	1,65	605	605
8	6,73	0,28	3,66	0,70	10,81	911,4	911,4
16	22,25	11,41	2,55	14,95	6,66	564,4	564,4
32	11,45	8,77	25,19	29,38	<u>57,25</u>	262	224,5

Tabela 2.12.2: Determinação de Média e Desvios Relativos

Observando-se a Tabela 2.12.2, constata-se duas medidas sublinhadas que

apresentam desvio acima de 50%. Elas devem, portanto, ser desconsideradas. Assim, refaz-se o cálculo das médias, para os espaçamentos que tiverem medidas rejeitadas. As demais médias são mantidas. Vide última coluna da Tabela 2.12.2.

Os valores representativos do solo medido são os indicados na Tabela 2.12.3.

Espaçamento a(m)	Resistividade ($\Omega.m$)
2	334
4	510
6	605
8	911,4
16	564,4
32	224,5

Tabela 2.12.3: Resistividade do Solo Medido

Capítulo 3

Estratificação do Solo

3.1 Introdução

Serão abordados neste capítulo, várias técnicas de modelagem de solo.

Considerando as características que normalmente apresentam os solos, em virtude da sua própria formação geológica ao longo dos anos, a modelagem em camadas estratificadas, isto é, em camadas horizontais, tem produzido excelentes resultados comprovados na prática. A figura 3.1.1 mostra o solo com uma estratificação em camadas horizontais.

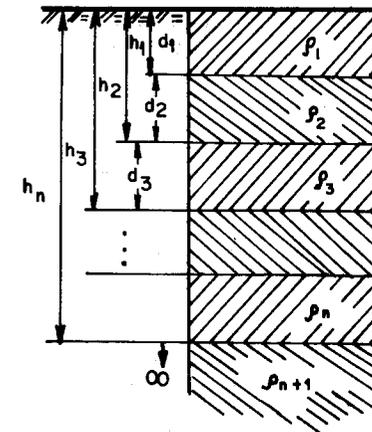


Figura 3.1.1: Solo Estratificado

Com base na curva $\rho \times a$, obtida no Capítulo 2, serão apresentados diversos métodos de estratificação do solo, entre os quais:

- Métodos de Estratificação de Duas Camadas;
- Método de Pirson;
- Método Gráfico.

Apresenta-se também, outros métodos complementares.

3.2 Modelagem do Solo de Duas Camadas

Usando as teorias do eletromagnetismo no solo com duas camadas horizontais, é possível desenvolver uma modelagem matemática, que com o auxílio das medidas efetuadas pelo **Método de Wenner**, possibilita encontrar a resistividade do solo da primeira e segunda camada, bem como sua respectiva profundidade.

Uma corrente elétrica I entrando pelo ponto A , no solo de duas camadas da figura 3.2.1, gera potenciais na primeira camada, que deve satisfazer a equação 3.2.1, conhecida como **Equação de Laplace**.

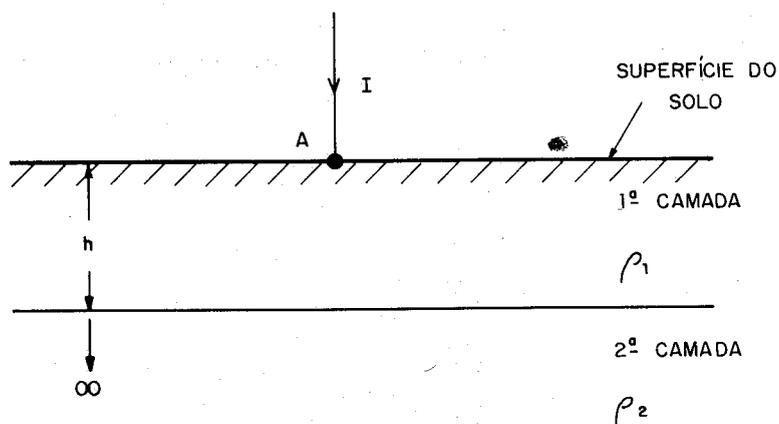


Figura 3.2.1: Solo em Duas Camadas

$$\nabla^2 V = 0 \quad (3.2.1)$$

V = Potencial na primeira camada do solo

Desenvolvendo a **Equação de Laplace** relativamente ao potencial V de qualquer ponto p da primeira camada do solo, distanciada de " r " da fonte de corrente A , chega-se a seguinte expressão:

$$V_p = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (3.2.2)$$

Onde:

V_p = É o potencial de um ponto p qualquer da primeira camada em relação ao infinito

ρ_1 = Resistividade da primeira camada

h = Profundidade da primeira camada

r = Distância do ponto p à fonte de corrente A

K = Coeficiente de reflexão, definido por:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} \quad (3.2.3)$$

ρ_2 = Resistividade da segunda camada

Pela expressão 3.2.3, verifica-se que a variação do coeficiente de reflexão é limitada entre -1 e $+1$.

$$-1 \leq K \leq +1 \quad (3.2.4)$$

3.3 Configuração de Wenner

A expressão 3.2.2 será aplicada na configuração de **Wenner**, sobre o solo de duas camadas. Ver figura 3.3.1.

Nesta configuração, a corrente elétrica I entra no solo pelo ponto A e retorna ao aparelho pelo ponto D . Os pontos B e C são os eletrodos de potencial.

O potencial no ponto B , será dado pela superposição da contribuição da corrente elétrica entrando em A e saindo por D . Usando a expressão 3.2.2, e efetuando a superposição, tem-se:

$$V_B = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (3.3.1)$$

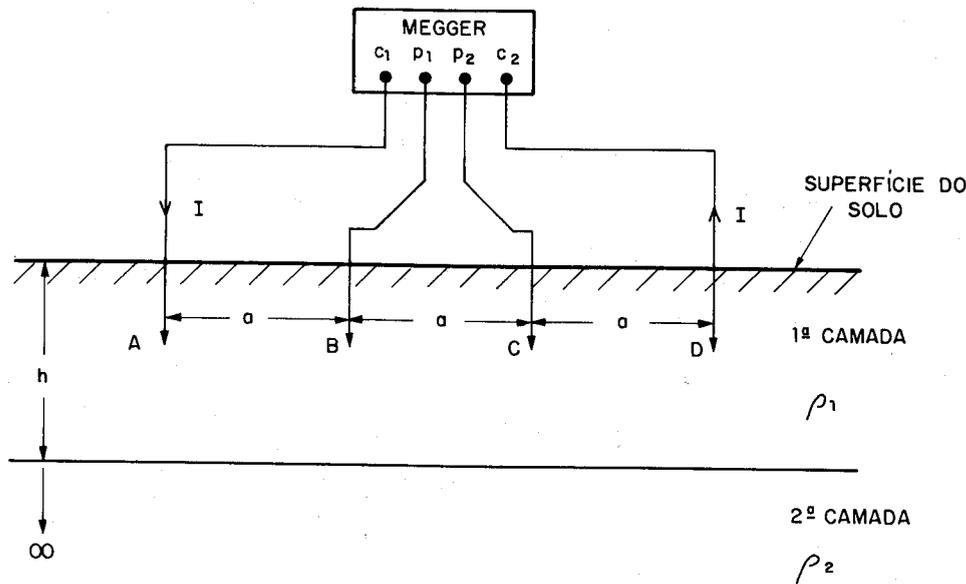


Figura 3.3.1: Configuração de Wenner no Solo de Duas Camadas

Fazendo a mesma consideração para o potencial do ponto C, tem-se:

$$V_C = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (3.3.2)$$

A diferença de potencial entre os pontos B e C é dado por:

$$V_{BC} = V_B - V_C$$

Substituindo-se as equações correspondentes, obtém-se:

$$V_{BC} = \frac{I\rho_1}{2\pi a} \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n \frac{h}{a})^2}} \right] \right\} \quad (3.3.3)$$

$$2\pi a \frac{V_{BC}}{I} = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n \frac{h}{a})^2}} \right] \right\}$$

A relação $\frac{V_{BC}}{I}$ representa o valor da resistência elétrica (R) lida no aparelho Megger do esquema apresentado. Assim, então:

$$2\pi a R = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n \frac{h}{a})^2}} \right] \right\}$$

De acordo com a expressão 2.6.6, a resistividade elétrica do solo, para o espaçamento "a" é dada por $\rho(a) = 2\pi a R$. Após a substituição, obtém-se finalmente:

$$\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n \frac{h}{a})^2}} \right] \quad (3.3.4)$$

A expressão 3.3.4 é fundamental na elaboração da estratificação do solo em duas camadas.

3.4 Método de Estratificação do Solo de Duas Camadas

Empregando estrategicamente a expressão 3.3.4 é possível obter alguns métodos de estratificação do solo para duas camadas. Entre eles, os mais usados são:

- Método de duas camadas usando curvas;
- Método de duas camadas usando técnicas de otimização;
- Método simplificado para estratificação do solo de duas camadas.

A seguir, é feita uma detalhada descrição de cada um desses métodos.

3.5 Método de Duas Camadas Usando Curvas

Como já observado, a faixa de variação do coeficiente de reflexão K é pequena, e está limitada entre -1 e +1. Pode-se então, traçar uma família de curvas de $\frac{\rho(a)}{\rho_1}$ em função de $\frac{h}{a}$ para uma série de valores de K negativos e positivos, cobrindo toda a sua faixa de variação. As curvas traçadas para K variando na faixa negativa, isto é, curva $\rho(a) \times a$ descendente, figura 3.5.1a, estão apresentadas na figura 3.5.2.

Já as curvas obtidas da expressão 3.3.4 para a curva $\rho(a) \times a$ ascendente, figura 3.5.1b, isto é, para K variando na faixa positiva, são mostradas na figura 3.5.3.

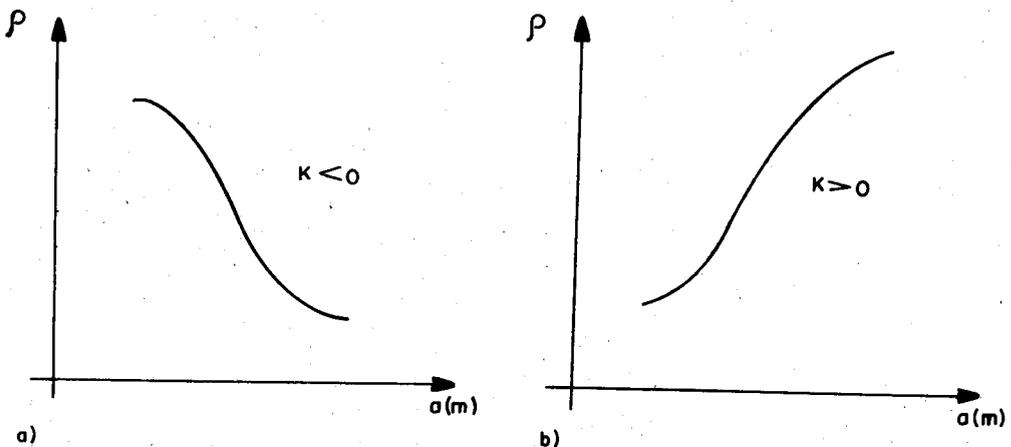


Figura 3.5.1: Curvas $\rho(a)$ x a Descendente e Ascendente

Com base na família de curvas teóricas das figuras 3.5.2 e 3.5.3, é possível estabelecer um método que faz o casamento da curva $\rho(a)$ x a , medida por Wenner, com uma determinada curva particular. Esta curva particular é caracterizada pelos respectivos valores de ρ_1 , K e h . Assim, estes valores são encontrados e a estratificação está estabelecida.

A seguir são apresentados os passos relativos ao procedimento deste método:

- 1º passo: Traçar em um gráfico a curva $\rho(a)$ x a obtida pelo método de Wenner;
- 2º passo: Prolongar a curva $\rho(a)$ x a até cortar o eixo das ordenadas do gráfico. Neste ponto, é lido diretamente o valor de ρ_1 , isto é, a resistividade da primeira camada. Para viabilizar este passo, recomenda-se fazer várias leituras pelo método de Wenner para pequenos espaçamentos. Isto se justifica porque a penetração desta corrente dá-se predominantemente na primeira camada.
- 3º passo: Um valor de espaçamento a_1 é escolhido arbitrariamente, e levado na curva para obter-se o correspondente valor de $\rho(a_1)$.
- 4º passo: Pelo comportamento da curva $\rho(a)$ x a , determina-se o sinal de K . Isto é:
 - Se a curva for descendente, o sinal de K é negativo e efetua-se o cálculo de $\frac{\rho(a_1)}{\rho_1}$;
 - Se a curva for ascendente, o sinal de K é positivo e efetua-se o cálculo de $\frac{\rho_1}{\rho(a_1)}$.

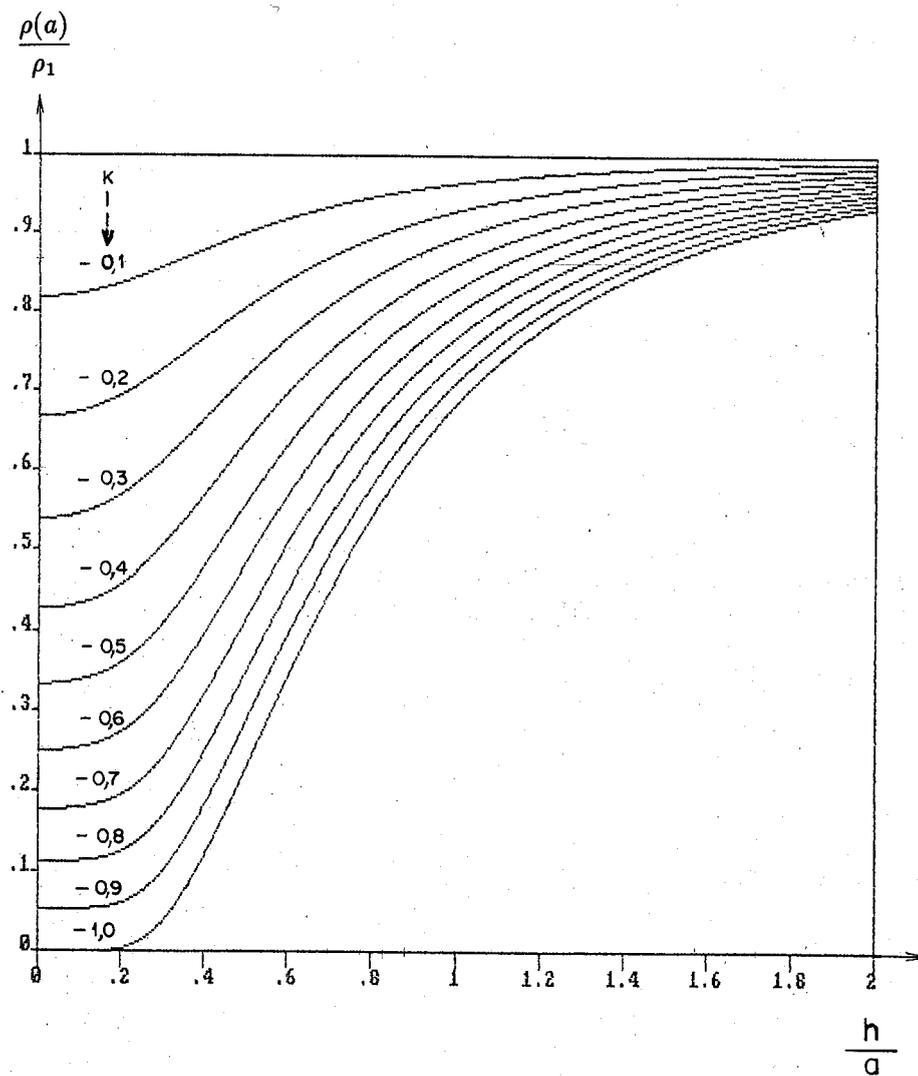


Figura 3.5.2: Curvas para K Negativos

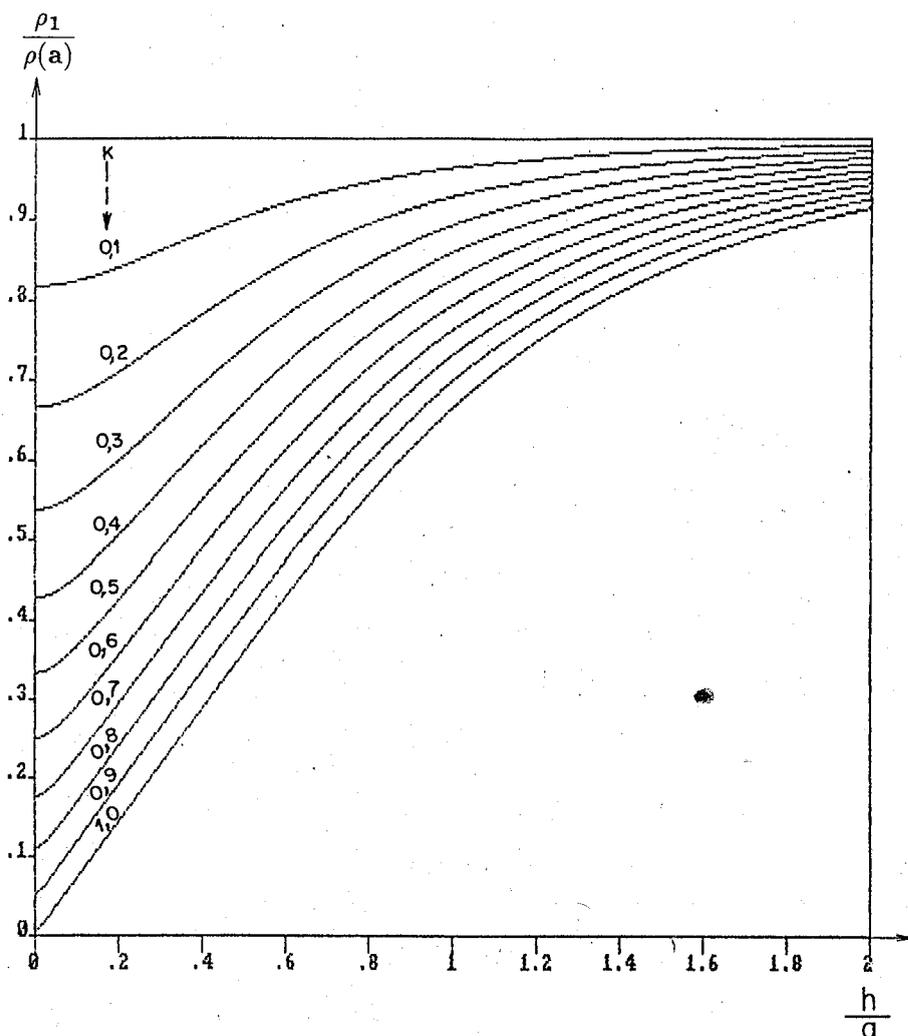


Figura 3.5.3: Curvas para K Positivos

- 5º passo: Com o valor de $\frac{\rho(a_1)}{\rho_1}$ ou $\frac{\rho_1}{\rho(a_1)}$ obtido, entra-se nas curvas teóricas correspondentes e traça-se uma linha paralela ao eixo da abscissa. Esta reta corta curvas distintas de K . Proceder a leitura de todos os específicos K e $\frac{h}{a}$ correspondentes.
- 6º passo: Multiplica-se todos os valores de $\frac{h}{a}$ encontrados no quinto passo pelo valor de a_1 do terceiro passo. Assim, com o quinto e sexto passo, gera-se uma tabela com os valores correspondentes de K , $\frac{h}{a}$ e h .
- 7º passo: Plota-se a curva $K \times h$ dos valores obtidos da tabela gerada no sexto passo.
- 8º passo: Um segundo valor de espaçamento $a_2 \neq a_1$ é novamente escolhido, e todo o processo é repetido, resultando numa nova curva $K \times h$.
- 9º passo: Plota-se esta nova curva $K \times h$ no mesmo gráfico do sétimo passo.
- 10º passo: A intersecção das duas curvas $K \times h$ num dado ponto resultará nos valores reais de K e h , e a estratificação estará definida.

Exemplo 3.5.1

Efetuar a estratificação do solo pelo método apresentado no item 3.5, correspondente à série de medidas feitas em campo pelo método de Wenner, cujos dados estão na Tabela 3.5.1.

Espaçamento (m)	Resistividade ($\Omega.m$)
1	684
2	611
4	415
6	294
8	237
16	189
32	182

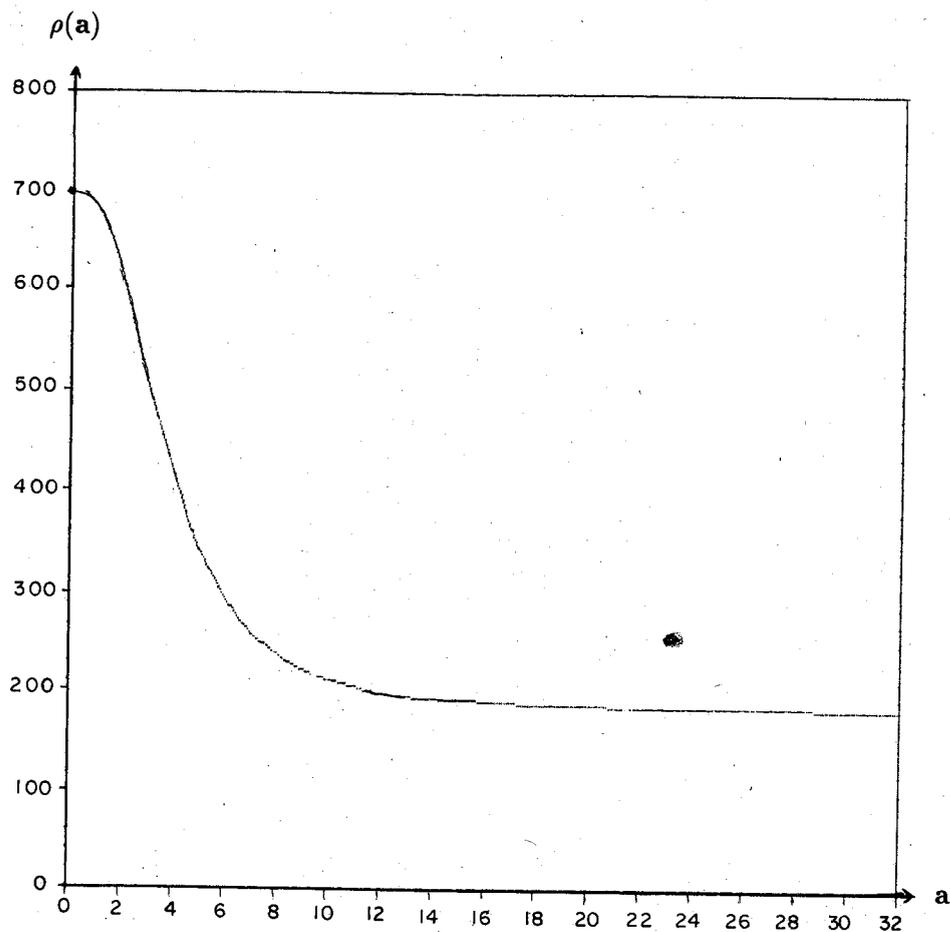
Tabela 3.5.1: Valores de Medição em Campo

A resolução é feita seguindo os passos recomendados.

1º passo: Na figura 3.5.4 está traçada a curva $\rho(a) \times a$

2º passo: Prolongando-se a curva, obtém-se

$$\rho_1 = 700 \Omega.m$$

Figura 3.5.4: Curva $\rho(a)$ x a

3º passo: Escolhe-se $a_1 = 4m$ e obtém-se $\rho(a_1) = 415 \Omega.m$.

4º passo: Como a curva $\rho(a)$ x a é descendente, K é negativo, então calcula-se a relação:

$$\frac{\rho(a_1)}{\rho_1} = \frac{415}{700} = 0,593$$

5º passo: Como K é negativo e com o valor $\frac{\rho(a_1)}{\rho_1} = 0,593$ levado na família de curvas teóricas da figura 3.5.2, procede-se a leitura dos respectivos K e $\frac{h}{a}$. Assim, gera-se a Tabela 3.5.2 proposta no sexto passo.

$a_1 = 4m$		$\frac{\rho(a_1)}{\rho_1} = 0,593$
K	$\frac{h}{a}$	$h [m]$
-0,1	-	-
-0,2	-	-
-0,3	0,263	1,052
-0,4	0,423	1,692
-0,5	0,547	2,188
-0,6	0,625	2,500
-0,7	0,691	2,764
-0,8	0,752	3,008
-0,9	0,800	3,200
-1,0	0,846	3,384

Tabela 3.5.2: Valores do Quinto e Sexto Passo

8º passo: Escolhe-se um outro espaçamento.

$$a_2 = 6m$$

$$\rho(a_2) = 294 \Omega.m$$

$$\frac{\rho(a_2)}{\rho_1} = \frac{294}{700} = 0,42$$

Constrói-se a Tabela 3.5.3.

9º passo: A figura 3.5.5 apresenta o traçado das duas curvas K x h obtidas da Tabela 3.5.2 e 3.5.3.

10º passo: A intersecção ocorre em:

$$K = -0,616$$

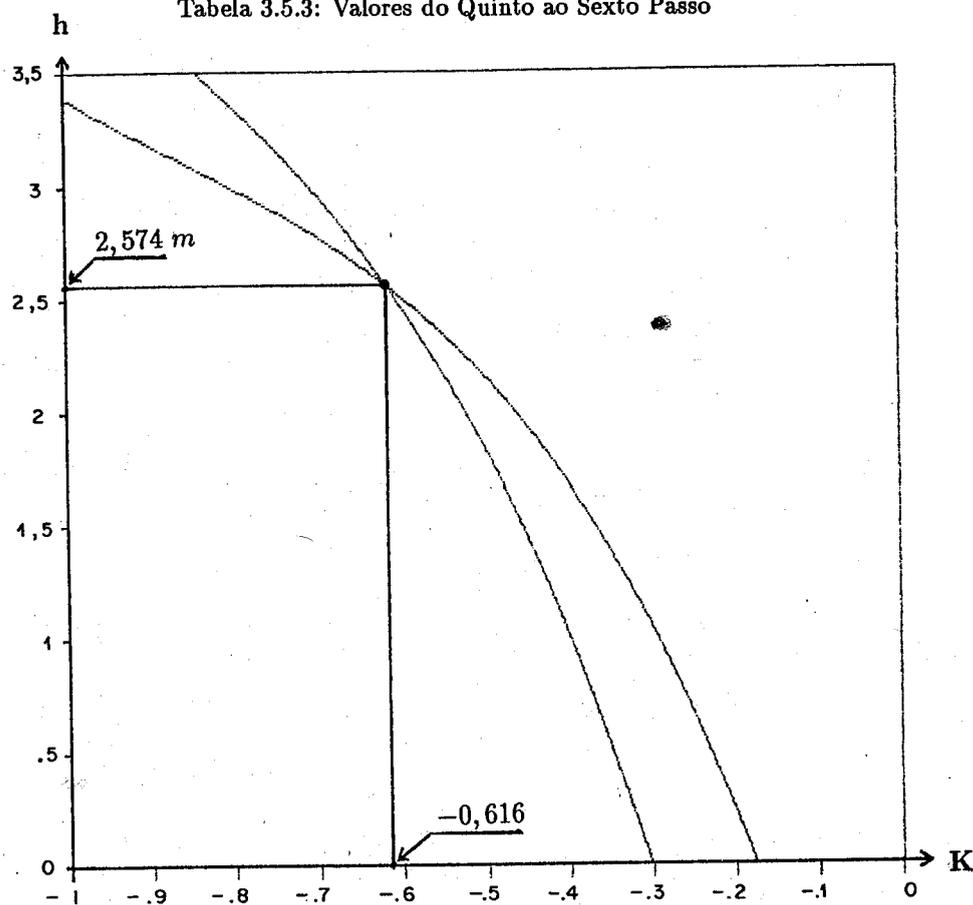
$$h = 2,574 m$$

Usando a equação 3.2.3, obtém-se o valor de ρ_2 .

$$\rho_2 = 166,36 \Omega.m$$

$a_2 = 6m$		$\frac{\rho(a_2)}{\rho_1} = 0,42$
K	$\frac{h}{a}$	h [m]
-0,1	-	-
-0,2	-	-
-0,3	-	-
-0,4	-	-
-0,5	0,305	1,830
-0,6	0,421	2,526
-0,7	0,488	2,928
-0,8	0,558	3,348
-0,9	0,619	3,714
-1,0	0,663	3,978

Tabela 3.5.3: Valores do Quinto ao Sexto Passo

Figura 3.5.5: Curvas $h \times K$

A figura 3.5.6 mostra o solo estratificado em duas camadas.

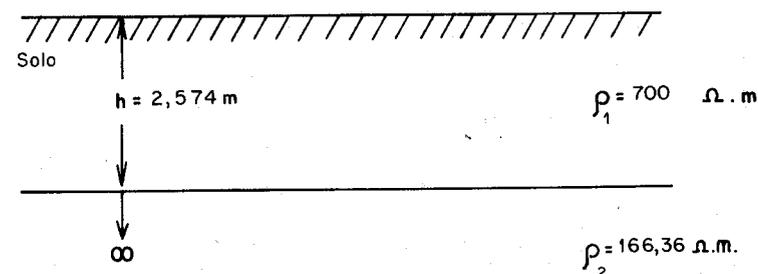


Figura 3.5.6: Solo Estratificado, Solução do Exemplo

3.6 Métodos de Duas Camadas Usando Técnicas de Otimização

A expressão 3.3.4 pode ser colocada na forma:

$$\rho(a) = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n \frac{h}{a})^2}} \right] \right\} \quad (3.6.1)$$

Pela expressão acima, para um específico solo em duas camadas, há uma relação direta entre os espaçamentos entre as hastes da configuração de Wenner e o respectivo valor de $\rho(a)$.

Na prática, pelos dados obtidos em campo, tem-se a relação de "a" e $\rho(a)$ medidos no aparelho. Os valores de $\rho(a)$ medidos e os obtidos pela fórmula 3.6.1 devem ser os mesmos. Portanto, procura-se, pelas técnicas de otimização, obter o melhor solo estratificado em duas camadas, isto é, obter os valores de ρ_1 , K e h, tal que a expressão 3.6.1 seja aquela que mais se ajusta à série de valores medidos. Assim, procura-se minimizar os desvios entre os valores medidos e calculados.

A solução será encontrada na minimização da função abaixo:

$$\text{minimizar } \sum_{i=1}^q \left\{ \rho(a_i)_{\text{medido}} - \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h}{a_i})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n \frac{h}{a_i})^2}} \right) \right] \right\}^2 \quad (3.6.2)$$

As variáveis são ρ_1 , K e h .

Esta é a expressão da minimização dos desvios ao quadrado conhecida como **mínimo quadrado**. Aplicando qualquer método de otimização multidimensional em 3.6.2, obtém-se os valores ótimos de ρ_1 , K e h , que é a solução final do método de estratificação.

Existem vários métodos tradicionais que podem ser aplicados para otimizar a expressão 3.6.2, tais como:

- Método do Gradiente;
- Método do Gradiente Conjugado;
- Método de Newton;
- Método Quase-Newton;
- Método de Direção Aleatória;
- Método de Hooke e Jeeves;
- Método do Poliedro Flexível;
- etc.

Exemplo 3.6.1

Aplicando separadamente três métodos de otimização conforme proposto pela expressão 3.6.2 ao conjunto de medidas da Tabela 3.6.1, obtidas em campo pelo método de Wenner, as soluções obtidas estão apresentadas na Tabela 3.6.2.

Espaçamento a [m]	Resistividade Medida [$\Omega.m$]
2,5	320
5,0	245
7,5	182
10,0	162
12,5	168
15,0	152

Tabela 3.6.1: Dados da Medição

Estratificação do Solo Calculada	Gradiente	Linearizado	Hooke-Jeeves
Resistividade da 1ª Camada [$\Omega.m$]	383,49	364,67	364,335
Resistividade da 2ª Camada [$\Omega.m$]	147,65	143,61	144,01
Profundidade da 1ª Camada [m]	2,56	2,82	2,827
Fator de Reflexão K	-0,44	-0,43	-0,4334

Tabela 3.6.2: Solução Encontrada.

3.7 Método Simplificado para Estratificação do Solo em Duas Camadas

Este método oferecerá resultados razoáveis somente quando o solo puder ser considerado estratificável em duas camadas e a curva $\rho(a) \times a$ tiver uma das formas típicas indicadas na figura 3.7.1 abaixo, com uma considerável tendência de saturação assintótica nos extremos e paralela ao eixo das abscissas.

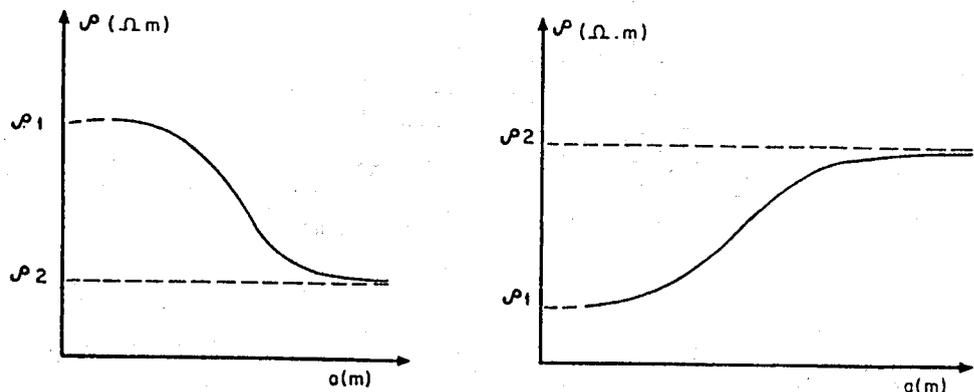


Figura 3.7.1: Curvas $\rho(a) \times a$ para Solo de Duas Camadas

A assíntota para pequenos espaçamentos é típica da contribuição da primeira camada do solo. Já para espaçamentos maiores, tem-se a penetração da corrente na segunda camada, e sua assíntota caracteriza nitidamente um solo distinto.

Pela análise das curvas $\rho(a) \times a$ da figura 3.7.1, fica caracterizado pelo prolongamento e assíntota, os valores de ρ_1 e ρ_2 . Portanto, neste solo específico, com os dois valores obtidos, fica definido de acordo com a expressão 3.3.4 o valor do parâmetro K . Assim, na expressão 3.3.4 o valor desconhecido é a profundidade da primeira camada, isto é, "h".

A filosofia deste método baseia-se em deslocar as hastes do Método de Wenner, de modo que a distância entre as hastes seja exatamente igual a "h", isto é, igual a profundidade da primeira camada. Ver figura 3.7.2.

Assim, como $a = h$ ou $\frac{h}{a} = 1$, o termo a direita da expressão 3.3.4 fica sendo a expressão 3.7.1, que será denominado de $M_{(h=a)}$.

$$\frac{\rho(a=h)}{\rho_1} = M_{(h=a)} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n)^2}} \right] \quad (3.7.1)$$

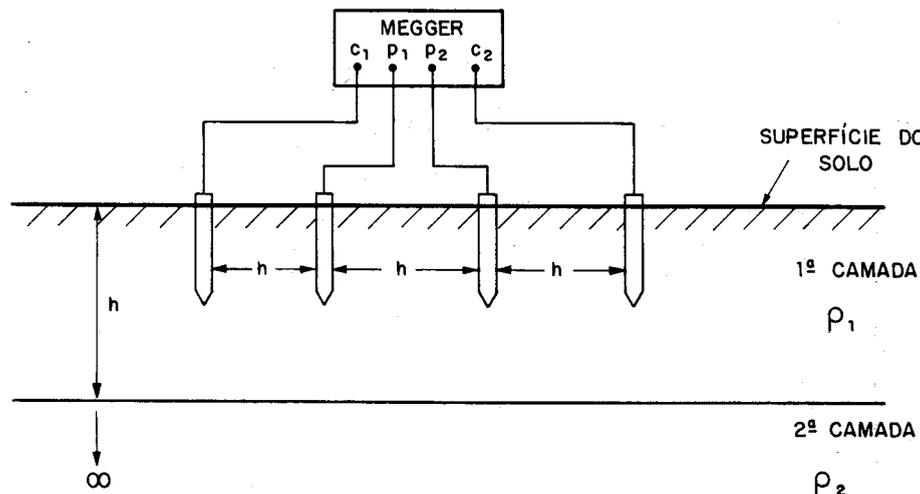


Figura 3.7.2: Espaçamento $a = h$

A expressão 3.7.1 significa que se o espaçamento "a" das hastes no Método de Wenner for exatamente igual a "h", a leitura no aparelho Megger será:

$$\rho(a=h) = \rho_1 \cdot M_{(h=a)} \quad (3.7.2)$$

Portanto, deste modo, basta levar o valor de $\rho(a=h)$ na curva $\rho(a) \times a$ e obter o valor de "a", isto é, "h". Assim, fica obtida a profundidade da primeira camada.

Esta é a filosofia deste método, para tanto, deve-se obter a curva $M_{(a=h)}$ versus K , através da expressão 3.7.1. Esta curva está na figura 3.7.3.

Assim, definida a curva de resistividade $\rho(a) \times a$, obtida pelo método de Wenner, a seqüência para obtenção da estratificação do solo é a seguinte:

- 1º passo: Traçar a curva $\rho(a) \times a$, obtida pela medição em campo usando o método de Wenner.
- 2º passo: Prolongar a curva $\rho(a) \times a$ até interceptar o eixo das ordenadas e determinar o valor de ρ_1 , isto é, da resistividade da primeira camada do solo.
- 3º passo: Traçar a assíntota no final da curva $\rho(a) \times a$ e prolongá-la até o eixo das ordenadas, o que indicará o valor da resistividade ρ_2 da segunda camada do solo.
- 4º passo: Calcular o coeficiente de reflexão K , através da expressão 3.2.3, isto é:

$$K = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1}$$

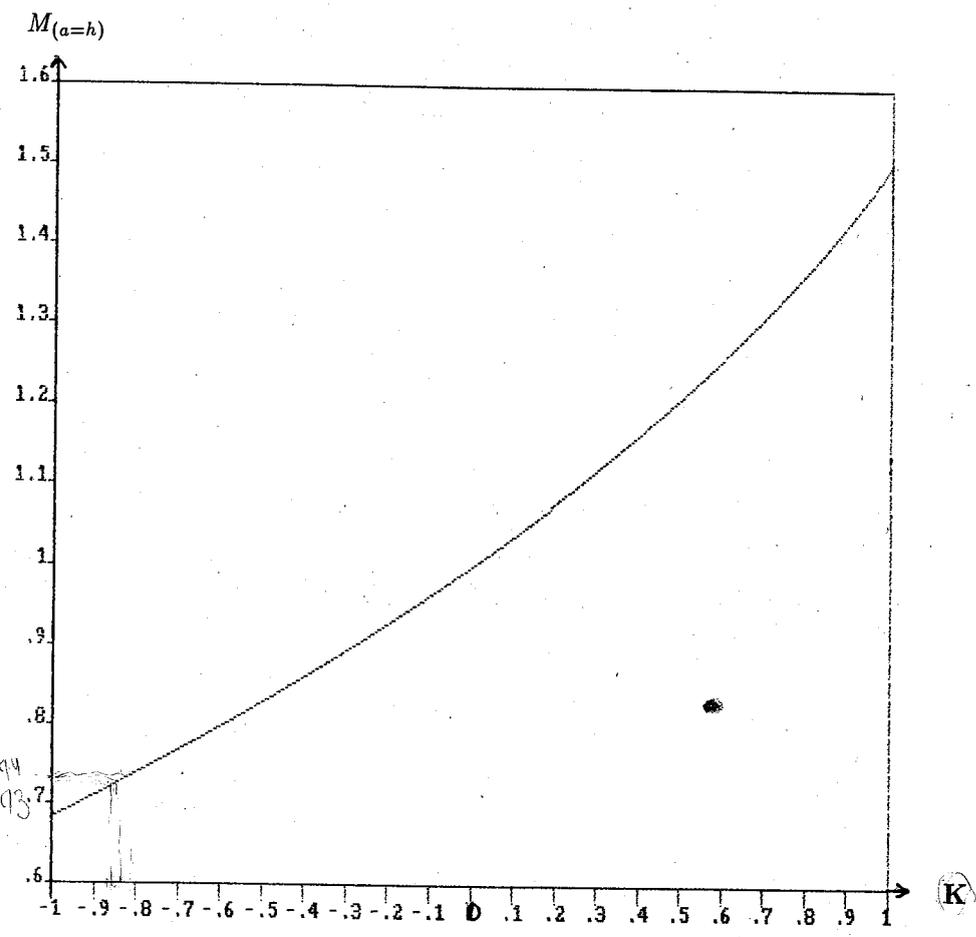


Figura 3.7.3: Curva $M_{(a=h)}$ versus K

5º passo: Com o valor de K obtido no quarto passo, determinar o valor de $M_{(a=h)}$ na curva da figura 3.7.3. O valor de $M_{(a=h)}$ está relacionado com a equação 3.3.4, já que são conhecidos ρ_1 , ρ_2 e K , sendo a profundidade "h" desconhecida.

6º passo: Calcular $\rho_{(a=h)} = \rho_1 \cdot M_{(a=h)}$.

7º passo: Com o valor de $\rho_{(a=h)}$ encontrado, entrar na curva de resistividade $\rho(a)$ x a e determinar a profundidade "h" da primeira camada do solo.

Exemplo 3.7.1

Com os valores medidos em campo pelo método de Wenner da Tabela 3.7.1, efetuar a estratificação do solo pelo método simplificado de duas camadas.

Espaçamento a(m)	Resistividade Medida ($\Omega.m$)
1	996
2	974
4	858
6	696
8	549
12	361
16	276
22	230
32	210

Tabela 3.7.1: Dados de Campo

1º passo: A curva $\rho(a)$ x a está mostrada na figura 3.7.4.

2º passo: Pelo prolongamento da curva, tem-se

$$\rho_1 = 1000 \Omega.m$$

3º passo: Traçando a assíntota, tem-se

$$\rho_2 = 200 \Omega.m$$

4º passo: Calcular o índice de reflexão K

$$K = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} = \frac{\frac{200}{1000} - 1}{\frac{200}{1000} + 1} = -0,6666$$

5º passo: Da curva da figura 3.7.3, obtém-se

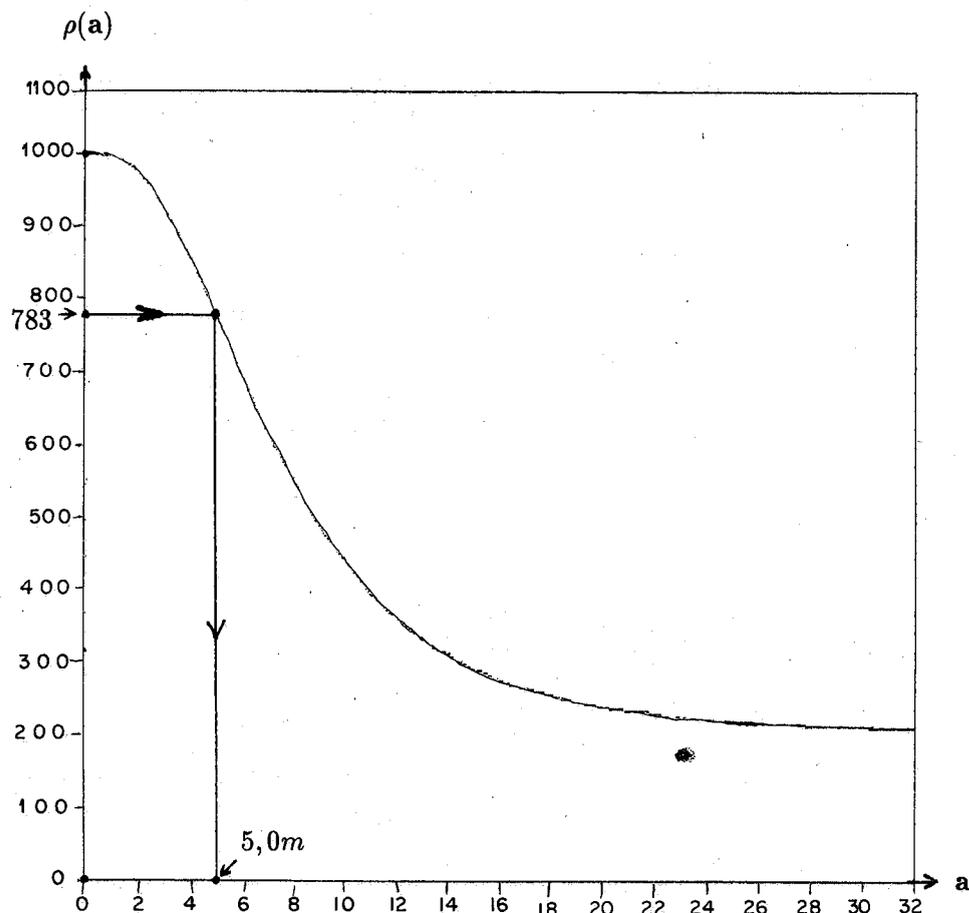
$$M_{(a=h)} = 0,783$$

6º passo: Calcular

$$\rho_{(a=h)} = \rho_1 \cdot M_{(a=h)} = 1000 \cdot 0,783 = 783 \Omega.m$$

7º passo: Com o valor de $\rho_{(a=h)}$ levado à curva $\rho(a)$ x a, obtém-se

$$h = 5,0m$$

Figura 3.7.4: Curva $\rho(a)$ x a

Assim, o solo estratificado em duas camadas é apresentado na figura 3.7.5.

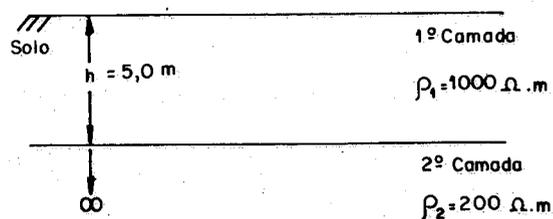


Figura 3.7.5: Estratificação do Solo

3.8 Método de Estratificação de Solos de Várias Camadas

Um solo com várias camadas apresenta uma curva $\rho(a)$ x a ondulada, com trechos ascendentes e descendentes, conforme mostrado na figura 3.8.1.

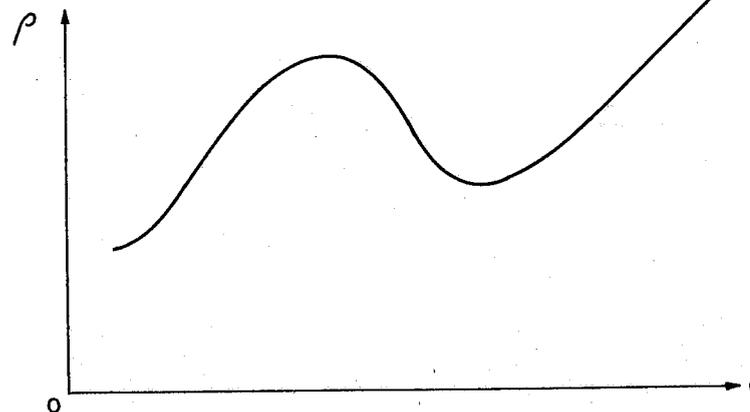


Figura 3.8.1: Solo Com Várias Camadas

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

Serão desenvolvidos os seguintes métodos para a estratificação do solo com várias camadas:

- Método de Pirson;
- Método Gráfico de Yokogawa.

3.9 Método de Pirson

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

Considerando o primeiro trecho como um solo de duas camadas, obtém-se ρ_1 , ρ_2 e h_1 . Ao analisar-se o segundo trecho, deve-se primeiramente determinar uma

resistividade equivalente, vista pela terceira camada. Assim, procura-se obter a resistividade ρ_3 e a profundidade da camada equivalente. E assim sucessivamente, seguindo a mesma lógica.

A seguir apresenta-se os passos a serem seguidos na metodologia adotada e proposta por **Pirson**:

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

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

3º passo: Prolonga-se a curva $\rho(a)$ x a até interceptar o eixo das ordenadas do gráfico. Neste ponto é lido o valor de ρ_1 , isto é, a resistividade da primeira camada.

4º passo: Em relação ao primeiro trecho da curva $\rho(a)$ x a , característica de um solo de duas camadas, procede-se então toda a seqüência indicada no método 3.5. Encontrando-se, assim, os valores de ρ_2 e h_1 .

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

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

$$\hat{h}_2 = d_1 + \hat{d}_2 = \frac{2}{3}a_t \quad (3.9.1)$$

Onde

$d_1 = h_1$ = Espessura da primeira camada

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

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

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

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

$$\hat{\rho}_2^1 = \frac{d_1 + \hat{d}_2}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{\hat{d}_2}{\rho_2}} \quad (3.9.2)$$

O $\hat{\rho}_2^1$ se apresenta como o ρ_1 do método de duas camadas.

8º passo: Para o segundo trecho da curva, repetir todo o processo de duas camadas visto no método apresentado em 3.5, considerando $\hat{\rho}_2^1$ a resistividade da primeira camada. Assim, obtém-se os novos valores estimados de $\hat{\rho}_3$ e \hat{h}_2 .

Estes valores foram obtidos a partir de uma estimativa de **Lancaster-Jones**. Se um refinamento maior no processo for desejado, deve-se refazer o processo a partir do novo \hat{h}_2 calculado, isto é:

$$\hat{h}_2 = d_1 + d_2$$

Volta-se ao sétimo passo para obter novos valores de ρ_3 e h_2 . Após, então, repete-se a partir do sexto passo, todo o processo para os outros trechos sucessores.

Exemplo 3.9.1

Efetuar a estratificação do solo pelo **Método de Pirson**, para o conjunto de medidas obtidas em campo pelo método de **Wenner**, apresentado na Tabela 3.9.1.

Espaçamento a(m)	Resistividade Medida ($\Omega.m$)
1	11.938
2	15.770
4	17.341
8	11.058
16	5.026
32	3.820

Tabela 3.9.1: Dados da Medição

1º passo: Figura 3.9.1 mostra a curva $\rho(a)$ x a .

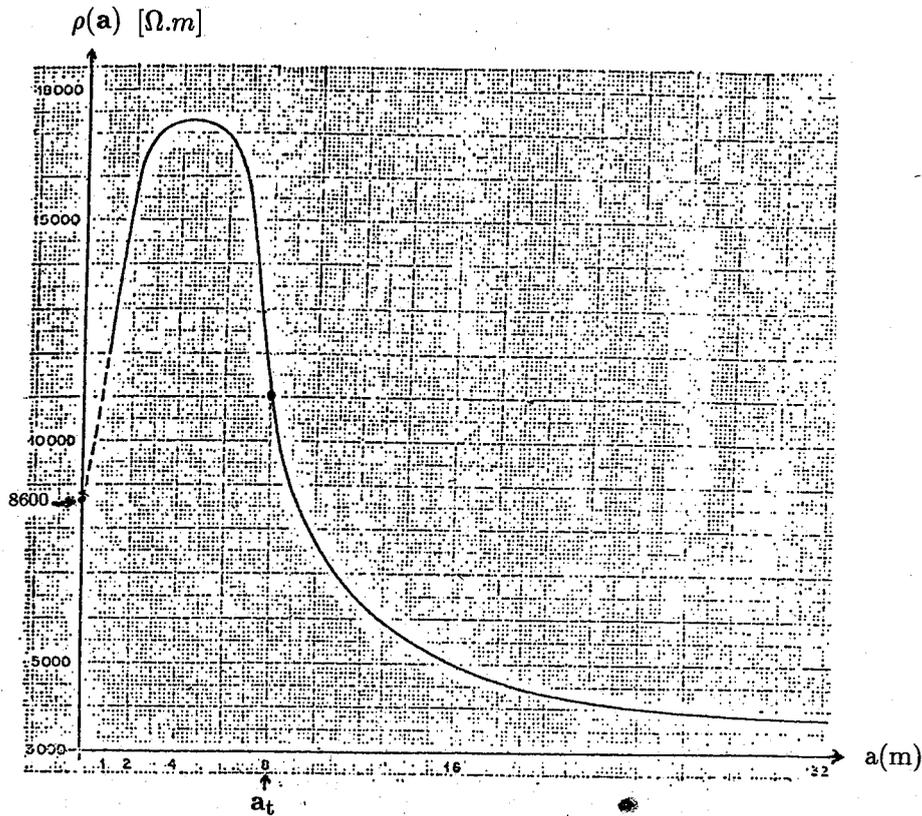
2º passo: A curva $\rho(a)$ x a é dividida em dois trechos, um ascendente e outro descendente. A separação é feita pelo ponto máximo da curva, isto é, onde $\frac{d\rho}{da} = 0$.

3º passo: Com o prolongamento da curva $\rho(a)$ x a obtém-se a resistividade da primeira camada do solo.

$$\rho_1 = 8.600 \Omega.m$$

4º passo: Após efetuados os passos indicados no método do item 3.5, obtém-se as Tabelas 3.9.2 relativa aos passos intermediários.

Para:

Figura 3.9.1: Curva $\rho(a)$ x a

$a_1 = 1m$, obtém-se $\rho(a_1) = 11.938 \Omega.m$

$a_1 = 2m$, obtém-se $\rho(a_1) = 15.770 \Omega.m$

Efetuada o traçado das duas curvas K x h , as mesmas se interceptam no ponto:

$$h_1 = d_1 = 0,64m$$

$$K_1 = 0,43$$

Calcula-se

$$\rho_2 = 21.575 \Omega.m$$

5º passo: Examinando o segundo trecho da curva, pode-se concluir que o ponto da curva com espaçamento de 8 metros, apresenta a maior inclinação. Portanto, o ponto de transição é relativo ao espaçamento de 8 metros, assim:

$$a_t = 8m$$

$a_1 = 1m \quad \frac{\rho_1}{\rho(a_1)} = 0,7204$			$a_1 = 2m \quad \frac{\rho_1}{\rho(a_1)} = 0,5475$		
K	$\frac{h}{a_1}$	h (m)	K	$\frac{h}{a_1}$	h (m)
0,2	0,23	0,23	0,2	-	-
0,3	0,46	0,46	0,3	0,05	0,10
0,4	0,60	0,60	0,4	0,28	0,56
0,5	0,72	0,72	0,5	0,40	0,80
0,6	0,81	0,81	0,6	0,49	0,98
0,7	0,89	0,89	0,7	0,57	1,14
0,8	0,98	0,98	0,8	0,65	1,30

Tabela 3.9.2: Valores Calculados

6º passo: Considerando o segundo trecho da curva $\rho(a)$ x a , estimar a profundidade da segunda camada. Aplicando-se a fórmula 3.9.1 do método de Lancaster-Jones, tem-se:

$$\hat{h}_2 = d_1 + \hat{d}_2 = \frac{2}{3} a_t$$

$$\hat{h}_2 = 0,64 + \hat{d}_2 = \frac{2}{3} \cdot 8$$

$$\hat{h}_2 = 5,4m$$

$$\hat{d}_2 = 4,76m$$

7º passo: Cálculo da resistividade média equivalente pela fórmula 3.9.2 de Hummel, tem-se

$$\hat{\rho}_2^1 = \frac{0,64 + 4,76}{\frac{0,64}{8600} + \frac{4,76}{21.575}}$$

$$\hat{\rho}_2^1 = 18.302 \Omega.m$$

8º passo: Para o segundo trecho da curva $\rho(a)$ x a , repetir novamente os passos do método do item 3.5, gerando as Tabelas 3.9.3.

Para:

$a_1 = 8m$, obtém-se $\rho(a_1) = 11.058 \Omega.m$

$a_1 = 16m$, obtém-se $\rho(a_1) = 5.026 \Omega.m$

Efetuada-se o traçado das duas curvas K x h , as mesmas interceptam-se no ponto,

$$h_2 = 5,64m$$

$$K = -0,71$$

$a_1 = 8m \quad \frac{\rho(a_1)}{\rho_1} = 0,604$			$a_1 = 16m \quad \frac{\rho(a_1)}{\rho_1} = 0,2746$		
K	$\frac{h}{a}$	h (m)	K	$\frac{h}{a}$	h (m)
-0,3	0,280	2,240	-0,3	-	-
-0,4	0,452	3,616	-0,4	-	-
-0,5	0,560	4,480	-0,5	-	-
-0,6	0,642	5,136	-0,6	0,20	3,20
-0,7	0,720	5,760	-0,7	0,34	5,44
-0,8	0,780	6,240	-0,8	0,43	6,88
-0,9	0,826	6,600	-0,9	0,49	7,84

Tabela 3.9.3: Valores Calculados

Assim,

$$\rho_3 = \rho_2^2 \frac{1+K}{1-K}$$

Substituindo-se os valores, tem-se:

$$\rho_3 = 3.103 \Omega.m$$

Portanto, a solução final foi encontrada e o solo com três camadas estratificadas é mostrado na figura 3.9.2.

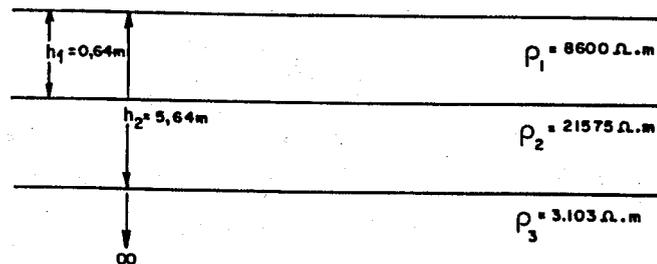


Figura 3.9.2: Solo em Três Camadas

3.10 Método Gráfico de Yokogawa

Este é um método gráfico apresentado no manual do aparelho **Yokogawa** de medição de resistência de terra. Com este método, pode-se efetuar a estratificação do solo em várias camadas horizontais com razoável aceitação.

A origem do método, baseia-se na logaritimização da expressão 2.3.4 obtida do modelo do solo de duas camadas. Assim, usando o logaritmo em ambos os lados da expressão 3.3.4, tem-se:

$$\log \left[\frac{\rho(a)}{\rho_1} \right] = \log \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n \frac{h}{a})^2}} \right] \right\} \quad (3.10.1)$$

Empregando-se a mesma filosofia usada no modelo desenvolvido no item 3.5, pode-se construir uma família de curvas teóricas de $\log \left[\frac{\rho(a)}{\rho_1} \right]$ em função de $\frac{h}{a}$ para uma série de valores de **K** dentro de toda sua faixa de variação.

Fazendo o traçado das famílias das curvas teóricas, em um gráfico com escala logarítmica, isto é, log-log, tem-se a CURVA PADRÃO, mostrada na figura 3.10.1.

A Curva Padrão obtida na escala logarítmica é similar às curvas do gráfico das figuras 3.5.2 e 3.5.3 traçadas juntas. Os valores de $\frac{\rho(a)}{\rho_1}$ estão na ordenada do gráfico 3.10.1, na abscissa estão os valores de $\frac{h}{a}$ e as curvas dos respectivos **K** estão indicadas pelo seu correspondente $\frac{\rho_2}{\rho_1}$.

Estas curvas são relativas às curvas teóricas obtidas especificamente de modelagem do solo de duas camadas. Um solo típico de duas camadas é caracterizado pelos três parâmetros: ρ_1 , ρ_2 e h . Fazendo as medições neste solo, pelo método de **Wenner** e traçando a curva $\rho(a) \times a$ em escala logarítmica, o seu formato é típico da Curva Padrão.

Fazendo manualmente o perfeito casamento da curva $\rho(a) \times a$ na escala logarítmica com uma determinada curva padrão, tem-se então a identidade estabelecida. Isto equivale a ter no método de **Wenner** o espaçamento igual à profundidade da primeira camada, isto é, $a = h$, no solo de duas camadas. Ver figura 3.10.2.

Portanto, no ponto da curva $\rho(a) \times a$ que coincide com a ordenada $\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1$ na Curva Padrão, lê-se diretamente o valor específico de $\rho(a)$, que é igual a resistividade ρ_1 da primeira camada. Este ponto é denominado de pólo **O₁** da primeira camada, que representa na curva $\rho(a) \times a$ o ponto de medição pelo método de **Wenner** que tenha o mesmo valor da resistividade da primeira camada, juntamente com seu respectivo espaçamento "a" que é idêntico à profundidade da primeira camada.

Neste ponto do pólo **O₁** lê-se, também, a profundidade da primeira camada, isto é, "h".

O traçado da Curva Padrão é feito de tal forma que, com o casamento da curva $\rho(a) \times a$, o ponto $\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1$ e $\frac{h}{a} = 1$, isto é, o pólo **O₁**, esteja na posição sobre a curva $\rho(a) \times a$ de tal forma que a medição do valor deste ponto pelo método de **Wenner**,

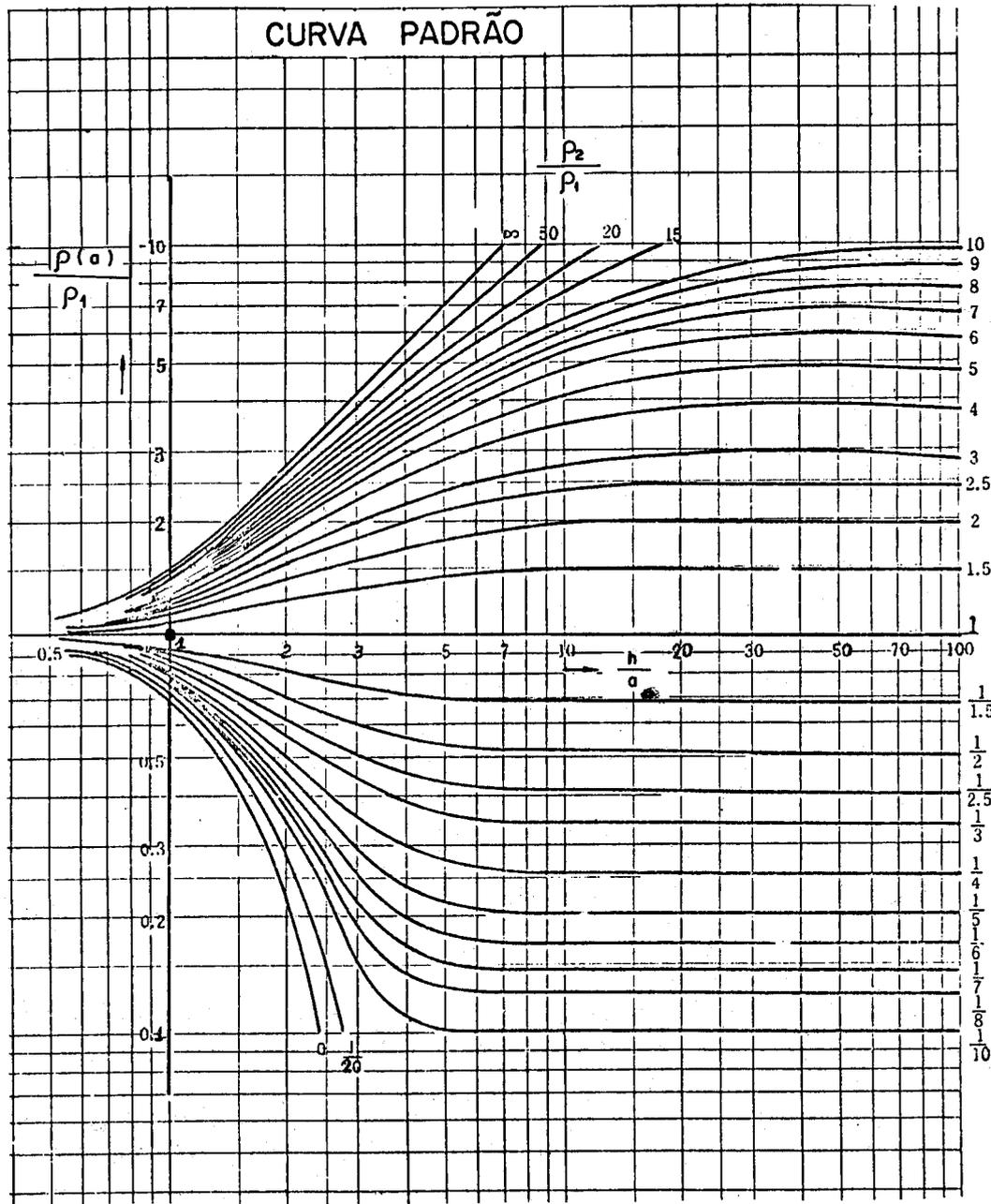


Figura 3.10.1: Curva Padrão

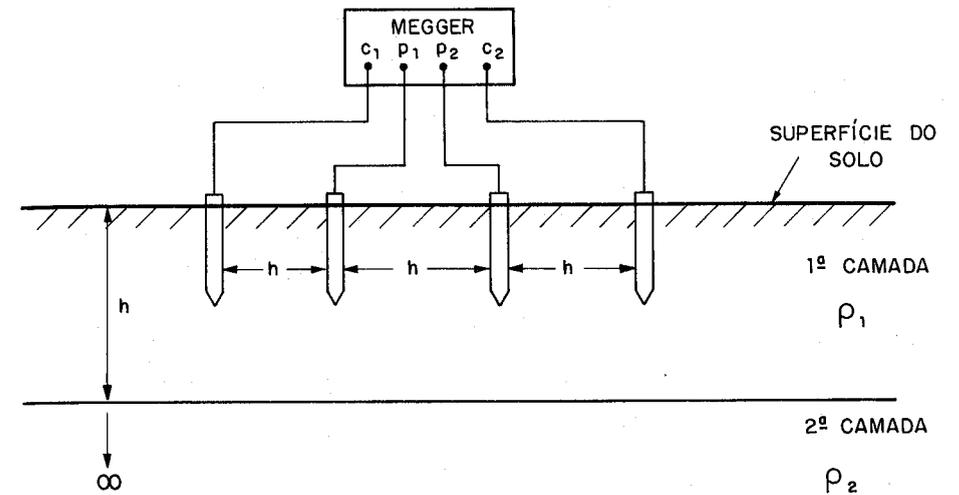


Figura 3.10.2: Espaçamento a = h

cobriria totalmente a primeira camada, isto é, já produz a solução da estratificação procurada.

No ponto estabelecido do pólo O_1 , basta efetuar a leitura de $\rho(a)$ e "a", onde:

$$\rho_1 = \rho(a) \Rightarrow \text{Valor lido no pólo } O_1 \text{ na curva } \rho(a) \times a$$

$$a = h \Rightarrow \text{Valor lido no pólo } O_1 \text{ na curva } \rho(a) \times a$$

O casamento de curvas fornece o valor de ρ_2 .

Pode-se estender este processo para solos com várias camadas, seguindo a mesma filosofia do método de **Pirson**. Deste modo, divide-se a curva $\rho(a)$ x a em trechos ascendentes e descendentes.

A partir do segundo trecho, deve-se utilizar uma estimativa da camada equivalente vista pela terceira camada, isto é feito empregando a Curva Auxiliar da figura 3.10.3.

Coloca-se sobre o gráfico $\rho(a)$ x a, a curva $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ da Curva Auxiliar que tenha a mesma relação $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ obtida pelo casamento da curva $\rho(a)$ x a com a Curva Padrão.

CURVA AUXILIAR:

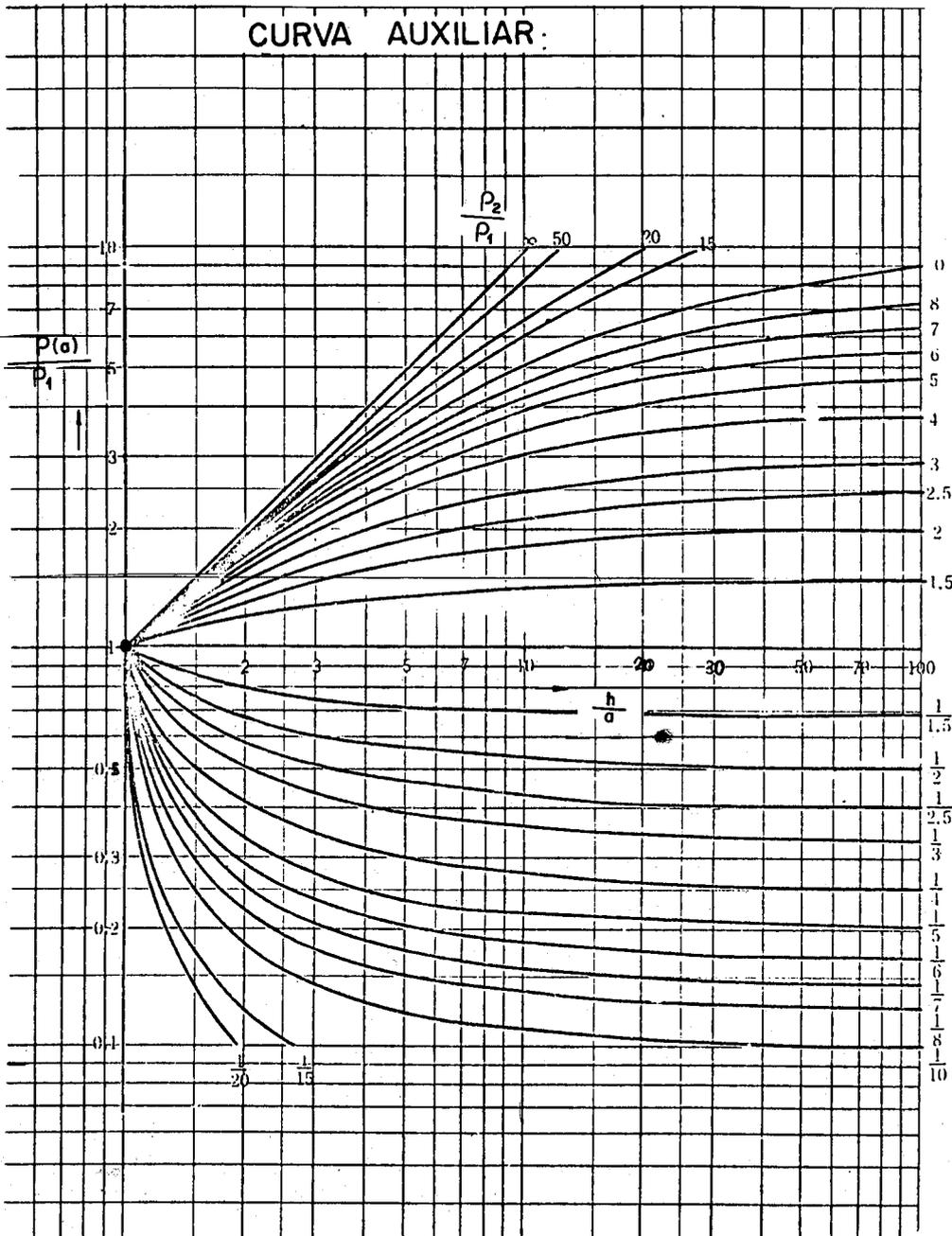


Figura 3.10.3: Curva Auxiliar

Com o pólo de origem ($\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1$ e $\frac{h}{a} = 1$) da Curva Padrão mantido sobre a Curva Auxiliar $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, procura-se ajustar o melhor casamento entre o segundo trecho da curva $\rho(a)$ x a com a da Curva Padrão. Isto feito, demarca-se no gráfico $\rho(a)$ x a o pólo O_2 .

Neste pólo O_2 , lê-se:

$\rho(a) = \rho_2^1 \Rightarrow$ Resistividade equivalente da primeira e segunda camada, isto é, vista pela terceira camada.

$a = h_2 \Rightarrow$ Profundidade do conjunto da primeira e segunda camada.

Com a relação $\frac{\rho_3}{\rho_2}$ obtida do casamento, obtém-se o ρ_3 . E assim sucessivamente.

Até o momento procurou-se apenas justificar a filosofia baseada neste método. A resolução da estratificação é puramente gráfica usando traslado de curvas, portanto, é difícil traduzir com plenitude a exemplificação do método.

Colocando-se em ordem de rotina, passa-se a descrever o método:

- 1º passo: Traçar em papel transparente a curva $\rho(a)$ x a em escala logarítmica.
- 2º passo: Dividir a curva $\rho(a)$ x a em trechos ascendentes e descendentes.
- 3º passo: Desloca-se o primeiro trecho da curva $\rho(a)$ x a sobre a CURVA PADRÃO, até obter o melhor casamento possível, isto se dá na relação $\frac{\rho_2}{\rho_1}$.
- 4º passo: Demarca-se no gráfico da curva $\rho(a)$ x a , o ponto de origem ($\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1$ e $\frac{h}{a} = 1$) da Curva Padrão, obtendo-se assim o pólo O_1 .
- 5º passo: Lê-se no ponto do pólo O_1 , os valores de ρ_1 e h_1 .
- 6º passo: Calcula-se ρ_2 pela relação $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ obtida no terceiro passo.
Até este passo, foram obtidos ρ_1 , h_1 e ρ_2 . Para continuar o processo do outro trecho sucessor da curva $\rho(a)$ x a , vai-se ao sétimo passo.
- 7º passo: Faz-se o pólo O_1 do gráfico da curva $\rho(a)$ x a coincidir com o ponto de origem da CURVA AUXILIAR. Transfere-se, isto é, traça-se com outra cor a Curva Auxiliar com relação $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ obtida no terceiro passo, sobre o gráfico da curva $\rho(a)$ x a .

8º passo: Transladando-se o gráfico $\rho(a) \times a$, de modo que a Curva Auxiliar $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, traçada no sétimo passo, percorra sempre sobre o ponto de origem da CURVA PADRÃO. Isto é feito até se conseguir o melhor casamento possível do segundo trecho da curva $\rho(a) \times a$ com a da Curva Padrão, isto se dá numa nova relação $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ denominada agora de $\frac{\rho_3}{\rho_2}$.

9º passo: Demarca-se o pólo O_2 no gráfico $\rho(a) \times a$, coincidente com o ponto de origem da Curva Padrão.

10º passo: Lê-se no ponto do pólo O_2 os valores de ρ_2^1 e h_2 .

11º passo: Calcula-se a resistividade da terceira camada ρ_3 pela relação fornecida no oitavo passo.

Até este passo foram obtidos ρ_1 , h_1 , h_2 , ρ_2 e ρ_3 . Havendo mais trechos da curva $\rho(a) \times a$, deve-se repetir o processo a partir do sétimo passo.

Exemplo 3.10.1

Efetuar a estratificação do solo pelo método gráfico de Yokogawa do respectivo conjunto de medições em campo da Tabela 3.10.1, obtidos pelo método de Wenner.

Espaçamento a(m)	Resistividade Medida ($\Omega.m$)
2	680
4	840
8	930
16	690
32	330

Tabela 3.10.1: Dados de Campo

Toda a resolução baseia-se na figura 3.10.4.

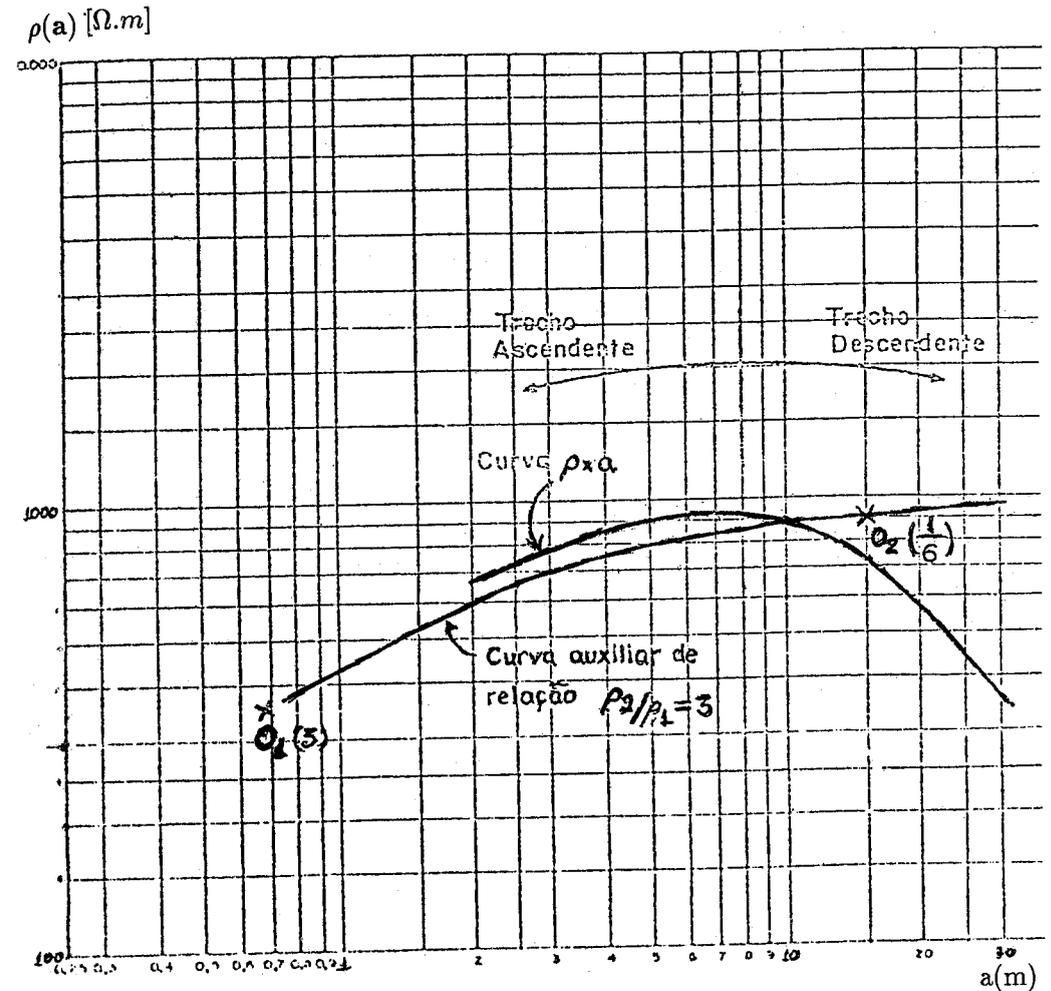


Figura 3.10.4: Resolução do Método Gráfico

No pólo O_1 , tem-se:

$$\rho_1 = 350 \Omega.m$$

$$h_1 = 0,67m$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = 3$$

$$\rho_2 = 1050 \Omega.m$$

No pólo O_2 , tem-se:

$$\begin{aligned} \rho_2^1 &= 900 \Omega.m \\ h_2 &= 15m \\ \frac{\rho_3}{\rho_2^1} &= \frac{1}{6} \quad \rho_3 = 150 \Omega.m \end{aligned}$$

O solo estratificado em três camadas está na figura 3.10.5.

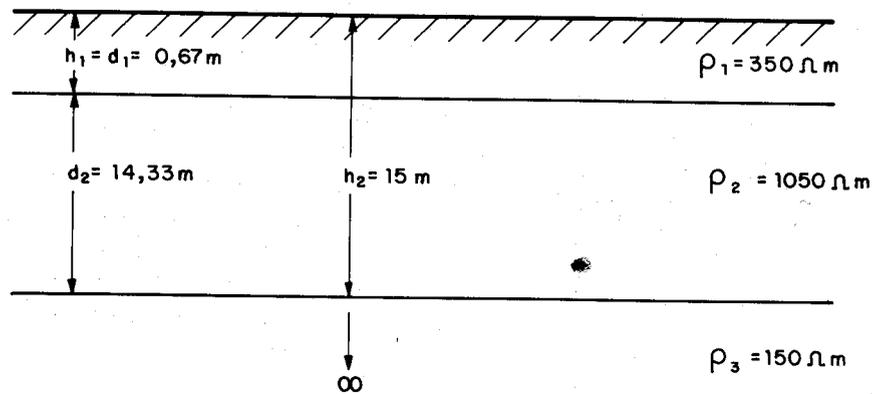


Figura 3.10.5: Solo Em Três Camadas

Capítulo 4

Sistemas de Aterramento

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os sistemas de aterramento mais simples, com geometria e configurações efetuadas por hastes, anel e fios.

Sendo a malha de terra um sistema de aterramento especial, um capítulo à parte será dedicado ao seu estudo.

O escoamento da corrente elétrica emanada ou absorvida pelo sistema de aterramento, se dá através de uma resistividade aparente que o solo apresenta para este aterramento em especial. Portanto, serão analisados, inicialmente, os sistemas de aterramento em relação a uma resistividade aparente. No Capítulo 6 será abordado o assunto sobre a resistividade aparente (ρ_a). Como o cálculo da resistividade aparente (ρ_a) depende do solo e do tipo de sistema de aterramento, serão vistos a seguir, vários tipos de sistemas de aterramento.

4.2 Dimensionamento de Um Sistema de Aterramento com Uma Haste Vertical

Uma haste cravada verticalmente em um solo homogêneo, de acordo com a figura 4.2.1, tem uma resistência elétrica que pode ser determinada pela fórmula 4.2.1.

$$R_{1haste} = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln \left(\frac{4L}{d} \right) \quad [\Omega] \quad (4.2.1)$$

Onde:

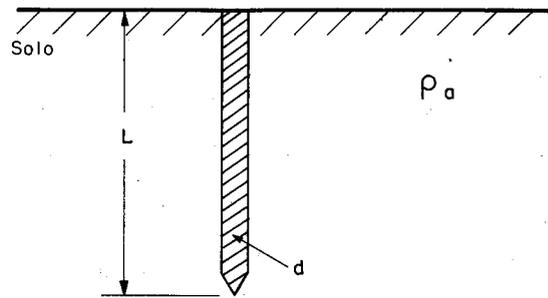


Figura 4.2.1: Haste Cravada no Solo

$\rho_a \Rightarrow$ Resistividade aparente do solo [$\Omega.m$]

$L \Rightarrow$ Comprimento da haste [m]

$d \Rightarrow$ Diâmetro do círculo equivalente à área da secção transversal da haste [m]

A figura 4.2.2, exemplifica a secção transversal.



Figura 4.2.2: Secção Transversal da Haste Circular e em Cantoneira

No caso de haste tipo cantoneira, deve-se efetuar o cálculo da área da sua secção transversal e igualar à área de um círculo. Assim:

$$S_{cantoneira} = S_{circulo} = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2$$

$$d = 2 \sqrt{\frac{S_{cantoneira}}{\pi}} \quad (4.2.2)$$

Onde:

$d \Rightarrow$ Diâmetro do círculo equivalente à área da secção transversal da cantoneira

Observação: Para haste com secção transversal diferente, o procedimento é o mesmo do caso da cantoneira, desde que a maior dimensão da secção transversal em relação ao comprimento da haste seja muito pequeno.

Exemplo 4.2.1

Determinar a resistência de terra de uma haste de 2,4m de comprimento com diâmetro 15mm, cravada verticalmente em um solo com $\rho_a = 100 \Omega.m$.

A figura 4.2.3 apresenta os dados deste exemplo.

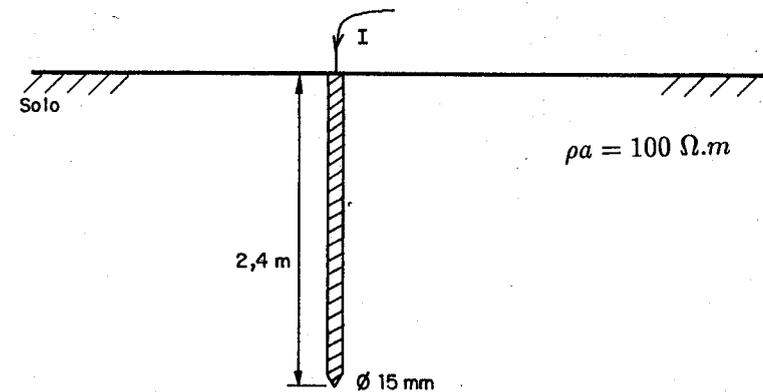


Figura 4.2.3: Dados do Exemplo

$$R_{1haste} = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln \left(\frac{4L}{d} \right)$$

$$R_{1haste} = \frac{100}{2\pi \cdot 2,4} \ln \left(\frac{4 \cdot 2,4}{15 \cdot 10^{-3}} \right)$$

$$R_{1haste} = 42,85 \Omega$$

Nem sempre o aterramento com uma única haste fornece o valor da resistência desejada. Neste caso, examinando-se a fórmula 4.2.1, pode-se saber os parâmetros que influenciam na redução do valor da resistência elétrica. Eles são:

- Aumento do diâmetro da haste;
- Colocando-se hastes em paralelo;
- Aumento do comprimento da haste;
- Redução do ρ_a utilizando tratamento químico no solo.

Será vista, a seguir, a influência de cada parâmetro, gerando assim, alternativas para reduzir a resistência do aterramento.

Pode-se observar também que a expressão 4.2.1 não leva em conta o material de que é formada a haste, mas sim do formato da cavidade que a geometria da haste forma no solo. O fluxo formado pelas linhas de corrente elétrica entra ou sai do solo, utilizando a forma da cavidade. Portanto, o R_{lhaste} refere-se somente à resistência elétrica da forma geométrica do sistema de aterramento interagindo com o solo. Assim, generalizando, a resistência elétrica de um sistema de aterramento é apenas uma parcela da resistência do aterramento de um equipamento. A resistência total vista pelo aterramento de um equipamento (figura 4.2.4) é composta:

- a) Da resistência da conexão do cabo de ligação com o equipamento;
- b) Da impedância do cabo de ligação;
- c) Da resistência da conexão do cabo de ligação com o sistema de aterramento empregado;
- d) Da resistência do material que forma o sistema de aterramento;
- e) Da resistência de contato do material com a terra;
- f) Da resistência da cavidade geométrica do sistema de aterramento com a terra.

Deste total, a última parcela, que é a resistência de terra do sistema de aterramento, é a mais importante. Seu valor é maior e depende do solo, das condições climáticas, etc.. Já as outras parcelas são menores e podem ser controladas com facilidade.

4.3 Aumento do Diâmetro da Haste

Aumentando-se o diâmetro da haste, tem-se uma pequena redução que pode ser observada analisando a fórmula 4.2.1.

Esta redução apresenta uma saturação ao aumentar-se em demasia o diâmetro da haste. A figura 4.3.1 mostra a redução em (%) da resistência da haste com o aumento do diâmetro em relação à haste original.

Convém salientar que um aumento grande do diâmetro da haste, sob o ponto de vista de custo-benefício, não seria vantajoso. Na prática, o diâmetro que se utiliza para as hastes, é aquele compatível com a resistência mecânica do cravamento no solo.

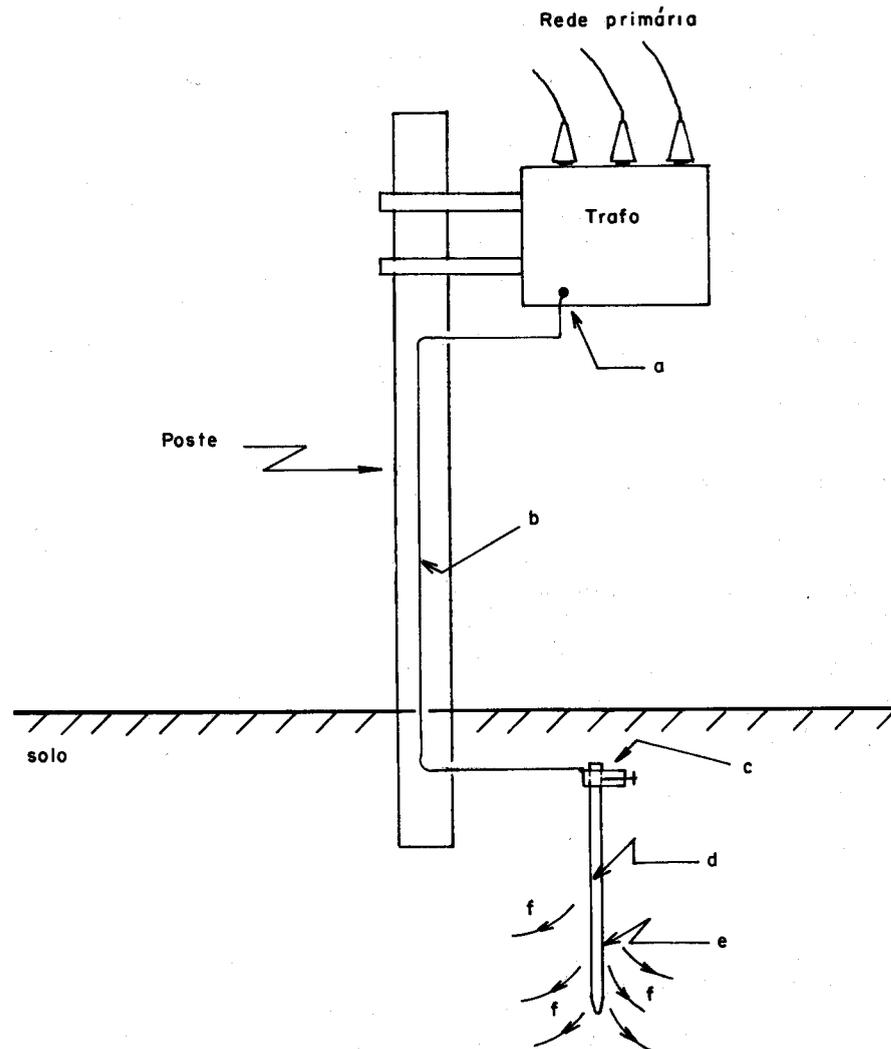


Figura 4.2.4: Resistência Elétrica Total do Equipamento

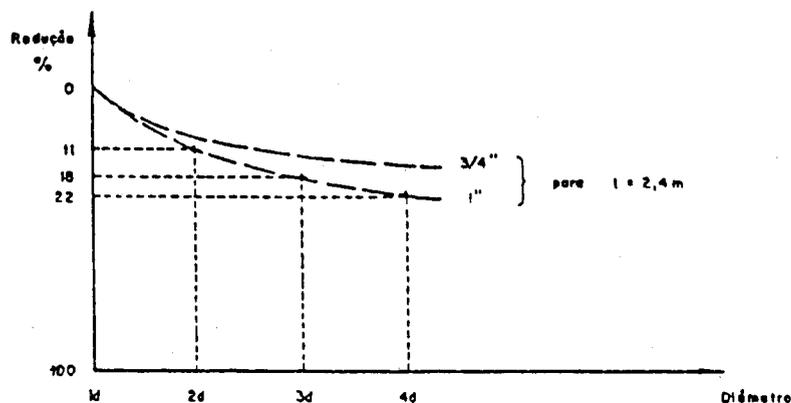


Figura 4.3.1: Redução do Valor da Resistência de Uma Haste Vertical em Função do Diâmetro da Haste

4.4 Interligação de Hastes em Paralelo

A interligação de hastes em paralelo diminui sensivelmente o valor da resistência do aterramento. O cálculo da resistência de hastes paralelas interligadas não segue a lei simples do paralelismo de resistências elétricas. Isto é devido às interferências nas zonas de atuação das superfícies equipotenciais. A figura 4.4.1 mostra as superfícies equipotenciais de uma haste vertical cravada no solo homogêneo.

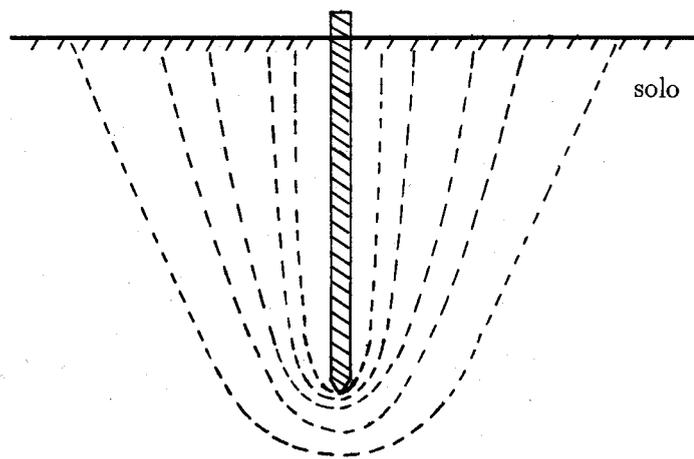


Figura 4.4.1: Superfícies Equipotenciais de Uma Haste

No caso de duas hastes cravadas no solo homogêneo, distanciadas de "a", a figura 4.4.2 mostra as superfícies equipotenciais que cada haste teria se a outra não existisse, onde pode ser observada também a zona de interferência.

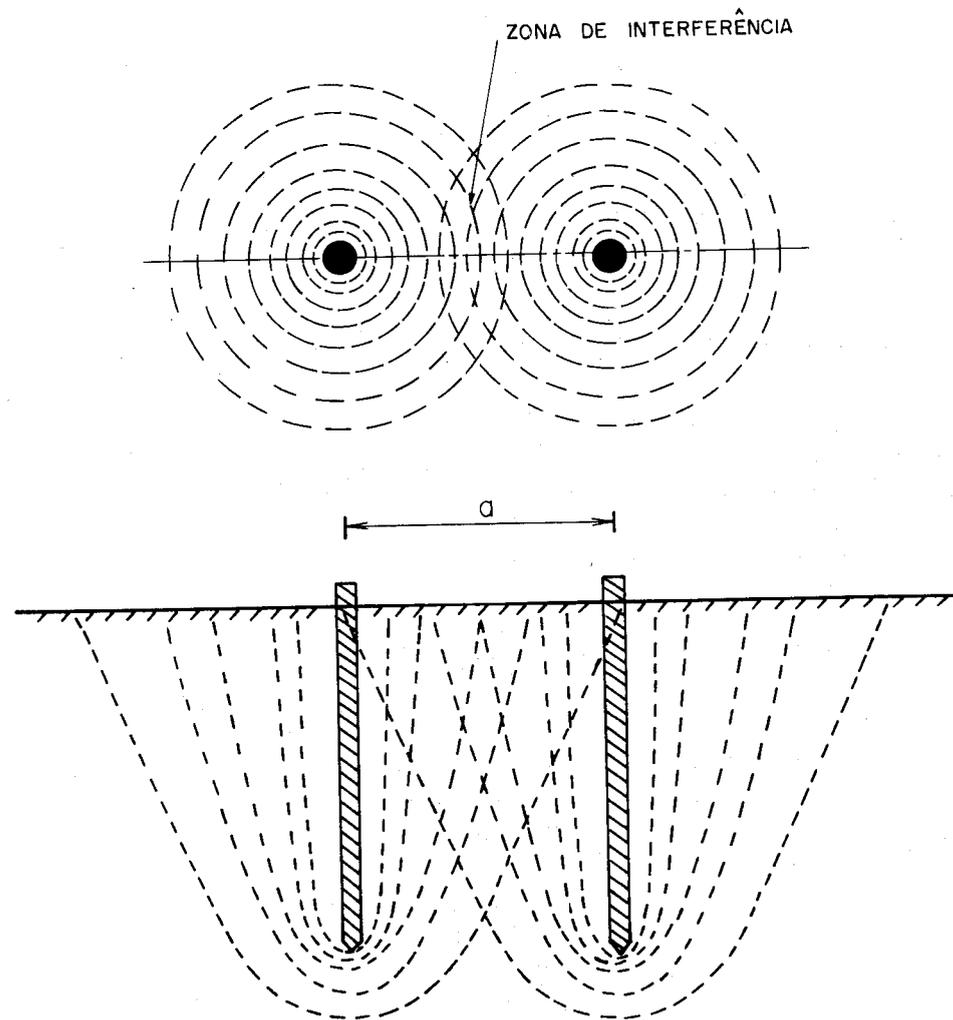


Figura 4.4.2: Zona de Interferência nas Linhas Equipotenciais de Duas Hastes

A figura 4.4.3 mostra as linhas equipotenciais resultantes do conjunto formado pelas duas hastes.

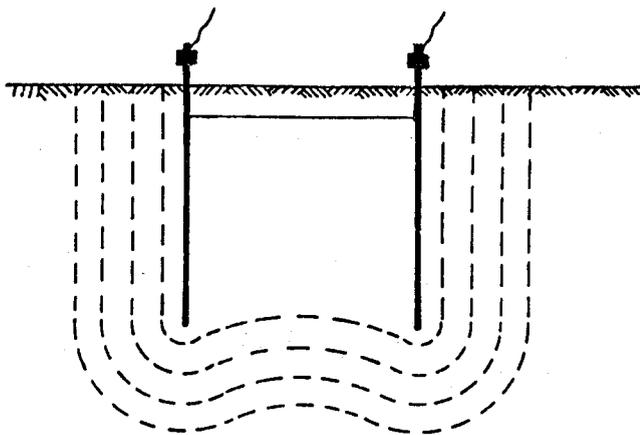


Figura 4.4.3: Superfícies Equipotenciais de Duas Hastes

A zona de interferência das linhas equipotenciais causa uma área de bloqueio do fluxo da corrente de cada haste, resultando uma maior resistência de terra individual. Como a área de dispersão efetiva da corrente de cada haste torna-se menor, a resistência de cada haste dentro do conjunto aumenta. Portanto, a resistência elétrica do conjunto de duas hastes é:

$$\frac{R_{1haste}}{2} < R_{2haste} < R_{1haste} \quad (4.4.1)$$

Observe-se que o aumento do espaçamento das hastes paralelas faz com que a interferência seja diminuída. Teoricamente, para um espaçamento infinito, a interferência seria nula, porém, um aumento muito grande do espaçamento entre as hastes não seria economicamente viável. Na prática, o espaçamento aconselhável gira em torno do comprimento da haste. Adota-se muito o espaçamento de 3 metros.

4.5 Resistência Equivalente de Hastes Paralelas

Para o cálculo da resistência equivalente de hastes paralelas, deve-se levar em conta o acréscimo de resistência ocasionado pela interferência entre as hastes. A

fórmula 4.5.1 apresenta a resistência elétrica que cada haste tem inserida no conjunto.

$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1, m \neq h}^n R_{hm} \quad (4.5.1)$$

Onde:

R_h \Rightarrow Resistência apresentada pela haste "h" inserida no conjunto considerando as interferências das outras hastes

n \Rightarrow Número de hastes paralelas

R_{hh} \Rightarrow Resistência individual de cada haste sem a presença de outras hastes (fórmula 4.2.1)

R_{hm} \Rightarrow Acréscimo de resistência na haste "h" devido à interferência mútua da haste "m", dada pela expressão 4.5.2

$$R_{hm} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{hm} + L)^2 - e_{hm}^2}{e_{hm}^2 - (b_{hm} - L)^2} \right] \quad (4.5.2)$$

e_{hm} \Rightarrow Espaçamento entre a haste "h" e a haste "m" (em metros)

L \Rightarrow Comprimento da haste [m]

A representação de b_{hm} está na figura 4.5.1, seu valor é obtido pela expressão 4.5.3.

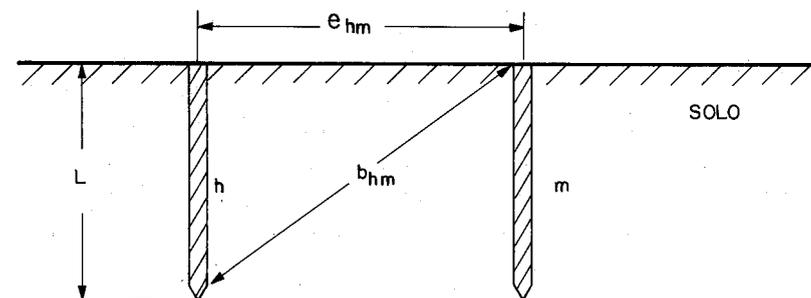


Figura 4.5.1: Parâmetros das Mútuas Entre as Hastes "h" e "m"

$$b_{hm} = \sqrt{L^2 + e_{hm}^2} \quad (4.5.3)$$

Num sistema de aterramento emprega-se hastes iguais, o que facilita a padronização na empresa, e também o cálculo da resistência equivalente do conjunto.

Fazendo o cálculo para todas as hastes do conjunto (expressão 4.5.1) tem-se os valores da resistência de cada haste:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{11} + R_{12} + R_{13} + \dots + R_{1n} \\ R_2 &= R_{21} + R_{22} + R_{23} + \dots + R_{2n} \\ &\vdots \\ R_n &= R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} + \dots + R_{nn} \end{aligned}$$

Determinada a resistência individual de cada haste dentro do conjunto, já considerados os acréscimos ocasionados pelas interferências, a resistência equivalente das hastes interligadas será a resultante do paralelismo destas. Figura 4.5.2.

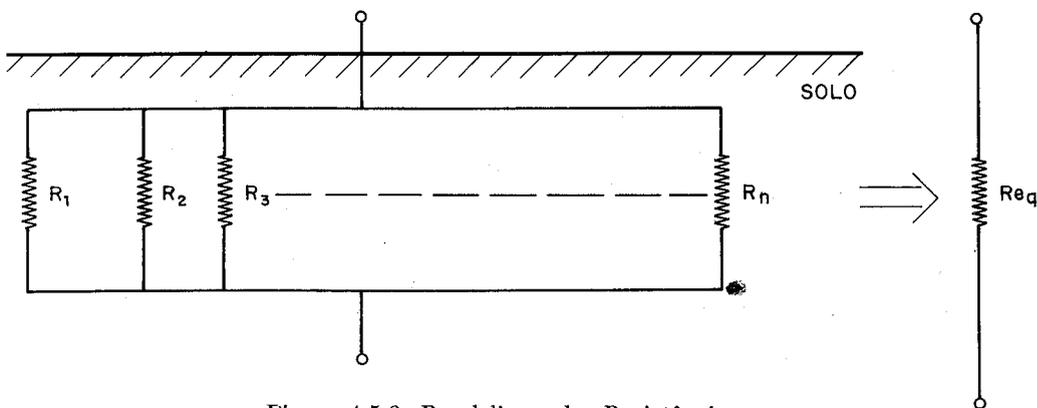


Figura 4.5.2: Paralelismo das Resistências

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (4.5.4)$$

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad (4.5.5)$$

4.5.1 Índice de Aproveitamento ou Índice de Redução (K)

É definido como a relação entre a resistência equivalente do conjunto (R_{eq}) e a resistência individual de cada haste sem a presença de outras hastes.

$$K = \frac{R_{eq}}{R_{1haste}} \quad (4.5.6)$$

Isolando R_{eq} , tem-se:

$$R_{eq} = K R_{1haste} \quad (4.5.7)$$

A expressão 4.5.7 indica que a resistência equivalente (R_{eq}) do conjunto de hastes em paralelo está reduzida de **K** vezes o valor da resistência de uma haste isoladamente.

Para facilitar o cálculo de R_{eq} os valores de **K** são tabelados, ou obtidos através de curvas, como será visto a seguir.

4.6 Dimensionamento de Sistema de Aterramento Formado Por Hastes Alinhadas em Paralelo, Igualmente Espaçadas

A figura 4.6.1 mostra um sistema de aterramento formado por hastes alinhadas em paralelo.

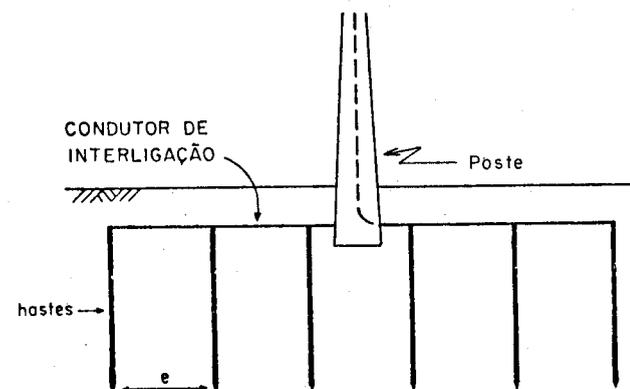


Figura 4.6.1: Hastes Alinhadas em Paralelo

É um sistema simples e eficiente, muito empregado em sistema de distribuição de energia elétrica, no aterramento de equipamentos isolados. Dentro da área urbana, efetua-se o aterramento ao longo do meio fio da calçada, o que é econômico e não prejudica o trânsito.

O cálculo da resistência equivalente de hastes paralelas alinhadas é feito usando as fórmulas 4.2.1, 4.5.1, 4.5.2 e 4.5.5, e pela fórmula 4.5.6 é calculado o coeficiente de redução (K).

Exemplo 4.6.1

Calcular a resistência equivalente do aterramento de quatro hastes alinhadas como mostra a figura 4.6.2 em função de ρa . Determinar o índice de redução (K).

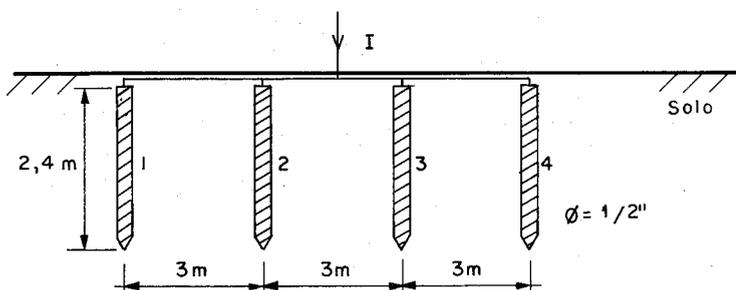


Figura 4.6.2: Sistema com Quatro Hastes Alinhadas

Escrevendo a fórmula 4.5.1 extensivamente para o sistema de quatro hastes, teremos:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} \\ R_2 &= R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24} \\ R_3 &= R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34} \\ R_4 &= R_{41} + R_{42} + R_{43} + R_{44} \end{aligned}$$

Como as hastes são todas do mesmo formato, temos:

$$R_{11} = R_{22} = R_{33} = R_{44} = \frac{\rho a}{2\pi L} \ln \left(\frac{4L}{d} \right) = \frac{\rho a}{2\pi \cdot 2,4} \ln \left(\frac{4 \cdot 2,4}{\frac{1}{2} \cdot 2,54 \cdot 10^{-2}} \right) = 0,44\rho a$$

Devido à zona de bloqueio, as resistências mútuas de acréscimo são obtidas usando a fórmula 4.5.2.

$$R_{12} = R_{21} = R_{23} = R_{32} = R_{34} = R_{43} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{12} + L)^2 - e_{12}^2}{e_{12}^2 - (b_{12} - L)^2} \right]$$

$$b_{12} = \sqrt{L^2 + e_{12}^2} = \sqrt{5,76 + 9} = \sqrt{14,76} = 3,841m$$

$$R_{12} = \frac{\rho a}{4\pi \cdot 2,4} \ln \left[\frac{(3,841 + 2,4)^2 - 3^2}{3^2 - (3,841 - 2,4)^2} \right] = 0,048\rho a$$

$$R_{13} = R_{31} = R_{42} = R_{24} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{13} + L)^2 - e_{13}^2}{e_{13}^2 - (b_{13} - L)^2} \right]$$

$$e_{13} = 6m \quad b_{13} = 6,462m$$

$$R_{13} = \frac{\rho a}{4\pi \cdot 2,4} \ln \left[\frac{(6,462 + 2,4)^2 - 6^2}{6^2 - (6,462 - 2,4)^2} \right] = 0,0258\rho a$$

$$R_{14} = R_{41} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{14} + L)^2 - e_{14}^2}{e_{14}^2 - (b_{14} - L)^2} \right]$$

$$e_{14} = 9m$$

$$b_{14} = \sqrt{9^2 + 2,4^2} = 9,314m$$

$$R_{14} = \frac{\rho a}{4\pi \cdot 2,4} \ln \left[\frac{(9,314 + 2,4)^2 - 9^2}{9^2 - (9,314 - 2,4)^2} \right] = 0,0174\rho a$$

Cálculo de R_1, R_2, R_3 e R_4

$$R_1 = 0,44\rho a + 0,048\rho a + 0,0258\rho a + 0,0174\rho a = 0,5312\rho a$$

$$R_2 = 0,048\rho a + 0,44\rho a + 0,048\rho a + 0,0258\rho a = 0,5618\rho a$$

$$R_3 = 0,0258\rho a + 0,048\rho a + 0,44\rho a + 0,048\rho a = 0,5618\rho a$$

$$R_4 = 0,0174\rho a + 0,0258\rho a + 0,048\rho a + 0,44\rho a = 0,5312\rho a$$

Devido à simetria, $R_1 = R_4$ e $R_2 = R_3$

Cálculo da Resistência Equivalente (R_{eq4h}), Usando 4.5.5

$$R_{eq4h} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}$$

$$R_{eq4h} = \frac{1}{\frac{1}{0,5312\rho a} + \frac{1}{0,5618\rho a} + \frac{1}{0,5618\rho a} + \frac{1}{0,5312\rho a}} = 0,1365\rho a$$

Índice de Redução (K)

$$K = \frac{R_{eq4h}}{R_{hh}} = \frac{0,1365\rho a}{0,44\rho a} = 0,31$$

Isto significa que a resistência equivalente de quatro hastes é igual a 31% da resistência de uma haste isolada. Para evitar todo esse caminho trabalhoso, o coeficiente de redução (K) é tabelado e está apresentado nas tabelas do Apêndice A. Nas tabelas tem-se disponível o valor da resistência de uma haste, obtida usando a fórmula 4.2.1 em função de ρa . Além da coluna do **K**, tem-se a coluna do $R_{eq} = K R_{1haste}$ em função de ρa . Assim, no exemplo 4.6.1, usando a tabela A.0.5, pode-se ter diretamente o índice de redução $K = 0,31$ e o $R_{eq4h} = 0,136\rho a$.

Analisando as tabelas do coeficiente de redução (K) para hastes alinhadas, pode-se observar que também existe uma saturação na diminuição da resistência equivalente com o aumento do número de hastes. Na prática, o número de hastes alinhadas é limitado a 6 (seis), acima do qual o sistema torna-se anti-econômico.

Exemplo 4.6.2

Um sistema de aterramento consiste de oito hastes, espaçadas de 3m, cravadas em um solo com $\rho a = 100 \Omega.m$. O comprimento das hastes é de 2,4m e o diâmetro de $\frac{1}{2}$ ". Pede-se:

a) Resistência do sistema de aterramento;

$$R_{1haste} = \frac{\rho a}{2\pi L} \ln \left(\frac{4L}{d} \right) = \frac{100}{2\pi \cdot 2,4} \ln \left(\frac{4 \cdot 2,4}{\frac{1}{2} \cdot 2,54 \cdot 10^{-2}} \right)$$

$$R_{1haste} = 0,44\rho a = 44\Omega$$

Para 8 (oito) hastes, $K = 0,174$ conforme Tabela A.0.5 do Apêndice A.

$$R_{eq8h} = K \cdot R_{1haste} = 0,174 \cdot 44 = 7,6\Omega$$

b) Quantas hastes devem ser cravadas para ter-se uma resistência máxima de 10Ω ?

$$R_{eq} \leq 10\Omega$$

$$R_{eq} = K R_{1haste} \leq 10$$

$$K \leq \frac{10}{44} \rightarrow K \leq 0,227$$

Da Tabela A.0.5 obtém-se 6 (seis) hastes ou mais.

c) Fazer uma curva $R_{eq} \times N^{\circ}$ de hastes em paralelo com $e = 3m$ para as hastes dadas.

Usando sistematicamente a Tabela A.0.5, efetua-se a curva que está apresentada na figura 4.6.3.

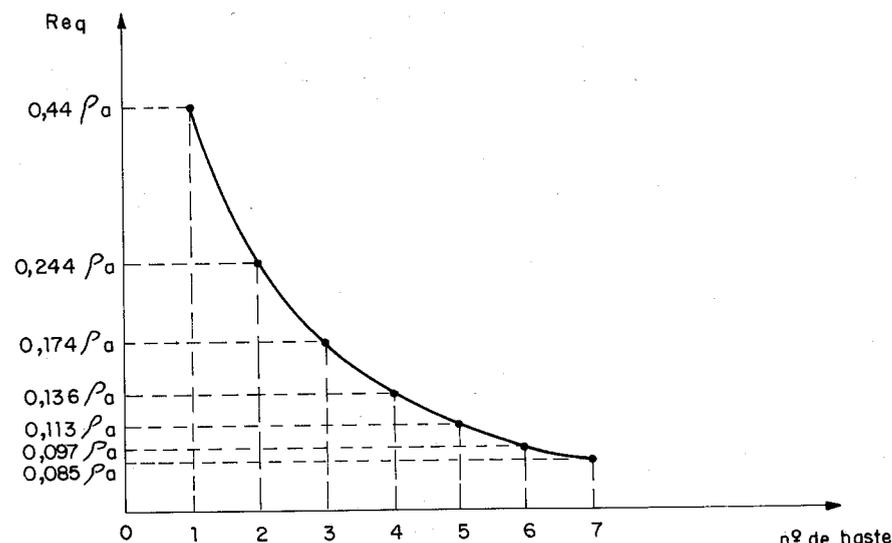


Figura 4.6.3: Curva $R_{eq} \times N^{\circ}$ de Hastes em Paralelo

4.7 Dimensionamento de Sistema de Aterramento com Hastes em Triângulo

Para este sistema as hastes são cravadas nos vértices de um triângulo equilátero. Figura 4.7.1.

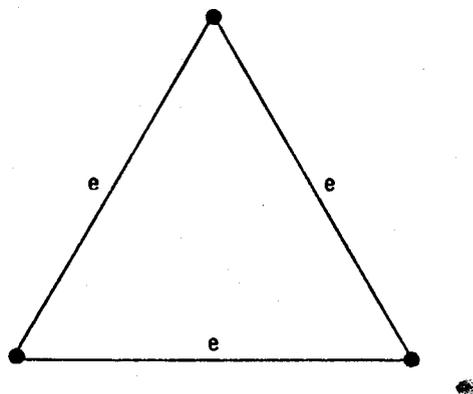


Figura 4.7.1: Triângulo Equilátero

Todo o dimensionamento do sistema em triângulo, baseia-se na definição do índice de redução (K) visto no subitem 4.5.1.

$$R_{eq\Delta} = K R_{1haste} \quad (4.7.1)$$

Onde:

R_{1haste} \Rightarrow Resistência elétrica de uma haste cravada isoladamente no solo

K \Rightarrow Índice de redução do sistema de aterramento

$R_{eq\Delta}$ \Rightarrow Resistência equivalente apresentada pelo sistema de aterramento em triângulo com lado "e"

Os índices de redução (K) são obtidos diretamente das curvas da figura 4.7.2.

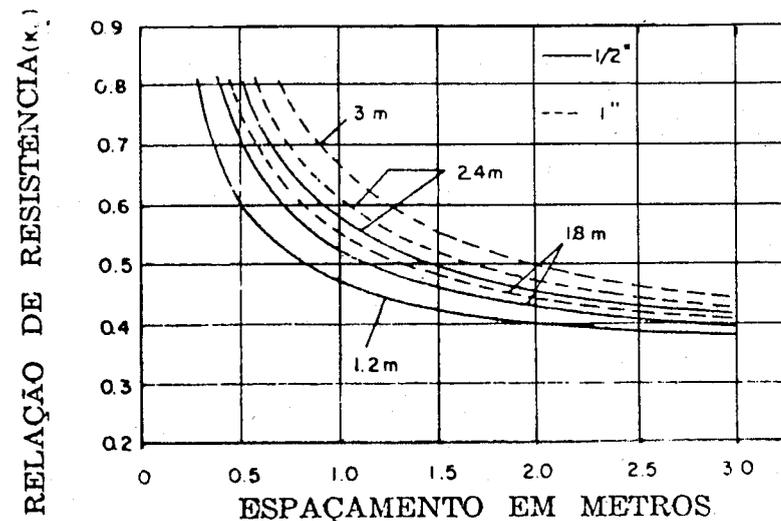


Figura 4.7.2: Curvas dos K x e

As curvas são para hastes de $\frac{1}{2}$ " e 1", com tamanhos de 1,2; 1,8; 2,4 e 3 metros.

Exemplo 4.7.1

Num solo onde $\rho_a = 100 \Omega.m$, determinar a resistência do sistema de aterramento com três hastes cravadas em triângulo com lado de 2m, sendo o comprimento da haste 2,4m e o diâmetro $\frac{1}{2}$ ".

$$R_{1haste} = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln \left(\frac{4L}{d} \right) = \frac{\rho_a}{2\pi \cdot 2,4} \ln \left(\frac{4 \cdot 2,4}{\frac{1}{2} \cdot 2,54 \cdot 10^{-2}} \right) = 0,44\rho_a$$

A relação acima poderia ser tirada diretamente da Tabela A.0.5.

$$R_{1haste} = 0,44\rho_a = 0,44 \cdot 100 = 44\Omega$$

$$R_{eq\Delta} = K R_{1haste}$$

Pela figura 4.7.2, tem-se

$$K = 0,46$$

$$R_{eq\Delta} = 0,46 \cdot 44 = 20,24\Omega$$

4.8 Dimensionamento de Sistemas com Hastes em Quadrado Vazio

A figura 4.8.1, mostra o sistema com o formato de quadrado vazio, onde as hastes são colocadas na periferia a uma distância "e" das hastes adjacentes.

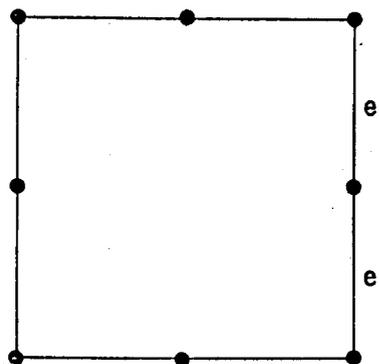


Figura 4.8.1: Quadrado Vazio

A resistência equivalente do sistema é dada pela expressão 4.5.7 com o índice de redução (K) obtido das figuras 4.8.2 e 4.8.3.

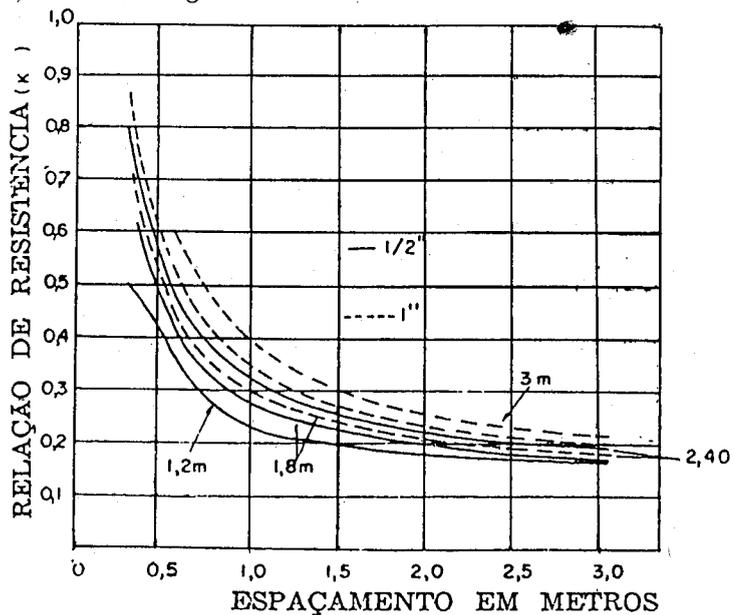


Figura 4.8.2: Oito Hastes em Quadrado Vazio

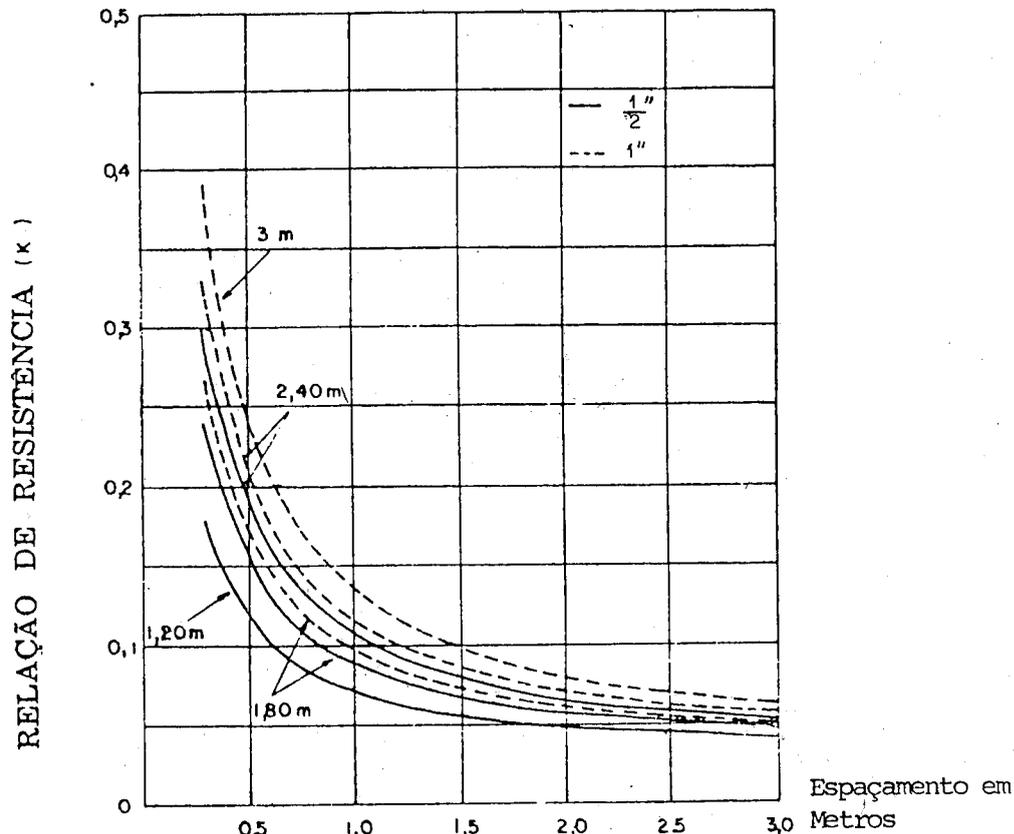


Figura 4.8.3: Trinta e Seis Hastes em Quadrado Vazio

Exemplo 4.8.1

Oito hastes formam um quadrado vazio com $e = 2m$, sendo o comprimento da haste 3m e o diâmetro 1", determinar a $R_{eq\Box}$.

$$R_{1haste} = 0,327 \rho a$$

$$R_{eq\Box} = K R_{1haste}$$

Da figura 4.8.2, tem-se $K = 0,27$.

$$R_{eq\Box} = 0,27 \cdot 0,327 \cdot \rho a = 0,08829 \rho a$$

4.9 Dimensionamento de Sistema com Hastes em Quadrado Cheio

As hastes são cravadas como mostra a figura 4.9.1.

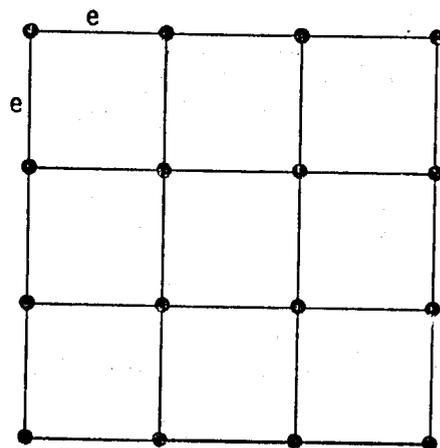


Figura 4.9.1: Quadrado Cheio

Os índices de redução (K) são obtidos pelas curvas das figuras 4.9.2 e 4.9.3.

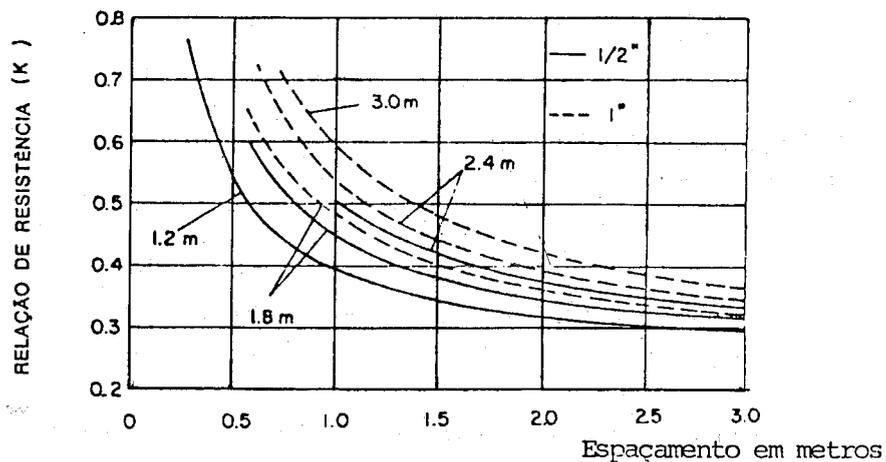


Figura 4.9.2: Quatro Hastes em Quadrado Cheio (Vazio)

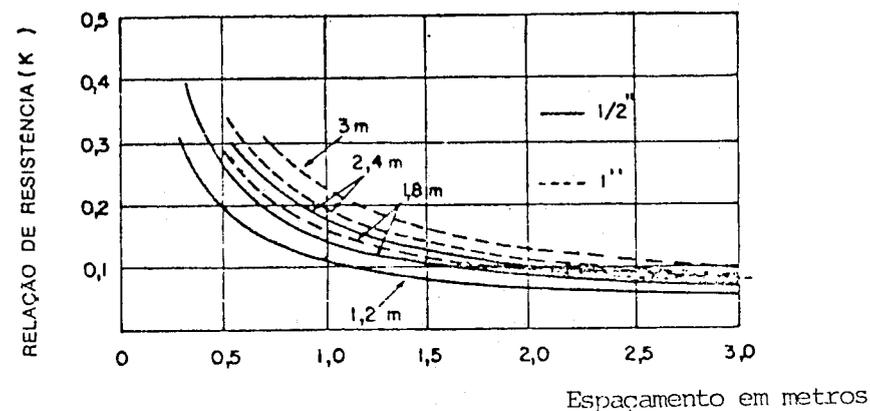


Figura 4.9.3: Trinta e Seis Hastes em Quadrado Cheio

Exemplo 4.9.1

Quatro hastes de 2,4m e $d = \frac{1}{2}$ " formam um quadrado com $e = 2m$ e estão cravadas num solo com $\rho a = 100 \Omega.m$. Determinar o valor de R_{eq} .

$$R_{1haste} = 0,44 \rho a = 0,44 \cdot 100 = 44 \Omega$$

$$R_{eq} = K R_{1haste}$$

Da figura 4.9.2 tem-se $K = 0,375$.

$$R_{eq} = 0,375 \cdot 44 = 16,5 \Omega$$

4.10 Dimensionamento de Sistema com Hastes em Circunferência

As hastes estão igualmente espaçadas ao longo da circunferência com raio R . Ver figura 4.10.1.

Os respectivos índices de redução são obtidos na figura 4.10.2.

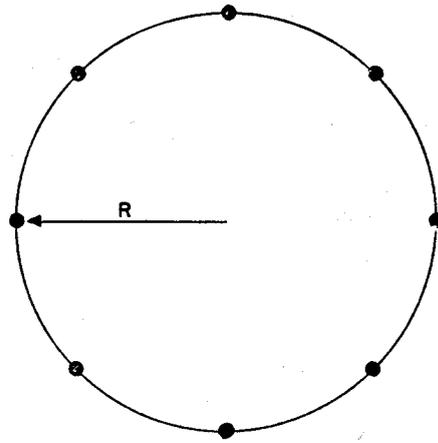


Figura 4.10.1: Hastes em Circunferência

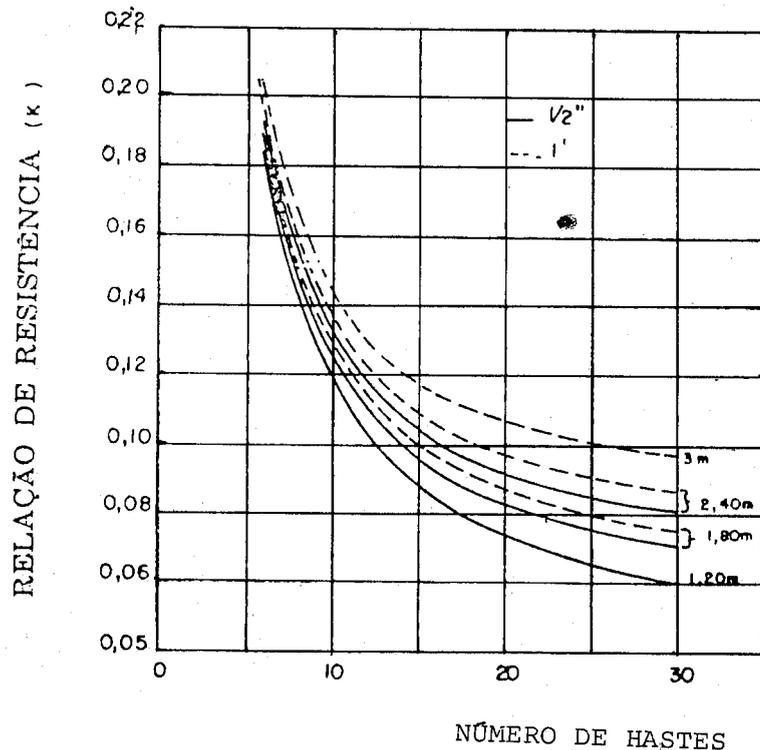


Figura 4.10.2: Hastes em Circunferência com Nove Metros de Raio

Exemplo 4.10.1

Determinar a resistência equivalente do sistema formado com 20 hastes com $L = 2,4m$ e $d = \frac{1}{2}$ " que estão cravadas ao longo de uma circunferência de raio 9m. A resistividade aparente é igual a $180 \Omega.m$.

$$R_{1haste} = 0,44 \rho a \quad R_{1haste} = 79,2 \Omega$$

Da figura 4.10.2 tem-se $K = 0,095$.

$$R_{eqO} = 7,524 \Omega$$

4.11 Hastes Profundas

O objetivo principal é aumentar o comprimento L da haste, o que faz, de acordo com a expressão 4.2.1, decair o valor da resistência praticamente na razão inversa de L .

Na utilização do sistema com hastes profundas, vários fatores ajudam a melhorar ainda mais a qualidade do aterramento. Estes fatores são:

- Aumento do comprimento da haste;
- Camadas mais profundas com resistividades menores;
- Condição de água presente estável ao longo do tempo;
- Condição de temperatura constante e estável ao longo do tempo;
- Produção de gradientes de potencial maiores no fundo do solo, tornando os potenciais de passo na superfície praticamente desprezíveis.

Assim, devido às considerações acima, obtém-se um aterramento de boa qualidade, com o valor de resistência estável ao longo do tempo. A dispersão de corrente se dá nas condições mais favoráveis, procurando regiões mais profundas de menor resistividade, o que atenua consideravelmente os gradientes de potencial na superfície do solo.

Para a execução desse sistema, usa-se basicamente dois processos que serão vistos a seguir:

a) Bate-Estaca

Por este método as hastes são uma a uma cravadas no solo por um bate-estacas. As hastes emendáveis possuem rosca nos extremos e a conexão é feita por luvas. Ver figura 4.11.1.

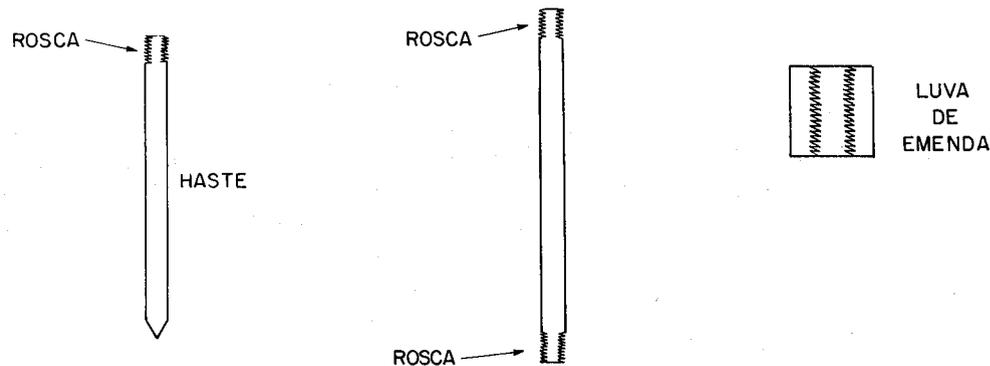


Figura 4.11.1: Hastes com Rosca e Luva de Conexão

Um bate-estaca produz, normalmente, 80 batidas/minuto e a haste vai sendo lentamente cravada no solo. Ver figura 4.11.2.

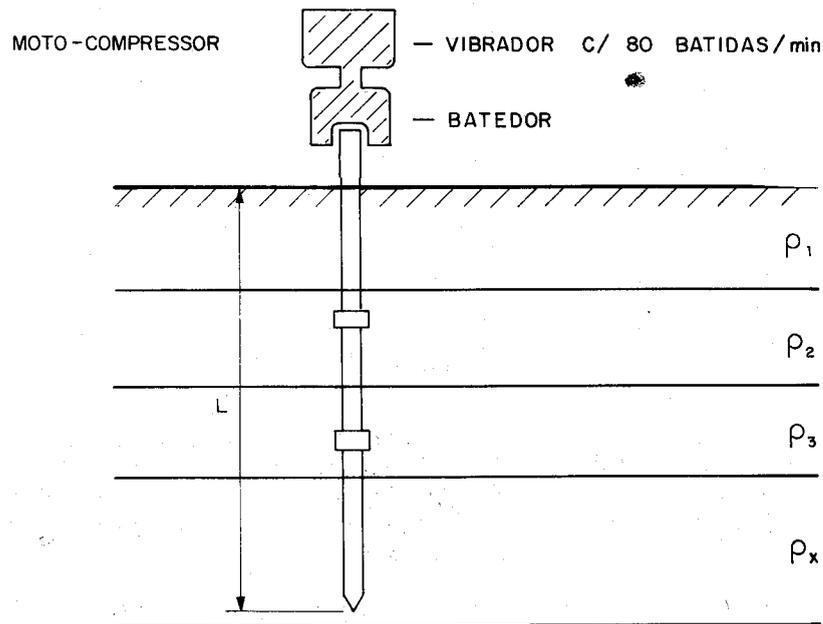


Figura 4.11.2: Bate-Estaca e Hastes Emendáveis

Dependendo das condições do terreno é possível, por este processo, conseguir até 18 metros de profundidade.

b) Moto-Perfuratriz

Como visto anteriormente, a dispersão das correntes em uma haste profunda se dá praticamente na camada de menor resistividade. Em vista disso, algumas empresas de energia elétrica, ao invés de cravar hastes emendáveis, utilizam a técnica de cavar o buraco no solo e, em seguida, introduzir uma única haste soldada a um fio longo que vai até a superfície. Ver figura 4.11.3.

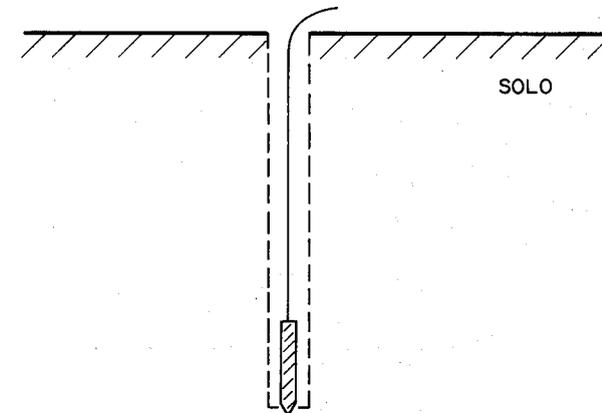


Figura 4.11.3: Haste Profunda

Recomenda-se também, introduzir no buraco, limalha de cobre. Esta limalha distribuída no buraco vai, lentamente, penetrando no solo, aumentando consideravelmente o efeito da atuação da haste, que facilita a dispersão da corrente no solo, pois se obtém uma menor resistência elétrica do sistema.

O processo de cavar o buraco no solo utiliza uma moto-perfuratriz de poço manual (figura 4.11.4). Por este processo pode-se conseguir até 60 metros de profundidade, dependendo, evidentemente, das características do solo.

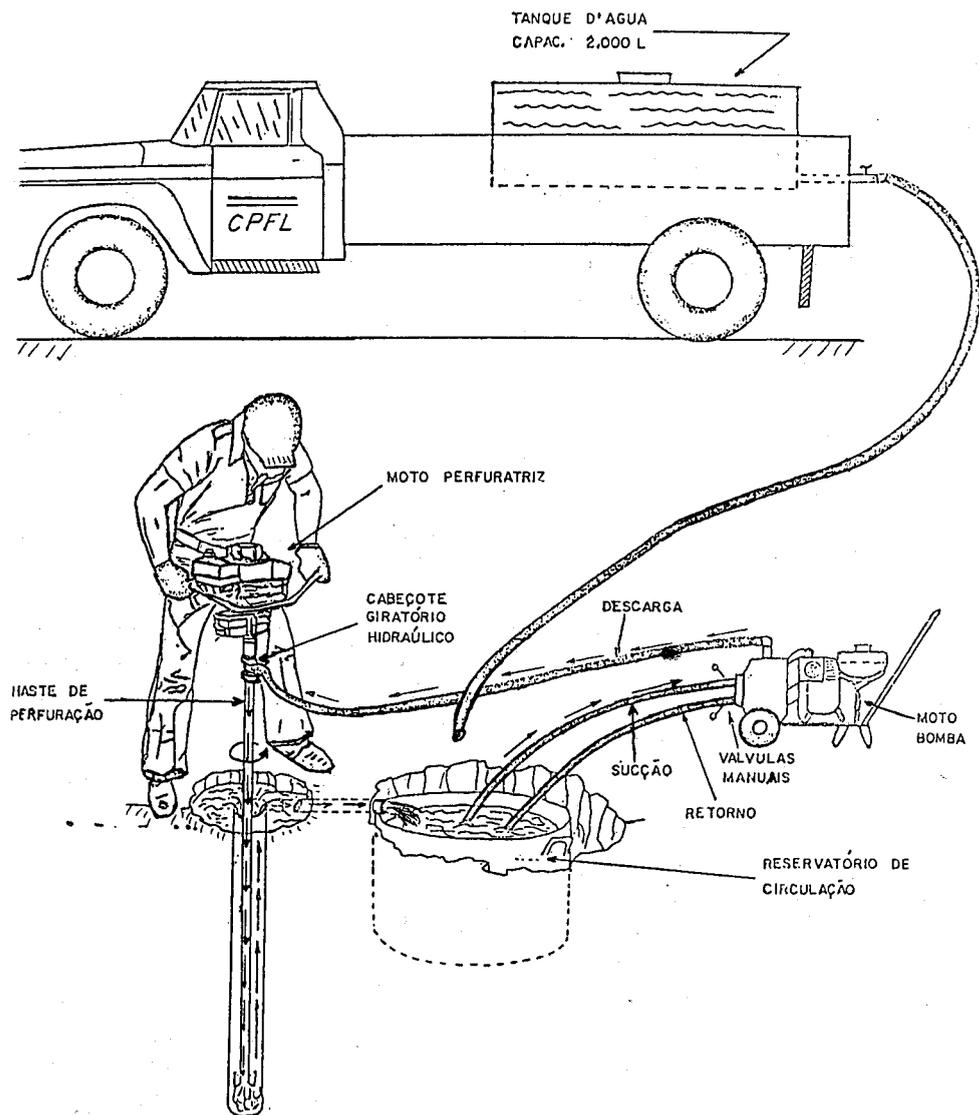


Figura 4.11.4: Perfuração do Buraco

A técnica apresentada na figura 4.11.4 tem os seguintes problemas:

- Risco para o operador;
- Ruído excessivo causado pelos motores da perfuratriz e da bomba d'água.

Para contornar os problemas citados pode-se utilizar as alternativas abaixo:

- Moto-perfuratriz acoplada ao braço de um guindaste;
- Perfuratriz e bomba d'água acionados por transmissão flexível acoplada à transmissão do veículo;
- Perfuratriz e bomba d'água acionadas hidraulicamente por pressão do óleo do guindaste.

A última alternativa é a que apresenta melhores resultados, sendo a recomendada¹.

O controle da resistência elétrica é feito com medições durante a escavação. Alcançando-se o resultado esperado, tira-se a broca e coloca-se rapidamente o cabo com a haste na ponta. Com o tempo a resistência elétrica diminui devido a movimentação do terreno fechando e compactando completamente o buraco.

Com este processo, não se alcançando bons resultados, recomenda-se as seguintes alternativas:

- Fazer uma malha de terra;
- Deslocar o equipamento a ser aterrado;
- Usar hastes profundas em paralelo.

¹A CPFL foi a primeira empresa no país a adotar o aterramento profundo, usando inicialmente a perfuratriz de poço com motor de combustão interna a gasolina. Devido a alguns problemas, este processo foi evoluindo até chegar a perfuratriz e bomba d'água acionadas hidraulicamente por pressão do óleo desenvolvido pelo próprio veículo. Neste processo sem ruído, a rotação da broca é menor, produzindo um ótimo desempenho, com menor desgaste da broca.

4.12 Resistência de Aterramento de Condutores Enrolados em Forma de Anel e Enterrados Horizontalmente no Solo

A figura 4.12.1 mostra um aterramento em forma de anel que pode ser usado aproveitando o buraco feito para a colocação do poste.

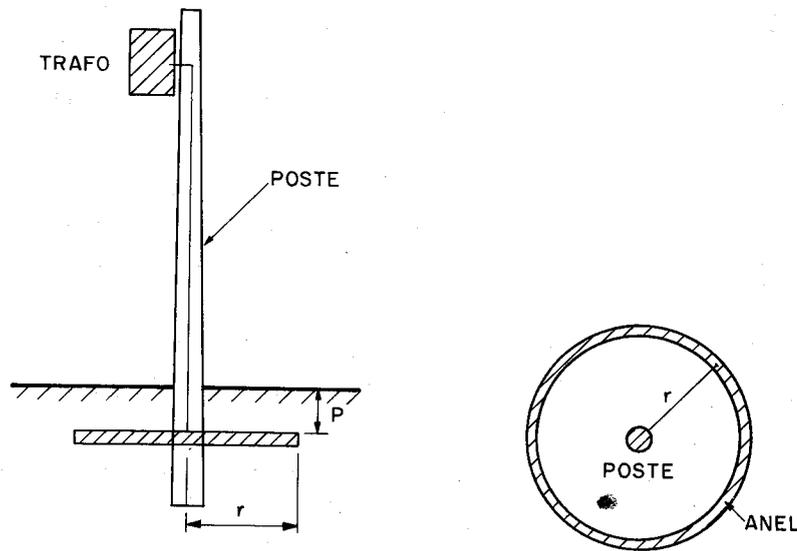


Figura 4.12.1: Aterramento em Forma de Anel

A resistência de aterramento em anel é dada pela fórmula 4.12.1.

$$R_{anel} = \frac{\rho a}{\pi^2 r} \ln \left(\frac{4r^2}{dp} \right) \quad [\Omega] \quad (4.12.1)$$

Onde:

$p \Rightarrow$ Profundidade que está enterrado o anel [m]

$r \Rightarrow$ Raio do anel [m]

$d \Rightarrow$ Diâmetro do círculo equivalente à soma da seção transversal dos condutores que formam o anel [m]

Exemplo 4.12.1

Determinar a resistência de um anel com 50cm de raio, diâmetro do condutor de 10mm, enterrado a 60cm em um solo com resistividade aparente de $1.000 \Omega \cdot m$.

$$R_{anel} = \frac{1000}{\pi^2 \cdot 0,5} \ln \left(\frac{4 \cdot 0,5^2}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6} \right)$$

$$R_{anel} = 1036,71 \Omega$$

4.13 Sistemas com Condutor Enterrado Horizontalmente no Solo

A resistência de aterramento de um condutor enterrado horizontalmente no solo, é dada pela fórmula 4.13.1. Ver figura 4.13.1.

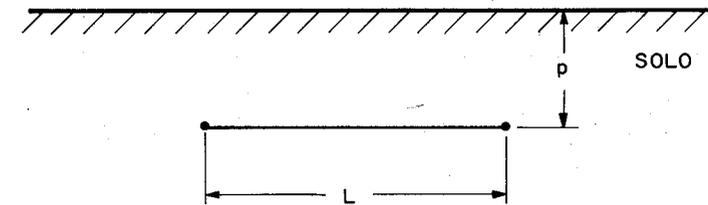


Figura 4.13.1: Condutor Enterrado Horizontalmente no Solo

$$R = \frac{\rho a}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L^2}{rp} \right) - 2 + \frac{2p}{L} - \left(\frac{p}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad [\Omega] \quad (4.13.1)$$

Onde:

$p \Rightarrow$ Profundidade em que está enterrado o condutor [m]

$L \Rightarrow$ Comprimento do condutor [m]

$r \Rightarrow$ Raio equivalente do condutor [m]

Apresenta-se a seguir, as fórmulas para a obtenção da resistência de aterramento dos condutores enterrados horizontalmente no solo, que tenham as configurações da figura 4.13.2.

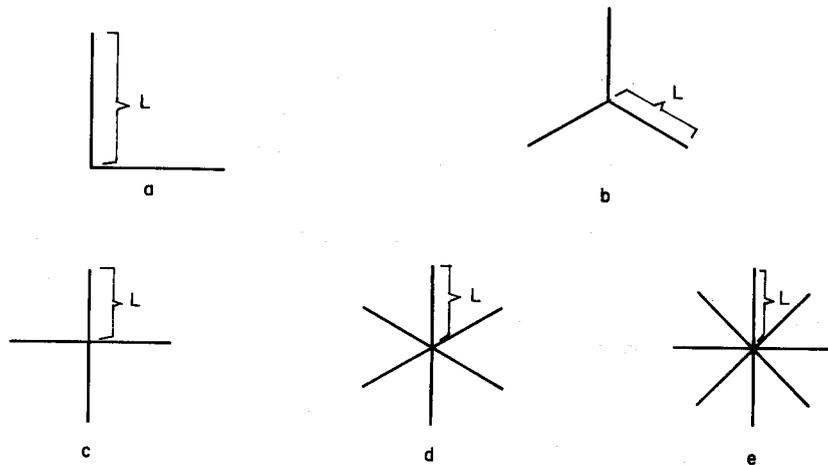


Figura 4.13.2: Configurações Horizontais de Condutores

a) Dois condutores em ângulo reto, letra (a) da figura 4.13.2.

$$R = \frac{\rho a}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2rp} \right) - 0,2373 + 0,8584 \frac{p}{L} + 1,656 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 10,85 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad [\Omega] \quad (4.13.2)$$

Onde:

$L \Rightarrow$ Tamanho de cada segmento retilíneo a partir da conexão [m]

b) Configuração em Estrela com três pontas, letra (b) da figura 4.13.2.

$$R = \frac{\rho a}{3\pi L} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2rp} \right) + 1,077 - 0,836 \frac{p}{L} + 3,808 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 13,824 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad [\Omega] \quad (4.13.3)$$

c) Configuração em Estrela com quatro pontas, letra (c) da figura 4.13.2.

$$R = \frac{\rho a}{4\pi L} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2rp} \right) + 2,912 - 4,284 \frac{p}{L} + 10,32 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 37,12 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad [\Omega] \quad (4.13.4)$$

d) Configuração em Estrela com seis pontas, letra (d) da figura 4.13.2.

$$R = \frac{\rho a}{6\pi L} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2rp} \right) + 6,851 - 12,512 \frac{p}{L} + 28,128 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 125,4 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad [\Omega] \quad (4.13.5)$$

e) Configuração em Estrela com oito pontas, letra (e) da figura 4.13.2.

$$R = \frac{\rho a}{8\pi L} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2rp} \right) + 10,98 - 22,04 \frac{p}{L} + 52,16 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 299,52 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad [\Omega] \quad (4.13.6)$$

Exemplo 4.13.1

Tendo-se disponível 60m de um condutor com diâmetro de 6mm, fazer todas as configurações propostas na figura 4.13.2, para aterramento a 60cm da superfície em um solo com resistividade aparente de 1.000 $\Omega.m$.

Os resultados são apresentados na Tabela 4.13.1.

Configuração	Resistência [Ω]
1 fio	35,00
2 fios em ângulo reto	64,77
Estrela 3 pontas	67,23
Estrela 4 pontas	73,21
Estrela 6 pontas	87,17
Estrela 8 pontas	101,83

Tabela 4.13.1: Solução do Exemplo

Capítulo 5

Tratamento Químico do Solo

5.1 Introdução

Todo sistema de aterramento depende da sua integração com o solo e da resistividade aparente.

Se o sistema já está fisicamente definido e instalado, a única maneira de diminuir sua resistência elétrica é alterar as características do solo, usando um tratamento químico.

O tratamento químico deve ser empregado somente quando:

- Existe o aterramento no solo, com uma resistência fora da desejada, e não se pretende alterá-lo por algum motivo;
- Não existe outra alternativa possível, dentro das condições do sistema, por impossibilidade de trocar o local, e o terreno tem resistividade elevada.

5.2 Característica do Tratamento Químico do Solo

O tratamento químico do solo visa a diminuição de sua resistividade, conseqüentemente a diminuição da resistência de aterramento.

Os materiais a serem utilizados para um bom tratamento químico do solo devem ter as seguintes características:

- Boa higroscopia;
- Não lixiviável;

- Não ser corrosivo;
- Baixa resistividade elétrica;
- Quimicamente estável no solo;
- Não ser tóxico;
- Não causar dano à natureza.

5.3 Tipos de Tratamento Químico

São apresentados, a seguir, alguns produtos usados nos diversos tipos de tratamento químico do solo.

a) BENTONITA

Bentonita é um material argiloso que tem as seguintes propriedades:

- Absorve facilmente a água;
- Retém a umidade;
- Boa condutora de eletricidade;
- Baixa resistividade (1,2 a 4 $\Omega.m$);
- Não é corrosiva (pH alcalino) e protege o material do aterramento contra a corrosão natural do solo.

É pouco usada atualmente. Hoje é empregada uma variação onde se adiciona gesso para dar maior estabilidade ao tratamento.

b) EARTHTRON

Earthtron é um material líquido de lignosulfato (principal componente da polpa da madeira) mais um agente geleificador e sais inorgânicos. Suas principais propriedades são:

- Não é solúvel em água;
- Não é corrosivo, devido à substância gel que anula a ação do ácido da madeira;

- Seu efeito é de longa duração;
- É de fácil aplicação no solo;
- É quimicamente estável;
- Retém umidade.

c) GEL

O Gel é constituído de uma mistura de diversos sais que, em presença da água, formam o agente ativo do tratamento. Suas propriedades são:

- Quimicamente estável;
- Não é solúvel em água;
- Higroscópico;
- Não é corrosivo;
- Não é atacado pelos ácidos contidos no solo;
- Seu efeito é de longa duração.

5.4 Coeficiente de Redução Devido ao Tratamento Químico do Solo (K_t)

O valor de K_t poderá ser obtido, para cada caso, medindo-se a resistência do aterramento antes e após o tratamento.

Desta forma, obtém-se

$$K_t = \frac{R_{\text{com tratamento}}}{R_{\text{sem tratamento}}} \quad (5.4.1)$$

Para ilustrar, na figura 5.4.1 tem-se um gráfico dos valores prováveis de K_t em função da resistividade do solo para um tratamento do tipo GEL.

A região hachurada é a faixa provável dos valores de K_t dado pelo fabricante.

Observa-se que em solos com alta resistividade, o tratamento químico é mais eficiente.

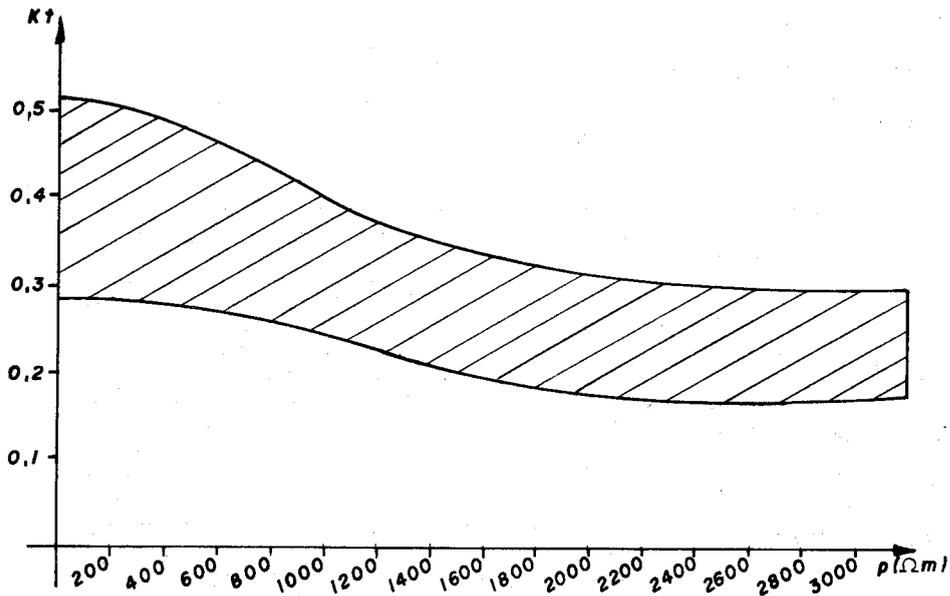


Figura 5.4.1: Valores Típicos de K_t em Função da Resistividade

Exemplo 5.4.1

Um aterramento tem um valor de 870Ω num local cuja resistividade é de $2.000 \Omega.m$. Qual a faixa provável do valor de $R_{tratamento}$ se for feito um tratamento químico no solo a base de GEL?

Da figura 5.4.1 obtém-se

$$0,2 \leq K_t \leq 0,34$$

então

$$K_{t_{inferior}} \cdot R \leq R_{tratamento} \leq K_{t_{superior}} \cdot R$$

$$174 \Omega \leq R_{tratamento} \leq 295,8 \Omega$$

5.5 Variação da Resistência de Terra Devido ao Tratamento Químico

Nos gráficos das figuras 5.5.1, 5.5.2 e 5.5.3 é apresentado o comportamento das variações da resistência de terra com o tratamento químico do solo.

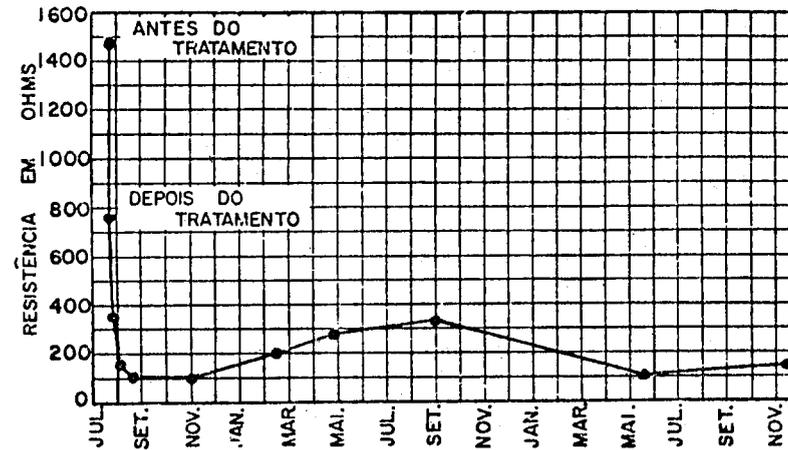


Figura 5.5.1: Resistência de Terra Reduzida pelo Tratamento Químico do Solo

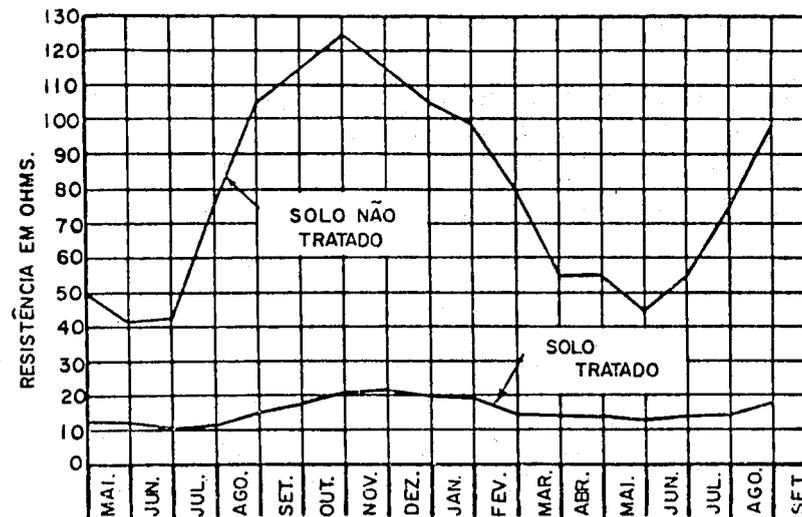


Figura 5.5.2: Tratamento Químico do Solo e as Variações Mensais da Resistência

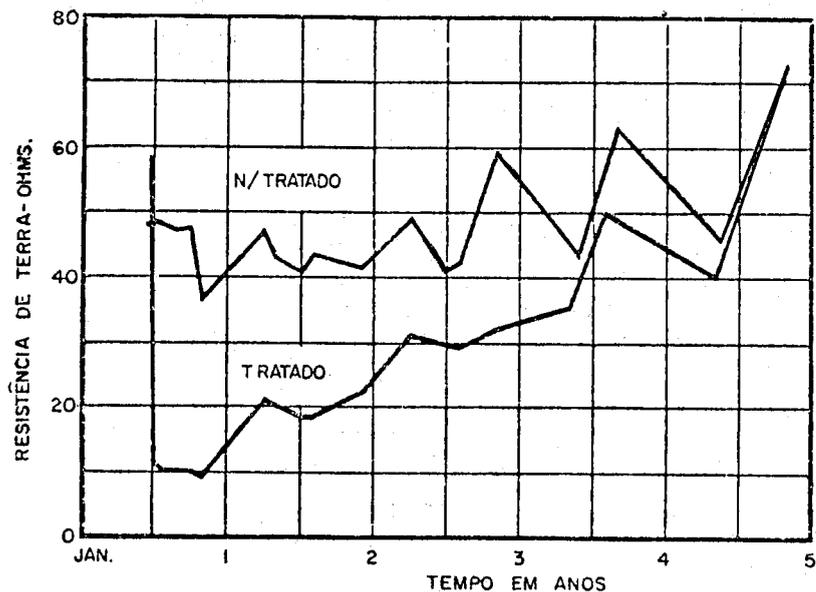


Figura 5.5.3: Variação da Resistência de Terra, com o Tempo, de Hastes em Solos Tratados e Não Tratados Adjacentes

Pode-se observar que pela figura 5.5.3, o tratamento químico vai perdendo o seu efeito. Recomenda-se fazer novo tratamento após algum tempo.

5.6 Aplicação do Tratamento Químico no Solo

A seguir, nas figuras 5.6.1 e 5.6.2 é mostrado uma seqüência de ilustrações de aplicação do tratamento químico do solo. A figura 5.6.2 foi obtida da referência [48].

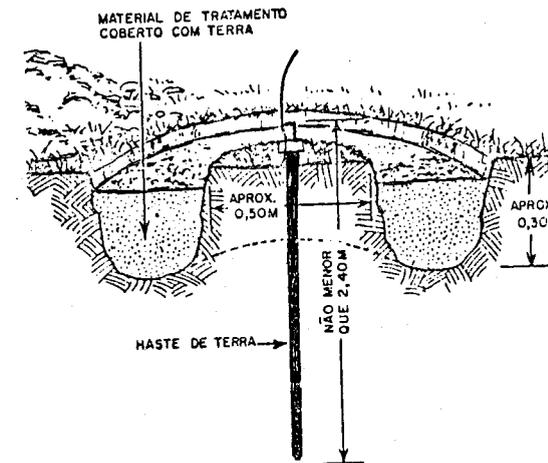
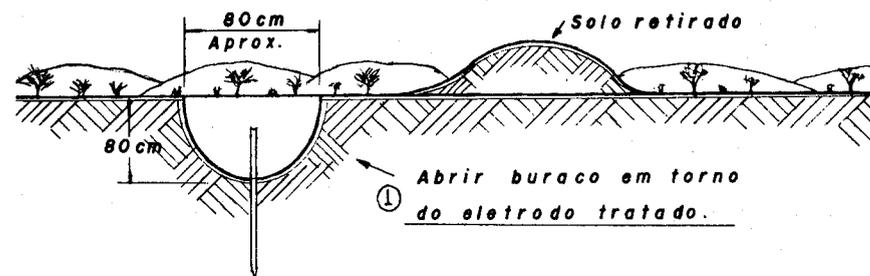


Figura 5.6.1: Tratamento Químico do Solo Tipo Trincheira (rosquinha)



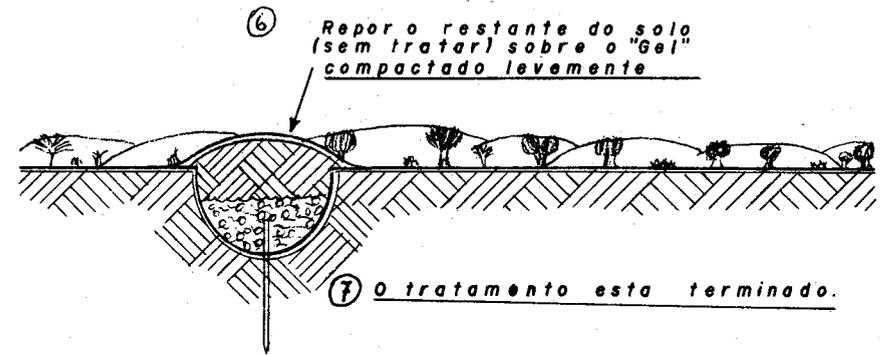
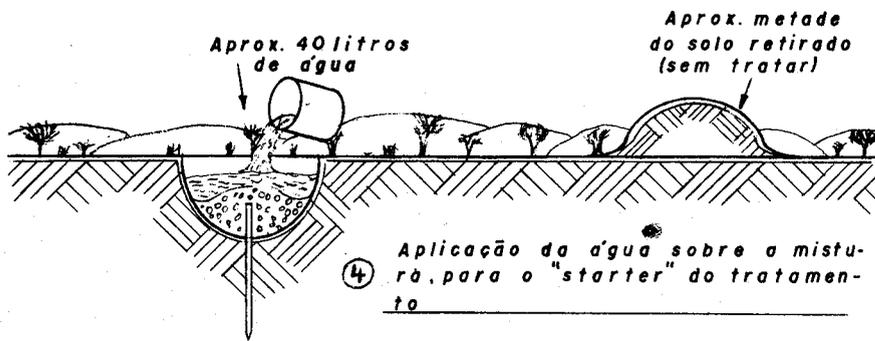
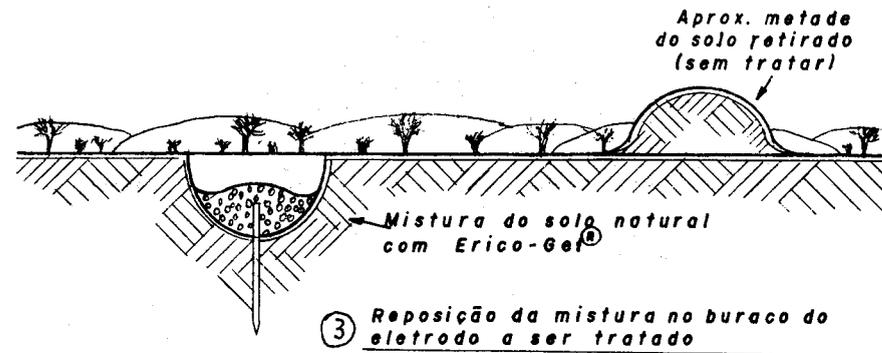


Figura 5.6.2: Seqüência de um Tratamento Químico do Tipo GEL

5.7 Considerações Finais

Como o tratamento químico do solo é empregado na correção de aterramento existente, deve-se então, após a execução do mesmo, fazer sempre um acompanhamento com medições periódicas para analisar o efeito e a estabilidade do tratamento.

Deve-se sempre dimensionar e executar projetos de sistemas de aterramento de modo eficiente, para não ser necessário usar tratamento químico.

A ação efetiva do tratamento químico deve-se ao fato de o produto químico ser higroscópico e manter retida a água por longo tempo, assim, de acordo com o item 1.3, a resistência do aterramento decai acentuadamente. Portanto, recomenda-se nas regiões que tenham período de seca bem definido, molhar a terra do sistema de aterramento, o que terá o mesmo efeito do tratamento químico. Em subestação pode-se deixar instalado um conjunto de mangueiras e a períodos regulares, molhar a terra que contém a malha. Pode-se, inclusive, adicionar à água, a solução do produto químico do tratamento.

Em terreno extremamente seco, pode-se concretar o aterramento. O concreto tem a propriedade de manter a umidade. Sua resistividade está entre 30 e 90 Ω.m.

Capítulo 6

Resistividade Aparente

6.1 Resistividade Aparente

Um solo com várias camadas apresenta resistividade diferente para cada tipo de sistema de aterramento.

A passagem da corrente elétrica do sistema de aterramento para o solo depende:

- Da composição do solo com suas respectivas camadas;
- Da geometria do sistema de aterramento;
- Do tamanho do sistema de aterramento.

Portanto, faz-se mister, calcular a resistividade aparente que representa a integração entre o sistema de aterramento relativo ao seu tamanho em conformidade com o solo.

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

Assim, é possível definir uma resistividade, chamada aparente, que é a resistividade vista pelo sistema de aterramento em integração com o solo, considerada a profundidade atingida pelo escoamento das correntes elétricas.

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

A resistência elétrica de um sistema de aterramento depende fundamentalmente da:

- Resistividade aparente que o solo apresenta para este determinado aterramento;
- Geometria e da forma como o sistema de aterramento está enterrado no solo.

Assim, genericamente, para qualquer sistema de aterramento, tem-se:

$$R_{\text{aterramento}} = \rho a f(g) \quad (6.1.1)$$

Onde:

$R_{\text{aterramento}} \Rightarrow$ Resistência elétrica do sistema de aterramento

$\rho a \Rightarrow$ Resistividade aparente

$f(g) \Rightarrow$ Função que depende da geometria do sistema e da forma de colocação no solo

Pela análise da expressão 6.1.1, pode-se definir mais claramente o conceito de resistividade aparente. Para tanto, faz-se necessário a seguinte comparação:

a) Colocar um sistema de aterramento em um solo de várias camadas.

Sua resistência será dada por:

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

b) Colocar o mesmo sistema de aterramento em posição idêntica a anterior em um solo homogêneo, tal que a resistência elétrica seja a mesma. Isto é:

$$R_{\text{aterramento}} = \rho h f(g)$$

Assim, igualando-se, tem-se:

$$\rho a f(g) = \rho h f(g) \quad \therefore \quad \rho a = \rho h \quad (6.1.2)$$

Portanto, pela expressão 6.1.2 pode-se definir a resistividade aparente (ρa) de um sistema de aterramento relativo a um solo não homogêneo, como sendo a resistividade elétrica de um solo homogêneo que produza o mesmo efeito.

No Capítulo 4, foram apresentadas as expressões (da forma $R = \rho a f(g)$) para cálculo da resistência elétrica para diversos tipos de sistemas de aterramento, ou seja, foram apresentadas as expressões de $f(g)$. Neste capítulo estuda-se a resistividade aparente e as formas de calculá-la.

6.2 Haste em Solo de Várias Camadas

A resistência do aterramento de uma haste cravada verticalmente em um solo com várias camadas, é dada pela fórmula 4.2.1, onde a resistividade aparente é calculada pela expressão 6.2.1, conhecida com a fórmula de **Hummel**. Ver figura 6.2.1.

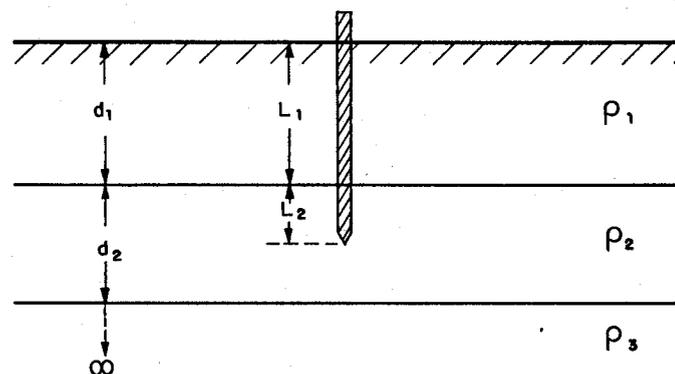


Figura 6.2.1: Haste Cravada no Solo Estratificado

$$\rho a = \frac{L_1 + L_2}{\frac{L_1}{\rho_1} + \frac{L_2}{\rho_2}} \quad (6.2.1)$$

A dispersão das correntes em cada camada se dará de forma proporcional à sua respectiva resistividade bem como ao comprimento da parcela da haste nela contida.

Exemplo 6.2.1

Calcular a resistência do aterramento relativa aos dados da figura 6.2.2.

$$\rho a = \frac{2 + 5 + 3}{\frac{2}{500} + \frac{5}{200} + \frac{3}{120}} = 185,18 \Omega.m$$

$$R_{1\text{haste}} = \frac{185,18}{2\pi \cdot 10} \ln \left(\frac{4 \cdot 10}{15 \cdot 10^{-3}} \right)$$

$$R_{1\text{haste}} = 23,19 \Omega$$

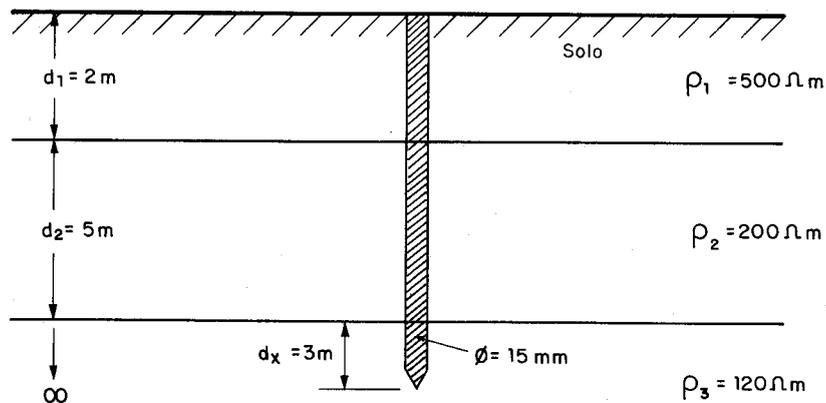


Figura 6.2.2: Haste Cravada no Solo em Camadas

6.3 Redução de Camadas

O cálculo da resistividade aparente (ρ_a) de um sistema de aterramento é efetuado considerando o nível de penetração da corrente de escoamento num solo de duas camadas.

Portanto, um solo com muitas camadas deve ser reduzido a um solo equivalente com duas camadas.

O procedimento de redução é feito a partir da superfície, considerando-se o paralelismo entre cada duas camadas, usando a fórmula de Hummel, 6.3.1, que transforma diretamente o solo em duas camadas equivalentes.

$$\rho_{eq} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_3}{\rho_3} + \dots + \frac{d_n}{\rho_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\rho_i}} \quad (6.3.1)$$

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

Onde:

$d_i \Rightarrow$ Espessura da i -ésima camada

$\rho_i \Rightarrow$ Resistividade da i -ésima camada

$n \Rightarrow$ Número de camadas reduzidas

Assim, chega-se a apenas duas camadas no solo, conforme figura 6.3.1.

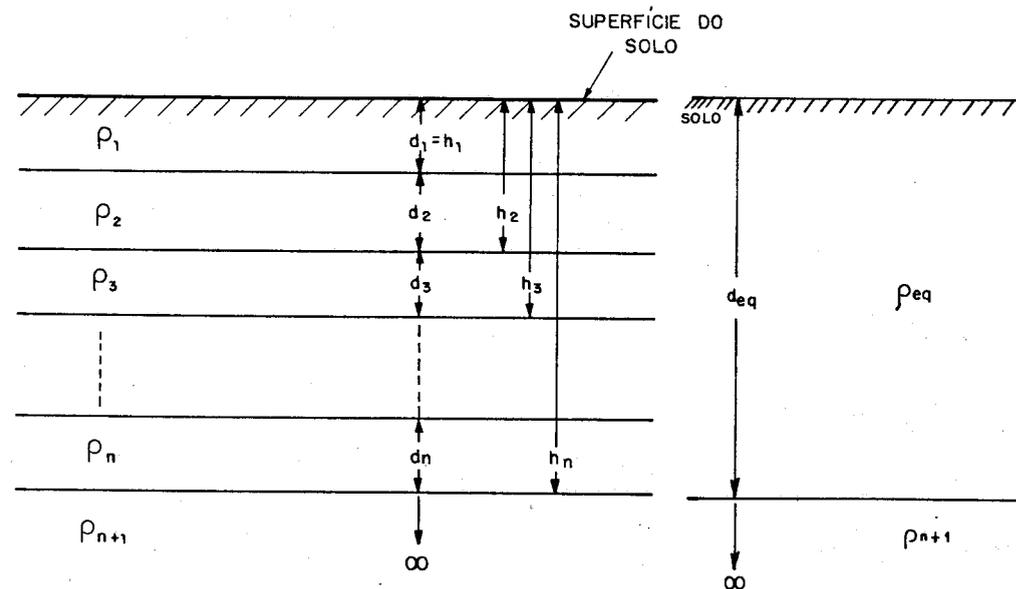


Figura 6.3.1: Solo Equivalente com Duas Camadas

Exemplo 6.3.1

Transformar o solo da figura 6.3.2 em duas camadas.

$$\rho_{eq} = \frac{1 + 6 + 1}{\frac{1}{200} + \frac{6}{500} + \frac{1}{65}} = 247 \Omega \cdot \text{m}$$

$$d_{eq} = 8 \text{ m}$$

6.4 Coeficiente de Penetração (α)

O coeficiente de penetração (α) indica o grau de penetração das correntes escoadas pelo aterramento no solo equivalente. É dado por:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} \quad (6.4.1)$$

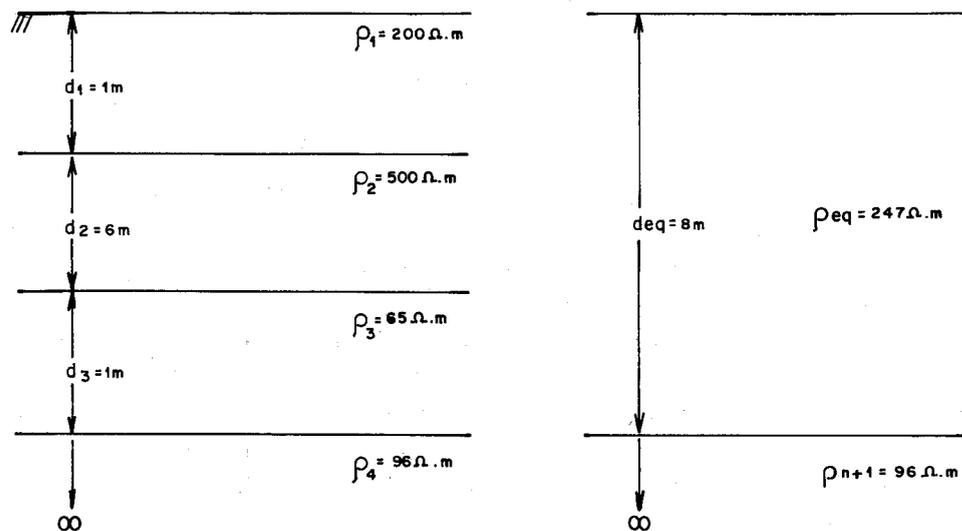


Figura 6.3.2: Redução e Solo Equivalente

Onde:

r ⇒ Raio do anel equivalente do sistema de aterramento considerado

Cada sistema é transformado em um anel equivalente de **Endrenyi**, cujo raio “ r ” é a metade da maior dimensão do aterramento.

O cálculo de “ r ” para algumas configurações, é dado a seguir:

a) Hastes alinhadas e igualmente espaçadas

$$r = \frac{(n-1)e}{2} \quad (6.4.2)$$

Onde:

n ⇒ Número de hastes cravadas verticalmente no solo

e ⇒ Espaçamento entre as hastes

b) Outras configurações

$$r = \frac{A}{D} \quad (6.4.3)$$

Onde:

A ⇒ Área abrangida pelo aterramento

D ⇒ Maior dimensão do aterramento

Por exemplo, no caso da malha de terra de uma subestação, a maior dimensão D é a diagonal.

6.5 Coeficiente de Divergência (β)

Para solo de duas camadas, este coeficiente é definido pela relação entre a resistividade da última camada e a resistividade da primeira camada equivalente.

$$\beta = \frac{\rho_{n+1}}{\rho_{eq}} \quad (6.5.1)$$

O coeficiente é similar ao coeficiente de reflexão entre duas camadas.

6.6 Resistividade Aparente para Solo com Duas Camadas

Com o (α) e (β) obtidos, pode-se determinar a resistividade aparente (ρ_a) do aterramento especificado em relação ao solo de duas camadas. Usando as curvas da figura 6.6.1, desenvolvidas por **Endrenyi** [2], onde (α) é o eixo das abscissas e (β) é a curva correspondente, obtém-se o valor de N .

$$N = \frac{\rho_a}{\rho_{eq}} \quad (6.6.1)$$

Assim, então:

$$\rho_a = N \cdot \rho_{eq} \quad (6.6.2)$$

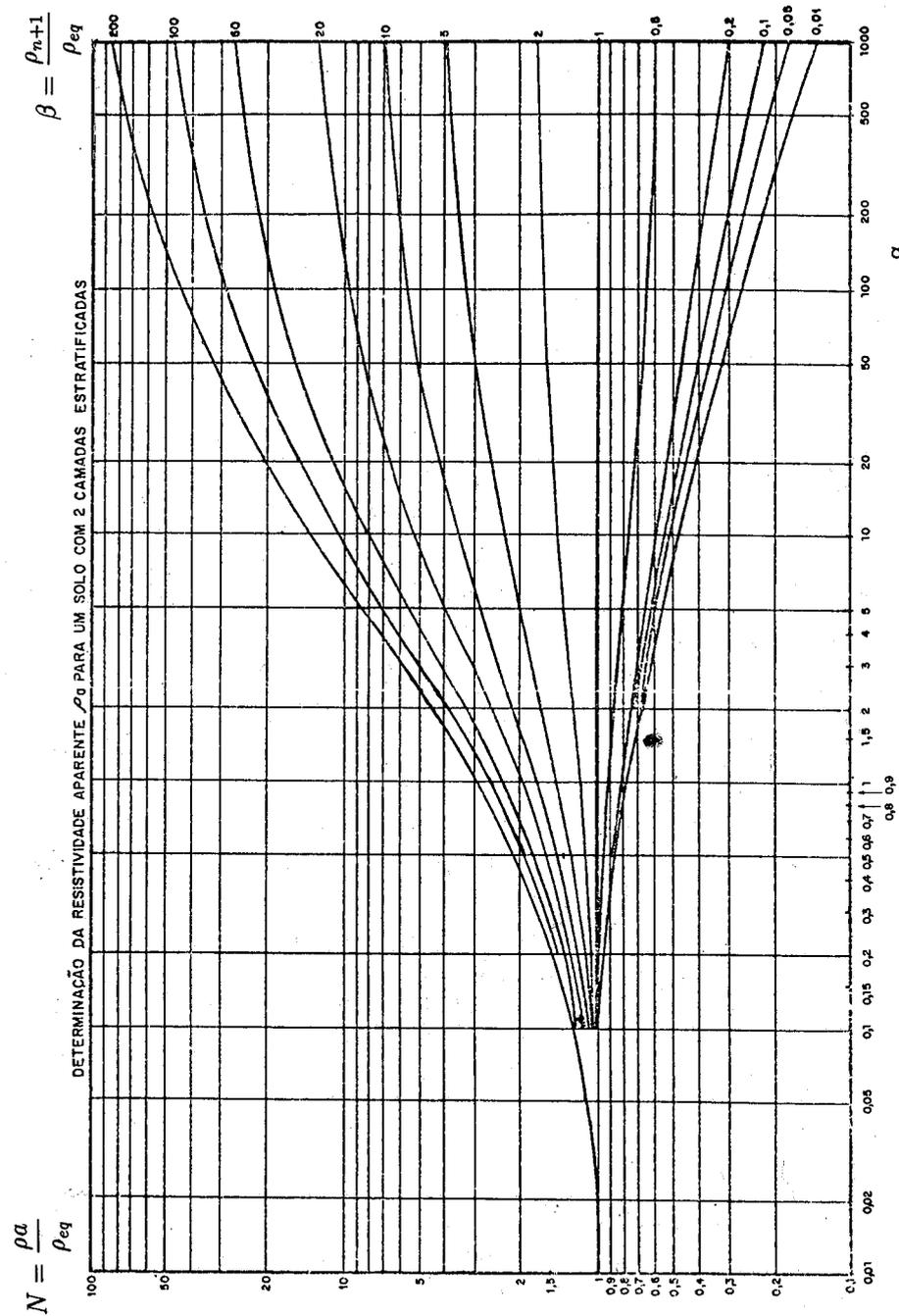


Figura 6.6.1: Curva de Resistividade Aparente

Exemplo 6.6.1

Um conjunto de sete hastes de 2,4 metros e diâmetro de $\frac{1}{2}$ " é cravado em forma retilínea no solo da figura 6.3.2. O espaçamento é de 3 metros. Determinar a resistência elétrica do conjunto.

$$r = \frac{(7 - 1) 3}{2} = 9m$$

$$\alpha = \frac{9}{8} = 1,125$$

$$\beta = \frac{96}{247} = 0,389$$

Pela figura 6.6.1, obtém-se:

$$N = 0,86$$

$$\rho_a = N \rho_{eq} = 0,86 \cdot 247 = 212,42 \Omega.m$$

Pela Tabela A.0.5 do Apêndice A, obtém-se:

$$R_{eq} = 0,085 \rho_a = 0,085 \cdot 212,42$$

$$R_{eq} = 18,268\Omega$$

Exemplo 6.6.2

Determinar o número de hastes alinhadas, necessárias para se obter um aterramento com resistência máxima de 25Ω numa região onde a estratificação do solo é conforme a figura 6.6.2. Hastes disponíveis $L = 3m$, diâmetro igual a $\frac{3}{4}$ " e espaçamento 3 metros.

Transformando em duas camadas:

$$\rho_{eq} = \frac{9}{\frac{2}{300} + \frac{3}{450} + \frac{4}{100}} = 168,75 \Omega.m$$

O processo é iterativo, porque não se conhece o número de hastes alinhadas, ou seja, não se tem a informação da dimensão do sistema de aterramento.

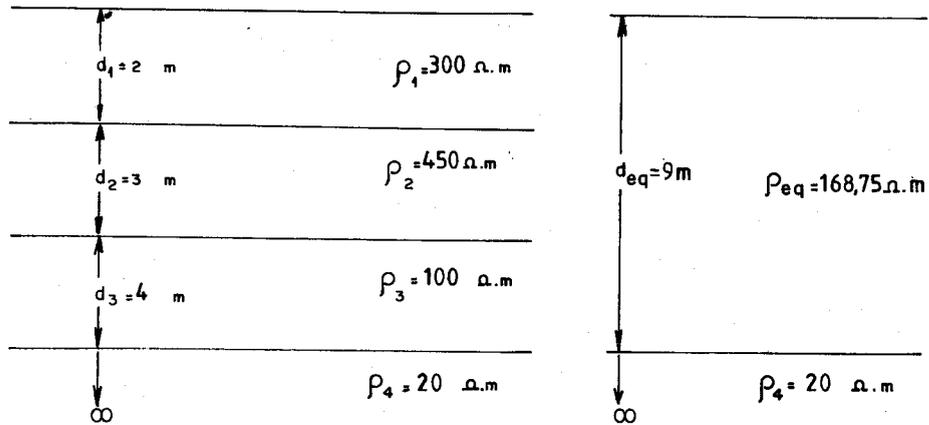


Figura 6.6.2: Dados da Camada do Solo

1º passo: Supor $\rho_a = \rho_{eq} = 168,75 \Omega.m$

2º passo: Cálculo de $f(g)$

$$f(g) = \frac{R}{\rho_a} = \frac{25}{168,75} = 0,148$$

Da Tabela A.0.11 do Apêndice A, pode-se constatar que o maior coeficiente de ρ_a menor ou igual a 0,148 é 0,140.

$$R_{eq} = 0,140 \rho_a \begin{cases} 3 \text{ hastes} \\ e = 3m \end{cases}$$

3º passo: Determinação de ρ_a para três hastes alinhadas.

$$\beta = \frac{\rho_{n+1}}{\rho_{eq}} = \frac{20}{168,75} = 0,119$$

$$r = \frac{(n-1)e}{2} = \frac{(3-1)}{2} \cdot 3 = 3m$$

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{3}{9} = 0,333$$

Entrando com (α) e (β) na figura 6.6.1, tem-se:

$$N = 0,9$$

$$\rho_a = N \rho_{eq} = 0,9 \cdot 168,75 = 151,875 \Omega.m$$

4º passo: Calculando-se novamente a $f(g)$, tem-se

$$f(g) = \frac{R}{\rho_a} = \frac{25}{151,875} = 0,165$$

O maior coeficiente de ρ_a menor ou igual a 0,165 é 0,140.

$$R_{eq} = 0,140 \rho_a \begin{cases} 3 \text{ hastes} \\ e = 3m \end{cases}$$

Os valores são iguais \rightarrow convergiu

5º passo: Verificação

$$R_{eq} = 0,140 \rho_a = 0,140 \cdot 151,875 = 21,263 \Omega$$

Capítulo 7

Fibrilação Ventricular do Coração Pelo Choque Elétrico

7.1 Introdução

O sistema de aterramento é projetado de modo a produzir, durante o curto-circuito máximo com a terra, uma distribuição no perfil dos potenciais de passo e toque abaixo dos limites de risco de fibrilação ventricular do coração.

Os defeitos no sistema elétrico, que geram correntes de seqüência zero, terão suas correntes passando pelo aterramento. A área do aterramento é a região de concentração das correntes de defeitos, portanto os potenciais são elevados e cuidados especiais devem ser observados na segurança.

Um choque elétrico causa vários efeitos e sintomas no ser humano, mas dentre os relativos à tensão de passo e toque, o mais importante a considerar é a fibrilação ventricular [51, 65].

7.2 Choque Elétrico

É a perturbação de natureza e efeitos diversos que se manifesta no organismo humano quando este é percorrido por uma corrente elétrica.

Os efeitos das perturbações variam e dependem de:

- Percurso da corrente elétrica pelo corpo;
- Intensidade da corrente elétrica;

- Tempo de duração do choque elétrico;
- Espécie da corrente elétrica;
- Frequência da corrente elétrica;
- Tensão elétrica;
- Estado de umidade da pele;
- Condições orgânicas do indivíduo.

As perturbações no indivíduo, manifestam-se por:

- Inibição dos centros nervosos, inclusive dos que comandam a respiração produzindo PARADA RESPIRATÓRIA;
- Alteração no ritmo cardíaco, podendo produzir FIBRILAÇÃO VENTRICULAR e uma conseqüente PARADA CARDÍACA;
- Queimaduras profundas, produzindo NECROSE do tecido;
- Alterações no sangue provocadas por efeitos térmicos e eletrolíticos da corrente elétrica.

Se o choque elétrico for devido ao contato direto com a tensão da rede, todas as manifestações podem ocorrer.

Para os choques elétricos devidos à tensão de toque e passo impostas pelo sistema de aterramento durante o defeito na rede elétrica, a manifestação mais importante a ser considerada é a FIBRILAÇÃO VENTRICULAR DO CORAÇÃO, que será o assunto específico do presente capítulo. Maiores detalhes ver referência [65].

7.3 Funcionamento Mecânico do Coração

Para compreender como ocorre a fibrilação ventricular no coração pelo choque elétrico, há necessidade de conhecer o funcionamento normal do coração.

Do ponto de vista mecânico, o coração é uma bomba hemo-hidráulica que faz o sangue circular continuamente pelo corpo humano. Ver figura 7.3.1.

O sangue venoso, isto é, pobre em O_2 e rico em CO_2 , entra no coração pela veia cava inferior e superior, ocupando o átrio direito. Do átrio é bombeado para o ventrículo direito e deste para os pulmões, onde é feita a troca do CO_2 pelo O_2 ,

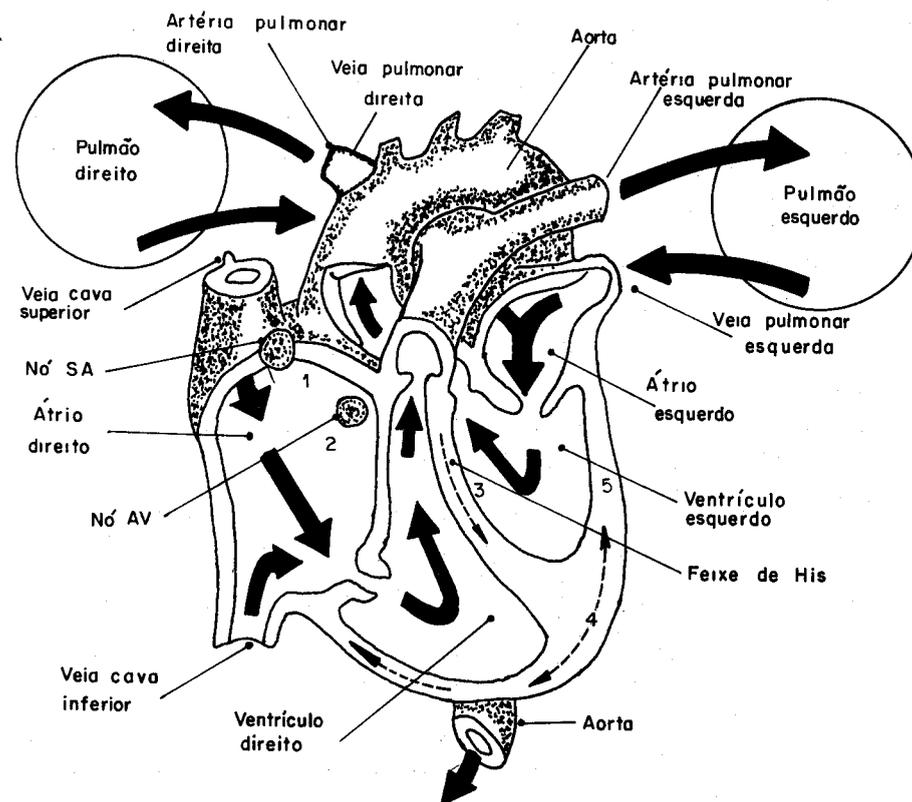


Figura 7.3.1: Coração Humano

formando o sangue arterial. Este sangue retorna ao átrio esquerdo onde é bombeado ao ventrículo esquerdo. Este último ao se contrair, impulsiona o sangue arterial para todo o corpo.

A contração dos dois átrios dá-se no mesmo instante, o mesmo ocorrendo com os dois ventrículos.

As paredes do coração são formadas por fibras musculares especializadas em efetuar as contrações cardíacas de maneira permanente e ritmada.

As paredes musculares do ventrículo são as mais solicitadas, porque a sua contração deve ser forte e eficiente para prover o bombeamento do sangue com pressão adequada a todo o corpo. Portanto, é nesta região que ocorrem os problemas cardíacos de enfarte e fibrilação ventricular.

7.4 Funcionamento Elétrico do Coração

O funcionamento mecânico do coração é controlado e comandado eletricamente por dois nódulos existentes no átrio direito do coração, pontos (1) e (2) das figuras 7.3.1 e 7.4.1.

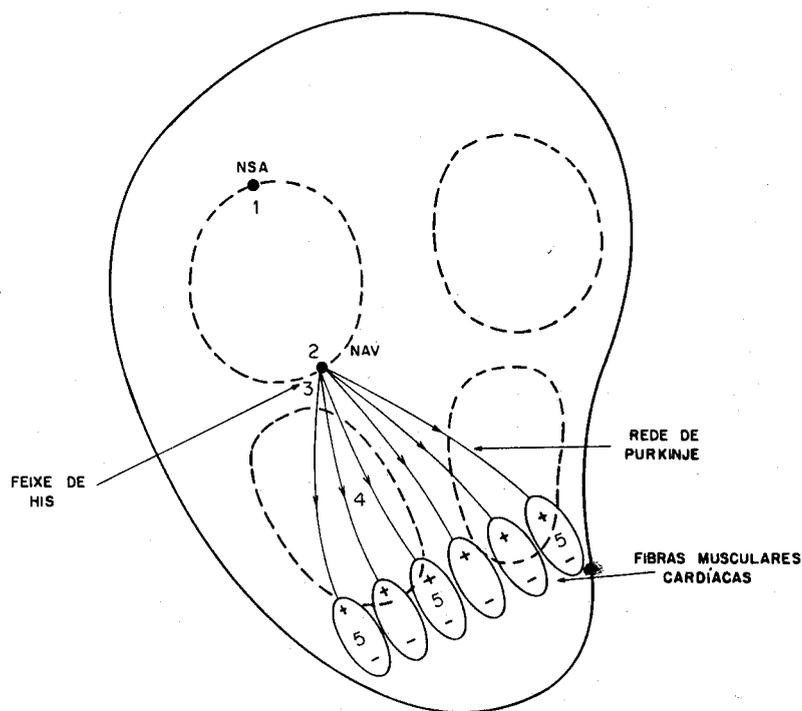


Figura 7.4.1: Esquema Elétrico do Coração

Os dois pontos são chamados de **Nódulo Sino Atrial (NSA)** e **Nódulo Átrio Ventricular (NAV)**.

O NSA é um gerador elétrico que, quimicamente, processa a alternância dos íons Na^+ e K^+ , emitindo o sinal (pulso) elétrico. Este sinal, passando pela parede muscular do átrio, promove a sua contração e o sangue passa para o ventrículo. O sinal elétrico é então captado pelo feixe de **His** (3) e distribuído pela rede de **Purkinje** (4) a todas as fibras musculares (5) do ventrículo, provocando a contração deste.

Nesta contração, o sangue contido na cavidade direita é impulsionado para os pulmões e o do lado esquerdo para todo o corpo.

O NSA comanda eletricamente o batimento do coração. O NAV é o reserva,

que opera em flutuação, acompanhando em sincronismo o sinal do NSA. Se o NSA tiver problemas e falhar, o NAV assume a responsabilidade.

A figura 7.4.2 apresenta um circuito elétrico análogo ao circuito elétrico do coração.

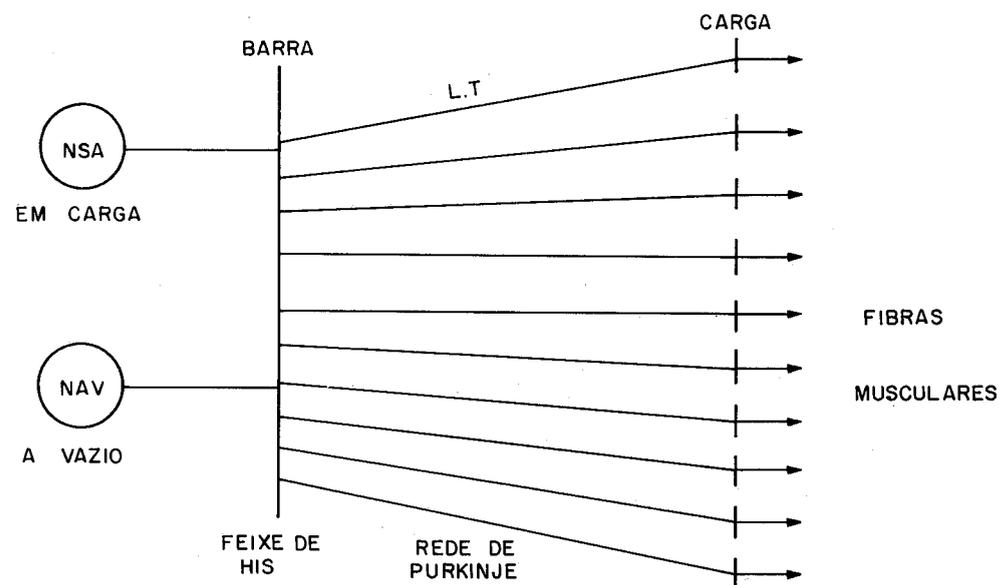


Figura 7.4.2: Circuito Elétrico do Coração

O sinal elétrico do gerador é captado pela barra (feixe de **His**) e distribuído pela rede de transmissão (rede de **Purkinje**) às cargas (fibras musculares).

As fibras musculares do ventrículo da figura 7.4.1 estão polarizadas. Ao receberem o sinal proveniente do NSA, elas se contraem, despolarizando-se.

Em seguida, deve ocorrer o processo de repolarização das fibras. Esta etapa de repolarização das fibras é conhecida como o período mais vulnerável e é o momento mais perigoso para ocorrência da fibrilação ventricular do coração devido ao choque elétrico. Se a corrente elétrica do choque passar pelas paredes do ventrículo no instante da repolarização das fibras a probabilidade de fibrilação ventricular é grande.

7.5 Fibrilação Ventricular do Coração Pelo Choque Elétrico

A fibrilação ventricular é o estado de tremulação (vibração) irregular e desritmada das paredes dos ventrículos, com perda total da eficiência do bombeamento do sangue. O sinal detectado no eletrocardiograma e a pressão arterial são mostradas na figura 7.5.1.

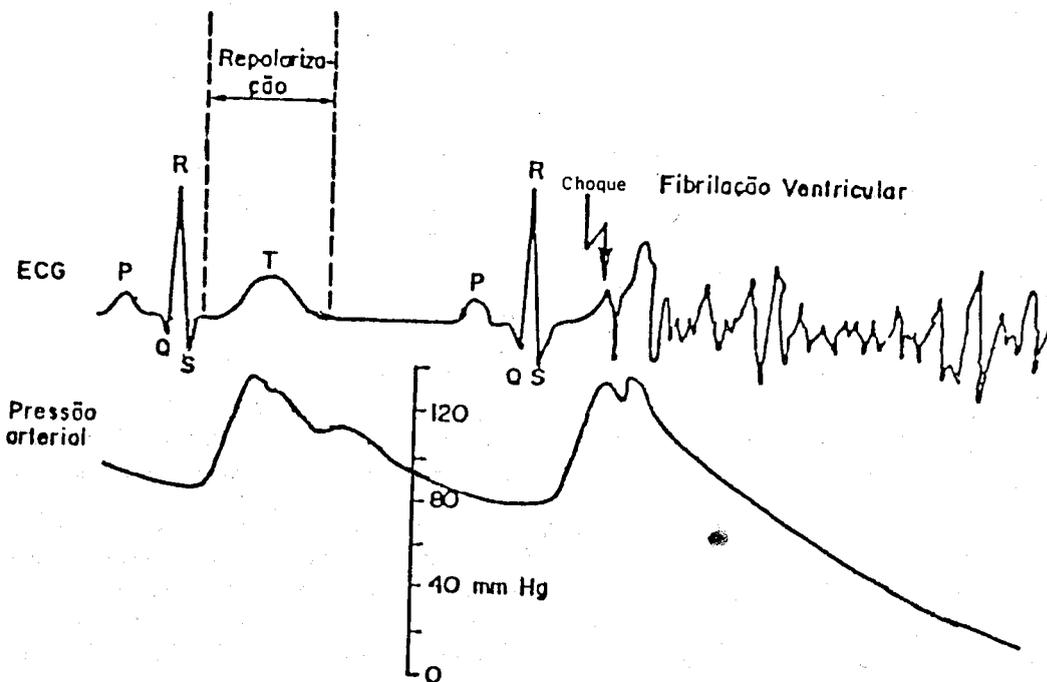


Figura 7.5.1: Sinal do Eletrocardiograma e Pressão Arterial

A pressão arterial cai a zero, isto é, o sangue está parado no corpo. Este estado é conhecido por MORTE APARENTE.

Pensava-se, há pouco tempo atrás, que a corrente elétrica do choque, ao passar pelo coração, mais precisamente pelo NSA e NAV, fazia com que estes se desregulassem, passando a emitir sinais caóticos e desritmados, produzindo a fibrilação ventricular.

Verificou-se, posteriormente, que os NSA e NAV não são os responsáveis pela fibrilação ventricular devido ao choque elétrico. Isto porque:

- Os NSA e NAV são muito pequenos. Em conseqüência, da corrente que passa pelo corpo, apenas uma densidade menor afeta o coração e desta, somente uma

ínfima parcela passa pelos nódulos;

- Os nódulos têm uma rápida recuperação.

Na realidade, o que acontece é que o coração humano é um órgão muito complexo. As paredes do ventrículo são formadas por tecidos diferentes superpostos de maneira estratificada. Figura 7.5.2.

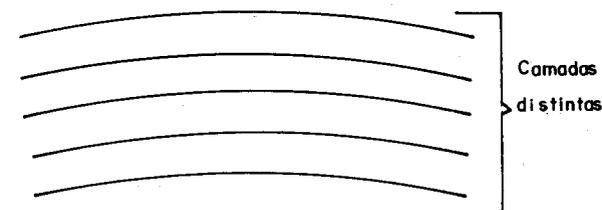


Figura 7.5.2: Parede do Coração

Esta heterogeneidade confere a cada camada, densidade e espessura diferentes. Além disso, cada camada tem sua própria freqüência mecânica natural de ressonância.

A corrente elétrica do choque, ao passar por estas camadas, produz vibrações distintas, quebrando a eficiência da repolarização. Isto gera uma despolarização caótica nas fibras musculares que compõem as paredes do ventrículo. Conseqüentemente, as fibras não mais obedecem e não respondem sincronicamente aos sinais emitidos pelo NSA. As paredes ficam então, tremulando, caracterizando o estado de fibrilação. Ver figura 7.5.3.

Como o sangue não mais circula pelo corpo, são as células cerebrais as primeiras a serem prejudicadas.

A fibrilação ventricular é irreversível espontaneamente. Se nenhuma providência for tomada dentro de quatro minutos, os danos cerebrais são comprometedores. Dentro de oito a doze minutos a fibrilação vai diminuindo sua intensidade, passando para o regime de parada cardíaca.

7.6 Desfibrilador Elétrico

O desfibrilador elétrico é um aparelho usado para reverter a fibrilação ventricular. Ver figura 7.6.1.

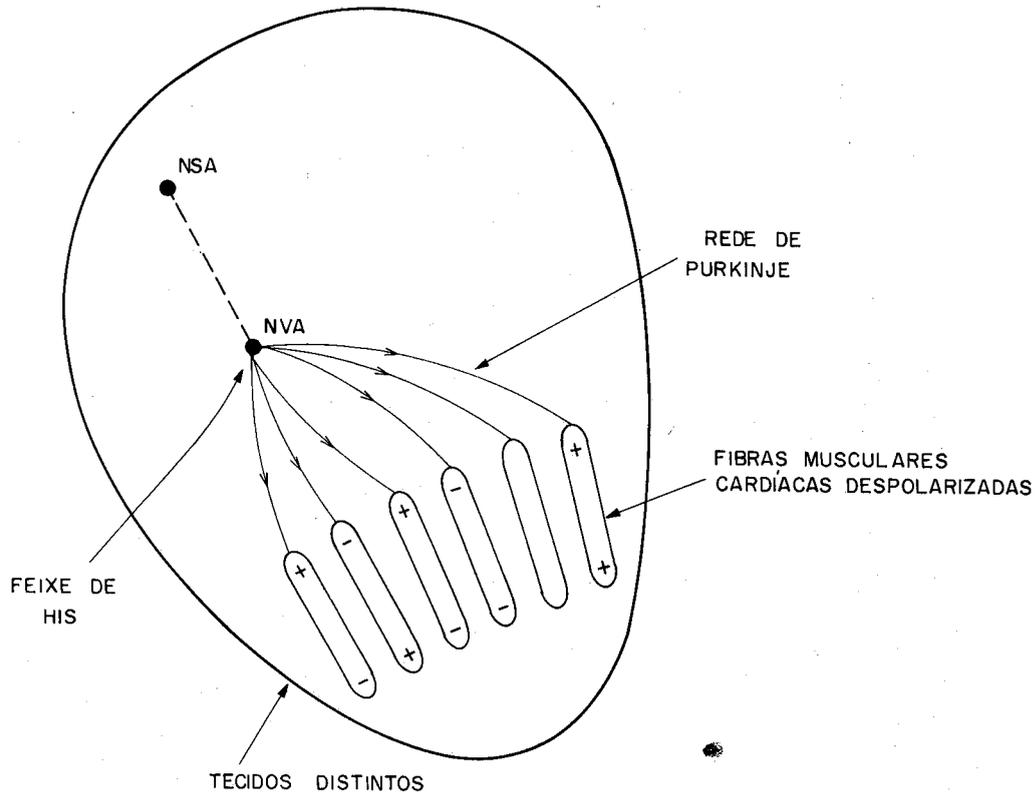


Figura 7.5.3: Fibras Despolarizadas

Seu funcionamento é simples. A descarga de um capacitor C é feita de modo que sua corrente elétrica tenha a forma da figura 7.6.2 e passe através do coração, no sentido do átrio ao ventrículo.

A área hachurada é a região efetiva da corrente, e corresponde ao tempo de 10ms. A descarga produz uma avalanche de corrente unidirecional forçando as fibras a ficarem polarizadas. Obtendo-se a polarização, as fibras voltam a obedecer ao sinal emitido pelo NSA e o coração restabelece o seu ritmo de batimento.

A energia da carga no capacitor é dada pela fórmula 7.6.1.

$$E_c = \frac{1}{2} C V_0^2 \quad (7.6.1)$$

Onde:

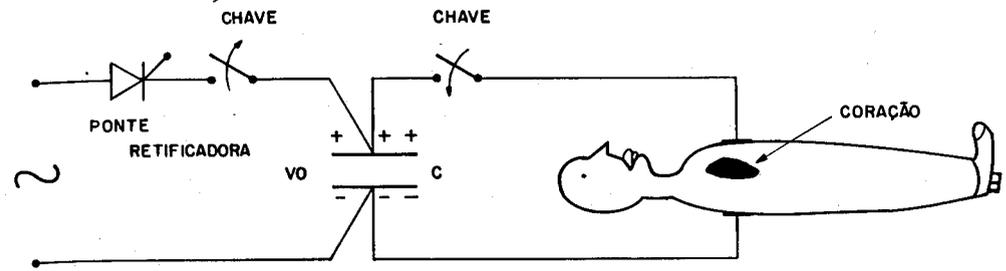


Figura 7.6.1: Desfibrilador Elétrico

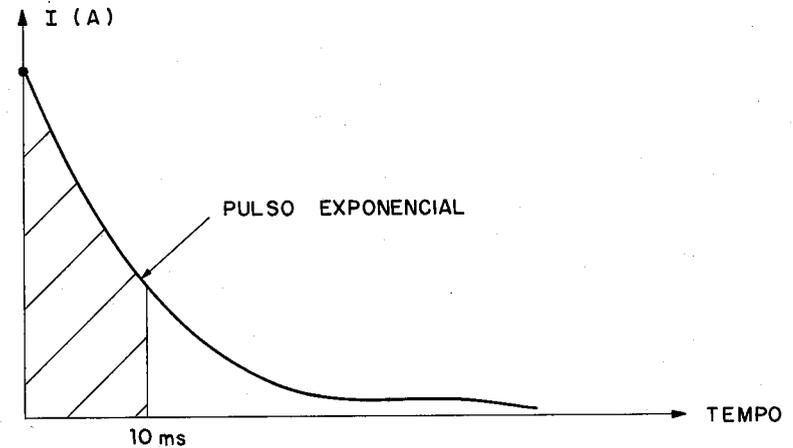


Figura 7.6.2: Corrente da Descarga

$E_c \Rightarrow$ Energia do capacitor [J]

$C \Rightarrow$ Capacitor [F]

$V_0 \Rightarrow$ Tensão do capacitor [V]

A escala do aparelho vai até 500J, a tensão no capacitor varia de 2 a 9kV, e a corrente de descarga pelo tórax do paciente na ordem de 1 a 30A.

7.7 Influência do Valor da Corrente Elétrica

A Tabela 7.7.1 apresenta os efeitos das correntes elétricas alternadas de 50 a 60Hz no corpo humano, sem levar em conta o tempo de duração do choque.

I (mA)	REAÇÃO FISIOLÓGICA		CONSEQUÊNCIA	SALVAMENTO	RESULTADO FINAL MAIS PROVÁVEL
	A.T.E.	C.C.			
25	ATE	1 mA (C.A.) - Limiar da sensação/sens. de formigamento 5-15 mA (C.A.) - Contração muscular 15-25 mA (C.A.) - Contr. Vio lenta impossib. de soltar o eletrodo. Prob. Respiratório	Se a corrente for próxima 25 mA --- pode haver Asfixia e conseq. Morte Aparente.	RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL	RESTABELECIMENTO
25-80	80-300	- Sensação Insuportável - Contrações Violentas - Asfixia	MORTE APARENTE	RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL	RESTABELECIMENTO
>80	>300	- Asfixia Imediata - Fibrilação Ventric. - Alteração Musculares (Químicas). - Queimaduras	MORTE APARENTE	- RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL - MASSAGEM CARDÍACA	CASO LEVADO AO HOSP. E FEITO A DESFIBRILAÇÃO -- RESTABELECIMENTO
CORRENTE DA ORDEM DE AMPÈRES		- Queimaduras (Efeito Térmico). - Necrose dos tecidos - Fibrilação Ventric. - Asfixia Imediata - Danos Posteriores Resultado do Produto da Electrolise	- MORTE APARENTE - DEPENDENDO DA EXTENSÃO DAS QUEIMADURAS. SE QUELAS OU MORTE	- RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL - MASSAGEM CARDÍACA - TRATAMENTO HOSPITALAR	- HOSPITAL - DESFIBRILAÇÃO - RECUPERAÇÃO DIFÍCIL - ATROFIA MUSCULAR - OUTROS DANOS

Tabela 7.7.1: Efeito da Corrente no Corpo Humano

A tabela apresenta apenas uma estimativa do efeito da corrente no corpo humano. O valor da corrente elétrica para causar determinado efeito no corpo humano é muito variado. Portanto, é difícil fazer uma correlação dos efeitos através de equações matemáticas.

7.8 Curva Tempo x Corrente

Muitas pesquisas foram feitas no sentido de obter-se um equacionamento que espelhasse a realidade do efeito da corrente elétrica no corpo humano. No entanto, devido às diferentes condições de choque e do próprio corpo humano, ainda não se obteve muito sucesso.

A curva Tempo x Corrente (figura 7.8.1) é uma das tentativas de mostrar o relacionamento entre a corrente elétrica aplicada por certo tempo e seus efeitos no corpo humano.

Onde:

Zona 2 - Geralmente nenhum efeito patofisiológico perigoso;

Zona 3 - Zona que produz algum efeito perigoso. O efeito mais importante é o pulmonar. Já pode haver risco de fibrilação;

Zona 4 - Zona perigosa com probabilidade de fibrilação superior em 50% das pessoas;

Zona S - Curva de segurança com probabilidade de 0,5% de ocorrência de fibrilação ventricular.

7.9 Limite de Corrente para Não Causar Fibrilação

Charles Dalziel concluiu, após pesquisa que 99,5% das pessoas com peso de 50kg ou mais, podem suportar sem a ocorrência de fibrilação ventricular, a corrente elétrica determinada pela expressão 7.9.1.

$$I_{\text{choque}} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (7.9.1)$$

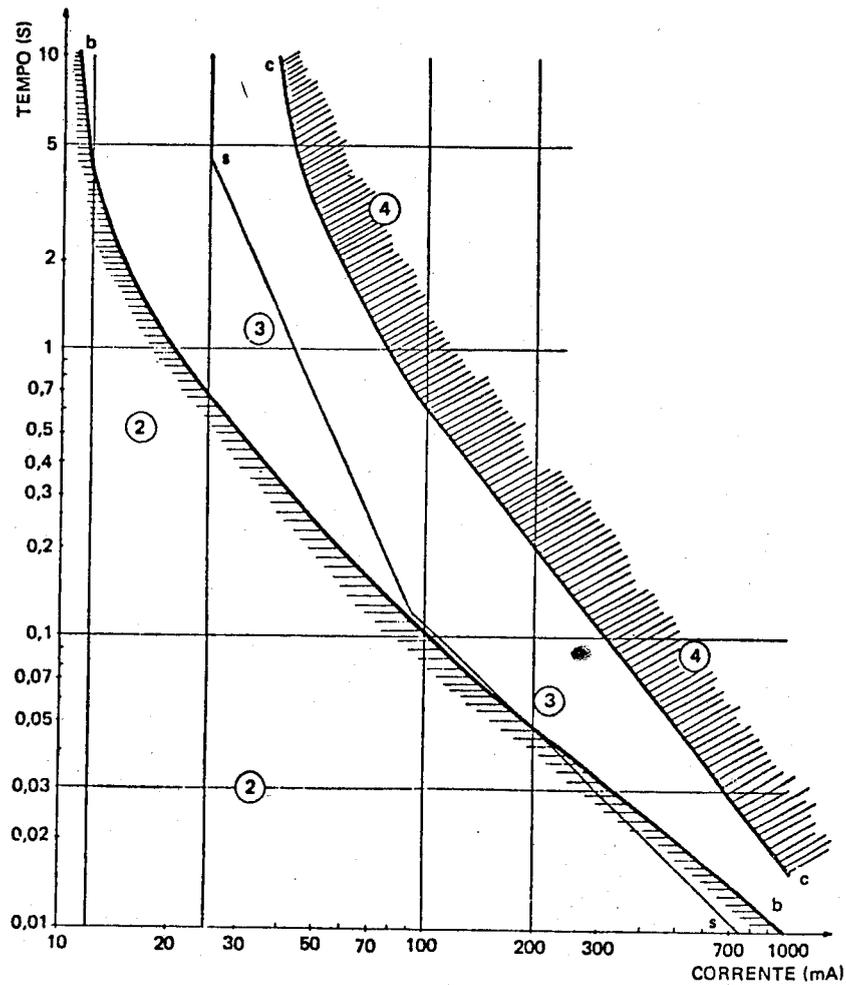


Figura 7.8.1: Curva Tempo x Corrente

Sendo:

$$0,03s \leq t \leq 3s$$

I_{choque} \Rightarrow Corrente [A] pelo corpo humano, limite para não causar fibrilação

t \Rightarrow Tempo [S] da duração do choque

A expressão 7.9.1 é usada para 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.

O tempo de choque é limitado pela atuação da proteção, de acordo com a curva do relé. Assim, para a maior corrente de defeito no sistema que passa pelo aterramento, a curva do relé fornece o tempo de atuação da proteção. Ver figura 7.9.1.

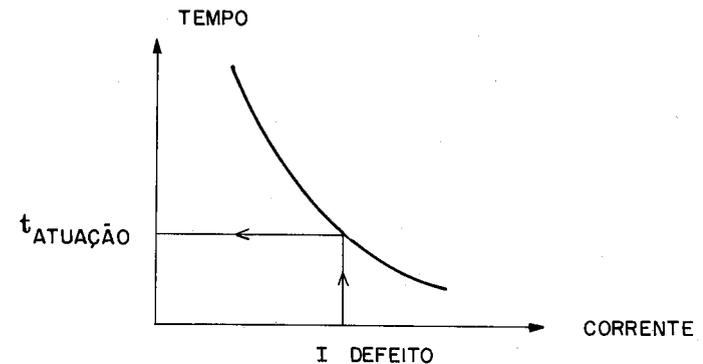


Figura 7.9.1: Curva Tempo x Corrente de Defeito

Este tempo, definido pela curva de atuação da proteção, levado à equação 7.9.1, permite a obtenção da corrente limite através do corpo humano, até a qual não ocorre fibrilação.

7.10 Potencial de Toque

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

O potencial máximo gerado por um aterramento durante o período de defeito, não deve produzir uma corrente de choque superior à limitada por Dalziel.

Pela figura 7.10.1, obtém-se a expressão do potencial de toque em relação à corrente elétrica de choque.

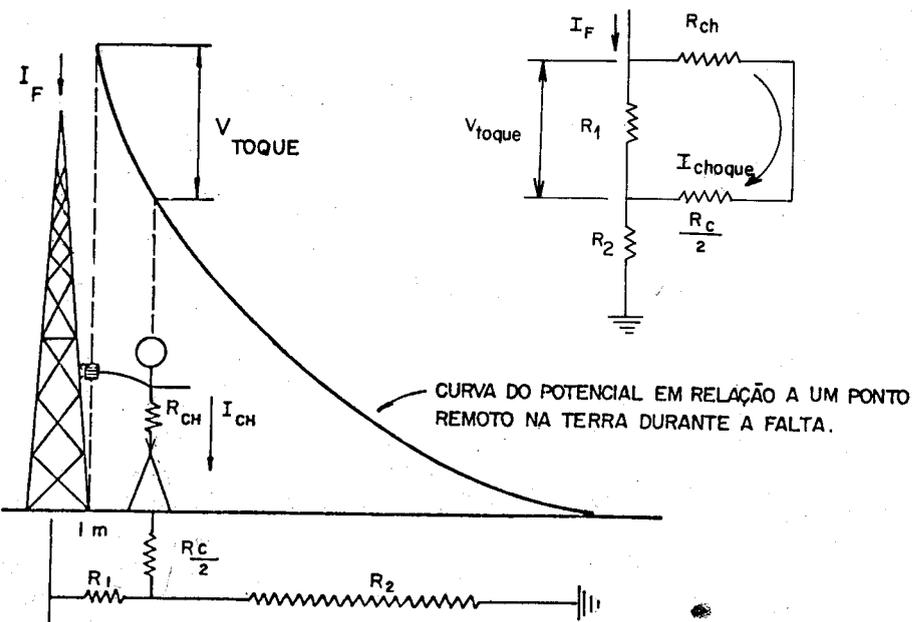


Figura 7.10.1: Potencial de Toque

$$V_{toque} = \left(R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) \cdot I_{choque} \quad (7.10.1)$$

Onde:

$R_{ch} \Rightarrow$ Resistência do corpo humano considerada 1.000Ω

$R_c \Rightarrow$ Resistência de contato que pode ser considerada igual a $3\mu s$ (resistividade superficial do solo), de acordo com a recomendação da IEEE-80 [38]

$I_{choque} \Rightarrow$ Corrente de choque pelo corpo humano

R_1 e $R_2 \Rightarrow$ Resistências dos trechos de terra considerados

A expressão do potencial de toque pode ser escrita da seguinte maneira:

$$V_{toque} = (1000 + 1,5 \mu s) I_{choque} \quad (7.10.2)$$

7.11 Potencial de Toque Máximo

O potencial de toque máximo permissível entre a mão e o pé, para não causar fibrilação ventricular, é o produzido pela corrente limite de Dalziel. Assim, da expressão 7.10.2, obtém-se:

$$V_{toque\ máximo} = (1000 + 1,5 \mu s) \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (7.11.1)$$

$$V_{toque\ máximo} = \frac{116 + 0,174 \mu s}{\sqrt{t}} \quad [Volts] \quad (7.11.2)$$

7.12 Potencial de Passo

Potencial de passo é a diferença de potencial existente entre os dois pés.

As tensões de passo ocorrem quando entre os membros de apoio (pés), aparecem diferenças de potencial. Isto pode acontecer quando os membros se encontrarem sobre linhas equipotenciais diferentes. Estas linhas equipotenciais se formam na superfície do solo quando do escoamento da corrente de curto-circuito. É claro que, se naquele breve espaço de tempo os dois pés estiverem sobre a mesma linha equipotencial ou, se um único pé estiver sendo usado como apoio, não haverá a tensão de passo.

A figura 7.12.1 mostra o potencial de passo devido a um raio que cai no solo.

A definição clássica do potencial de passo para análise de segurança é a diferença de potencial que aparece entre dois pontos situados no chão e distanciados de 1m (para pessoas), devido à passagem de corrente de curto-circuito pela terra. Ver figura 7.12.2.

Onde:

$R_1, R_2, R_3 \Rightarrow$ são as resistências dos trechos de terra considerados

A expressão do potencial de passo é:

$$V_{passo} = (R_{ch} + 2R_c) I_{choque} \quad (7.12.1)$$

Fazendo $R_c = 3\mu s$, tem-se

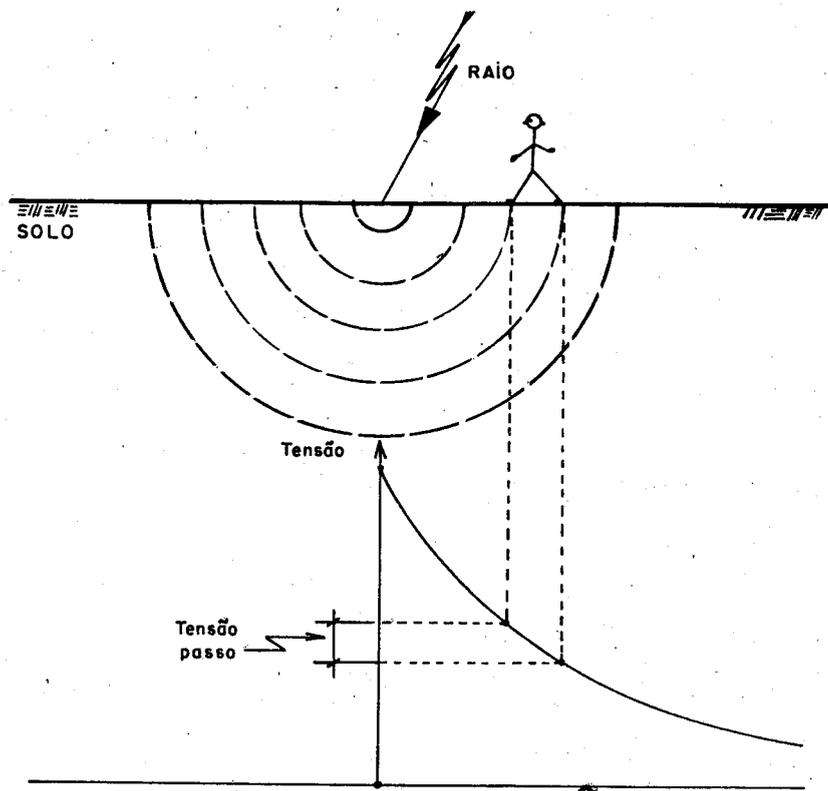


Figura 7.12.1: Tensão de Passo de Um Raio

$$V_{passo} = (1000 + 6\rho_s) I_{choque} \quad (7.12.2)$$

7.13 Potencial de Passo Máximo

O potencial de passo máximo ($V_{passo\ máximo}$) tolerável é limitado pela máxima corrente permissível pelo corpo humano que não causa fibrilação. Assim, tem-se

$$V_{passo\ máximo} = (1000 + 6\rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (7.13.1)$$

$$V_{passo\ máximo} = \frac{116 + 0,696\rho_s}{\sqrt{t}} \quad (7.13.2)$$

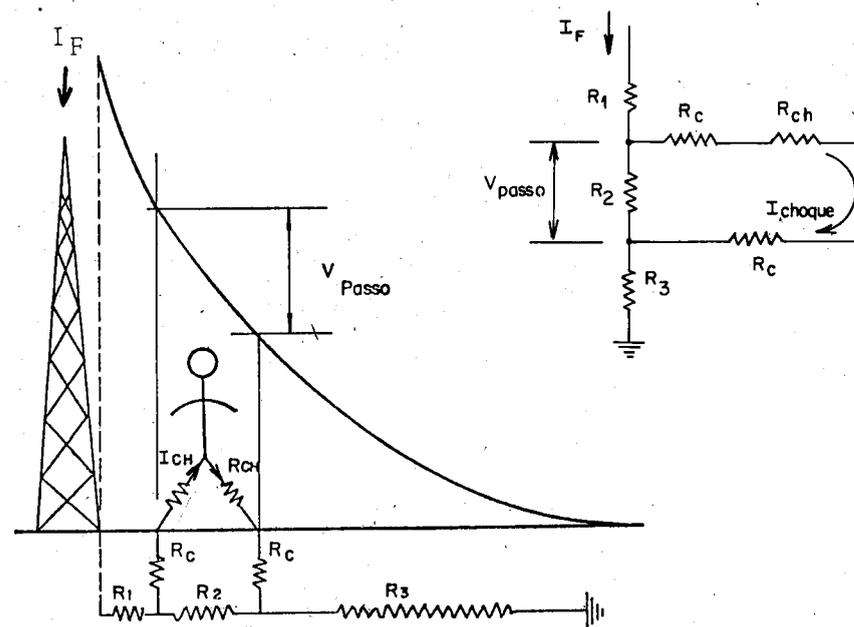


Figura 7.12.2: Tensão de Passo

7.14 Correção do Potencial de Passo e de Toque Máximo Admissível Devido à Colocação de Brita na Superfície

Como a área da subestação é a mais perigosa, o solo é revestido por uma camada de brita. Esta confere maior qualidade no nível de isolamento dos contatos dos pés com o solo. Ver figura 7.14.1.

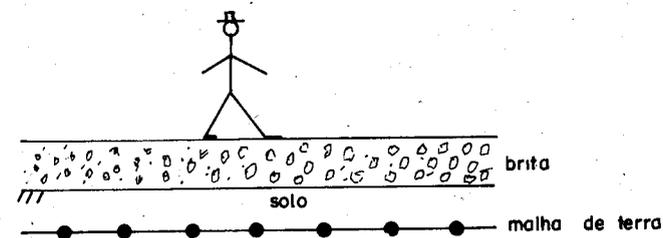


Figura 7.14.1: Camada de Brita

Esta camada representa uma estratificação adicional com a camada superficial do solo. Portanto, deve-se fazer uma correção no parâmetro que contém ρ_s das expressões 7.11.1 e 7.13.1.

Deve-se fazer uma correção $C_s(h_s, K)$ no $\rho_s = \rho_{brita} = 3000\Omega.m$ (brita moída).

O fator de correção $C_s(h_s, K)$ é dado por:

$$C_s(h_s, K) = \frac{1}{0,96} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h_s}{0,08})^2}} \right] \quad (7.14.1)$$

Onde:

$h_s \Rightarrow$ Profundidade (espessura) da brita [m]

$$K = \frac{\rho_a - \rho_s}{\rho_a + \rho_s}$$

$\rho_a \Rightarrow$ Resistividade aparente da malha, sem considerar a brita

$\rho_s = \rho_{brita} \Rightarrow$ Resistividade da brita

$C_s = 1 \Rightarrow$ Se a resistividade da brita for igual a resistividade do solo

Assim, as expressões 7.11.1 e 7.13.1, com o fator de correção, ficam:

$$V_{toque\ máximo} = [1000 + 1,5 C_s(h_s, K) \rho_s] \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (7.14.2)$$

$$V_{passo\ máximo} = [1000 + 6 C_s(h_s, K) \rho_s] \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (7.14.3)$$

7.15 Medida de Potencial de Toque

Para determinação do potencial de toque, utiliza-se duas placas de cobre ou alumínio, com superfícies bem polidas, de dimensões 10x20cm e com um terminal próprio para interligação com os terminais do voltímetro. As dimensões acima simulam a área do pé humano e, para simular o peso, deve-se colocar 40kg sobre cada placa (admitindo um peso humano de 80kg).

Deve ser usado um voltímetro de alta sensibilidade (alta impedância interna) e intercalar entre os pontos de medição uma resistência com o valor de 1000Ω para

simular a resistência do corpo humano. A seguir, mede-se o potencial entre o solo (placa colocada a 1m de distância do pé da estrutura) e a estrutura metálica no ponto de alcance da mão, com a resistência inserida entre estes dois pontos. Ver figura 7.15.1.

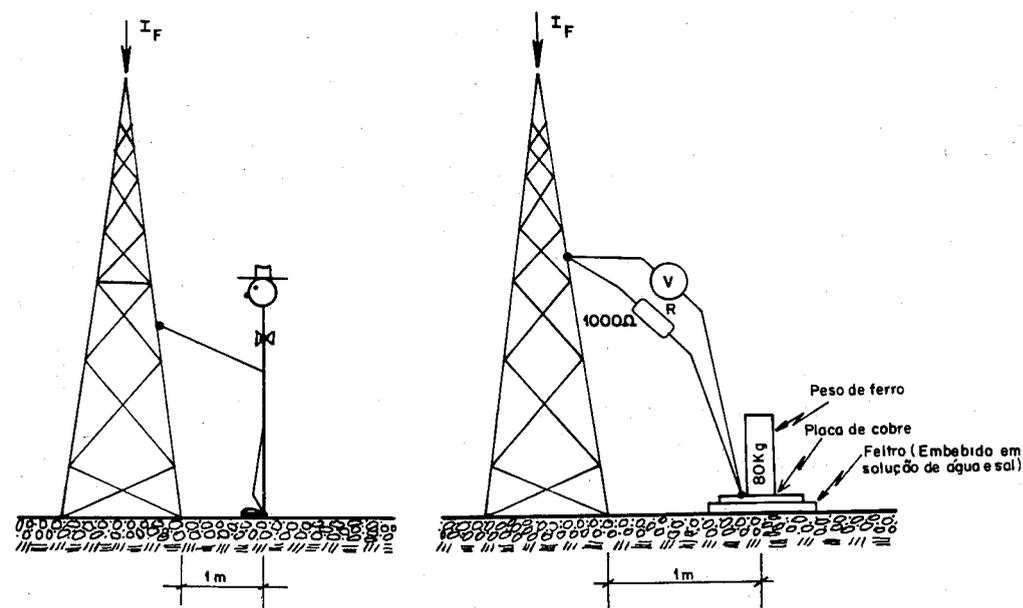


Figura 7.15.1: Medida de Potencial de Toque

Deve-se efetuar a medida em todos os quadrantes do solo, com relação à estrutura, e verificar se os pontos da estrutura, onde se aplica o voltímetro, estão limpos, livres de pinturas, óxidos, etc.

Para a extrapolação desse valor de tensão, devido à corrente aplicada ao solo, para valores referidos à máxima corrente de curto-circuito fase-terra, pode-se considerar extrapolação linear, supondo que a terra mantenha as características resistivas invariáveis para altas correntes.

Exemplo: Se para 5A o potencial de toque é 10V, para uma corrente de curto de 1000A, o valor de V_{toque} é 2000V. Ver figura 7.15.2.

Na prática, os valores medidos devem ser menores do que os valores determinados pelos limites de segurança.

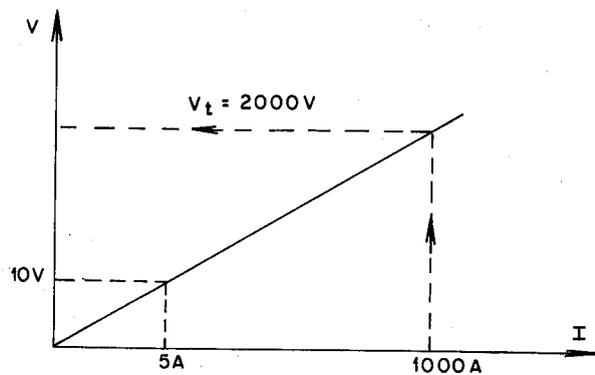


Figura 7.15.2: Extrapolação do Potencial de Toque

7.16 Medida de Potencial de Passo

Para a medida do potencial de passo, são utilizadas duas placas de cobre ou alumínio, como descritas no item anterior, que serão colocadas no solo espaçadas de 1 metro. Deverá ser aplicado um peso de 40kg a cada placa para simular o peso do corpo humano e inserir entre os dois pontos uma resistência de 1000Ω (vide figura 7.16.1).

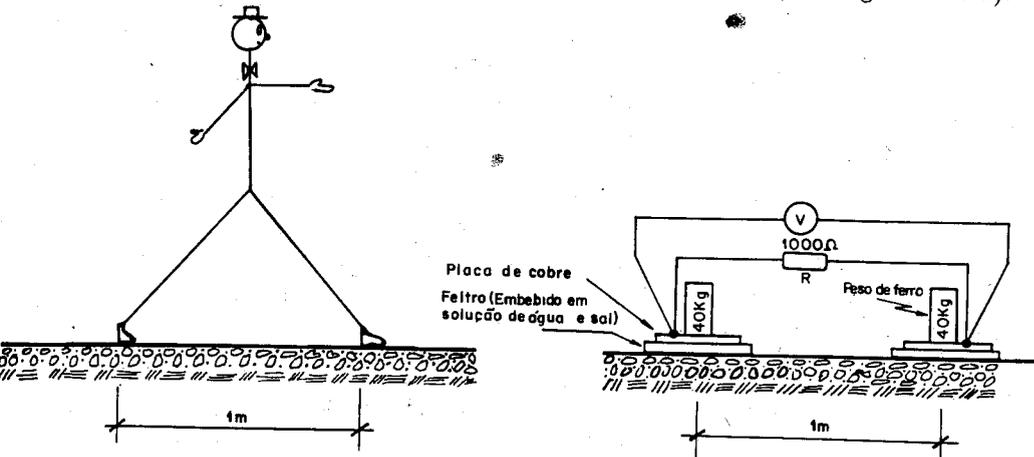


Figura 7.16.1: Medida de Potencial de Passo

O potencial obtido, medido com voltímetro de alta impedância interna, deverá ser extrapolado para valores de corrente de curto-circuito fase-terra, como já foi explicado no item anterior. Na prática, também deve-se ter valores medidos abaixo dos valores especificados pelos limites de segurança.

Capítulo 8

Malha de Aterramento

8.1 Introdução

Neste capítulo serão vistos os passos necessários para o dimensionamento da malha de terra de uma subestação. Resumidamente pode-se dizer que dimensionar uma malha de terra é verificar se os potenciais que surgem na superfície, quando da ocorrência do máximo defeito à terra, são inferiores aos máximos potenciais de passo e toque que uma pessoa pode suportar sem a ocorrência de fibrilação ventricular. Além disso, deve ser dimensionado o condutor da malha, de forma a suportar os esforços mecânicos e térmicos a que estarão sujeitos ao longo de sua vida útil. É fundamental também, levar-se em conta que o valor da resistência de terra da malha deve ser compatível, para sensibilizar o relé de neutro, no nível de corrente no final do trecho protegido. Deve-se ressaltar que o dimensionamento de uma malha de terra é um processo iterativo. Parte-se de uma malha inicial e verifica-se os potenciais, na superfície, quando do máximo defeito à terra, são inferiores aos valores máximos suportáveis por um ser humano. Caso a condição se verifique, parte-se para o detalhamento da malha. Caso contrário, modifica-se o projeto inicial da malha até se estabelecer as condições exigidas.

8.2 Itens Necessários ao Projeto

Quando da elaboração do projeto da malha de terra da subestação, são necessários alguns procedimentos pré-definidos, bem como informações do local da construção da subestação. Eles são:

- Fazer no local da construção da malha de terra, as medições necessárias pelo método de **Wenner**, afim de se obter a estratificação do solo;

- b) Resistividade superficial do solo (ρ_s). Geralmente utiliza-se brita na superfície do solo sobre a malha, que forma uma camada mais isolante, contribuindo para a segurança humana. Neste caso, utiliza-se o valor da resistividade da brita molhada ($\rho_s = 3000 \Omega.m$). Aqui deve-se considerar o item 7.14. No caso de não utilizar-se brita, usa-se a resistividade da primeira camada obtida da estratificação, isto é, $\rho_s = \rho_1$;
- c) Corrente de curto-circuito máxima entre fase e terra no local do aterramento ($I_{máxima} = 3I_0$); Ver referência [11];
- d) Percentual da corrente de curto-circuito máxima que realmente escoar pela malha. Deve-se observar os diversos caminhos pelos quais a corrente de seqüência zero pode circular, a que entra na malha pela terra é conhecida por corrente de malha (I_{malha}), ver Apêndice B;
- e) Tempo de defeito para a máxima corrente de curto-circuito fase-terra ($t_{defeito}$); referência [16];
- f) Área da malha pretendida;
- g) Valor máximo da resistência de terra de modo a ser compatível com a sensibilidade da proteção.

Passa-se a descrever, nos itens subseqüentes, os elementos a serem considerados no dimensionamento da malha de terra. Estas recomendações estão de acordo com a referência [41].

8.3 Estratificação do Solo

Com as medidas de resistividade feitas no local da subestação pelo método de Wenner e utilizando-se um dos métodos vistos no Capítulo 3, chega-se a um modelo de solo estratificado.

8.4 Determinação da Resistividade Aparente

Como foi visto no Capítulo 6, para um sistema de aterramento, no caso a malha de terra, pode-se determinar uma resistividade equivalente homogênea que o sistema de aterramento enxerga. Esta resistividade convencionou-se chamar de resistividade aparente e viu-se que ela depende da estratificação do solo e das dimensões do aterramento. Com estes valores obtidos, determina-se a resistividade aparente do solo para esta malha.

8.5 Dimensionamento do Condutor da Malha

O condutor da malha de terra é dimensionado considerando os esforços mecânicos e térmicos que ele pode suportar. Deve ser verificado também, se o condutor suporta os esforços de compressão e cisalhamento a que estará sujeito. Na prática, utiliza-se, no mínimo, o condutor $35mm^2$, que suporta os esforços mecânicos da movimentação do solo e dos veículos que transportam os equipamentos durante a montagem da subestação.

Quanto ao dimensionamento térmico, utiliza-se a fórmula de Onderdonk 8.5.1, válida somente para cabos de cobre, que considera o calor produzido pela corrente de curto-circuito totalmente restrito ao condutor.

$$I = 226,53 S_{cobre} \sqrt{\frac{1}{t_{defeito}} \ln \left(\frac{\theta_m - \theta_a}{234 + \theta_a} + 1 \right)} \quad (8.5.1)$$

Sendo:

$S_{cobre} \Rightarrow$ Secção do condutor de cobre da malha de terra em mm^2 .

$I \Rightarrow$ Corrente de defeito em Ampères, através do condutor.

$t_{defeito} \Rightarrow$ Duração do defeito em Segundos.

$\theta_a \Rightarrow$ Temperatura ambiente em $^{\circ}C$.

$\theta_m \Rightarrow$ Temperatura máxima permissível em $^{\circ}C$.

Com isso pode-se verificar se o condutor suporta os esforços provocados pela elevação da temperatura.

Para condutores de cobre, o valor de θ_m é limitado pelo tipo de conexão adotado.

As conexões podem ser do tipo:

- Conexão cavilhada com juntas de bronze; é uma conexão tradicional por aperto (pressão), cuja temperatura máxima é de $\theta_m = 250^{\circ}C$.
- Solda convencional feita com eletrodo revestido, cuja fusão se dá através do arco elétrico produzido pela Máquina de Solda, sua temperatura máxima é de $\theta_m = 450^{\circ}C$.
- Brasagem com liga Foscooper, é uma união feita usando o maçarico (Oxi-Acetileno), cuja temperatura máxima é de $\theta_m = 550^{\circ}C$. Foscooper é uma liga cobre

e fósforo, cuja união é feita por brasagem, vulgarmente conhecida como solda heterógena.

- Solda exotérmica, conhecida como aluminotermia, cuja conexão é feita pela fusão obtida pela ignição e combustão dos ingredientes no cadinho. Neste caso a temperatura máxima é de $\theta_m = 850^\circ C$.

Resumidamente, o valor de θ_m é:

$\theta_m = 250^\circ C \Rightarrow$ para malha cavilhada com juntas de bronze;

$\theta_m = 450^\circ C \Rightarrow$ para malha com emendas tipo solda convencional;

$\theta_m = 550^\circ C \Rightarrow$ para malha cuja conexão é com **Foscoper**;

$\theta_m = 850^\circ C \Rightarrow$ para malha com emendas em solda exotérmica.

Para o dimensionamento do condutor da malha ou do cabo de ligação que interliga os equipamentos a serem aterrados à malha, deve-se considerar a corrente de defeito de acordo com a figura 8.5.1.

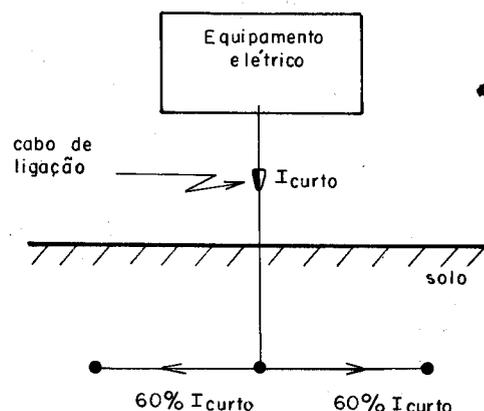


Figura 8.5.1: Dimensionamento do Condutor

a) Cabo da Malha

A conexão do cabo de descida (ligação) a malha, geralmente é feito no ponto mais próximo à malha, dividindo o segmento do lado da quadrícula em duas partes

(figura 8.5.1). A corrente de defeito (curto-circuito), divide-se em 50% para cada lado, mas para o dimensionamento, a corrente a ser utilizada na expressão 8.5.1 terá um acréscimo de 10%, isto é

$$I_{\text{defeito condutor da malha}} = 60\% I_{\text{curto máximo}} \quad (8.5.2)$$

b) Cabo de Ligação

A conexão do cabo de ligação ao equipamento elétrico é feito por aperto, portanto, sua temperatura máxima é a mesma da junta cavilhada, isto é, de $250^\circ C$.

De acordo com a figura 8.5.1, a corrente de defeito a ser empregada na expressão 8.5.1, será a corrente total de curto-circuito máximo.

A Tabela 8.5.1 resume o dimensionamento do condutor. Nela é apresentada a secção do condutor necessária para cada ampère da corrente de defeito, em função do tempo de defeito e do tipo de emenda.

Tempo de Defeito (Segundos)	Capacidade do Condutor de Cobre em $\frac{mm^2}{kA}$		
	Condutor 97% Cu		
	Solda Exotérmica	Solda Convencional	Juntas Cavilhadas
0,5	2,44	3,20	4,05
1	3,45	4,51	5,78
4	6,84	9,07	11,50
30	18,74	24,83	31,52

Tabela 8.5.1: Dimensionamento dos Condutores da Malha e Cabo de Ligação

8.6 Potenciais Máximos a Serem Verificados

No Capítulo 7 definiu-se o potencial de passo e toque e, também, mostrou-se como calcular os potenciais máximos de passo e toque que uma pessoa pode suportar sem a ocorrência de fibrilação ventricular. Estes potenciais máximos são utilizados, como limites dos potenciais que surgem na superfície do solo sobre a malha, quando da ocorrência do maior defeito fase-terra. A malha só pode ser aceita se os potenciais estiverem abaixo dos limites calculados pelas expressões 7.14.2 e 7.14.3. Ou seja,

$$V_{\text{toque}} \leq V_{\text{toque máximo}}$$

$$V_{\text{passo}} \leq V_{\text{passo máximo}}$$

8.7 Malha Inicial

Como já foi dito, o dimensionamento de uma malha de terra é um processo iterativo, que parte de um projeto inicial de malha. A seguir é verificado se os potenciais que surgem na superfície do solo são inferiores aos limites vistos no item 8.6 e se a resistência de aterramento da malha é compatível com a sensibilidade da proteção.

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

Um espaçamento inicial típico adotado está entre 5% e 10% do comprimento dos respectivos lados da malha. A figura 8.7.1 mostra o projeto inicial da malha.

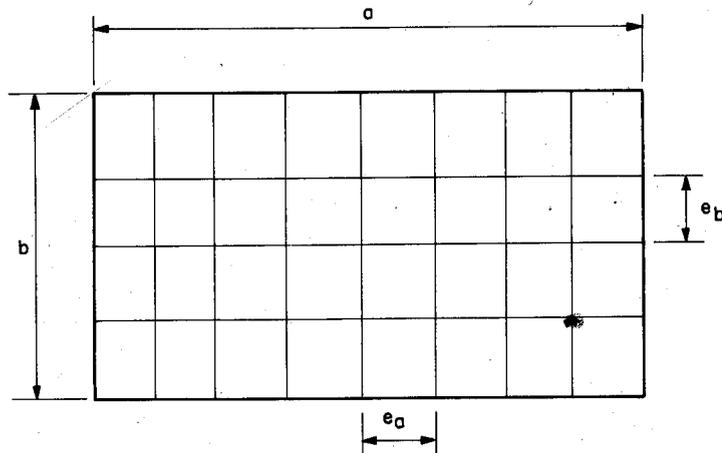


Figura 8.7.1: Projeto Inicial da Malha

Todas as fórmulas a serem usadas no cálculo do dimensionamento da malha de terra, foram deduzidas considerando as submalhas quadradas, isto é, $e_a \cong e_b$.

Tendo-se as dimensões da malha determina-se o número de condutores paralelos, ao longo dos lados da malha, pelas expressões:

$$N_a = \frac{a}{e_a} + 1 \quad (8.7.1)$$

$$N_b = \frac{b}{e_b} + 1 \quad (8.7.2)$$

Escolhe-se o número inteiro, adequado ao resultado do cálculo acima.

O comprimento total dos condutores que formam a malha é dado pela expressão:

$$L_{cabo} = a N_b + b N_a \quad (8.7.3)$$

Se durante o dimensionamento forem introduzidas hastes na malha, deve-se acrescentar seus comprimentos na determinação do comprimento total de condutores na malha, conforme expressão 8.7.4.

$$L_{total} = L_{cabo} + L_{hastes} \quad (8.7.4)$$

Onde:

$L_{cabo} \Rightarrow$ Comprimento total de condutores da malha

$L_{hastes} \Rightarrow$ Comprimento total das hastes cravadas na malha

8.8 Resistência de Aterramento da Malha

A resistência de aterramento da malha pode, aproximadamente, ser calculada pela fórmula de Sverak [45] abaixo, que é uma correção feita da fórmula de Laurent, C.1.2. Esta fórmula leva em conta a profundidade (h) em que a malha é construída.

$$R_{malha} = \rho a \left[\frac{1}{L_{total}} + \frac{1}{\sqrt{20 A_{malha}}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A_{malha}}}} \right) \right] \quad (8.8.1)$$

Onde:

$A_{malha} = a.b \Rightarrow$ Área ocupada pela malha [m^2]

$h \Rightarrow$ Profundidade da malha [m], com $0,25m \leq h \leq 2,5m$

$L_{total} \Rightarrow$ Comprimento total dos cabos e hastes que formam a malha

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

Este valor geralmente é verificado devido ao baixo ajuste do relé de neutro.

Várias expressões para R_{malha} propostas por outros pesquisadores são apresentadas no Apêndice C.

8.9 Potencial de Malha

O potencial de malha (V_{malha}) é definido como o potencial de toque máximo, encontrado dentro de uma submalha da malha de terra, quando do máximo defeito fase-terra. Numa malha de terra, a corrente de defeito escoar preferencialmente pelas bordas da malha. Ver figura 8.9.1.

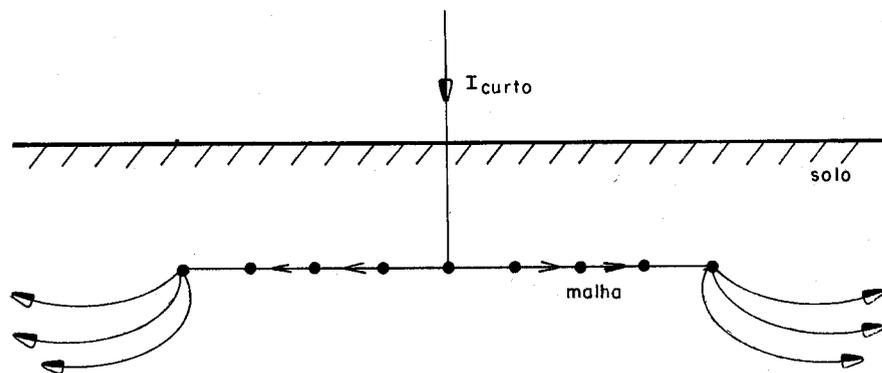


Figura 8.9.1: Correntes Pelas Bordas da Malha

Isto se dá, devido à interação entre os condutores no interior da malha que forçam o escoamento da corrente pelas bordas da malha. Assim, o potencial de malha máximo se encontra nos cantos da malha e pode ser calculado pela expressão:

$$V_{malha} = \frac{\rho_a K_m K_i I_{malha}}{L_{total}} \quad (8.9.1)$$

Onde K_m é definido como o coeficiente de malha, que condensa a influência da profundidade da malha, diâmetro do condutor e do espaçamento entre condutores.

Seu valor é dado pela expressão:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{e^2}{16hd} + \frac{(e+2h)^2}{8ed} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2N-1)} \right\} \quad (8.9.2)$$

Sendo:

h \Rightarrow Profundidade da malha [m]

e \Rightarrow Espaçamento entre condutores paralelos ao longo do lado da malha [m]

d \Rightarrow Diâmetro do condutor da malha [m]

$N = \sqrt{N_a N_b}$ \Rightarrow A malha retangular é transformada numa malha quadrada com N condutores paralelos em cada lado

$K_{ii} = 1$ \Rightarrow Para malha com hastes cravadas ao longo do perímetro ou nos cantos da malha ou ambos

$K_{ii} = \frac{1}{(2N)^{1/2}}$ \Rightarrow Para malha sem hastes cravadas na malha ou com poucas hastes não localizadas nos cantos e perímetro da malha

K_h \Rightarrow Correção de profundidade é calculado pela expressão 8.9.3.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (8.9.3)$$

Onde:

$$h_0 = 1m .$$

Já o K_i é definido como coeficiente de irregularidade, que condensa os efeitos da não uniformidade de distribuição da corrente pela malha.

O valor de K_i é dado pela expressão:

$$K_i = 0,656 + 0,172 N \quad (8.9.4)$$

Os demais termos da expressão 8.9.1 são:

ρ_a \Rightarrow Resistividade aparente vista pela malha

I_{malha} \Rightarrow Parcela da corrente máxima de falta que realmente escoar da malha para a terra

L_{total} \Rightarrow Comprimento total dos condutores da malha

No caso de malhas onde são colocadas hastes cravadas nos cantos e/ou no perímetro, figura 8.9.2, as correntes têm maior facilidade de escoar mais profundamente no solo, alterando portanto, o potencial de malha calculado pela expressão 8.9.1.

Neste caso, faz-se uma correção, ponderando-se em 15% a mais no comprimento das hastes cravadas nos cantos e na periferia da malha. Considera-se, então,

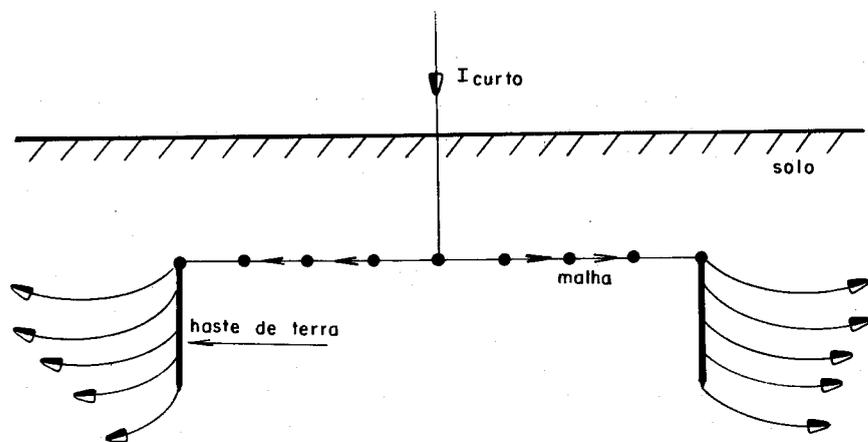


Figura 8.9.2: Hastes no Perímetro da Malha

um comprimento virtual de condutores dado pela expressão 8.9.5 que deverá ser usado na expressão 8.9.1, para o cálculo do valor de V_{malha} .

$$L_{total} = L_{cabo} + 1,15 L_{hastes} \quad (8.9.5)$$

Onde:

$L_{hastes} \Rightarrow$ Comprimento total das hastes cravadas na malha

Assim, para este caso, o valor de V_{malha} é dado por:

$$V_{malha} = \frac{\rho a K_m K_i I_{malha}}{L_{cabo} + 1,15 L_{hastes}} \quad (8.9.6)$$

No caso de malhas sem hastes cravadas nos cantos ou no perímetro, ou com poucas em seu interior, a expressão 8.9.1 permanece a mesma, isto é, sem ponderação maior para L_{total} .

O valor do potencial de malha deve ser comparado com o valor do potencial de toque máximo calculado pela expressão 7.14.2, para verificar se está abaixo do limite.

No caso da malha ter outra configuração, pode-se, aproximadamente, transformá-la numa malha retangular equivalente e efetuar toda a seqüência de cálculo.

8.10 Potencial de Passo na Malha

Neste item, procura-se determinar o maior potencial de passo (V_{psM}) que surge na superfície da malha, quando do máximo defeito fase-terra. Este potencial ocorre na periferia da malha e pode ser calculado pela expressão:

$$V_{psM} = \frac{\rho a K_p K_i I_{malha}}{L_{total}} \quad (8.10.1)$$

Onde:

$K_p \Rightarrow$ Coeficiente que introduz no cálculo a maior diferença de potencial entre dois pontos distanciados de 1m. Este coeficiente relaciona todos os parâmetros da malha que induzem tensões na superfície da terra.

A expressão para o cálculo de K_p é dada por:

$$K_p = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{e+h} + \frac{1}{e} (1 - 0,5^{N-2}) \right] \quad (8.10.2)$$

Onde:

$N = \text{Máximo}(N_a, N_b) \Rightarrow$ este dará o maior valor para K_p

As correções feitas no cálculo de V_{psM} com relação à utilização ou não de hastes, na periferia e nos cantos da malha, devem também ser efetuados.

Para a malha que tiver hastes na periferia ou nos cantos da malha, a expressão 8.10.1 fica modificada para:

$$V_{psM} = \frac{\rho a K_p K_i I_{malha}}{L_{cabo} + 1,15 L_{hastes}} \quad (8.10.3)$$

O valor de V_{psM} deve ser comparado com o valor da tensão de passo máxima que o organismo humano deve suportar, calculada pela expressão 7.14.3, para verificar se o seu valor está abaixo do limite.

8.11 Limitações das Equações de V_{Malha} e V_{psM}

As expressões vistas, para o cálculo de V_{malha} e V_{psM} têm algumas limitações, que devem ser consideradas para se ter um projeto seguro.

Estas limitações são:

$$N \leq 25$$

$$d < 0,25h$$

$$0,25m \leq h \leq 2,5m$$

$$e \geq 2,5m$$

8.12 Potencial de Toque Máximo da Malha em Relação ao Infinito

Os equipamentos têm suas partes metálicas ligadas (aterradas) na malha de terra da subestação. O potencial gerado pela maior corrente de curto-circuito monofásica à terra, entre as partes metálicas dos equipamentos e um ponto no infinito é dado pela expressão:

$$V_{\text{toque máximo da malha}} = R_{\text{malha}} \cdot I_{\text{malha}} \tag{8.12.1}$$

Se este valor estiver abaixo do limite da tensão de toque para não causar fibrilação, significa que a malha satisfaz todos os requisitos de segurança, isto é, ela está bem dimensionada.

Esta verificação é:

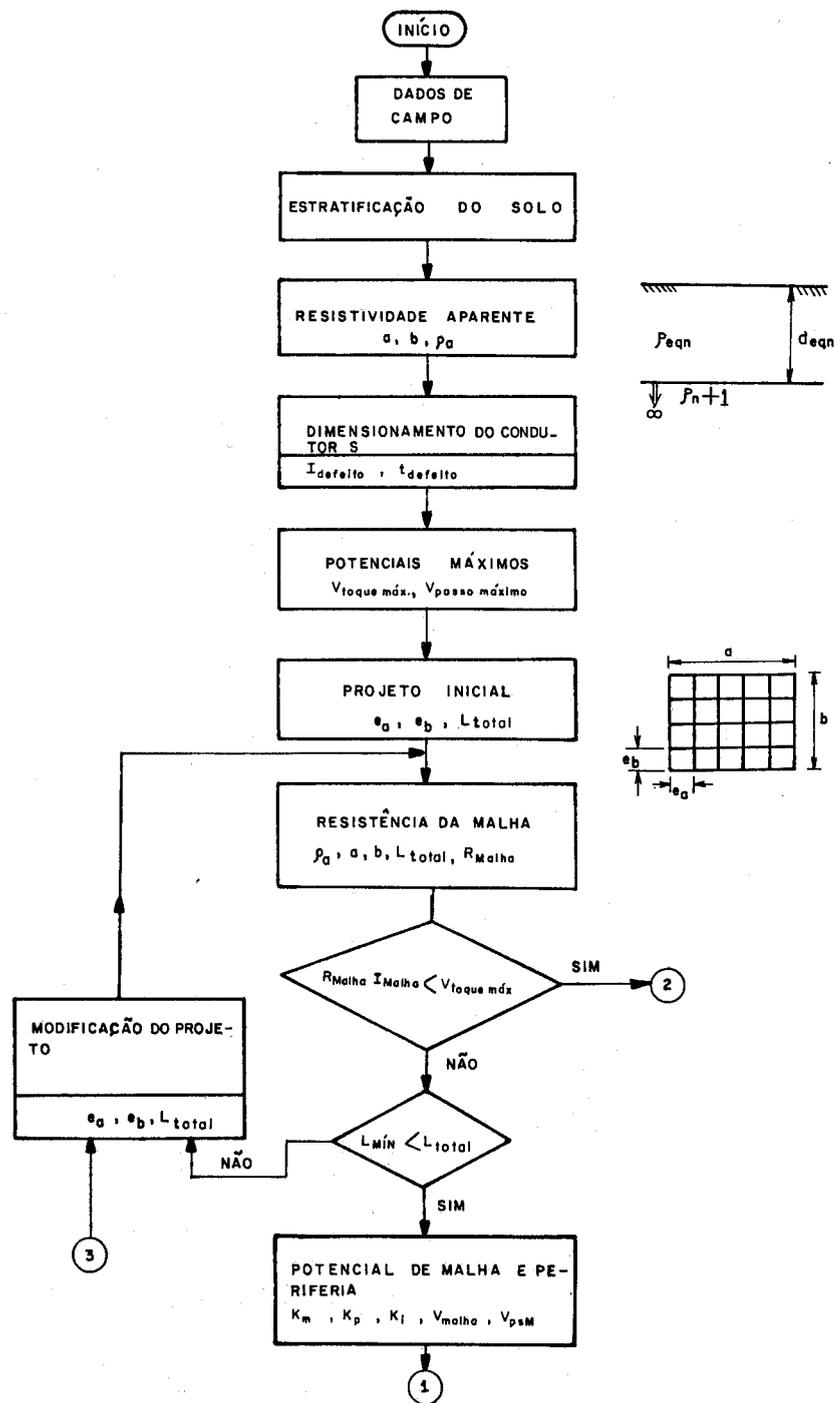
$$V_{\text{toque máximo da malha}} = R_{\text{malha}} \cdot I_{\text{malha}} \leq V_{\text{toque máximo}} \tag{8.12.2}$$

O fato de o valor de $V_{\text{toque máximo da malha}}$ não atender à condição, não significa que a malha é inadequada. Deve-se, então, fazer todos os cálculos necessários de verificação das tensões V_{malha} e V_{psM} em adequação com o limite de fibrilação. A seqüência e o detalhamento do cálculo do dimensionamento da malha serão vistos no item a seguir.

8.13 Fluxograma do Dimensionamento da Malha de Terra

Dimensionar uma malha de terra é, na verdade, verificar se todos os itens estão dentro dos limites de segurança. Estrategicamente, pode-se ir, iterativamente, redimensionando a malha, no sentido de otimizá-la sob o ponto de vista econômico, mantendo sempre estabelecida a segurança.

O processo é iterativo, seguindo o fluxograma apresentado na figura 8.13.1.



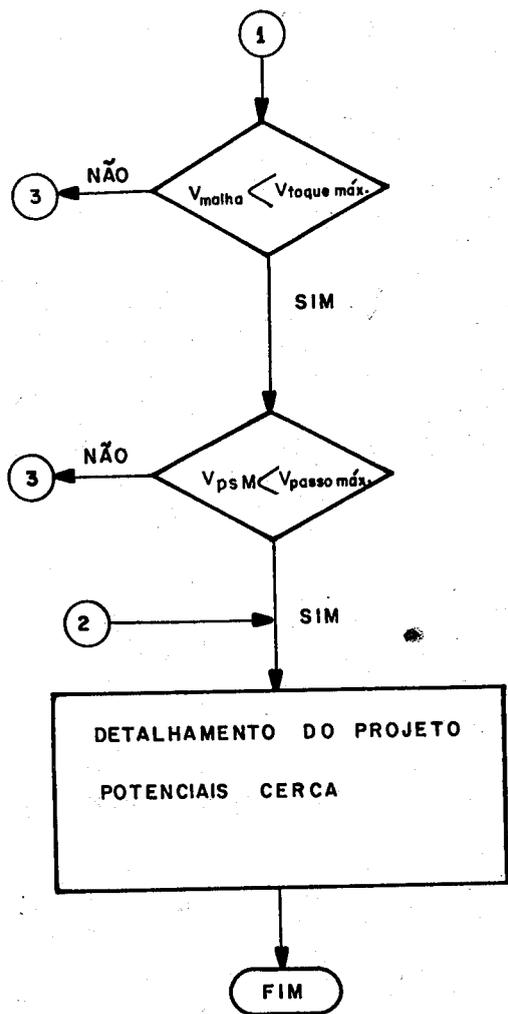


Figura 8.13.1: Fluxograma da Malha de Terra

Fazendo o cálculo, chega-se a uma malha adequada que atende aos requisitos de segurança e de sensibilidade da proteção.

Deve-se, a seguir, fazer o detalhamento da malha, inclusive decidir sobre isolamento através de muro de alvenaria ou cerca metálica.

8.14 Potencial de Toque na Cerca Perimetral da Malha

Dependendo do grau de risco, localização e característica da malha, deve-se decidir adequadamente o modo como ela será cercada.

Usualmente, costuma-se isolar a malha através de:

- Muro de alvenaria
- Cerca metálica

A cerca metálica é bem econômica, mas sendo condutora, fica submetida às tensões oriundas das correntes de curto-circuito da subestação.

Assim, qualquer pessoa que toca na cerca ficará sujeita a uma diferença de potencial. O potencial de toque máximo na cerca deve ser calculado, de forma a se verificar se é inferior ao valor limite do potencial de toque tolerável.

O potencial de toque máximo (V_{cerca}) que surge na cerca quando do máximo defeito à terra é dado pela expressão:

$$V_{cerca} = \frac{\rho a K_c K_i I_{malha}}{L_{total}} \quad (8.14.1)$$

Onde:

K_c ⇒ Coeficiente que relaciona todos os parâmetros da malha com a posição da pessoa que está tocando a cerca metálica. Seu valor é dado pela expressão 8.14.2.

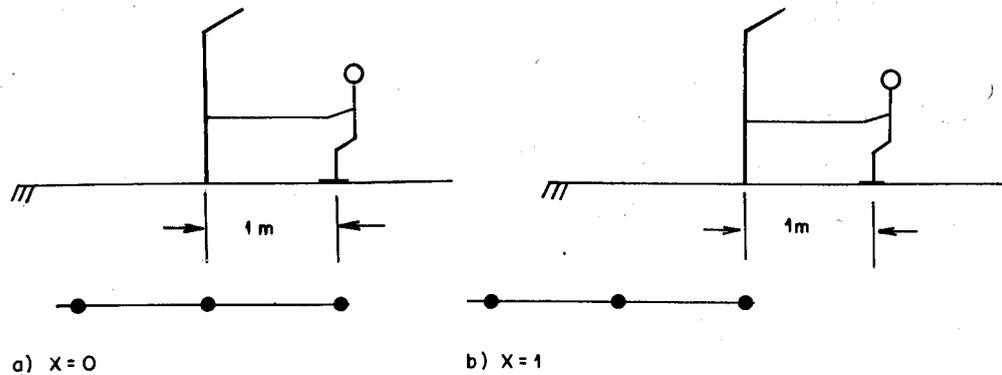
$$K_c = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{(h^2 + x^2) \cdot [h^2 + (e + x)^2]}{h d (h^2 + e^2)} \right] + 2 \ln \left\{ \left[\frac{2e + x}{2e} \right] \cdot \left[\frac{3e + x}{3e} \right] \right. \right. \\ \left. \left. \dots \left[\frac{(N - 1)e + x}{(N - 1)e} \right] \right\} \right\} \quad (8.14.2)$$

Onde:

x ⇒ Distância [m] da periferia da malha ao ponto considerado (pessoa)

N = Máximo (N_a, N_b)

A figura 8.14.1 ilustra a distância x .

Figura 8.14.1: Ilustração da Distância x

Se a malha tiver hastes cravadas na periferia e nos cantos a expressão de V_{cerca} fica modificada para:

$$V_{cerca} = \frac{\rho_a K_c K_i I_{malha}}{L_{cabo} + 1,15 L_{hastes}} \quad (8.14.3)$$

A cerca metálica só estará adequada quando a inequação 8.14.4 for satisfeita.

$$V_{cerca} \leq V_{toque\ máximo} \quad (8.14.4)$$

Se dentro das limitações do terreno, não for possível projetar uma cerca metálica, então deve-se partir para outra alternativa.

8.15 Melhoria na Malha

Após o dimensionamento da malha, pode-se usar algumas das alternativas recomendadas abaixo para melhorar ainda mais a qualidade da malha de terra:

- Fazer espaçamentos menores na periferia da malha;
- Arredondamento dos cantos da malha de terra, para diminuir o efeito das pontas;
- Rebaixamento do cantos;
- Colocar hastes pela periferia;
- Colocar haste na conexão do cabo de ligação do equipamento com a malha;

- Fazer submalhas no ponto de aterramento de bancos de capacitores e chaves de aterramento; se não for possível, usar malha de equalização somente neste local.

Uma alternativa muito recomendada e utilizada é colocar um condutor em anel a 1,5m da malha e a 1,5m de profundidade.

8.16 Malha de Equalização

Se a malha estiver em situação muito crítica, ou além do seu limite de segurança, pode-se usar uma malha de equalização, que mantém o mesmo nível do potencial na superfície do solo. É uma verdadeira blindagem elétrica. Figura 8.16.1.

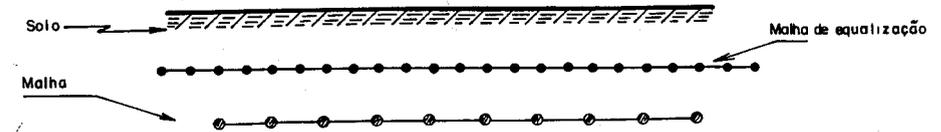


Figura 8.16.1: Malha de Equalização

8.17 Exemplo Completo do Dimensionamento de Uma Malha de Terra

Projetar uma malha de terra com os seguintes dados pré-definidos:

$$I_{cc\phi-T(máximo)} = 3000A \quad I_{malha} = 1200A$$

Tempo de abertura da proteção para a corrente de defeito é $t_{defeito} = 0,6s$.

Dimensões e profundidade da malha pretendida estão na figura 8.17.1.

$$\rho_s = \rho_{brita} = 3000 \Omega.m \text{ com uma camada de } 20cm \text{ colocada na superfície do solo.}$$

As emendas dos cabos são feitas com solda convencional.

A estratificação do solo está representada na figura 8.17.2.

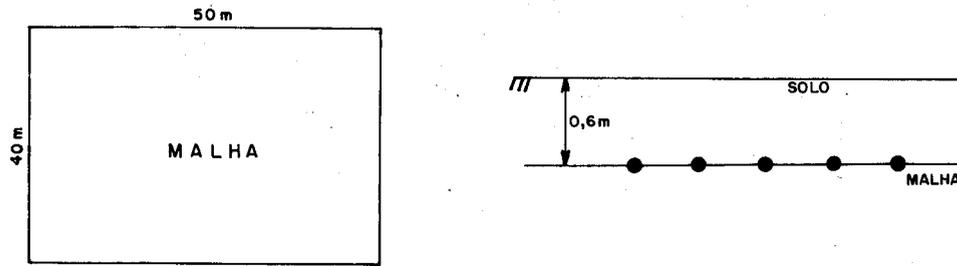


Figura 8.17.1: Malha Inicial e Profundidade

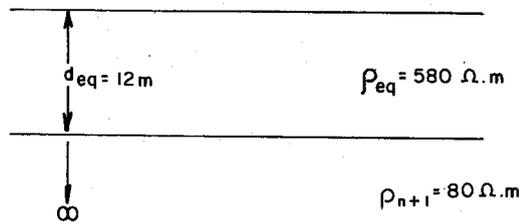


Figura 8.17.2: Estratificação do Solo em Duas Camadas

1) Determinação de ρ_a , vista pela malha

$$r = \frac{A}{D} = \frac{40 \cdot 50}{\sqrt{40^2 + 50^2}} = \frac{2000}{64,03} = 31,23m$$

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{31,23}{12} = 2,60$$

$$\beta = \frac{\rho_{n+1}}{\rho_{eq}} = \frac{80}{580} = 0,138$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha \\ \beta \end{array} \right\} \rightarrow N = 0,71$$

$$\rho_a = N \rho_{eq} = 0,71 \cdot 580 = 411,8 \Omega.m$$

2) Cálculo da bitola mínima dos condutores que formam a malha de terra

O dimensionamento é feito de acordo com o item 8.5. Isto é, pela expressão 8.5.2, a corrente de defeito no condutor da malha é:

$$I_{defeito} = 60\% I_{cc\phi-T} = 0,6 \cdot 3000 = 1800A$$

$$I = 226,53 S_{cobre} \sqrt{\frac{1}{t_{defeito}} \ln \left(\frac{\theta_m - \theta_a}{234 + \theta_a} + 1 \right)}$$

$$\theta_a = 30^\circ C$$

$$\theta_m = 450^\circ C \rightarrow \text{solda convencional}$$

$$1800 = 226,53 S_{cobre} \sqrt{\frac{1}{0,6} \ln \left(\frac{450 - 30}{234 + 30} + 1 \right)}$$

$$S_{cobre} = 6,31 mm^2$$

Por razões mecânicas usa-se no mínimo o cabo com $35mm^2$, cujo diâmetro é 6,6756mm.

3) Bitola do cabo de ligação

Neste caso, a corrente de defeito é a total, e a conexão é por aperto tipo junta cavilhada. Assim,

$$I_{defeito} = 3000A$$

$$\theta_m = 250^\circ C$$

Usando a expressão 8.5.1, tem-se

$$S_{cabo \text{ de ligação}} = 13,10 mm^2$$

Usar $35mm^2$.

4) Valores dos potenciais máximos admissíveis

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

$h_s = 0,20m \rightarrow$ camada de brita

$$K = \frac{\rho a - \rho s}{\rho a + \rho s} = \frac{411,8 - 3000}{411,8 + 3000} = -0,759$$

$$C_s(h_s, K) = \frac{1}{0,96} \left\{ 1 + 2 \left[\frac{-0,759}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 0,2}{0,08}\right)^2}} + \frac{(-0,759)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 2 \cdot 0,2}{0,08}\right)^2}} + \frac{(-0,759)^3}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 3 \cdot 0,2}{0,08}\right)^2}} \right] \right\}$$

$$C_s(h_s, K) = 0,7905$$

$$V_{toque\ máximo} = [1000 + 1,5 C_s(h_s, K) \rho s] \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

$$V_{toque\ máximo} = [1000 + 1,5 \cdot 0,7905 \cdot 3000] \frac{0,116}{\sqrt{0,6}}$$

$$V_{toque\ máximo} = 682,47V$$

$$V_{passo\ máximo} = [1000 + 6 C_s(h_s, K) \rho s] \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

$$V_{passo\ máximo} = [1000 + 6 \cdot 0,7905 \cdot 3000] \frac{0,116}{\sqrt{0,6}}$$

$$V_{passo\ máximo} = 2280,62V$$

5) Projeto inicial para o espaçamento

$$e_a = e_b = 3m$$

- Número de condutores ao longo dos lados

$$N_a = \frac{50}{3} + 1 = 17,66 \quad N_b = \frac{40}{3} + 1 = 14,33$$

Como N_a e N_b devem ser inteiros, faz-se

$$N_a = 18 \quad e_a = 2,941m$$

$$N_b = 14 \quad e_b = 3,077m$$

Os espaçamentos são aproximadamente iguais.

- Comprimento total dos cabos que formam a malha.

$$L_{cabo} = 18 \cdot 40 + 14 \cdot 50 = 1420m$$

6) Cálculo da resistência da malha

$$R_{malha} = 411,8 \left[\frac{1}{1420} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 40 \cdot 50}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0,6 \sqrt{\frac{20}{40 \cdot 50}}} \right) \right]$$

$$R_{malha} = 4,291\Omega$$

Verificação do potencial máximo na malha

$$V_{toque\ máximo\ da\ malha} = R_{malha} \cdot I_{malha} = 4,291 \cdot 1200 = 5149,2V$$

$$R_{malha} \cdot I_{malha} > V_{toque\ máximo}$$

Como não verificou, deve-se calcular mais precisamente os potenciais na malha.

7) Cálculo do potencial de malha durante o defeito

$$V_{malha} = \frac{\rho a K_m K_i I_{malha}}{L_{total}}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{e^2}{16hd} + \frac{(e+2h)^2}{8ed} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2N-1)} \right\}$$

$$N = \sqrt{18 \cdot 14} = 15,8745$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot 15,8745)^{15,8745}} = \frac{1}{(31,749)^{0,126}} = 0,6468$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0,6}{1}} = 1,2649$$

$$\text{Condutor } 35mm^2 \Rightarrow d = 6,6756 \cdot 10^{-3}m$$

Como $e_a \neq e_b$, utiliza-se apenas no cálculo do K_m , o maior espaçamento, pois o mesmo resulta no maior valor de K_m .

$$e = \text{máximo}(e_a, e_b) = 3,077m$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{3,077^2}{16 \cdot 0,6 \cdot 6,6756 \cdot 10^{-3}} + \frac{(3,077 + 2 \cdot 0,6)^2}{8 \cdot 3,077 \cdot 6,6756 \cdot 10^{-3}} - \frac{0,6}{4 \cdot 6,6756 \cdot 10^{-3}} \right] + \frac{0,6468}{1,2649} \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot 15,8745 - 1)} \right] \right\} \quad (8.17.1)$$

$$K_m = 0,6673$$

$$K_i = 0,656 + 0,172 \cdot 15,8745 = 3,3864$$

$$V_{malha} = \frac{411,8 \cdot 0,6673 \cdot 3,3864 \cdot 1200}{1420} = 786,39V$$

$$V_{malha} \geq V_{toque\ máximo}$$

Não verificou o limite, deve-se alterar o projeto da malha.

8) Estimativa do mínimo comprimento do condutor

Usando as expressões 7.14.2 e 8.9.1, pode-se fazer uma estimativa do comprimento mínimo de condutor que a malha deve ter para ficar no limite de segurança, isto é:

$$\begin{aligned} V_{malha} &\leq V_{toque\ máximo} \\ \frac{\rho a K_m K_i I_{malha}}{L_{mínimo}} &\leq V_{toque\ máximo} \\ L_{mínimo} &\geq \frac{\rho a K_m K_i I_{malha}}{V_{toque\ máximo}} \\ L_{mínimo} &\geq \frac{411,8 \cdot 0,6673 \cdot 3,3864 \cdot 1200}{682,47} \\ L_{mínimo} &\geq 1636,22m \end{aligned} \quad (8.17.2)$$

9) Modificação do projeto da malha

Para que a tensão de toque fique dentro do limite de segurança, deve-se neste caso, por exemplo, colocar hastes de 3m nos cantos e ao longo do perímetro da malha. A quantidade de hastes (N_h) é dado pela expressão 8.17.3.

$$\begin{aligned} L_{total} = L_{cabo} + L_{hastes} &\geq L_{mínimo} \\ L_{total} = 1420 + 3N_h &\geq 1636,22 \\ N_h &\geq 72,07 \\ N_h &= 73\ hastes \\ L_{hastes} = 3N_h &= 3 \cdot 73 = 219m \\ L_{total} = L_{cabo} + L_{hastes} &= 1420 + 219 = 1639m \end{aligned} \quad (8.17.3)$$

10) Cálculo do potencial de malha

$$K_{ii} = 1 \quad N = \sqrt{18 \cdot 14} = 15,8745$$

$$K_h = 1,2649 \quad K_i = 3,3864$$

Fazendo o novo cálculo do K_m , obtém-se:

$$K_m = 0,5565$$

O valor de V_{malha} é agora obtido pela expressão 8.9.6.

$$V_{malha} = \frac{411,8 \cdot 0,5565 \cdot 3,3864 \cdot 1200}{1420 + 1,15 \cdot 219} = 557,02V$$

$$V_{malha} \leq V_{toque\ máximo}$$

Verificou-se o limite de segurança para tensão de toque.

11) Cálculo do potencial de passo na periferia da malha

$$N = \text{máximo}(18, 14) = 18$$

$$K_i = 0,656 + 0,172 \cdot 18 = 3,752$$

Para o cálculo do potencial de passo na periferia da malha, utiliza-se o menor valor de e_a e e_b , isto é,

$$\begin{aligned} e &= \text{mínimo}(e_a, e_b) = 2,941m \\ K_p &= \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{e+h} + \frac{1}{e} (1 - 0,5^{N-2}) \right] \\ K_p &= \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot 0,6} + \frac{1}{2,941 + 0,6} + \frac{1}{2,941} (1 - 0,5^{18-2}) \right] \\ K_p &= 0,4634 \\ V_{psM} &= \frac{411,8 \cdot 0,4634 \cdot 3,752 \cdot 1200}{1420 + 1,15 \cdot 219} = 513,91V \\ V_{psM} &< V_{passo\ máximo} \end{aligned}$$

Os potenciais máximos admissíveis foram verificados, agora deve-se fazer o detalhamento da malha. Se a subestação for fechada por uma cerca metálica, deve-se verificar os potenciais de toque na cerca. Verificar, por exemplo, o potencial de toque na cerca, construída acompanhando o perímetro da malha.

12) Cálculo do potencial de toque na cerca metálica

Cerca metálica construída acompanhando o perímetro da malha, sendo aterrada na própria malha.

Cálculo de $K_c(x = 1)$ e $K_c(x = 0)$

$$K_c(x = 0) = 0,7159$$

$$K_c(x = 1) = 1,2718$$

O K_c a ser usado na expressão 8.14.3 será:

$$K_c = K_c(x = 1) - K_c(x = 0)$$

$$K_c = 1,2718 - 0,7159 = 0,5559$$

$$V_{cerca} = \frac{\rho_a K_c K_i I_{malha}}{L_{cabo} + 1,15 L_{hastes}}$$

$$V_{cerca} = \frac{411,8 \cdot 0,5559 \cdot 3,3864 \cdot 1200}{1420 + 1,15 \cdot 219}$$

$$V_{cerca} = 556,42V$$

$$V_{cerca} \leq V_{toque\ máximo}$$

A cerca está adequada.

Capítulo 9

Medida da Resistência de Terra

9.1 Introdução

Este capítulo aborda somente o processo da medição da resistência de terra, que é uma atividade relativamente simples.

Basta apenas ir ao local do aterramento já existente e efetuar a medição.

Com esta medição pretende-se somente medir o valor da resistência de terra que este sistema de aterramento tem no momento da medição. Como o valor da resistência de terra varia ao longo do ano, deve-se programar adequadamente medições ao longo do tempo para manter um histórico do perfil do seu comportamento.

Em épocas atípicas, isto é, seca ou inundações, além das medidas já previstas, deve-se efetuar algumas medições para se ter o registro dos valores extremos de resistência de terra.

9.2 Correntes de Curto-Circuito pelo Aterramento

Somente os curto-circuitos que envolvem a terra, geram componentes de seqüência zero. Parte desta corrente retorna pelo cabo de cobertura do sistema de transmissão ou pelo cabo neutro do sistema de distribuição multi-aterrado, o restante retorna pela terra. Ver referência [11].

A corrente que retorna pela terra é limitada pela resistência de aterramento do sistema. A figura 9.2.1 apresenta a distribuição de corrente na terra, devido a um curto-circuito no sistema.

Note-se que a corrente de curto-circuito precisa de um caminho fechado para

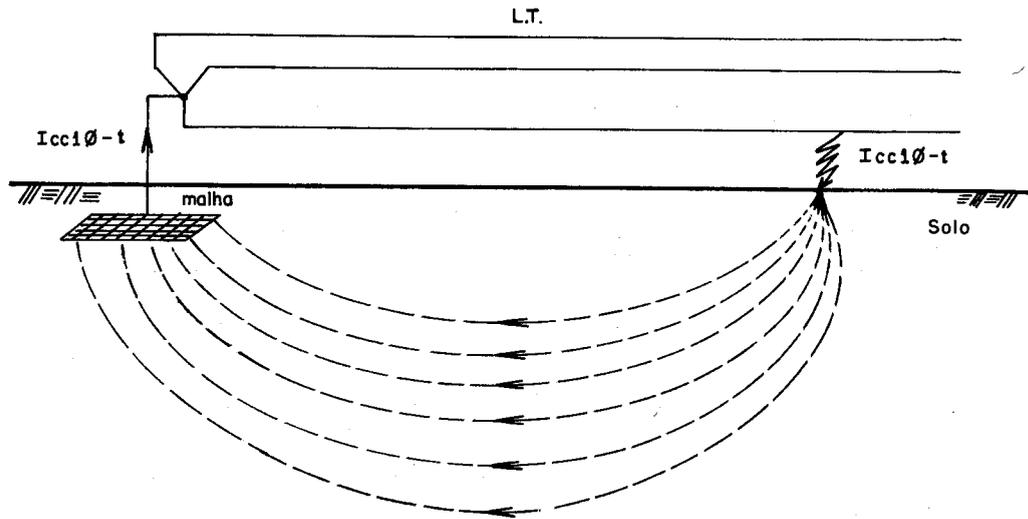


Figura 9.2.1: Corrente de Curto-Circuito Pela Terra

que possa circular.

9.3 Distribuição de Corrente Pelo Solo

A figura 9.3.1 mostra a distribuição de corrente de um sistema elétrico, cujo aterramento é feito por hastes.

A densidade de corrente no solo junto à haste é máxima. Com o afastamento, as linhas de correntes se espalham diminuindo a densidade de corrente.

Após uma certa distância da haste, o espriamento das linhas de corrente é enorme, e a densidade de corrente é praticamente nula. Portanto, a região do solo para o afastamento considerado, fica com resistência elétrica praticamente nula. Isto também pode ser verificado pela expressão 9.3.1.

$$R_{solo} = \rho_{solo} \frac{l}{S} \quad (9.3.1)$$

Nesta região, com um afastamento grande, o espriamento das linhas de corrente ocupa uma área muito grande, isto é, praticamente $S \Rightarrow \infty$ e portanto $R_{solo} \cong 0$.

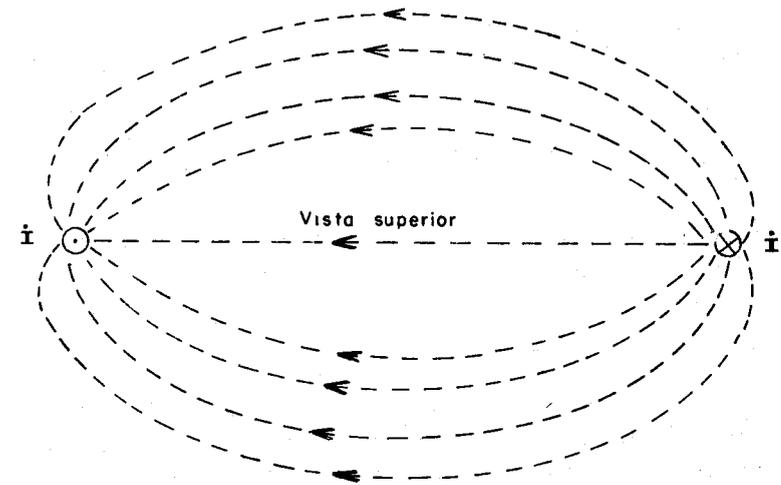
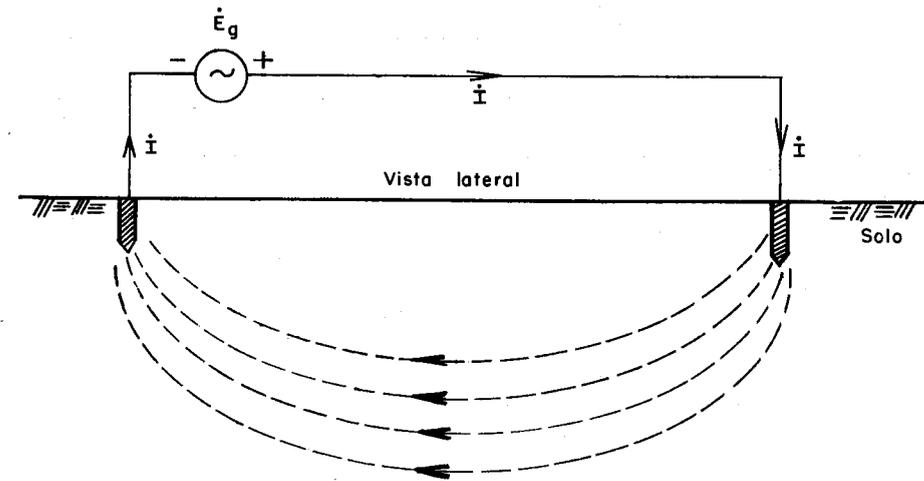


Figura 9.3.1: Distribuição de Corrente no Solo

Portanto, a resistência de terra da haste corresponde somente e, efetivamente, à região do solo onde as linhas de corrente convergem.

A resistência de terra da haste, ou de qualquer aterramento, após um certo afastamento fica constante, independente da distância.

9.4 Curva de Resistência de Terra versus Distância

Esta curva é levantada usando o esquema da figura 9.4.1, onde a haste *p* do voltímetro se desloca entre as duas hastes.

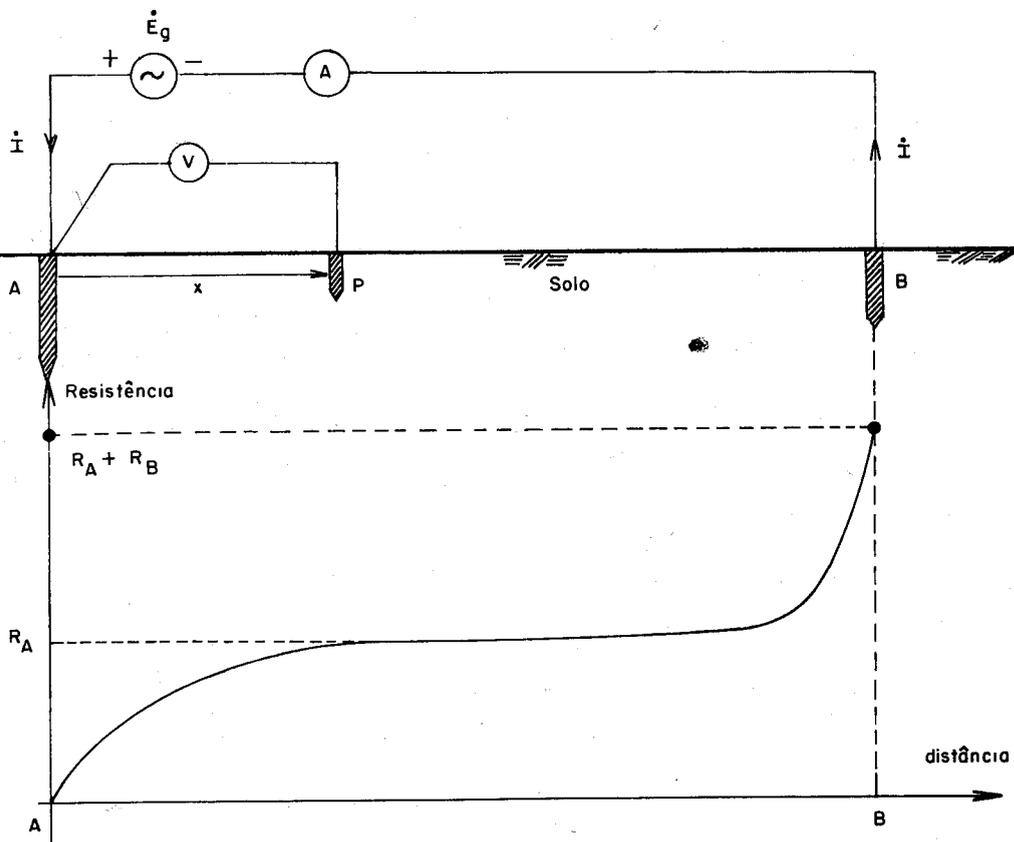


Figura 9.4.1: Curva da Resistência de Terra x Distância

A ⇒ Sistema de aterramento principal.

B ⇒ Haste auxiliar para possibilitar o retorno da corrente elétrica *I*.

p ⇒ Haste de potencial, que se desloca desde A até B.

x ⇒ Distância da haste *p* em relação ao aterramento principal A.

A corrente que circula pelo circuito é constante, pois a mudança da haste *p* não altera a distribuição de corrente. Para cada posição da haste *p*, é lido o valor da tensão no voltímetro e calculado o valor da resistência elétrica pela expressão 9.4.1.

$$R(x) = \frac{V(x)}{I} \quad (9.4.1)$$

Deslocando-se a haste *p* em todo o percurso entre A e B, tem-se a curva de resistência de terra em relação ao aterramento principal, isto é, da haste A. Figura 9.4.1.

Na região do patamar, tem-se o valor R_A , que é a resistência de terra do sistema de aterramento principal.

No ponto B, tem-se a resistência de terra acumulada do aterramento principal e da haste auxiliar, isto é, $R_A + R_B$.

Como o objetivo da medição é obter o valor da resistência de terra do sistema de aterramento, deve-se deslocar a haste *p* até atingir a região do patamar. Neste ponto a resistência de terra R_A é dada pela expressão abaixo:

$$R_A = \frac{V_{patamar}}{I} \quad (9.4.2)$$

9.5 Método Volt-Amperímetro

É o método clássico, efetuado por um amperímetro e um voltímetro, utilizando o esquema apresentado na figura 9.4.1. A resistência do aterramento medido é dada pela expressão 9.4.2.

Se com o distanciamento empregado não atingir-se o patamar, o valor da resistência de terra medido não representa o valor real.

Deve-se então, aumentar a distância da haste auxiliar B, até se conseguir um patamar bem definido.

A fonte geradora de corrente neste processo pode ser:

- Gerador Síncrono portátil a gasolina;
- Transformador de Distribuição.

Deve-se procurar injetar no solo uma corrente adequada, da ordem de ampères, de modo a tornar desprezíveis as interferências de outras correntes na terra.

Geralmente, a resistência do aterramento da haste auxiliar B é alta, e limita a corrente elétrica da medição. Deve-se então, colocar neste local um solução de água e sal.

9.6 Medição Usando o Aparelho Megger

Existem vários instrumentos usados na medição da resistência de terra.

Eles são:

- Tipo Universal;
- Tipo Zero Central;

Não se pretende desenvolver o estudo do funcionamento de cada instrumento, mas sim, utilizá-los na medição da resistência de terra.

Tornou-se hábito, na prática, designar todos os aparelhos de medição de resistência de terra, com o nome do conhecido aparelho MEGGER. Este nome é na verdade marca registrada de um fabricante de aparelhos de medição.

A medição da resistência de terra, utilizando-se o aparelho MEGGER, é feita de acordo com o esquema da figura 9.6.1.

Os terminais C_1 e P_1 devem ser conectados.

O aparelho injeta no solo, pelo terminal de corrente C_1 , uma corrente elétrica I . Esta corrente retorna ao aparelho pelo terminal de corrente C_2 , através da haste auxiliar B. Esta circulação de corrente gera potenciais na superfície do solo. O potencial correspondente ao ponto p é processado internamente pelo aparelho (operação correspondente à expressão 9.4.1), que indicará então o valor da resistência $R(x)$.

Durante a medição deve-se observar o seguinte procedimento:

- Alinhamento do sistema de aterramento principal com as hastes de potencial e auxiliar;

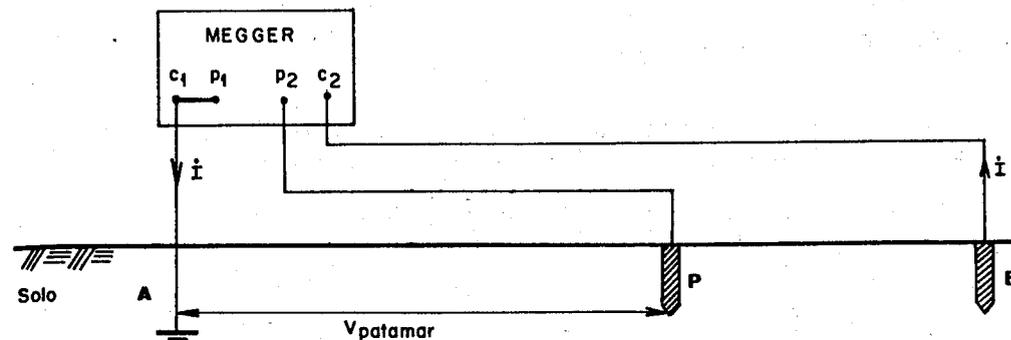


Figura 9.6.1: Medição com o MEGGER

- A distância entre o sistema de aterramento principal e a haste auxiliar deve ser suficientemente grande, para que a haste de potencial atinja a região plana do patamar;
- O aparelho deve ficar o mais próximo possível do sistema de aterramento principal;
- As hastes de potencial e auxiliar devem estar bem limpas, principalmente isentas de óxidos e gorduras, para possibilitar bom contato com o solo;
- Calibrar o aparelho, isto é, ajustar o potenciômetro e o multiplicador do MEGGER, até que o seja indicado o valor zero;
- As hastes usadas devem ser do tipo Copperweld, com 1,2m de comprimento e diâmetro de 16mm;
- Cravar as hastes no mínimo 70cm no solo;
- O cabo de ligação deve ser de cobre com bitola mínima de $2,5\text{mm}^2$;
- As medições devem ser feitas em dias em que o solo esteja seco, para se obter o maior valor de resistência de terra deste aterramento;
- Se não for o caso acima, devem-se anotar as condições do solo;
- Se houver oscilação da leitura, durante a medição, significa existência de interferência. Deve-se, então, deslocar as hastes de potencial e auxiliar para outra direção, de modo a contornar o problema;
- Verificar o estado do aparelho;
- Verificar a carga da bateria.

9.7 Precaução de Segurança Durante a Medição de Resistência de Terra

Para efetuar adequadamente a medição da resistência de terra, levando em consideração a segurança humana, deve-se observar os seguintes itens:

- Não devem ser feitas medições sob condições atmosféricas adversas, tendo-se em vista a possibilidade de ocorrência de raios;
- Não tocar na haste e na fiação;
- Não deixar que animais ou pessoas estranhas se aproximem do local;
- Utilizar calçados e luvas de isolamento para executar as medições;
- O terra a ser medido deve estar desconectado do sistema elétrico.

Capítulo 10

Corrosão no Sistema de Aterramento

10.1 Corrosão

Corrosão é uma palavra originada do latim "corrodere", que significa destruição gradativa. Especificamente, o significado do termo corrosão de metais, está associado à degradação das suas propriedades devido à ação do meio. Todo metal tende a sofrer um certo grau de corrosão, que é o processo natural da volta do metal ao seu estado primitivo.

Os sistemas de aterramentos são construídos com materiais condutores à base de metal. Sendo a terra um meio eletrolítico, o processo da corrosão sempre estará presente. Portanto, um estudo mais profundo da corrosão se faz mister, para que medidas de proteção possam ser efetuadas.

10.2 Eletronegatividade dos Metais

Segue-se na Tabela 10.2.1, a eletronegatividade dos metais mais importantes.

Nesta tabela os potenciais dos metais estão referidos ao potencial do **hidrogênio**, que tem como referência o valor zero.

Estes metais formam o material do ânodo e cátodo, ficando caracterizado pela tabela de eletronegatividade o pólo negativo e positivo da pilha eletroquímica.

Metal	Potencial (V) (25°C)
Potássio (K)	-2,922
Cálcio (Ca)	-2,870
Sódio (Na)	-2,712
Magnésio (Mg)	-2,370
Alumínio (Al)	-1,670
Manganês (Mn)	-1,180
Zinco (Zn)	-0,762
Ferro (Fe)	-0,440
Níquel (Ni)	-0,250
Chumbo (Pb)	-0,126
Hidrogênio (H ₂)	0,000
Cobre (Cu)	0,345
Prata (Ag)	0,800
Ouro (Au)	1,680

Tabela 10.2.1: Eletronegatividade dos Metais

10.3 Reação de Corrosão

Para se realizar o processo de corrosão eletroquímica, é necessário a presença de quatro elementos:

- **Eléctrodo anódico** - que libera os seus íons positivos para o meio eletrolítico, gerando um excesso de elétrons, isto é, ficando com potencial negativo;
- **Eléctrodo catódico** - tem potencial positivo, é o elemento que não se dissolve na reação eletroquímica, sendo o eléctrodo protegido;
- **Eletrólito** - meio na qual se processa a reação de formação dos íons;
- **Ligação externa** - que propicia a condução dos elétrons do ânodo para o cátodo.

Estes quatro elementos agrupados sob condições propícias, formam a pilha eletroquímica. Figura 10.3.1.

Com a circulação da corrente elétrica, o processo de corrosão sempre se dará no ânodo, isto é, no pólo negativo. O ânodo dissolve o seu metal, gerando elétrons e mantendo o seu potencial negativo. Os correspondentes íons positivos são liberados no eletrólito, caracterizando a corrosão. A corrente que circula é conhecida como corrente galvânica.

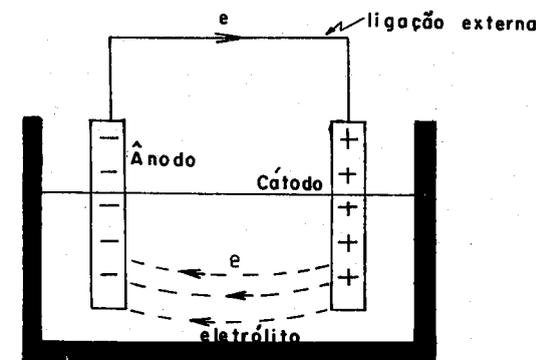


Figura 10.3.1: Pilha Eletroquímica

Na pilha eletroquímica, pode-se generalizar que o eléctrodo que sofrerá o processo de corrosão será sempre o eléctrodo que recebe elétrons da solução eletrolítica.

Na pilha eletroquímica, faltando qualquer dos quatro elementos mencionados, não haverá possibilidade de circular a corrente galvânica, e o processo da corrosão não poderá existir.

Usando a corrente convencional, isto é, a contrária ao do fluxo de elétrons, então, a corrosão se dará no eléctrodo que deixa a corrente convencional sair para o meio eletrolítico.

Para caracterizar melhor estes fundamentos, serão apresentados os itens a seguir:

a) Cuba Eletrolítica

Usando dois eléctrodos de cobre e ferro numa cuba eletrolítica da figura 10.3.2, o potencial da pilha eletroquímica será dado pela expressão 10.3.1, que será obtido pela diferença entre as eletronegatividades dos metais da Tabela 10.2.1.

$$E_{pilha} = E_{cátodo} - E_{ânodo} \quad (10.3.1)$$

Onde:

$E_{cátodo} \Rightarrow$ é o potencial do metal que será o cátodo na pilha;

$E_{ânodo} \Rightarrow$ é o potencial do metal que será o ânodo na pilha.

Assim,

$$E_{pilha} = 0,345 - (-0,440)$$

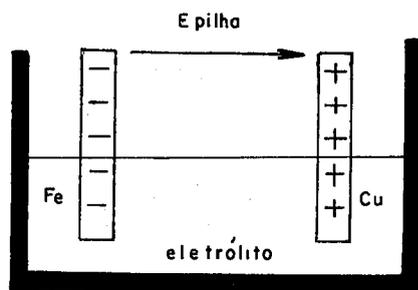


Figura 10.3.2: Cuba Eletrolítica

$$E_{pilha} = 0,785 \text{ Volts}$$

Nesta condição nenhum eletrodo sofrerá a corrosão porque não há a formação de corrente elétrica.

b) Corrente Galvânica

Ligando por fio condutor os dois eletrodos da figura 10.3.2, haverá a circulação de corrente de elétrons, indicada na figura 10.3.3.

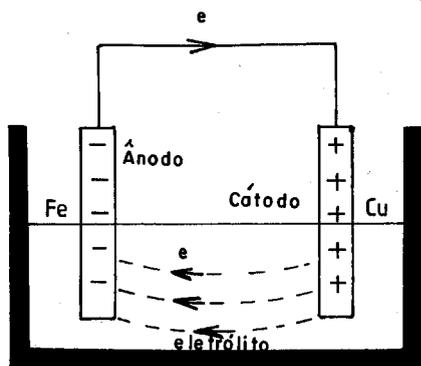


Figura 10.3.3: Circulação de Corrente

O eletrodo de ferro sofrerá corrosão. Os íons metálicos Fe^+ deixarão a barra de ferro, e serão liberados na solução eletrolítica.

Já o cátodo, isto é, a barra de cobre, será o eletrodo protegido, e não sofrerá a corrosão.

c) Pilha Eletroquímica Bloqueada

Colocando uma fonte de tensão externa, com o mesmo potencial e polaridade da pilha, figura 10.3.4, haverá um bloqueio na corrente galvânica.

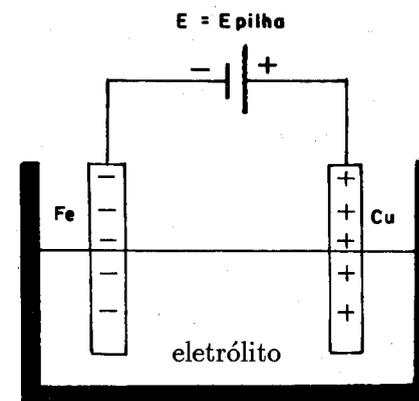


Figura 10.3.4: Pilha Eletroquímica Bloqueada

Como a fonte externa tem o mesmo valor de tensão, mas com polaridade contrária, fica cessada a ação da pilha, isto é, não haverá circulação de corrente, e não haverá portanto corrosão.

d) Corrente Impressa

Se a tensão da fonte externa da figura 10.3.4, for maior que o potencial da pilha, haverá circulação de corrente contrária, que é conhecida por corrente impressa ou forçada, figura 10.3.5.

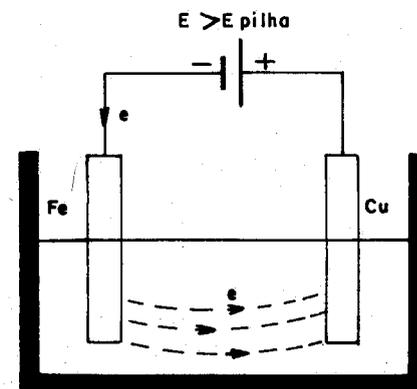


Figura 10.3.5: Corrente Impressa

Esta corrente elétrica, imposta pela fonte externa, circula ao contrário, protegendo a barra de ferro e produzindo corrosão na barra de cobre.

Portanto, com o uso adequado da corrente impressa, pode-se controlar e determinar qual eletrodo será o protegido. Esta é uma técnica muito empregada na proteção do material a ser protegido.

10.4 Corrosão no Sistema de Aterramento

Os sistemas de aterramento estarão sempre sofrendo o processo de corrosão.

Os cabos, hastes e conexões enterrados no solo (eletrolítico), sofrerão os efeitos da corrosão.

Pela própria característica do solo e do tipo de material empregado no sistema de aterramento, a corrosão ocorre devido a várias causas, entre elas:

- Heterogeneidade dos materiais que formam o sistema de aterramento;
- Heterogeneidade dos solos abrangidos pelo sistema de aterramento;
- Heterogeneidade do tipo e concentração de sais, e da umidade no sistema de aterramento;
- Heterogeneidade de temperaturas no sistema de aterramento;
- Aeração diferencial;
- Ação das correntes elétricas dispersas.

As ações acima, em separado ou combinadas produzem os mais diversos efeitos de corrosão no material do sistema de aterramento. A seguir será analisado o efeito das causas acima citadas, que propiciam a corrosão.

10.5 Heterogeneidade dos Materiais que Compõem o Sistema de Aterramento

O ideal seria empregar no sistema de aterramento, materiais com a mesma concentração de metal, para evitar eletronegatividade diferentes, impossibilitando a geração da força eletromotriz da pilha eletroquímica. Assim, o sistema não teria corrosão.

Os sistemas do aterramento, no entanto, são construídos usando componentes diferentes. Ver exemplo, na figura 10.5.1.

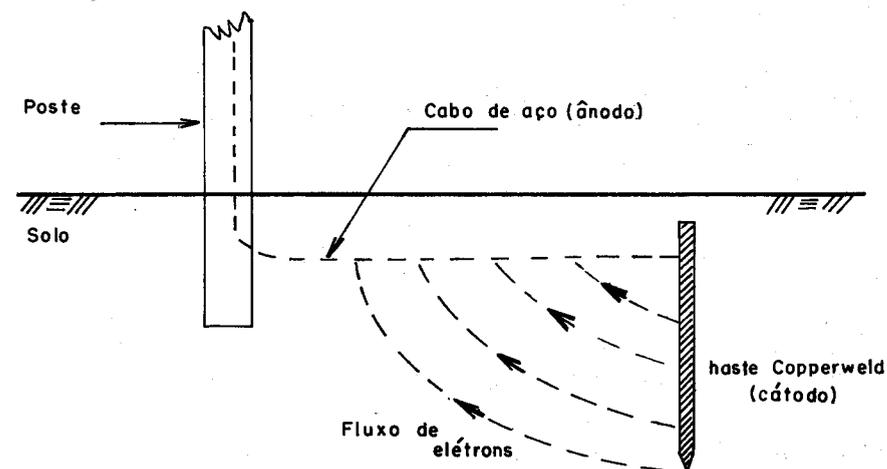


Figura 10.5.1: Aterramento com Aço e Cobre

O aterramento do equipamento no poste, (por exemplo, um transformador), é feito por um cabo de descida de aço (ferro) e a haste usada é do tipo Copperweld, isto é, cobreada.

O solo contém sais dissolvidos na água, tendo-se assim a formação do eletrólito. Portanto, a pilha eletroquímica está formada. De acordo com o item 10.3.b, a corrente galvânica do fluxo de elétrons tem o sentido indicado na figura 10.5.1. Em consequência, e o cabo de descida, que está enterrado no solo, que sofrerá a corrosão, isto é, os íons Fe^{+} irão para o solo, deixando perfurações no cabo de aço.

Outro exemplo é o caso do desfolhamento de pequena parte da cobertura do cobre da haste, que ocorre devido a abrasão no momento da cravação. Ver figura 10.5.2.

A camada de cobre e a área exposta de ferro formarão uma pilha eletroquímica, com o fluxo de elétrons do cobre para o ferro. Portanto, como a área de cobre do cátodo é grande, será gerada uma grande quantidade de elétrons, que se dirigirão para a pequena área exposta de ferro e a corrosão será intensa.

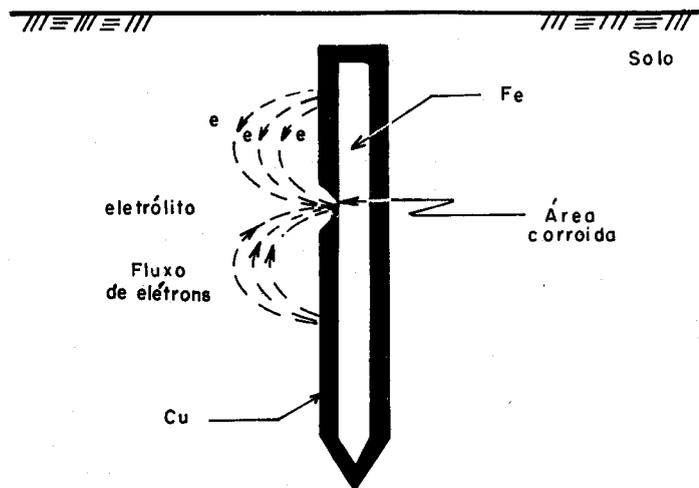


Figura 10.5.2: Área de Ferro Exposta

10.6 Heterogeneidade dos Solos Abrangidos Pelo Sistema de Aterramento

Esta corrosão ocorre em sistema de aterramento que abrange uma área grande no solo. O solo sendo heterogêneo, cada parte tem diferentes concentrações e distribuição de sais, umidade, temperatura, formando verdadeiras zonas anódicas e catódicas na região em que o aterramento está contido. Figura 10.6.1.

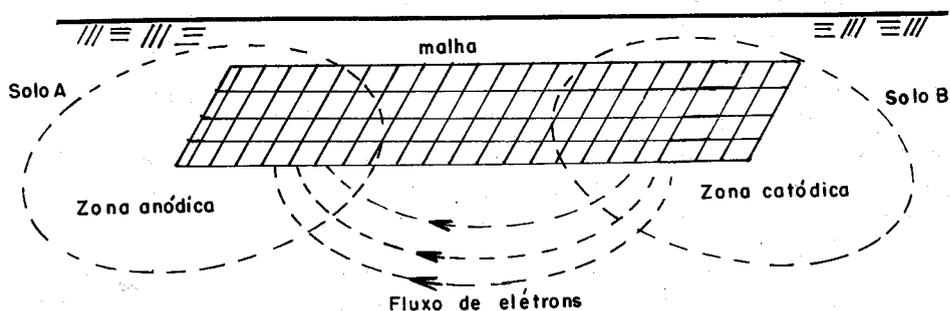


Figura 10.6.1: Zonas de Solos Distintos

Os elétrons saem da malha pela zona catódica e entram na zona anódica. Assim, os metais que compõem a malha de terra na zona anódica, serão corroídos, e

os da zona catódica serão protegidos.

A região do solo com menor resistividade funcionará como zona anódica e, conseqüentemente, será a área em que ocorrerá o processo de corrosão.

No sistema de Distribuição de Energia Elétrica [24] com neutro contínuo, há um grande número de aterramentos distribuídos por toda a cidade, abrangendo áreas com solos distintos, formando várias pilhas eletroquímicas. Estas correntes circulando pelo solo irão corroer os metais contidos nas áreas anódicas, que são as áreas de menores resistividades. O mesmo ocorre no Sistema de Transmissão [11], com o aterramento das torres e cabos de cobertura.

No aterramento profundo, a haste transpõe várias camadas de solos distintos, gerando várias regiões anódicas e catódicas, tendo-se a corrosão em vários locais.

10.7 Heterogeneidade do Tipo e Concentração de Sais, e da Umidade no Sistema de Aterramento

Apesar do solo ser o mesmo, a diferença de concentração da solução, tipos de sais, e de umidade, produz zonas anódicas e catódicas. Ver figura 10.7.1.

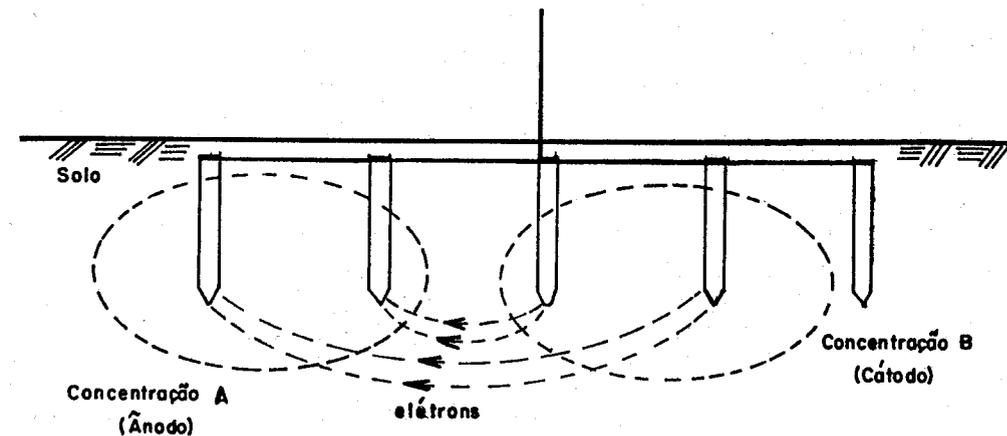


Figura 10.7.1: Solos com Concentrações Distintas

Portanto, o material do sistema de aterramento que está situado na região de menor resistividade, isto é, zona anódica, será o corroído.

10.8 Heterogeneidade da Temperatura do Solo

Quando um sistema de aterramento encontra-se em regiões com temperaturas distintas, tem-se a ação termogalvânica. Figura 10.8.1.

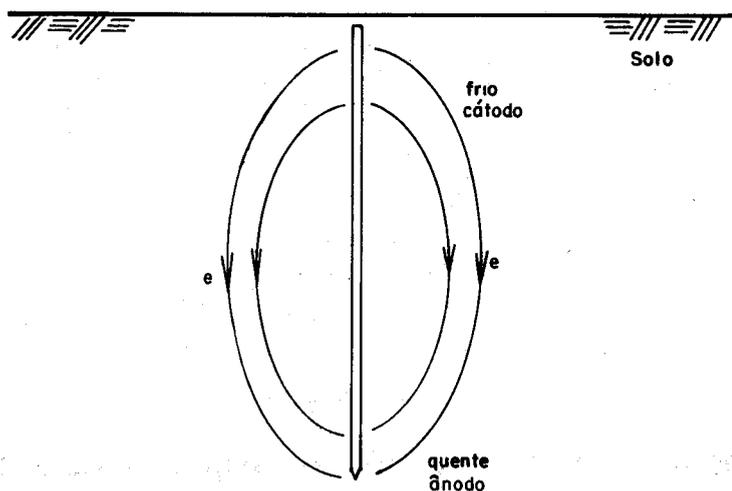


Figura 10.8.1: Ação Termogalvânica na Haste Profunda

A região quente agirá como ânodo, e será a zona corroída. A região fria será a protegida.

10.9 Aeração Diferencial

Um solo com aeração diferente, forma eletrólitos diferentes, criando regiões anódicas e catódicas. Isto é, há formação da pilha por aeração diferencial. Este efeito é mais acentuado em solos porosos.

A pilha por aeração diferencial é gerada pela diferença de concentração de oxigênio. Neste caso, o eletrodo mais aerado é o cátodo e o menos aerado é o ânodo. Portanto, a corrosão em um aterramento profundo, construído de um mesmo material, se dá nos elementos mais enterrados no solo. Figura 10.9.1.

Apesar de existir a corrosão, é importante que ocorra dessa maneira. Observe-se que a região mais aerada, que a princípio propiciaria a corrosão da haste, torna-se, por força da pilha de aeração, zona catódica, sendo, portanto, protegida.

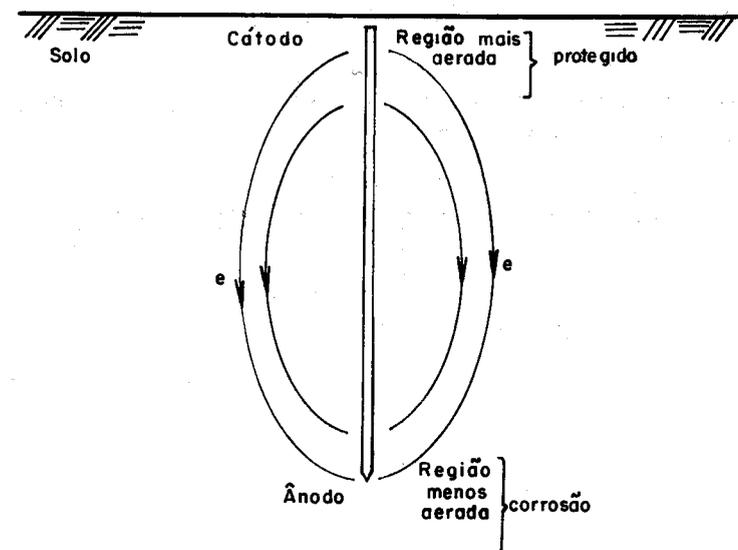


Figura 10.9.1: Aeração Diferencial

10.10 Ação das Correntes Elétricas Dispersas no Solo

No solo, há correntes elétricas circulando provenientes de diversas fontes. Estas correntes são conhecidas como correntes dispersas, de fugas ou parasitas, e procuram os caminhos de menor resistência, tais como encanamentos metálicos, trilhos, tubulações, qualquer condutor, solos de menor resistividade, e principalmente os sistemas de aterramento.

Os pontos onde as correntes de elétrons entram no condutor formarão uma região anódica, que sofrerá corrosão. A região catódica, isto é, a região protegida, será a região formada pelas partes onde o fluxo de elétrons deixa o condutor. Figura 10.10.1.

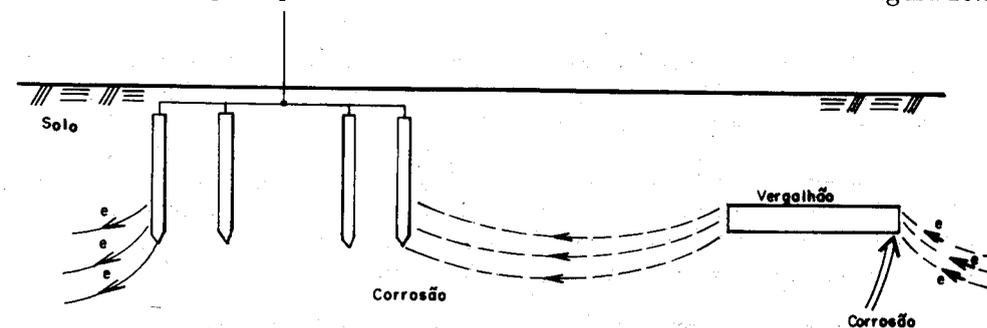


Figura 10.10.1: Correntes de Elétrons Dispersas no Solo

As correntes dispersas no solo são do tipo contínuas e alternadas. As correntes contínuas em relação à corrosão, são muito mais atuantes que as correntes alternadas. Para uma corrente elétrica de mesmo valor, a alternada produz somente 1% da corrosão em corrente contínua. Se a corrente alternada for de baixa frequência, a corrosão aumenta.

As fontes que geram correntes dispersas no solo são:

- Correntes galvânicas devido a pilhas eletroquímicas formadas no solo, geradas por qualquer processo apresentado anteriormente;
- Correntes devido à tração elétrica de corrente contínua, com retorno pelos trilhos;
- Corrente alternada de retorno pela terra do Sistema Monofásico com Retorno pela Terra (MRT), usada na alimentação de Distribuição Rural;
- Corrente contínua proveniente do sistema de proteção catódico por corrente impressa. Este item será visto a seguir;
- Correntes alternadas provenientes dos curto-circuitos no sistema elétrico de energia;
- Corrente contínua de curto-circuitos no sistema de transmissão em corrente contínua;
- Correntes telúricas, geradas pelas variações de campos magnéticos provenientes da movimentação do magma da Terra.

10.11 Proteção Contra a Corrosão

A corrosão de um modo ou de outro sempre estará presente, mas empregando convenientemente algumas técnicas pode-se diminuir ou anular esta ação.

Tendo-se sempre como objetivo proteger da corrosão o elemento principal do sistema de aterramento, pode-se aplicar, dependendo do caso, alguma das técnicas relacionadas a seguir:

- Construir todo o sistema de aterramento com um único metal;
- Isolar do eletrólito o metal diferente do sistema de aterramento;
- Usar ânodo de sacrifício para se obter a proteção catódica;

- Usar corrente impressa ou forçada.

Os três últimos itens serão vistos a seguir.

10.12 Proteção Por Isolação de Um Componente

Para haver a corrosão, há a necessidade da presença de quatro condições, como visto no item 10.3. Na falta de um deles, cessa a ação da pilha eletroquímica e conseqüentemente a ação da corrosão. No sistema de aterramento é mais simples isolar convenientemente o cabo de descida do equipamento aterrado. Figura 10.12.1.

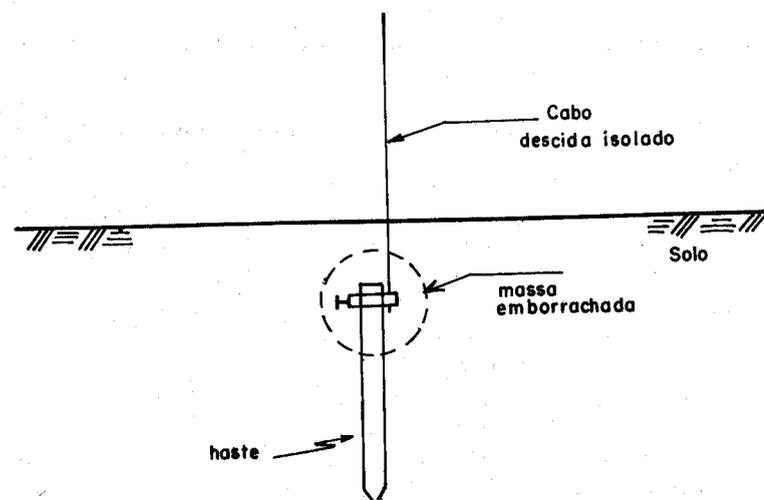


Figura 10.12.1: Cabo de Descida Isolado

Deve-se ter o cuidado de cobrir toda a conexão com uma massa emborrachada.

10.13 Proteção Catódica Por Ânodo de Sacrifício

Para que o metal do sistema de aterramento fique protegido, basta ligá-lo a um outro metal que tenha um potencial menor na escala de eletronegatividade da tabela 10.2.1.

Assim, o material protegido será o cátodo, e o outro será o ânodo. Como o ânodo sofrerá a corrosão, ele é denominado de ânodo de sacrifício.

O material do ânodo de sacrifício deve ter as seguintes características:

- Manter o potencial negativo praticamente constante ao longo de sua vida útil;
- Manter a corrente galvânica estabilizada, para que o processo de corrosão se dê uniformemente;
- Os íons positivos, dissociados na corrosão, não devem produzir uma capa diminuindo a área ativa da corrosão.

Os materiais que melhor satisfazem a essas condições são as ligas de Zinco e Magnésio. Nestas ligas são colocados aditivos para melhorar a qualidade do ânodo de sacrifício.

Os ânodos de sacrifício de Zinco são adequados para solos cuja resistividade vai até 1000 $\Omega.m$. O ânodo de Magnésio é usado em solos de até 3000 $\Omega.m$.

Os ânodos de sacrifício devem ter uma grande área, para produzirem proteções catódicas adequadas.

Pode-se utilizar um revestimento (enchimento) nas ligas de Zinco ou Magnésio para aumentar o seu volume. Este enchimento é formado por uma mistura a base de Gesso, Bentonita e Sulfato de Sódio, nas seguintes proporções:

Gesso	75%
Bentonita	20%
Sulfato de Sódio	05%

A proteção catódica com ânodo de sacrifício de Zinco com enchimento é mostrada na figura 10.13.1.

O enchimento tem as seguintes finalidades:

- Aumentar a área de atuação, distribuindo a corrente galvânica;
- Evitar o contato do metal do ânodo com os elementos agressivos do solo;
- É higroscópico, mantendo a região úmida, obtendo-se um região de baixa resistividade;
- Tem volume grande para aumentar a vida útil deste processo;
- Como está conectado ao sistema de aterramento, contribui também na diminuição da resistência do aterramento.

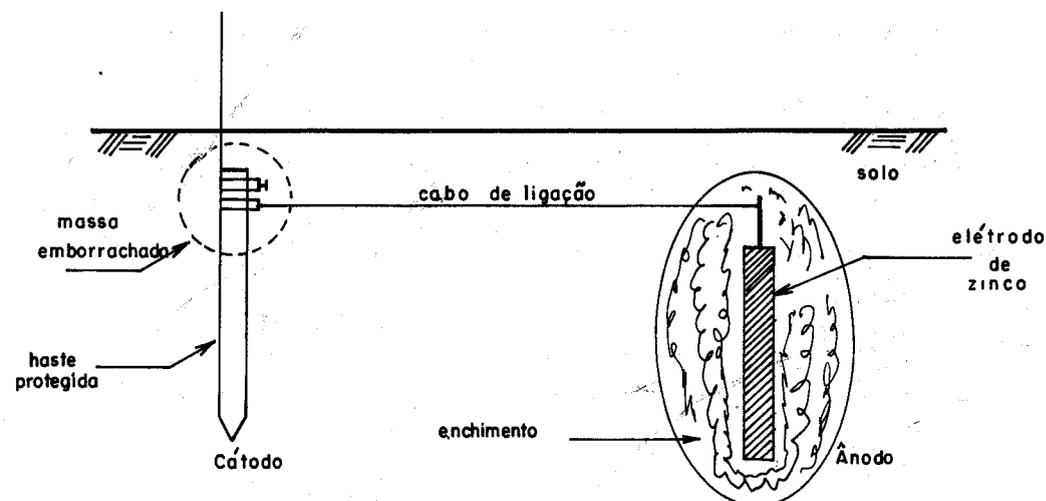


Figura 10.13.1: Ânodo de Sacrifício de Zinco com Enchimento

Se o sistema de aterramento a proteger for muito grande pode-se usar vários ânodos de sacrifícios distribuídos ou, se for o caso, concentrados, formando uma bateria.

10.14 Proteção Por Corrente Impressa

Não se consegue fazer proteção catódica com ânodo de sacrifício em solos com resistividade elevada. Isto porque a corrente galvânica é muito pequena, não permitindo obter-se a eficiência desejada.

Neste caso, para que a proteção seja eficiente, deve-se impor uma corrente contínua com uma fonte externa. Esta corrente é conhecida por corrente impressa ou forçada.

Com este processo, já visto no item 10.3.d, pode-se comandar e controlar o eletrodo a ser corroído. A fonte de tensão externa força a circulação da corrente contínua convencional do eletrodo a ser corroído para o sistema de aterramento a ser protegido. Ver figura 10.14.1.

O eletrodo que libera a corrente convencional no solo é o que sofrerá a corrosão.

A corrente eletroquímica, isto é, a do fluxo de elétrons, circula do sistema de aterramento para o eletrodo a ser corroído.

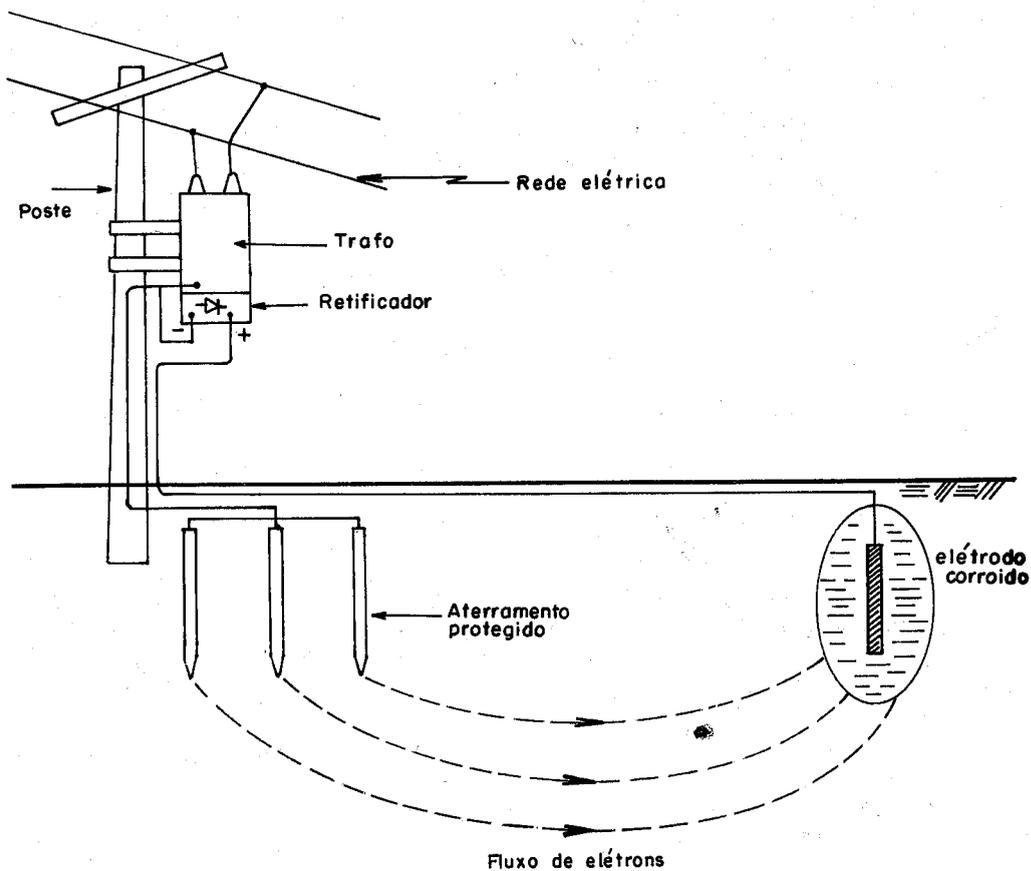


Figura 10.14.1: Proteção Por Corrente Impressa

Como o objetivo é proteger o sistema de aterramento, não há necessidade da corrosão do eletrodo. Para manter a vida útil e a eficiência da proteção por corrente impressa, deve-se usar um material altamente resistente à corrosão no eletrodo a ser corroído. Por este motivo, ele é conhecido como eletrodo inerte.

Os materiais usados na confecção dos eletrodos inertes são:

- Grafite em solos normais;
- Ferro-Silício em solos normais;
- Ferro-Silício-Cromo (14,5% Si – 4,5% Cr) em solo com salinidade.

Como o eletrodo inerte está enterrado no solo, há necessidade de envolvê-lo com um enchimento condutor de coque metalúrgico moído. Isto adiciona as seguintes vantagens:

- Diminui a resistividade elétrica da região que envolve o eletrodo inerte, facilitando a passagem da corrente elétrica;
- Diminui o gasto do eletrodo inerte;
- Aumenta a área de dispersão da corrente no solo.

A fonte de tensão que alimenta o processo por corrente impressa é um transformador conectado à rede local, juntamente com uma ponte retificadora, que converte corrente alternada em contínua.

10.15 Religamento e a Corrosão

O religador, usado na proteção do sistema de distribuição, de um modo geral prejudica o sistema de aterramento.

As aberturas e tentativas de religamento produzem interrupções e inrush de correntes elétricas que aceleram o processo de corrosão. Outro elemento que também acelera a corrosão é a elevação da temperatura do sistema de aterramento, como indicado na figura 10.15.1.

A temperatura final após as tentativas de religamento é bem maior do que um sistema que não utiliza o religador.

Portanto, isto implica num maior dimensionamento do aterramento.

10.16 Considerações

O assunto sobre corrosão é muito complexo, portanto, procurou-se neste capítulo, apenas abordar o assunto de maneira singela, sintetizando os tópicos principais da corrosão relacionados com o sistema de aterramento. As informações aqui contidas mostram a importância da corrosão no sistema de aterramento, assunto este tão negligenciado mas que deve ser profundamente estudado e considerado.

Maiores detalhes deverão ser estudados para serem considerados no projeto de um sistema de aterramento.

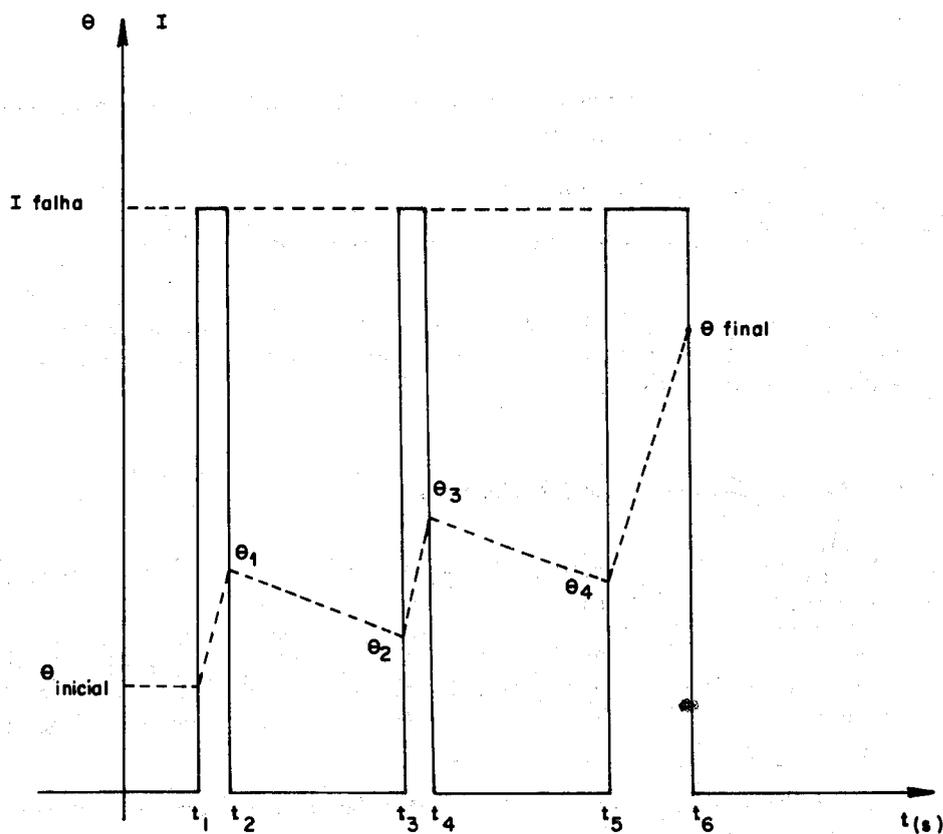


Figura 10.15.1: Elevação da Temperatura Devido ao Religamento

Capítulo 11

Surtos de Tensão

11.1 Introdução

Todo o conteúdo deste livro sobre aterramento foi desenvolvido considerando correntes elétricas à frequência de 60 Hz.

No entanto, a resistência elétrica que um sistema de aterramento apresenta ao surto de tensão [66] é diferente da resistência à 60 Hz.

Neste capítulo, não com o objetivo de esgotar o assunto, mas simplesmente para mostrar a sua importância, apresenta-se a análise de surtos de tensão em um sistema de aterramento com uma haste.

11.2 Campo Elétrico Gerado no Solo Pelo Surto de Corrente em Uma Haste

Um surto de corrente [66] em uma haste de aterramento, figura 11.2.1, gera na sua vizinhança um campo elétrico. Este campo elétrico é dado pela expressão 11.2.1.

$$E(x) = \frac{\rho I_{surto}}{2\pi (Lx + x^2)} \quad \left[\frac{V}{m} \right] \quad (11.2.1)$$

Onde:

I_{surto} \Rightarrow Valor máximo (crista) da corrente de surto [A]

ρ \Rightarrow Resistividade do solo [$\Omega.m$]

L \Rightarrow Comprimento da haste [m]

$x \Rightarrow$ Menor distância [m] do ponto p à haste

$E(x) \Rightarrow$ Intensidade do campo elétrico no ponto p $[\frac{V}{m}]$

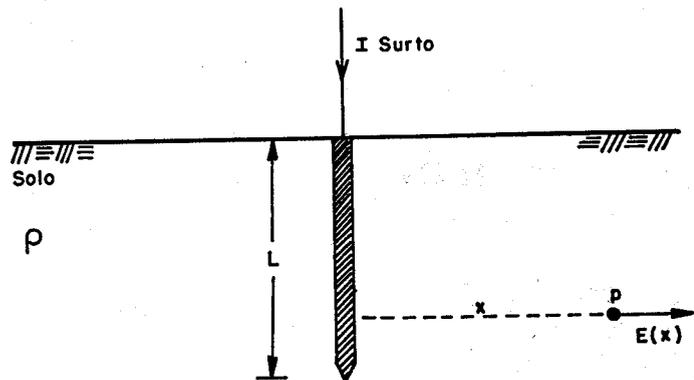


Figura 11.2.1: Campo Elétrico ao Redor da Haste

Observe que este campo elétrico acompanha a forma impulsiva da corrente de surto.

11.3 Gradiente de Ionização do Solo

A frente de onda do campo elétrico criado pelo surto de corrente tem a propriedade de facilitar a ionização do solo na vizinhança da haste.

O valor limite do campo elétrico acima do qual o solo torna-se ionizado é chamado de gradiente de ionização. Estes valores limites, para alguns tipos de solo, estão apresentados na Tabela 11.3.1.

Tipo de Solo	Gradiente de Ionização $[\frac{kV}{cm}]$
Cascalho úmido	11,4 - 19,2
Cascalho seco	20,8 - 22,8
Areia úmida	13,0 - 23,4
Areia seca	17,1 - 18,8
Argila plástica	18,7 - 39,0

Tabela 11.3.1: Gradiente de Ionização

Quando o campo elétrico for maior do que o gradiente de ionização, o solo fica ionizado, isto é, sua resistência elétrica cai praticamente a zero.

O gradiente de ionização pode ser estimado através da fórmula proposta por Oettle [56], indicada abaixo:

$$E_i = 241 \rho^{0,215} \tag{11.3.1}$$

Onde:

$E_i \Rightarrow$ gradiente de ionização $[\frac{kV}{m}]$

$\rho \Rightarrow$ resistividade elétrica do solo em $\Omega.m$

11.4 Zona de Ionização no Solo

Considere-se uma haste de um sistema de aterramento constituído de hastes. Como foi visto antes, o surto de corrente pode ionizar uma certa região do solo em torno da haste. Evidentemente esta região é limitada, ou seja, o solo em torno da haste é ionizado até uma certa distância (x_{limite}) na qual o campo elétrico $E(x)$, devido ao surto, é igual ao gradiente de ionização (E_i) do solo. Além deste limite o campo elétrico $E(x)$ não tem valor suficiente para ionizar o solo. Ver figura 11.4.1.

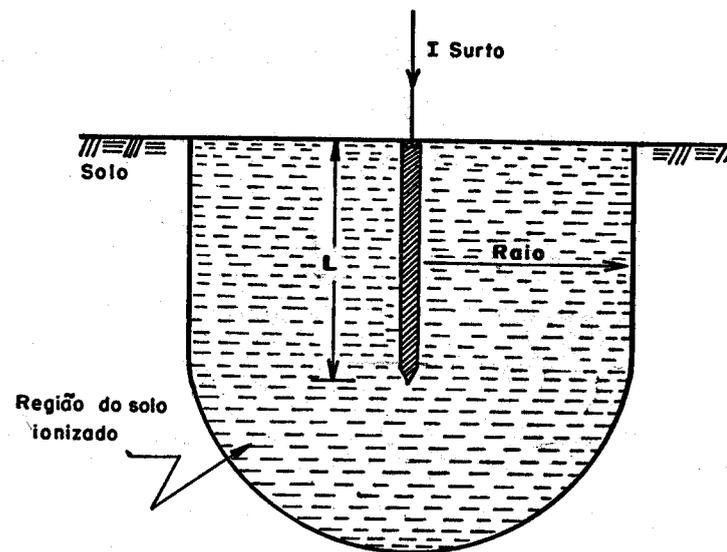


Figura 11.4.1: Zona de Ionização no Solo

Levando na expressão 11.2.1, tem-se:

$$E_i = \frac{\rho I_{surto}}{2\pi (Lx_{limite} + x_{limite}^2)} \quad (11.4.1)$$

O x_{limite} , demarca o cilindro de terra ionizado pelo surto. Este limite é dado pela resolução da expressão 11.4.2, abaixo:

$$x_{limite}^2 + Lx_{limite} = \frac{\rho I_{surto}}{2\pi E_i} \quad (11.4.2)$$

Todo o solo contido no cilindro fica ionizado. Portanto, do ponto de vista do surto, a haste se comporta como se ela fosse o cilindro. Devido a este motivo a resistência elétrica do aterramento ao surto é menor, e pode ser calculada pela expressão 11.4.3.

$$R_{surto} = \frac{\rho}{2\pi(L + x_{limite})} \ln \left[\frac{4(L + x_{limite})}{2x_{limite}} \right] \quad (\Omega) \quad (11.4.3)$$

Onde:

$R_{surto} \Rightarrow$ resistência elétrica do aterramento ao surto

Note que o mesmo campo elétrico criado pela corrente de curto em 60 Hz, não tem a propriedade de ionizar o solo em torno da haste, isto porque, a onda senoidal é muito suave em relação à frente de onda do surto.

Genericamente, pode-se afirmar que:

$$R_{surto} \leq R_{curto} \quad (11.4.4)$$

Na figura 11.4.2 tem-se a característica da resistência versus corrente de surto, para uma haste cravada num solo de areia e argila.

A diferença entre a resistência do aterramento à 60Hz e ao surto é tanto maior quanto for a resistividade do solo. Num solo com alta resistividade, a resistência ao surto cai bastante em relação à resistência do aterramento à 60Hz. Já em solo com baixa resistividade não há muita diferença entre a resistência ao surto e a resistência à 60Hz.

Exemplo Numérico

Uma haste de 3m, diâmetro 25mm, está cravada em um solo, cuja resistividade elétrica é de $2000 \Omega.m$. O gradiente de ionização do solo é de $16 \frac{kV}{cm}$. O surto máximo

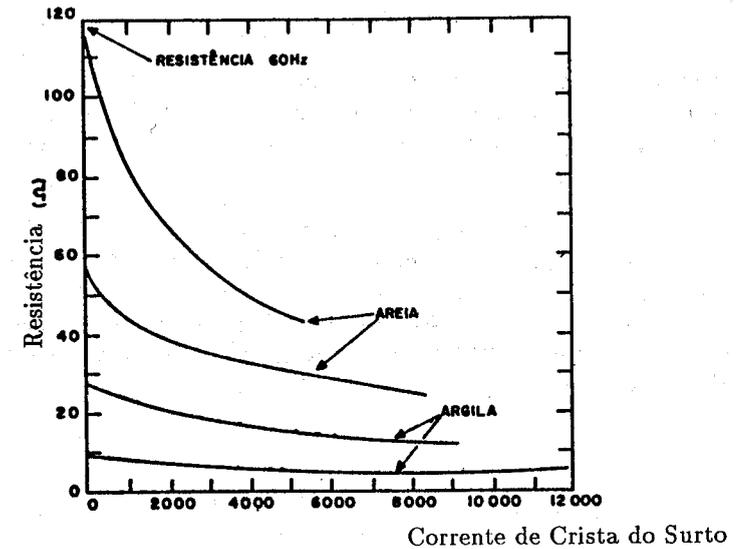


Figura 11.4.2: Resistência x Corrente de Crista do Surto

de corrente neste aterramento tem o valor de crista de $5kA$.

Calcular:

- a) A resistência do aterramento da haste para correntes de curto-circuitos em 60Hz.

$$R_{60Hz} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left(\frac{4L}{d} \right)$$

$$R_{60Hz} = \frac{2000}{2 \cdot \pi \cdot 3} \ln \left(\frac{4 \cdot 3}{25 \cdot 10^{-3}} \right)$$

$$R_{60Hz} = 655,06 \Omega$$

- b) O raio do cilindro ionizado pelo surto

$$x_{limite}^2 + 3x_{limite} = \frac{2000 \cdot 5000}{2\pi \cdot 1600000}$$

$$x_{limite} = 0,30m$$

- c) A resistência elétrica ao surto

$$R_{surto} = \frac{2000}{2\pi \cdot (3 + 0,30)} \ln \left[\frac{4(3 + 0,30)}{2 \cdot 0,30} \right]$$

$$R_{surto} = 298,15 \Omega$$

11.5 Finalidade da Haste

O emprego de hastes verticais no aterramento, ou no complemento de aterramentos maiores, é importante para o bom desempenho do escoamento das correntes de surto. Além de baixar a resistência de terra, a ponta da haste ajuda a manter os potenciais perigosos no fundo do solo.

Como um equipamento elétrico está sujeito a curto-circuitos e a surtos, deve-se sempre usar uma ou mais hastes no ponto da ligação do cabo de descida ao sistema de aterramento. A haste cravada na malha no ponto da conexão do cabo de descida, é importante porque facilita a dissipação do surto para a terra, evitando a sua propagação pela malha. A região ativa do surto nestas condições na malha, está estimada num raio de 5m em torno da haste.

Apêndice A

Tabelas de Hastes Paralelas, Alinhadas e Igualmente Espaçadas

$L = 2m \quad d = \frac{1}{2}'' \quad R_1 \text{ haste} = 0,513\rho a$								
Espaçamentos	2m		3m		4m		5m	
Número de Hastes	$R_{eq} [\Omega]$	K						
2	0,291 ρa	0,568	0,281 ρa	0,548	0,276 ρa	0,537	0,272 ρa	0,530
3	0,210 ρa	0,410	0,199 ρa	0,388	0,192 ρa	0,375	0,188 ρa	0,367
4	0,167 ρa	0,326	0,155 ρa	0,303	0,149 ρa	0,291	0,145 ρa	0,283
5	0,140 ρa	0,272	0,128 ρa	0,250	0,122 ρa	0,239	0,119 ρa	0,231
6	0,121 ρa	0,235	0,110 ρa	0,214	0,104 ρa	0,203	0,101 ρa	0,196
7	0,106 ρa	0,208	0,096 ρa	0,188	0,091 ρa	0,177	0,087 ρa	0,171
8	0,096 ρa	0,186	0,086 ρa	0,167	0,081 ρa	0,157	0,078 ρa	0,151
9	0,087 ρa	0,169	0,078 ρa	0,151	0,073 ρa	0,142	0,070 ρa	0,136
10	0,080 ρa	0,155	0,071 ρa	0,138	0,066 ρa	0,129	0,063 ρa	0,123
11	0,074 ρa	0,144	0,065 ρa	0,127	0,061 ρa	0,119	0,058 ρa	0,113
12	0,069 ρa	0,134	0,061 ρa	0,118	0,056 ρa	0,110	0,054 ρa	0,105
13	0,064 ρa	0,125	0,057 ρa	0,110	0,052 ρa	0,102	0,050 ρa	0,097
14	0,060 ρa	0,118	0,053 ρa	0,103	0,049 ρa	0,096	0,047 ρa	0,091
15	0,057 ρa	0,111	0,050 ρa	0,097	0,046 ρa	0,090	0,044 ρa	0,086

Tabela A.0.1:

$L = 2m \quad d = \frac{5}{8}'' \quad R_{1 \text{ haste}} = 0,495\rho a$

Espaçamentos	2m		3m		4m		5m	
	$R_{eq} [\Omega]$	K						
2	0,283ρa	0,571	0,272ρa	0,550	0,267ρa	0,539	0,263ρa	0,531
3	0,205ρa	0,413	0,193ρa	0,389	0,186ρa	0,376	0,182ρa	0,368
4	0,163ρa	0,329	0,151ρa	0,305	0,145ρa	0,292	0,141ρa	0,284
5	0,136ρa	0,275	0,125ρa	0,252	0,119ρa	0,240	0,115ρa	0,232
6	0,118ρa	0,238	0,107ρa	0,216	0,101ρa	0,204	0,098ρa	0,197
7	0,104ρa	0,210	0,094ρa	0,189	0,088ρa	0,178	0,085ρa	0,172
8	0,093ρa	0,189	0,084ρa	0,169	0,079ρa	0,159	0,075ρa	0,152
9	0,085ρa	0,171	0,076ρa	0,153	0,071ρa	0,143	0,068ρa	0,137
10	0,078ρa	0,157	0,069ρa	0,140	0,064ρa	0,130	0,062ρa	0,124
11	0,072ρa	0,146	0,064ρa	0,129	0,059ρa	0,120	0,056ρa	0,114
12	0,067ρa	0,136	0,059ρa	0,119	0,055ρa	0,111	0,052ρa	0,105
13	0,063ρa	0,127	0,055ρa	0,111	0,051ρa	0,103	0,049ρa	0,098
14	0,059ρa	0,120	0,052ρa	0,105	0,048ρa	0,097	0,045ρa	0,092
15	0,056ρa	0,113	0,049ρa	0,099	0,045ρa	0,091	0,043ρa	0,086

Tabela A.0.2:

$L = 2m \quad d = \frac{3}{4}'' \quad R_{1 \text{ haste}} = 0,481\rho a$

Espaçamentos	2m		3m		4m		5m	
	$R_{eq} [\Omega]$	K						
2	0,275ρa	0,573	0,265ρa	0,552	0,259ρa	0,540	0,256ρa	0,532
3	0,200ρa	0,416	0,188ρa	0,391	0,182ρa	0,378	0,177ρa	0,369
4	0,159ρa	0,331	0,147ρa	0,307	0,141ρa	0,293	0,137ρa	0,285
5	0,133ρa	0,277	0,122ρa	0,254	0,116ρa	0,241	0,112ρa	0,233
6	0,115ρa	0,240	0,105ρa	0,217	0,099ρa	0,205	0,095ρa	0,198
7	0,102ρa	0,212	0,092ρa	0,191	0,086ρa	0,179	0,083ρa	0,172
8	0,092ρa	0,190	0,082ρa	0,170	0,077ρa	0,160	0,073ρa	0,153
9	0,083ρa	0,173	0,074ρa	0,154	0,069ρa	0,144	0,066ρa	0,138
10	0,076ρa	0,159	0,068ρa	0,141	0,063ρa	0,131	0,060ρa	0,125
11	0,071ρa	0,147	0,062ρa	0,130	0,058ρa	0,121	0,055ρa	0,115
12	0,066ρa	0,137	0,058ρa	0,120	0,054ρa	0,112	0,051ρa	0,106
13	0,062ρa	0,129	0,054ρa	0,113	0,050ρa	0,104	0,047ρa	0,099
14	0,058ρa	0,121	0,051ρa	0,106	0,047ρa	0,097	0,044ρa	0,092
15	0,055ρa	0,114	0,048ρa	0,100	0,044ρa	0,092	0,042ρa	0,087

Tabela A.0.3:

$L = 2m \quad d = 1'' \quad R_{1 \text{ haste}} = 0,458\rho a$

Espaçamentos	2m		3m		4m		5m	
	$R_{eq} [\Omega]$	K						
2	0,264ρa	0,577	0,254ρa	0,554	0,248ρa	0,542	0,244ρa	0,534
3	0,192ρa	0,420	0,180ρa	0,394	0,174ρa	0,380	0,170ρa	0,371
4	0,153ρa	0,335	0,142ρa	0,309	0,135ρa	0,296	0,131ρa	0,287
5	0,129ρa	0,281	0,117ρa	0,257	0,111ρa	0,243	0,108ρa	0,235
6	0,111ρa	0,243	0,101ρa	0,220	0,095ρa	0,207	0,091ρa	0,200
7	0,099ρa	0,215	0,088ρa	0,193	0,083ρa	0,181	0,080ρa	0,174
8	0,089ρa	0,194	0,079ρa	0,173	0,074ρa	0,161	0,071ρa	0,154
9	0,081ρa	0,176	0,071ρa	0,156	0,067ρa	0,145	0,064ρa	0,139
10	0,074ρa	0,162	0,065ρa	0,143	0,061ρa	0,133	0,058ρa	0,126
11	0,069ρa	0,150	0,060ρa	0,132	0,056ρa	0,122	0,053ρa	0,116
12	0,064ρa	0,140	0,056ρa	0,122	0,052ρa	0,113	0,049ρa	0,107
13	0,060ρa	0,131	0,052ρa	0,114	0,048ρa	0,105	0,046ρa	0,100
14	0,057ρa	0,124	0,049ρa	0,107	0,045ρa	0,099	0,043ρa	0,093
15	0,053ρa	0,117	0,046ρa	0,101	0,043ρa	0,093	0,040ρa	0,088

Tabela A.0.4:

$L = 2,4m \quad d = \frac{1}{2}'' \quad R_{1 \text{ haste}} = 0,440\rho a$

Espaçamentos	2,5m		3m		4m		5m	
	$R_{eq} [\Omega]$	K						
2	0,248ρa	0,564	0,244ρa	0,555	0,239ρa	0,543	0,235ρa	0,535
3	0,178ρa	0,406	0,174ρa	0,395	0,168ρa	0,381	0,164ρa	0,372
4	0,141ρa	0,321	0,136ρa	0,310	0,130ρa	0,297	0,127ρa	0,288
5	0,118ρa	0,268	0,113ρa	0,258	0,107ρa	0,245	0,104ρa	0,236
6	0,102ρa	0,231	0,097ρa	0,221	0,092ρa	0,209	0,088ρa	0,201
7	0,090ρa	0,204	0,085ρa	0,195	0,080ρa	0,182	0,077ρa	0,175
8	0,080ρa	0,183	0,076ρa	0,174	0,071ρa	0,162	0,068ρa	0,155
9	0,073ρa	0,166	0,069ρa	0,157	0,064ρa	0,147	0,061ρa	0,140
10	0,067ρa	0,152	0,063ρa	0,144	0,059ρa	0,134	0,056ρa	0,127
11	0,062ρa	0,140	0,058ρa	0,133	0,054ρa	0,123	0,051ρa	0,117
12	0,057ρa	0,131	0,054ρa	0,123	0,050ρa	0,114	0,048ρa	0,108
13	0,054ρa	0,122	0,051ρa	0,115	0,047ρa	0,106	0,044ρa	0,101
14	0,051ρa	0,115	0,048ρa	0,108	0,044ρa	0,100	0,041ρa	0,094
15	0,048ρa	0,109	0,045ρa	0,102	0,041ρa	0,094	0,039ρa	0,089

Tabela A.0.5:

$L = 2,4m \quad d = \frac{5}{8}'' \quad R_{1\ haste} = 0,425\rho a$								
Espaçamentos	2,5m		3m		4m		5m	
Número de Hastes	$R_{eq} [\Omega]$	K						
2	0,241pa	0,566	0,237pa	0,557	0,231pa	0,544	0,228pa	0,536
3	0,173pa	0,408	0,169pa	0,397	0,163pa	0,383	0,159pa	0,374
4	0,137pa	0,324	0,133pa	0,313	0,127pa	0,298	0,123pa	0,289
5	0,115pa	0,270	0,110pa	0,260	0,105pa	0,246	0,101pa	0,237
6	0,099pa	0,233	0,095pa	0,223	0,089pa	0,210	0,086pa	0,202
7	0,087pa	0,206	0,083pa	0,196	0,078pa	0,184	0,075pa	0,176
8	0,078pa	0,185	0,075pa	0,176	0,070pa	0,164	0,066pa	0,156
9	0,071pa	0,168	0,068pa	0,159	0,063pa	0,148	0,060pa	0,141
10	0,065pa	0,154	0,062pa	0,146	0,057pa	0,135	0,054pa	0,128
11	0,060pa	0,142	0,057pa	0,134	0,053pa	0,124	0,050pa	0,118
12	0,056pa	0,132	0,053pa	0,125	0,049pa	0,115	0,046pa	0,109
13	0,053pa	0,124	0,050pa	0,117	0,046pa	0,107	0,043pa	0,101
14	0,049pa	0,117	0,047pa	0,110	0,043pa	0,101	0,040pa	0,095
15	0,047pa	0,110	0,044pa	0,103	0,040pa	0,095	0,038pa	0,089

Tabela A.0.6:

$L = 2,4m \quad d = \frac{3}{4}'' \quad R_{1\ haste} = 0,413\rho a$								
Espaçamentos	2,5m		3m		4m		5m	
Número de Hastes	$R_{eq} [\Omega]$	K						
2	0,235pa	0,568	0,231pa	0,559	0,225pa	0,546	0,222pa	0,537
3	0,169pa	0,410	0,165pa	0,399	0,159pa	0,384	0,155pa	0,375
4	0,134pa	0,326	0,130pa	0,315	0,124pa	0,300	0,120pa	0,290
5	0,112pa	0,272	0,108pa	0,262	0,102pa	0,247	0,098pa	0,238
6	0,097pa	0,235	0,093pa	0,225	0,087pa	0,211	0,084pa	0,203
7	0,086pa	0,208	0,082pa	0,198	0,076pa	0,185	0,073pa	0,177
8	0,077pa	0,186	0,073pa	0,177	0,068pa	0,165	0,065pa	0,157
9	0,070pa	0,169	0,066pa	0,160	0,061pa	0,149	0,058pa	0,142
10	0,064pa	0,155	0,061pa	0,147	0,056pa	0,136	0,053pa	0,129
11	0,059pa	0,144	0,056pa	0,136	0,052pa	0,125	0,049pa	0,119
12	0,055pa	0,134	0,052pa	0,126	0,048pa	0,116	0,045pa	0,110
13	0,052pa	0,125	0,049pa	0,118	0,045pa	0,108	0,042pa	0,102
14	0,049pa	0,118	0,046pa	0,111	0,042pa	0,101	0,039pa	0,096
15	0,046pa	0,111	0,043pa	0,104	0,039pa	0,096	0,037pa	0,090

Tabela A.0.7:

$L = 2,4m \quad d = 1'' \quad R_{1\ haste} = 0,394\rho a$								
Espaçamentos	2,5m		3m		4m		5m	
Número de Hastes	$R_{eq} [\Omega]$	K						
2	0,225pa	0,572	0,221pa	0,562	0,216pa	0,548	0,212pa	0,539
3	0,163pa	0,414	0,158pa	0,403	0,152pa	0,387	0,148pa	0,377
4	0,130pa	0,330	0,125pa	0,318	0,119pa	0,302	0,115pa	0,292
5	0,109pa	0,276	0,104pa	0,265	0,098pa	0,250	0,095pa	0,240
6	0,094pa	0,238	0,090pa	0,228	0,084pa	0,214	0,081pa	0,205
7	0,083pa	0,211	0,079pa	0,201	0,074pa	0,187	0,070pa	0,179
8	0,074pa	0,189	0,071pa	0,180	0,066pa	0,167	0,063pa	0,159
9	0,068pa	0,172	0,064pa	0,163	0,059pa	0,151	0,056pa	0,143
10	0,062pa	0,158	0,059pa	0,149	0,054pa	0,138	0,051pa	0,130
11	0,058pa	0,146	0,054pa	0,138	0,050pa	0,127	0,047pa	0,120
12	0,054pa	0,136	0,050pa	0,128	0,046pa	0,118	0,044pa	0,111
13	0,050pa	0,128	0,047pa	0,120	0,043pa	0,110	0,041pa	0,103
14	0,047pa	0,120	0,044pa	0,113	0,040pa	0,103	0,038pa	0,097
15	0,045pa	0,113	0,042pa	0,106	0,038pa	0,097	0,036pa	0,091

Tabela A.0.8:

$L = 3m \quad d = \frac{1}{2}'' \quad R_{1\ haste} = 0,363\rho a$						
Espaçamentos	3m		4m		5m	
Número de Hastes	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K
2	0,205pa	0,564	0,200pa	0,551	0,197pa	0,541
3	0,148pa	0,406	0,142pa	0,390	0,138pa	0,380
4	0,117pa	0,321	0,111pa	0,306	0,107pa	0,295
5	0,097pa	0,268	0,092pa	0,253	0,088pa	0,243
6	0,084pa	0,231	0,079pa	0,217	0,075pa	0,207
7	0,074pa	0,204	0,069pa	0,190	0,066pa	0,181
8	0,066pa	0,183	0,062pa	0,170	0,059pa	0,161
9	0,060pa	0,166	0,056pa	0,153	0,053pa	0,145
10	0,055pa	0,152	0,051pa	0,140	0,048pa	0,133
11	0,051pa	0,141	0,047pa	0,129	0,044pa	0,122
12	0,048pa	0,131	0,044pa	0,120	0,041pa	0,113
13	0,045pa	0,122	0,041pa	0,112	0,038pa	0,105
14	0,042pa	0,115	0,038pa	0,105	0,036pa	0,099
15	0,040pa	0,109	0,036pa	0,099	0,034pa	0,093

Tabela A.0.9:

$L = 3m \quad d = \frac{5''}{8} \quad R_{1 \text{ haste}} = 0,352\rho a$						
Espaçamentos	3m		4m		5m	
Número de Hastes	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K
2	0,199 ρa	0,566	0,194 ρa	0,552	0,191 ρa	0,543
3	0,144 ρa	0,408	0,138 ρa	0,392	0,134 ρa	0,381
4	0,114 ρa	0,324	0,108 ρa	0,307	0,104 ρa	0,297
5	0,095 ρa	0,270	0,090 ρa	0,255	0,086 ρa	0,245
6	0,082 ρa	0,233	0,077 ρa	0,218	0,073 ρa	0,209
7	0,072 ρa	0,206	0,067 ρa	0,192	0,064 ρa	0,182
8	0,065 ρa	0,185	0,060 ρa	0,171	0,057 ρa	0,162
9	0,059 ρa	0,168	0,054 ρa	0,155	0,052 ρa	0,147
10	0,054 ρa	0,154	0,050 ρa	0,142	0,047 ρa	0,134
11	0,050 ρa	0,142	0,046 ρa	0,130	0,043 ρa	0,123
12	0,047 ρa	0,132	0,043 ρa	0,121	0,040 ρa	0,114
13	0,044 ρa	0,124	0,040 ρa	0,113	0,037 ρa	0,106
14	0,041 ρa	0,117	0,037 ρa	0,106	0,035 ρa	0,100
15	0,039 ρa	0,110	0,035 ρa	0,100	0,033 ρa	0,094

Tabela A.0.10:

$L = 3m \quad d = \frac{3''}{4} \quad R_{1 \text{ haste}} = 0,342\rho a$						
Espaçamentos	3m		4m		5m	
Número de Hastes	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K
2	0,194 ρa	0,568	0,189 ρa	0,554	0,186 ρa	0,544
3	0,140 ρa	0,410	0,135 ρa	0,394	0,131 ρa	0,383
4	0,111 ρa	0,326	0,106 ρa	0,309	0,102 ρa	0,298
5	0,093 ρa	0,272	0,088 ρa	0,256	0,084 ρa	0,246
6	0,080 ρa	0,235	0,075 ρa	0,220	0,072 ρa	0,210
7	0,071 ρa	0,208	0,066 ρa	0,193	0,063 ρa	0,184
8	0,064 ρa	0,186	0,059 ρa	0,172	0,056 ρa	0,163
9	0,058 ρa	0,169	0,053 ρa	0,156	0,050 ρa	0,148
10	0,053 ρa	0,155	0,049 ρa	0,143	0,046 ρa	0,135
11	0,049 ρa	0,144	0,045 ρa	0,132	0,042 ρa	0,124
12	0,046 ρa	0,134	0,042 ρa	0,122	0,039 ρa	0,115
13	0,043 ρa	0,125	0,039 ρa	0,114	0,037 ρa	0,107
14	0,040 ρa	0,118	0,037 ρa	0,107	0,034 ρa	0,100
15	0,038 ρa	0,111	0,035 ρa	0,101	0,032 ρa	0,095

Tabela A.0.11:

$L = 3m \quad d = 1'' \quad R_{1 \text{ haste}} = 0,327\rho a$						
Espaçamentos	3m		4m		5m	
Número de Hastes	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K
2	0,187 ρa	0,571	0,182 ρa	0,556	0,178 ρa	0,546
3	0,135 ρa	0,414	0,129 ρa	0,396	0,126 ρa	0,385
4	0,108 ρa	0,329	0,102 ρa	0,312	0,098 ρa	0,300
5	0,090 ρa	0,276	0,085 ρa	0,259	0,081 ρa	0,248
6	0,078 ρa	0,238	0,073 ρa	0,222	0,069 ρa	0,212
7	0,069 ρa	0,211	0,064 ρa	0,195	0,061 ρa	0,185
8	0,062 ρa	0,189	0,057 ρa	0,175	0,054 ρa	0,165
9	0,056 ρa	0,172	0,052 ρa	0,158	0,049 ρa	0,149
10	0,052 ρa	0,158	0,047 ρa	0,145	0,045 ρa	0,136
11	0,048 ρa	0,146	0,044 ρa	0,133	0,041 ρa	0,125
12	0,044 ρa	0,136	0,041 ρa	0,124	0,038 ρa	0,116
13	0,042 ρa	0,128	0,038 ρa	0,116	0,035 ρa	0,109
14	0,039 ρa	0,120	0,036 ρa	0,109	0,033 ρa	0,102
15	0,037 ρa	0,113	0,034 ρa	0,103	0,031 ρa	0,096

Tabela A.0.12:

Apêndice B

Retorno da Corrente de Sequência Zero do Curto-Circuito

B.1 Correntes de Curto-Circuito pela Terra

As correntes que trafegam pela terra e entram na malha são provenientes de:

- curtos-circuitos monofásicos à terra;
- curtos-circuitos bifásicos à terra.

Estes tipos de curto-circuitos geram correntes de sequência zero [11]. As correntes de sequência zero são as únicas que, através da terra ou do cabo de cobertura, retornam à subestação. Como explicado em [11], as correntes de sequência zero estão em fase e geram um campo magnético que enlaça e se concatena com o cabo de cobertura da Linha de Transmissão. Este enlace produz, pelo princípio da ação e reação, uma corrente induzida de retorno, conhecida como corrente auto-neutralizada. Esta corrente retorna pelo cabo de cobertura até a subestação, isto é, a corrente auto-neutralizada retorna acompanhando o traçado da Linha de Transmissão. Ver Figura B.1.1.

A terra sob a Linha de Transmissão está também em paralelo com o cabo de cobertura. Portanto, o fluxo magnético proveniente das correntes de sequência zero também se concatena com a terra (solo) sob a Linha de Transmissão, induzindo nesta uma corrente chamada de corrente de retorno pela terra sob a Linha de Transmissão. Figura B.1.1. Esta corrente retorna pela terra à subestação, acompanhando o traçado da Linha de Transmissão [11].

O restante da corrente de curto-circuito fica então liberado, e retorna utilizando o menor traçado que vai do ponto do curto-circuito à subestação.

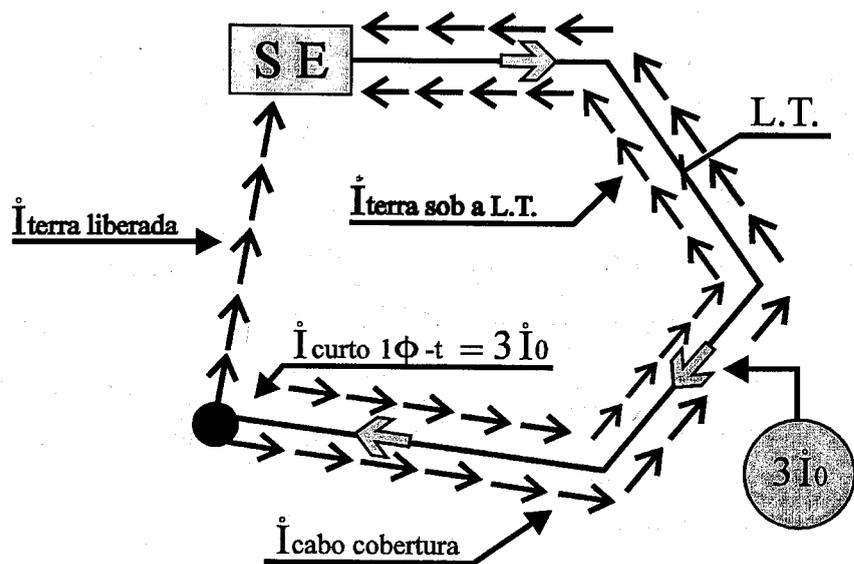


Figura B.1.1: Retorno da Corrente de Sequência Zero à Subestação

O defeito que tem a maior corrente de sequência zero é o curto-circuito monofásico à terra e seu valor é dado pela expressão B.1.1.

$$I_{\text{curto } 1\phi - \text{terra}} = 3I_0 = I_{\text{cabo de cobertura}} + I_{\text{terra sob a L.T.}} + I_{\text{terra liberada}}. \quad (\text{B.1.1})$$

B.2 Corrente de Malha

A corrente de malha (I_{malha}) é a corrente elétrica que efetivamente trafega pela terra e entra na malha pelo solo, ver Figura B.2.1.

A I_{malha} é a corrente que entra na malha pelo solo. Ela é composta pela corrente de terra sob a L.T. e a corrente pela terra liberada. Seu valor é dado pela expressão B.2.1.

$$I_{\text{malha}} = I_{\text{terra sob a L.T.}} + I_{\text{terra liberada}} \quad (\text{B.2.1})$$

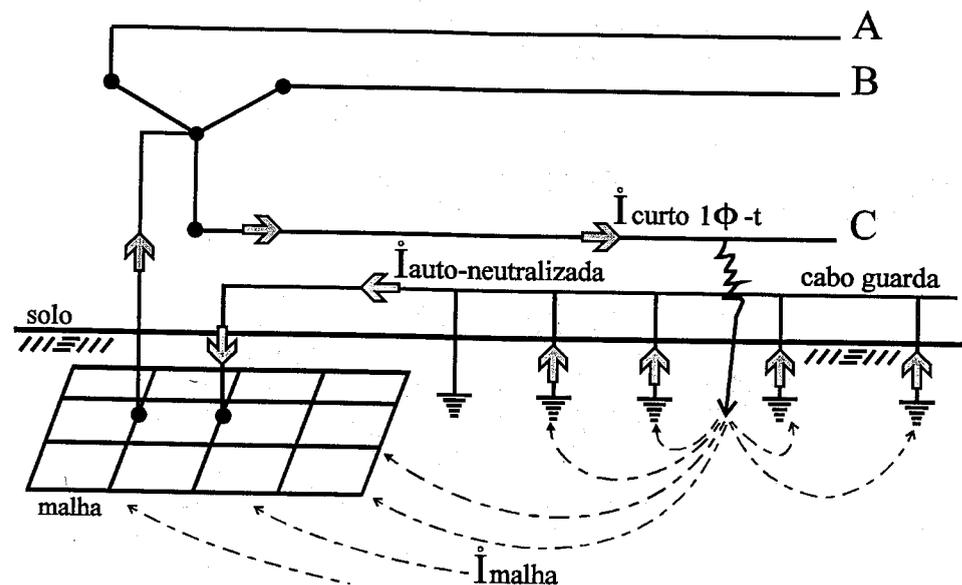


Figura B.2.1: Corrente de Malha

A corrente de malha (I_{malha}) é a corrente que produz as tensões de passo e toque. Portanto, a corrente de malha é a que deve ser considerada no cálculo do dimensionamento da malha, na questão da qualificação da malha no quesito de segurança humana.

Observa-se que a corrente auto-neutralizada não contribui na geração de tensões de passo e toque. Isto porque esta corrente retorna pelo cabo de cobertura e entra diretamente no cabo da malha retornando ao sistema elétrico pelo terra do Y do transformador ou do gerador síncrono.

A corrente de malha também pode ser obtida utilizando-se a expressão B.2.2.

$$I_{\text{malha}} = I_{\text{curto } 1\phi - \text{terra}} - \sum I_{\text{cabo de cobertura das L.T.'s}} \quad (\text{B.2.2})$$

Salienta-se que a corrente de malha é menor que a corrente de curto-circuito e seu valor depende da:

- geometria espacial dos condutores fase, cabo de cobertura e distância à terra;

- resistividade do solo;
- bitola dos condutores fase e cabo de cobertura;
- material(resistividade) dos condutores envolvidos;
- configuração das L.T.'s conectadas à subestação.

Dependendo das condições acima, a corrente de malha pode variar numa faixa larga, como indica, por exemplo, a expressão B.2.3.

$$I_{malha} = \left\{ \begin{array}{c} 0,1 \\ \dot{a} \\ 0,64 \end{array} \right\} \dot{I}_{curto\ 1\phi - terra} \quad (B.2.3)$$

Apêndice C

Resistência de Malha

Neste apêndice, são apresentados os resultados dos trabalhos de vários pesquisadores relativos ao cálculo da resistência de malha de terra (R_{malha}).

C.1 Resistência de Malha de Terra

As fórmulas apresentadas neste item referem-se a resistência de malha de terra proposta por diversos autores:

1) - Fórmula de Dwight [69]

$$R_{Dwight} = \frac{\rho_a}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A_{malha}}} \quad (C.1.1)$$

2) - Fórmula de Laurent e Nilman [38]

$$R_{Laurent} = \frac{\rho_a}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A_{malha}}} + \frac{\rho_a}{L_{total}} \quad (C.1.2)$$

3) - Fórmula de Nahman e Skuletich [70]

$$R_{NS} = \rho_a \left(\frac{0,53}{\sqrt{A_{malha}}} + \frac{1,75}{n^{\frac{1}{3}} L_{total}} \right) \left(1 - \frac{80hd}{n\sqrt{A_{malha}}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (C.1.3)$$

4) - Fórmula de Schwartz [71]

$$R_{Schwartz} = \frac{\rho_a}{\pi L_{total}} \left[\ln \left(\frac{2L_{total}}{h'} \right) + k_1 \left(\frac{L_{total}}{\sqrt{A_{malha}}} - k_2 \right) \right] \quad (C.1.4)$$

5) - Fórmula de Sverak [45]

$$R_{Sverak} = \rho_a \left[\frac{1}{L_{total}} + \frac{1}{\sqrt{20A_{malha}}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A_{malha}}}} \right) \right] \quad (C.1.5)$$

6) - Fórmula do Método Computacional do EPRI [68]

$$R_{EPRI} = K_{EPRI} R_{Laurent} \quad (C.1.6)$$

7) - Fórmula de Chow e Salama [67]

$$R_{CS} = \rho_a \left\{ \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A_{malha}}} + \frac{1}{N\Delta l} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \ln \left(\frac{0,165\Delta l}{d} \right) \right] \right\} \left(1 - \frac{2,256h}{\sqrt{A_{malha}}} \right) \quad (C.1.7)$$

onde:

$\rho_a \Rightarrow$ resistividade aparente do solo;

$A_{malha} \Rightarrow$ área da malha de terra;

$L_{total} \Rightarrow$ comprimento total dos cabos que formam a malha;

$n \Rightarrow$ número de condutores paralelos ao longo de uma direção da malha;

$h \Rightarrow$ profundidade da malha no solo;

$d \Rightarrow$ diâmetro do condutor da malha de terra;

$N = n - 1 \Rightarrow$ número de quadrículas em uma direção;

$\Delta l \Rightarrow$ lado da quadrícula;

$K_{EPRI} \Rightarrow$ fator de correção da Resistência de Malha conforme proposto na referência [68];

$$h' = \begin{cases} \sqrt{dh} & \text{para malha com profundidade } h \\ 0,5 & \text{para malha na superfície } (h = 0) \end{cases}$$

$$w = \frac{a}{b} = \frac{\text{comprimento da malha}}{\text{largura da malha}}$$

$$k_1 = \begin{cases} -0,04w + 1,41 & \text{para } h = 0 \\ -0,05w + 1,20 & \text{para } h = \frac{1}{10}\sqrt{A_{malha}} \\ -0,05w + 1,13 & \text{para } h = \frac{1}{6}\sqrt{A_{malha}} \end{cases}$$

$$k_2 = \begin{cases} 0,15w + 5,50 & \text{para } h = 0 \\ 0,10w + 4,68 & \text{para } h = \frac{1}{10}\sqrt{A_{malha}} \\ -0,05w + 4,40 & \text{para } h = \frac{1}{6}\sqrt{A_{malha}} \end{cases}$$

C.2 Análise da Resistência de Malha em Função de Parâmetros

Na Figura C.2.1 são mostrados resultados para a Resistência de Malha, em função da sua profundidade (h), obtidos pelas expressões apresentadas neste Apêndice, para uma malha de terra com $20m \times 20m$ com 4 quadrículas em cada direção. O diâmetro do cabo é de $1cm$.

Tomando como referência a Resistência de Malha calculada pela expressão proposta pelo EPRI, Fórmula C.1.6, os erros percentuais da R_{malha} estão apresentados na Figura C.2.2.

Uma comparação de R_{malha} , em função do comprimento total de cabos (L_{total}), está mostrada na Figura C.2.3, onde os cálculos foram efetuados para a malha exemplo mostrada na Figura C.2.1, montada a uma profundidade de $0,5m$ e número de quadrículas igual a 7×7 .

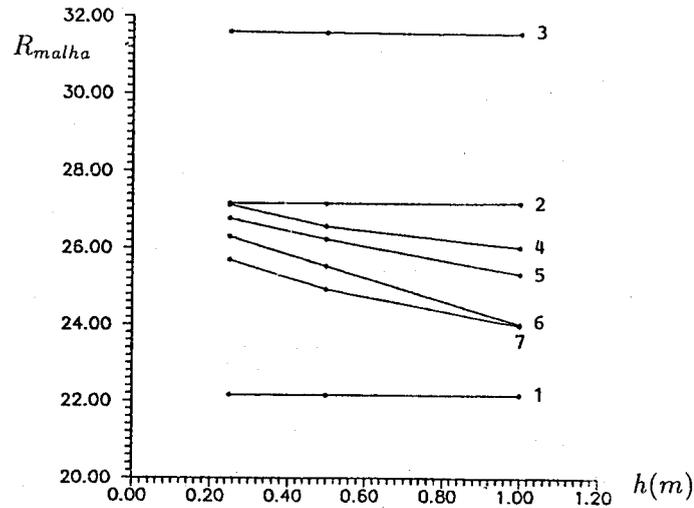


Figura C.2.1: $R_{malha} \times h$

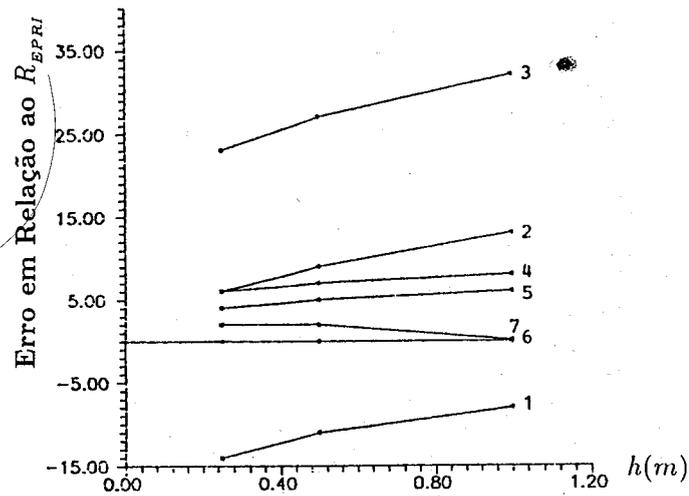


Figura C.2.2: Erros Percentuais da R_{malha} em Relação a R_{EPRI}

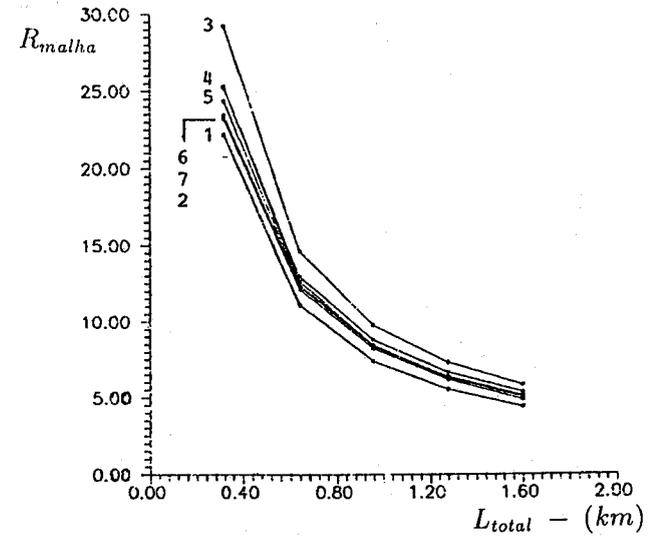


Figura C.2.3: $R_{malha} \times L_{total}$

A Resistência de Malha, em função do número de quadrículas ao longo de um lado (N), está apresentada na Figura C.2.4. A malha em estudo tem dimensão $100m \times 100m$, profundidade de $0,5m$ e diâmetro do cabo de $1cm$.

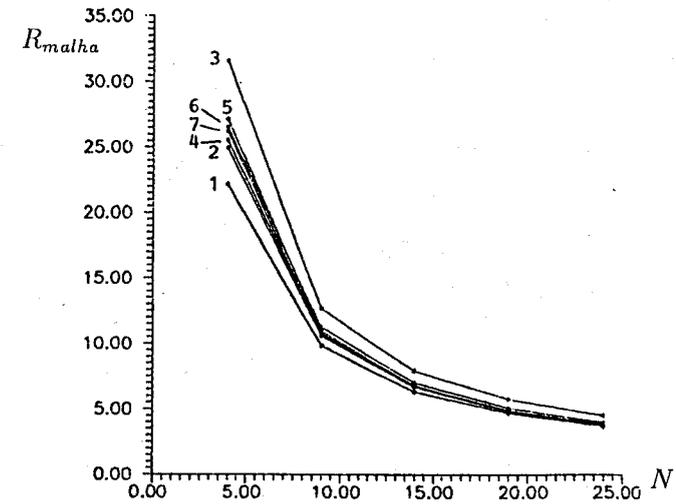


Figura C.2.4: $R_{malha} \times N$

Já a comparação de R_{malha} em função do diâmetro do cabo da malha (Figura C.2.5), foi feito utilizando-se uma malha de $100m \times 100m$, profundidade de $0,5m$ e quadriculadas em 7×7 .

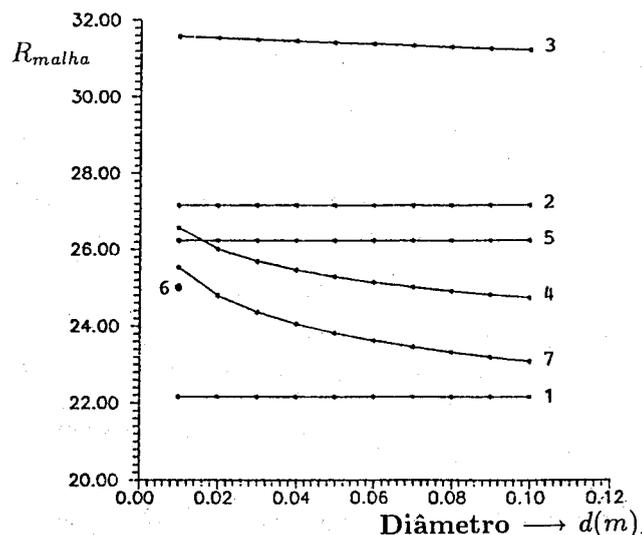


Figura C.2.5: $R_{malha} \times$ Diâmetro do Cabo da Malha

Bibliografia

- [1] J. Zaborszky. Efficiency of grounding grids with nonuniform soil. *AIEE Transaction*, December, 1955. pp.1230-1233.
- [2] J. Endrenyi. Evaluation of resistivity tests for design of station grounds in nonuniform soil. *AIEE Transactions*, December, 1963. pp.966-970.
- [3] G. F. Tagg. *Earth Resistances*. George Newnes Limited, London, 1964.
- [4] E. D. Sunde. *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*. Dover Publications, Inc., New York, 1968.
- [5] F. Dawalibi and D. Mukhedkar. Multi step analysis of interconnected grounding electrodes. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, January/February, 1976. Vol. PAS-95, n.1, pp.113-119.
- [6] F. Dawalibi and D. Mukhedkar. Resistance calculation of interconnected grounding electrodes. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, January/February, 1977. Vol. PAS-96, n.1, pp.59-65.
- [7] G. Kindermann e J. M. Campagnolo. *Aterramento Elétrico*. Publicação Interna - 120 páginas - EEL/UFSC., 1988.
- [8] R. J. Heppe. Step potentials and body currents near grounds in two-layer earth. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, January/February, 1979. Vol. PAS-98, n.1, pp.45-59.
- [9] F. Dawalibi and D. Mukhedkar. Transferred earth potentials in power systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, January/February, 1979. Vol. PAS-97, n.1, pp.90-101.
- [10] R. Verna and D. Mukhedkar. Ground fault current distribution in substation, towers and ground wire. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, May/June, 1979. Vol. PAS-98, n.3, pp.724-730.
- [11] G. Kindermann. *Curto-Circuito*. Editora Sagra - DC Luzzatto, Porto Alegre, 1992.

- [12] R. J. Heppe. Computation of potential at surface above and energized grid or other electrode, allowing for nonuniform current distribution. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, November/December, 1979. Vol. PAS-98, n.6, pp.1978-1989.
- [13] F. Dawalibi. Ground fault distribution between soil and neutral conductors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, March/April, 1980. Vol. PAS-99, n.2, pp.1758-1763.
- [14] F. Dawalibi and W. G. Finney. Transmission line tower grounding performance in nonuniform soil. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, March/April, 1980. Vol. PAS-99, n.2, pp.471-479.
- [15] F. Dawalibi, M. Bouchard, and D. Mukhedkar. Survey on power system grounding design practices. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, July/August, 1980. Vol. PAS-99, n.4, pp.1396-1405.
- [16] G. Kindermann. *Proteção de Sistemas Elétricos*. Publicação Interna - 140 páginas - EEL/UFSC, 1987.
- [17] D. L. Garrett and H. J. Holley. Calculation of substation grounding system resistance using matrix techniques. *IEEE Transactions on Power Apparatus an Systems*, September/October, 1980. Vol. PAS-99, n.5, pp.2008-2011.
- [18] A. P. Meliopoulos, R. P. Webb, and E. B. Joy. Analysis of grounding systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus an Systems*, March, 1981. Vol. PAS-100, n.3, pp.1039-1048.
- [19] G. Kindermann. *Sobretensão no Sistema Elétrico de Distribuição*. Publicação Interna - 120 páginas - EEL/UFSC, 1991.
- [20] J. G. Sverak, W. K. Dick, T. H. Dodds, and R. H. Heppe. Safe substation grounding - part i. *IEEE Transactions on Power Apparatus an Systems*, September, 1981. Vol. PAS-100, n.9, pp.4281-4290.
- [21] J. G. Sverak, R. U. Benson, W. K. Dick, T. H. Dodds, D. L. Garrett, J. E. Idzkowski, R. P. Keil, S. G. Patel, M. E. Ragan, G. E. Smith, R. Verna, and L. G. Zukerman. Safe substation grounding - part ii. *IEEE Transactions on Power Apparatus an Systems*, October, 1982. Vol. PAS-101, n.10, pp.4006-4023.
- [22] F. Dawalibi. *Transmission Line Grounding*. Technical Report, EPRI Research Project I494-1, Final Report EL2699, October, 1982.
- [23] E. B. Joy, N. Paik, T. E. Brewer, R. E. Wilson, R. P. Webb, and A. P. Meliopoulos. Graphical data for ground grid analysis. *IEEE Transactions on Power Apparatus an Systems*, September, 1983. Vol. PAS-102, n.9, pp.3038-3048.
- [24] G. Kindermann. *Distribuição de Energia Elétrica*. Publicação Interna - 103 páginas - EEL/UFSC, 1990.
- [25] F. Dawalibi and C. J. Blattner. Earth resistivity measurement interpretation techniques. *IEEE Transactions on Power Apparatus an Systems*, February, 1984. Vol. PAS-103, n.2, pp.374-382.
- [26] K. A. Ewy and H. A. Smolleck. A graphical explanation of the resistance and surface - potential calculations for grounding systems in two-layer earth. *IEEE Transactions on Power Apparatus an Systems*, March, 1984. Vol. PAS-103, n.3, pp.631-639.
- [27] D. L. Garrett and J. G. Pruitt. Problems encountered with the average potential method of analyzing substation grounding systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus an Systems*, December, 1985. Vol. PAS-104, n.12, pp.3586-3596.
- [28] J.M. Campagnolo. *Aplicação de Processamento Paralelo na Avaliação da Estabilidade a Pequenas Perturbações: Algoritmos para o Cálculo Parcial de Autovalores e Autovetores*, Tese de Doutorado, COPPE/UF RJ. 1994.
- [29] A. P. R. Miranda. *Malhas de aterramento em solos estratificados*. Março, 1986. *Revista Eletricidade Moderna*, pp.22-32.
- [30] G. Kindermann. *Métodos Numéricos de Otimização*. Publicação Interna - 110 páginas - EEL/UFSC, 1986.
- [31] C. A. Sotille. *Cálculo de Aterramento em Sistemas MRT*. *Revista Eletricidade Moderna*, pp.16-36, Outubro, 1986.
- [32] A. E. C. Gaete. *Uma Nova Proposta para a Fórmula de Laurent*. *Revista Eletricidade Moderna*, pp.37-42, Outubro, 1986.
- [33] P. J. Lagacé, J. L. Houle, H. Greiss, and D. Mukhedkar. Computer aided design of a toroidal ground electrode in a two-layer soil. *IEEE Transactions on Power Delivery*, July, 1987. Vol. PWRD-2, n.3, pp.744-749.
- [34] C. Portela. Determinação das resistências de contato com o solo, levando em conta camadas de brita ou revestimento. *IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 1987. Belo Horizonte - M.G.
- [35] E. E. Ribeiro e I. M. Santos. Programa de cálculo de transitórios em malha de aterramento para microcomputadores. *IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 1987. Belo Horizonte - M.G.
- [36] P. S. A. Rocha, L. B. Moraes e R. M. Coutinho. Métodos simplificados para cálculo de malhas de aterramento. *IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 1987. Belo Horizonte - M.G.

- [37] M. Chamma, R. J. Cardoso, F. S. Ribeiro e G. Gambirasio. O método dos elementos finitos no modelamento de sistemas de aterramento em solos de múltiplas camadas. *IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 1987. Belo Horizonte - M.G.
- [38] n.80 IEEE. *Guide for Safety in Substation Grounding*. 1976.
- [39] A. A. Dalben. Projeto de malhas de aterramento de subestações - prática atual, necessidades e perspectivas de desenvolvimento. *IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 1987. Belo Horizonte - M.G.
- [40] J. F. Leite Neto, E. D. B. Nogueira e H. G. Sinzato. Estratificação do solo por método computacional, levantamento e mapeamento da resistividade do solo. *X Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, 1988. Rio de Janeiro - R.J.
- [41] ANSI/IEEE Std 80. *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. 1986. Revision of IEEE.
- [42] D. M. Himmelblau. *Applied Nonlinear Programming*. McGraw-Hill Book Company, 1972.
- [43] E. R. Cabral e W. A. Mannheimer. *Galvanização, Sua Aplicação em Equipamento Elétrico*. Ao Livro Técnico S/A, 1979.
- [44] S. Medeiros Filho. *Fundamentos de Medidas Elétricas*. Editora Guanabara Dois, 1981.
- [45] J. G. Sverak. Sizing of ground conductors against fusing. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, January, 1981. Vol. PAS-100, n.1.
- [46] SCEI.12.03 - CODI. *Recomendações para Aterramento de Equipamentos de Redes e Linhas de Distribuição*. Relatório.
- [47] L. H. R. Oliveira. *Sistemas de Aterramento*. Apostila., 1984.
- [48] *Catálogo Fabricante "Érico do Brasil"*.
- [49] F. C. Wenner. *A Method of Measuring Earth Resistivity*. October, 1915. Bureau of Standards, n.258.
- [50] C. F. Dalziel. Effects of electric shock on man. *Electrical Engineering*, February, 1941. Vol. 60, n.2, pp.63-66.
- [51] G. Kindermann. *Fibrilação Ventricular do Coração pelo Choque Elétrico*. Publicação Interna - 110 páginas - EEL/UFSC, 1990.
- [52] G. Biegelmeier and W. R. Lee. New considerations on the threshold of ventricular fibrillation for a.c. shocks at 50-60hz. *IEE Proc.*, March, 1980. Vol. 127, n.2, pt.A.

- [53] *Anais do 8º Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*. 1983.
- [54] S. A. M. Leon. *Sistemas de Aterramento, Medições, Dimensionamento, Segurança*. Érico, 1978.
- [55] J. L. Marshall. *Lightning Protection*. Publication John Wiley & Sons.
- [56] E. E. Oettle. A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes. *IEEE Paper*, July, 1987. n.87 SM567-1, pp.12-17.
- [57] W. A. Chisholm and W. Janischewskyj. Lightning surge response of ground electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, April, 1989. Vol. 4, n.2, pp.1329-1337.
- [58] R. Rudenberg. Grounding principles and practices i - fundamental considerations on ground currents. *Electrical Engineering*, January, 1945. Vol. 64, pp.1-13.
- [59] V. Gentil. *Corrosão*. Editora Guanabara Dois, 1982.
- [60] A. C. Dutra e L. P. Nunes. *Proteção Catódica*. Editora McKlausen, 1987.
- [61] *NBR-5410 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão - Procedimentos*.
- [62] *IEC-479 - Effects of Current Passing Through the Human Body*.
- [63] C. G. Rodrigues. A estratificação do solo por método numérico. Dezembro, 1986. Revista Eletricidade Moderna.
- [64] A. M. Quites e J. C. Dutra. *Tecnologia da Soldagem a Arco Elétrico*. Editora EDEME, 1979.
- [65] G. Kindermann. *Choque Elétrico*. Editora Sagra - DC Luzzatto, Porto Alegre, 1995.
- [66] G. Kindermann. *Descargas Atmosféricas*. Editora Sagra - DC Luzzatto, Porto Alegre, 1992.
- [67] Y.L. Chow and M.M.A. Salama. A simplified method for calculating the substations grounding grid resistance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, April, 1994. Vol. 9, No. 2, pp.736-742.
- [68] EPRI Report. Analysis techniques of power substation grounding systems, Volume 1: Design Methodology and Tests, EPRI EL-2682. October 1982.
- [69] H.B. Dwight. Calculations of resistances to ground. *AIEE Transactions*, December, 1936. pp.1319-1328.

- [70] J. Nahman and S. Skuletich. Irregularity correction factors for mesh and step voltages of grounding grids. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1980. Vol. PAS-99, No. 1, pp.174-180.
- [71] S.J. Schwartz. Analytical expression for resistance of grounding systems. *AIEE Transactions*, 1954. Vol. 73, Part III-B, pp.1011-1016.