

Silvério Visacro Filho

ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

CONCEITOS BÁSICOS
TÉCNICAS DE MEDIÇÃO E
INSTRUMENTAÇÃO
FILOSOFIAS DE ATERRAMENTO

Silvério Visacro Filho

ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

Conceitos Básicos
Técnicas de Medição e
Instrumentação
Filosofias de Aterramento

Artliber
EDITORIAL

ÍNDICE

Capítulo 1 - Teoria básica de aterramentos elétricos	11
1 - Considerações preliminares	11
2 - Conceitos básicos	11
3 - Aplicações típicas associadas aos aterramentos elétricos	16
4 - “Aterramento de sistema” e “sistema de aterramento”	20
5 - Considerações sobre a influência do aterramento no desempenho dos sistemas	21
Capítulo 2 - Conceitos básicos em condições de baixa frequência: resistividade do solo e resistência de aterramento	23
1 - Introdução	23
2 - Resistividade do solo	25
2.1 - Conceito	25
2.2 - Fatores que determinam a resistividade do solo	26
2.3 - Resistividades características de nosso meio	37
2.4 - Considerações finais sobre a resistividade do solo	39
3 - Resistência de aterramento	39
3.1 - Generalidades	39
3.2 - Conceito e quantificação da “resistência de aterramento”	41
3.3 - Natureza da resistência de um aterramento	42

3.4 - Determinação da resistência de aterramento	45
3.5 - Requisitos básicos de um aterramento	50
3.6 - Resistência de alguns sistemas de aterramento	52
3.7 - Fatores que influenciam no valor da resistência de um aterramento	54
3.8 - Técnicas mais comuns de melhoria da resistência de aterramento	56

Capítulo 3 - Métodos de medição de resistência de aterramento e de resistividade do solo 61

1 - Introdução	61
2 - Distribuição de correntes e potenciais no solo	61
3 - Alterações produzidas na distribuição de correntes e potenciais no solo pelo emprego de outros tipos de eletrodos e pela não-homogeneidade do solo	68
4 - Medição de resistência de aterramento	71
4.1 - Método da queda de potencial (3 terminais)	72
4.2 - Método direto (2 terminais)	78
4.3 - Método do triângulo (Método de Kolrausch)	80
5 - Medição de resistividade do solo	82
5.1 - Medição por amostragem	82
5.2 - Medição local	84
5.2.1 - O método de Frank Wenner	84
5.2.2 - O método da haste vertical (“Driven rod method”)	96

Capítulo 4 - Instrumentação para medição de resistência de terra e resistividade do solo 97

1 - Medição de resistências elétricas	97
2 - Complexidades presentes na medição de resistência de terra e resistividade do solo	99

3 - Instrumentação para medição de resistência de terra e resistividade do solo	100
3.1 - Constituição	101
3.1.1 - Fonte de potência	101
3.1.2 - Filtros de onda	104
3.1.3 - Sistemas de medição	107
4 - Princípios mais comuns de implementação nos instrumentos comerciais	108
4.1 - Emprego de um instrumento do tipo quocientímetro	108
4.2 - Comparação pelo método de zero	109
4.3 - Medidores com características especiais	114
4.3.1 - Medidor de resistência de aterramento de pé de torre de linhas de transmissão	114
4.3.2 - Instrumento medidor de resistência de aterramento tipo “Alicate”	115
Capítulo 5 - Conceitos básicos de segurança em aterramentos	119
1 - Introdução	119
2 - Caracterização de condições de risco	120
3 - Efeitos da corrente elétrica no corpo humano	123
3.1 - Introdução	123
3.2 - A impedância do corpo humano	124
3.3 - Avaliação dos efeitos da corrente no corpo	126
3.4 - Análise da influência de alguns fatores nas condições de risco	128
3.4.1 - Frequência da corrente	128
3.4.2 - Tipo de corrente	128
4 - Critérios de segurança para aterramentos	129
Capítulo 6 - Filosofias de aterramento	131

1 - Considerações preliminares	131
2 - Modelos de aterramentos elétricos	132
2.1 - Aspectos gerais	132
2.2 - Considerações de ordem prática	137
3 - Influência do aterramento no sistema	141
3.1 - Modelagem do sistema	141
3.2 - Filosofias de aterramento	145
3.2.1 - Aterramento “isolado”	145
3.2.2 - Aterramento por ponto único	147
3.2.3 - Aterramento com equipotencialização	150
4 - Conclusões	153
Referências bibliográficas	155

CONCEITOS BÁSICOS EM CONDIÇÕES DE BAIXA FREQUÊNCIA: RESISTIVIDADE DO SOLO E RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

1 - Introdução

Na maioria das situações de projeto, o aterramento é dimensionado para atender a solicitações lentas, como as correntes de curto-circuito. As frequências representativas desse tipo de ocorrência são baixas, sendo próximas da frequência fundamental dos sistemas de alimentação, usualmente de valor 60 ou 50 Hz. Como o aterramento constituído pode, também, estar sujeito a ocorrências associadas a fenômenos rápidos, é prática usual promover-se algumas correções localizadas no aterramento projetado para condições de baixas frequências, para ajustar a sua configuração, complementando-a para também atender às solicitações rápidas.

Nesse sentido, é pertinente analisar-se especificamente como o aterramento se comporta nas condições particulares de baixa frequência, considerando-se a figura 1.2 apresentada no capítulo anterior (circuito equivalente para representação básica do aterramento). Na figura 2.1 é apresentado o circuito resultante da aplicação das simplificações cabíveis nas condições de baixa frequência. Em função do valor reduzido da frequência, a reatância longitudinal (de caráter

indutivo: ωL) e a susceptância transversal (de caráter capacitivo: ωC) podem ser desprezadas. Ademais, é possível desconsiderar-se a resistência longitudinal nos eletrodos, devido à ausência do efeito pelicular nessa faixa de frequência. A resistência interna do condutor é muito reduzida devido à alta condutividade dos eletrodos metálicos e à usual dimensão da seção desses condutores. Assim, o aterramento pode ser basicamente representado por um conjunto de condutâncias conectadas em paralelo, assegurando-se a inclusão dos efeitos mútuos condutivos entre as mesmas. Nessa perspectiva, o sistema aterrado deixa de enxergar o aterramento como uma impedância complexa, passando a visualizá-lo como uma resistência, designada Resistência de Aterramento (R_T), equivalente à solução do conjunto de condutâncias.

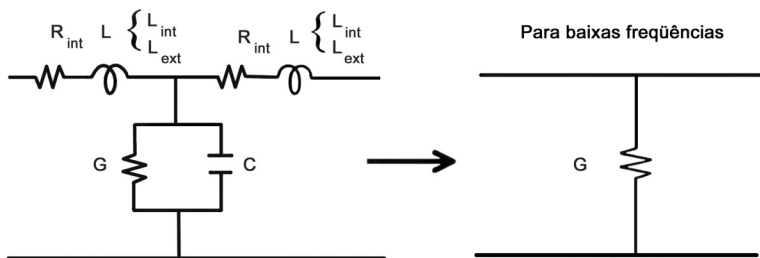


Figura 2.1 - Circuito equivalente de uma porção do aterramento em condições de baixa frequência.

Pode ser mostrado que a Resistência de Aterramento é diretamente proporcional à resistividade do solo (ρ) em que os eletrodos estão colocados. A constante de proporcionalidade K expressa apenas os efeitos geométricos (dimensão e forma) dos eletrodos:

$$R_T = K \cdot \rho \quad (2.1)$$

Efetivamente, do ponto de vista de aplicação, interessa avaliar-se a resistência de aterramento. Contudo, percebe-se, pela relação anterior, que os parâmetros que influenciam o valor da resistividade do solo, exercem uma influência na mesma proporção sobre a resistência de aterramento. Este contexto justifica a apreciação, nesse capítulo, da grandeza resistividade do solo, precedendo à consideração da grandeza resistência de aterramento.

2 - Resistividade do solo

2.1 - Conceito

Pode-se definir a resistividade do solo (ρ) como a resistência elétrica (R) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (aresta l de 1 m, área das faces A de 1 m²) preenchido com este solo. Sua unidade é “ $\Omega \cdot m$ ”. Sabe-se que:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \text{ou} \quad \rho = R \frac{A}{l} \quad (2.2)$$

O solo em seu estado natural é um mau condutor de eletricidade. Se for considerado totalmente seco, ele se comporta como um material isolante.

Sua resistividade é muito elevada se comparada a dos condutores convencionais. A tabela 2.1 ilustra tal fato.

Condutor	Resistividade ($\Omega.m$)
Cobre puro	$1,6 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,7 \times 10^{-8}$
Solos mais comuns	5 a 20.000

Tabela 2.1 - Ordem de grandeza da resistividade de certos materiais.

2.2 - Fatores que determinam a resistividade do solo

A seguir são considerados os principais parâmetros que influenciam no valor da resistividade do solo, bem como a direção dessa influência.

a) Tipo de solo

Os tipos de solo não são claramente definidos. Por isto, não é possível atribuir-se um valor específico de resistividade a um tipo de solo. Além disso, a experiência mostra que, usualmente, são encontrados valores diferentes de resistividade para a mesma variedade de solo de localidades distintas.

Contudo, é possível caracterizar faixas de valores característicos para os diferentes tipos de solo, nas suas condições usuais de umidade, conforme compilado na tabela 2.2.

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

Tabela 2.2 - Faixa de valores usuais de resistividade de certos tipos de solo {1,23,25}.

b) Umidade do solo

Para entender o efeito da umidade na resistividade do solo, deve-se considerar que, em baixa frequência, a condução no solo se faz basicamente por mecanismos eletrolíticos. Para que a eletrólise se estabeleça é essencial a existência da água e dos sais que vão prover os íons da mistura. Assim, a condutividade do solo é sensivelmente afetada pela quantidade de água nele contida, sendo que o aumento da umidade do solo implica a diminuição da sua resistividade. Na realidade, a água é o principal elemento de condução de corrente no solo, o que pode ser comprovado, por exemplo, pelo comportamento da condutividade do solo quando lhe é alterada a concentração de sais minerais.

Por sua vez, essa quantidade de água é variável com uma série de fatores, tais como clima, época do ano, tem-

peratura, natureza do solo, existência de lençóis subterrâneos, dentre outros. Em geral, a umidade aumenta com a profundidade. Contudo, observa-se que, em seu estado natural, dificilmente encontram-se solos realmente secos e, também, raramente se encontram solos com umidade superior a 40%.

Não é razoável se presumir que um solo que retenha grande quantidade de água tenha forçosamente pequena resistividade. Isto não ocorrerá, por exemplo, se a concentração de sais dissolvidos na água for muito baixa ou mesmo se esta estiver congelada, pois a estrutura cristalina do gelo lhe confere alta resistividade elétrica. Todavia, geralmente a resistividade de um tipo de solo é diminuída com o aumento da água nele retida. Um solo de terra de jardim que apresenta um valor médio de resistividade de $480 \, \Omega \cdot \text{m}$ a 20% de umidade (valor percentual em peso), tem essa resistividade diminuída para $140 \, \Omega \cdot \text{m}$, a 50% de umidade. A argila que, a 20% de umidade, tem valor característico de resistividade de $330 \, \Omega \cdot \text{m}$, tem este valor reduzido para $80 \, \Omega \cdot \text{m}$ a 40% de umidade. A areia a 90% de umidade apresenta uma resistividade média de $1.300 \, \Omega \cdot \text{m}$ {33}.

Na figura 2.2 é apresentado um gráfico que estabelece a relação entre resistividade e umidade para um solo arenoso. Observa-se que a resistividade diminui sensivelmente com o aumento da quantidade de água diluída no solo para variações do índice de 0 a 18%. A partir daí, a variação da umidade afeta pouco a resistividade. Experiências realizadas com diversos outros tipos de solo comprovam que o comportamento para estes solos é similar àquele descrito na curva da figura 2.2 {25}.

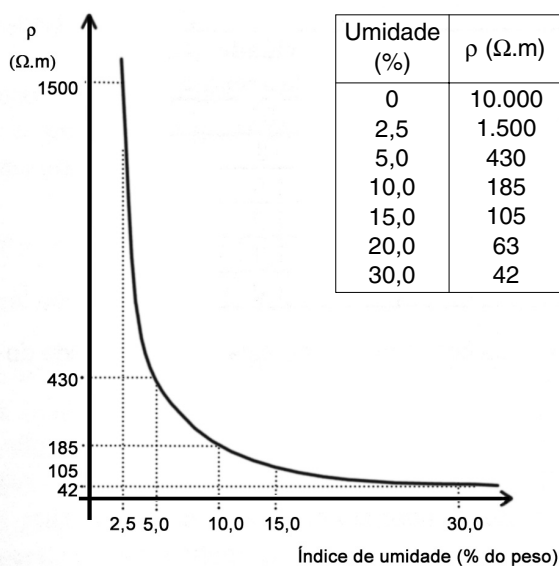


Figura 2.2 - Efeito da umidade na resistividade do solo.

c) Concentração e tipos de sais dissolvidos na água

Sendo a resistividade de um solo dependente da quantidade de água retida neste, e conhecendo-se o fato de que a resistividade da água é governada pelos sais dissolvidos nesta (condução eletrolítica), conclui-se que a resistividade do solo é influenciada pela quantidade e pelos tipos de sais dissolvidos na água retida no mesmo.

A areia é usualmente pobre em sais minerais. Assim, quando se umedece uma amostra de areia com água destilada, geralmente verifica-se que sua resistividade varia relativamente pouco, a despeito da variação da umidade, pela falta de condições para que se processe a eletrólise, devido à carência de sais na água. A tabela 2.3 mostra a relação entre a quantidade de sal adicionado a um solo arenoso, de umidade 15% (percentual em peso) e temperatura de 17° C, e

sua resistividade {23}. A figura 2.3 ilustra a influência do tipo de sal dissolvido na água {25}.

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

Tabela 2.3 - Influência da concentração de sais na resistividade do solo (17°C, umidade 15%).

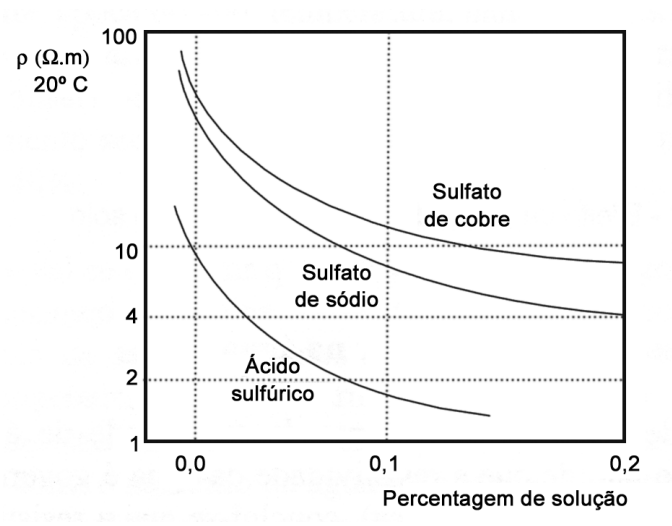


Figura 2.3 - Efeito do tipo e concentração de sais na resistividade do solo.

d) Compacidade do solo

Um solo mais compacto apresenta uma maior continuidade física, o que proporciona um menor valor de resistividade. Tanto assim, que se recomenda a espera de um certo tempo após a instalação de um aterramento elétrico, para se fazer a medição de sua resistência. O solo demora um pouco para se acomodar e tornar-se mais compacto.

Um aumento da pressão sobre o solo ocasiona geralmente maior compacidade deste, com redução de sua resistividade.

e) Granulometria do solo

São de reconhecida importância no estabelecimento da resistividade do solo a dimensão e a presença de grãos de diversos tamanhos. Deve-se considerar essa influência em dois aspectos:

- capacidade de retenção de água nas camadas do solo;
- continuidade física do solo.

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

f) Temperatura do solo

Deve-se encarar os efeitos da temperatura sobre a resistividade do solo em dois aspectos distintos:

- uma temperatura elevada provoca maior evaporação, diminuindo a umidade do solo. Dessa forma, um aumento de temperatura tende a aumentar a resistividade. Isso deve ser considerado, principalmente em países tropicais com regiões de alta temperatura e altos índices de insolação.
- considerando que a resistividade do solo é sensivelmente influenciada pela água nele contida e sabendo-se que a água possui alto coeficiente negativo de temperatura, é razoável supor que a resistividade tende a crescer para uma diminuição da temperatura. A figura 2.4 ilustra a influência da temperatura na resistividade da água.

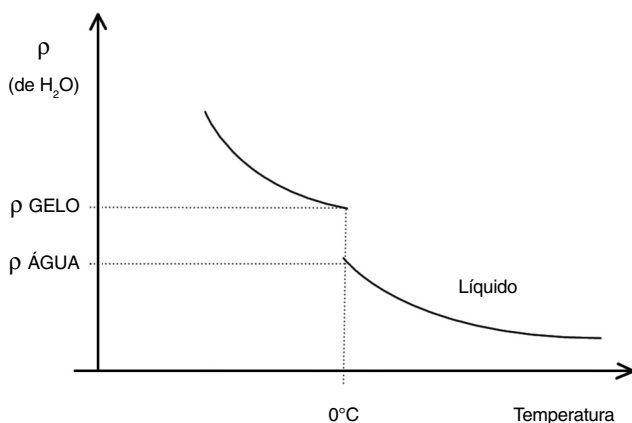


Figura 2.4 - Comportamento da resistividade da água em função da temperatura.

Dados coletados experimentalmente mostram que, para um solo cuja umidade é mantida aproximadamente constante, o comportamento da resistividade em função da temperatura é bem aproximado daquele apresentado na figura 2.4 {1, 23, 25}. A resistividade, que apresenta valores reduzidos a 20°C, passa a ter um valor muito elevado quando a água do solo se congela, devido ao alto valor de resistividade do gelo, como mostra a tabela 2.4 {23}.

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

Tabela 2.4 - Efeito da temperatura na resistividade do solo.

Portanto, para analisar-se os efeitos da temperatura de um solo em sua resistividade, os dois aspectos devem ser considerados, assim como outros fatores relacionados. Por exemplo, ao considerar-se a diminuição da umidade devido ao aumento de temperatura (maior evaporação), é necessário verificar se isto ocorre apenas na camada superficial do solo e se o mesmo é homogêneo, antes de chegar-se a alguma conclusão.

g) Estrutura geológica - Anisotropia - Estratificação do solo

Quando se pensa na resistividade do solo de um certo local, normalmente atribui-se a esta o valor da resistividade

do material que o compõe. Na realidade, a composição do solo é geralmente estratificada em várias camadas de formação diferente (conseqüentemente de diferentes resistividades) superpostas. Além disso, o solo apresenta características anisotrópicas, quando por exemplo camadas mais profundas afloram em locais determinados, ocasionando descontinuidades na superfície. Assim, a resistividade pode variar dependendo da direção considerada e, para tratar do solo de um certo local, passa-se a atribuir-lhe o valor médio das resistividades das diversas partes que o compõem, denominado resistividade efetiva deste solo {4, 17}.

Parece lógica a existência de uma correlação entre a resistividade do solo e sua estrutura geológica, quando são considerados os processos naturais de formação da crosta terrestre e a natureza dos materiais que a compõem. A experiência mostra que o valor da resistividade em áreas de rochas muito antigas é elevada e que, geralmente, este valor decresce com a diminuição da idade das rochas. Entretanto, notam-se algumas exceções nesse comportamento. A tabela 2.5 mostra faixas de valores de resistividade correspondentes a formações predominantes em determinados períodos geológicos {2}.

O extrato da crosta terrestre, composto pelas camadas mais superficiais do solo, foi formado pela deposição de materiais provenientes da erosão de elevações, sobre as terras baixas, mares e lagos internos, e, também, pela acumulação de conchas e materiais orgânicos no fundo de poços profundos de água. Esses materiais, logo após sua deposição, foram firmemente compactados. Os depósitos, sujeitos à transformação química e a grandes pressões, formaram rochas que sofreram metamorfose até tornarem-se den-

sas estruturas cristalinas. Entretanto, não se deve esquecer que a crosta está em constante movimento e a estrutura formada por sedimentação está sujeita a modificações decorrentes de erosão, deslocamentos, ação vulcânica, etc. Esta última, em particular, pode causar o afloramento de camadas profundas, ou dar origem a camadas de rochas ígneas na superfície ou estratificada entre outras camadas do solo e, também, sujeitas à metamorfose.

Período	Resistividade características ($\Omega.m$)
Pré-Cambriano e combinações de Pré-Cambriano e Cambriano	1.000 a 10.000
Combinações de Cambriano e Ordoviciano	100 a 1.000
Ordoviciano, Devoniano e combinações destes	50 a 600
Carbonífero, Triássico e combinações do Carbonífero com períodos mais recentes	10 a 300
Cretáceo, Terciário, Quaternário e combinações destes períodos	2 a 30

Tabela 2.5 - Valores típicos de resistividade para diferentes períodos geológicos.

Os minérios que compõem as rochas e sedimentos, com exceção de certos metais, têm, quando secos, resistividade tão elevada que podem ser considerados isolantes. Dois dos maiores constituintes da crosta, os óxidos de Silício e Alumínio são excelentes isolantes. A resistividade desses materiais, na forma como ocorrem na natureza, é determinada pela quantidade de água neles contida, a água nas par-

tículas ou, na maior parte dos casos, nos poros entre partículas. Para materiais abaixo do nível de saturação do solo, onde os poros estão completamente preenchidos, a resistividade depende do volume dos poros, da forma e arranjo das partículas, além da composição das águas impregnantes. Para solos e materiais acima do nível de saturação (definido como a superfície abaixo da qual os poros estão totalmente preenchidos com água), os poros podem estar apenas parcialmente preenchidos, sendo, então, difícil analisar a influência dessa variável.

No início do processo de deposição dos sedimentos, o volume dos poros era grande. Com o decorrer do tempo os sedimentos sofreram compactação e metamorfose, reduzindo gradualmente o volume dos poros a pequenas dimensões. A relação entre o volume dos poros e o volume total de material localiza-se na faixa de 35% a 53% para argilas, de 4% a 16% para areias e de 0,02% a 1,85% para rochas cristalinas muito antigas {2}. Como as rochas recentes e sedimentos têm elevado volume relativo de poros, estes poderiam possuir alta ou baixa resistividade, se fosse considerado apenas o fator quantidade de água. Entretanto, esses materiais são, geralmente, solúveis e os sais deles dissolvidos formam bons eletrólitos, determinando, usualmente, baixa resistividade. Constituem-se em exceções as areias e cascalhos, que são relativamente insolúveis e geralmente estão situados em locais tais, que não recebem águas de outras camadas, como, por exemplo, quando apresentam altas resistividades por formarem as porções superiores de estruturas. As rochas cristalinas antigas não só apresentam reduzido volume relativo dos poros, como são, também, insolúveis. Como não provêm sais para formação de eletrólitos,

nem recebem águas de condução de outras camadas, as mesmas têm alta resistividade.

2.3 - Resistividades características de nosso meio

O Estado de Minas Gerais constitui-se numa região cujos solos superficiais são compostos predominantemente de formações antigas, principalmente do período Pré-Cambriano, como mostra a figura 2.5 {3}.

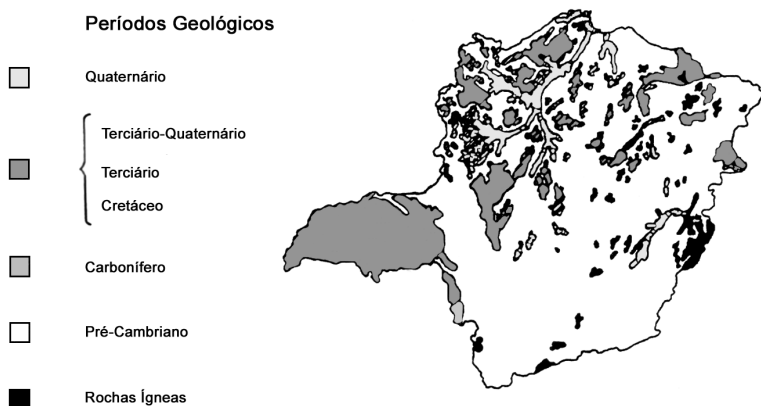


Figura 2.5 - Mapa geológico do Estado de Minas Gerais.

Assim, a resistividade desses solos é geralmente muito elevada, admitindo-se um valor médio de resistividade próximo a $2.500 \Omega.m$. Valores dessa grandeza situados na faixa entre 5.000 e $10.000 \Omega.m$ são comuns em locais onde são implantadas instalações elétricas. Em alguns casos, quando essas instalações se localizam em formações elevadas que apresentam solo seco e bastante afetado pela erosão, chega-se a encontrar resistividades superiores a $10.000 \Omega.m$.

Na tabela 2.6 estão compilados valores típicos de resistividade em algumas regiões brasileiras, a partir de informações fornecidas por empresas locais. Vale citar que tais valores constituem-se apenas numa referência, pois, em locais específicos, os valores de resistividade podem se afastar muito das médias regionais. Particularmente em regiões próximas ao litoral, tais valores tendem a ser significativamente menores.

Região	Valores típicos de resistividade do solo ($\Omega.m$)
Minas Gerais	2.450
São Paulo	700
Paraná	200 - 1.000
Mato Grosso	500 - 2.000
Pernambuco	100 - 2.000

Tabela 2.6 - Resistividades usuais de algumas regiões brasileiras.

De uma forma geral, os valores de resistividade do solo no Brasil são muito elevados se comparados com valores característicos de outros países como, por exemplo, a França e a Alemanha (valores usuais em torno de 50 $\Omega.m$). No início deste capítulo foi postulada a relação proporcional entre a resistência de aterramento e a resistividade do solo. Assim, pode se estimar de imediato que a resistência de aterramento de determinada configuração de eletrodos instalada em um solo típico de Minas Gerais deve apresentar um valor de resistência aproximadamente 50 vezes superior àquele encontrado para configuração idêntica de eletrodos instalada num solo típico da França. Isto sugere que

certas práticas de aterramento, adequadas e suficientes para as condições européias, podem ser completamente inopórtunas para as condições brasileiras.

2.4 - Considerações finais sobre a resistividade do solo

Nos itens anteriores foram colocados fatores que afetam a resistividade do solo. Contudo, é fundamental ressaltar-se a dificuldade de se estabelecer a relação entre o conjunto de todos esses fatores e o comportamento da resistividade do solo em casos reais. Isso confere maior importância à medição de resistividade local para avaliação desse parâmetro.

3 - Resistência de Aterramento

3.1 - Generalidades

Uma conexão à terra apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual influenciando na capacidade de condução de corrente para o solo. Portanto, em princípio, não deve se pensar apenas numa resistência de aterramento, mas numa impedância. Para condições de baixa frequência, baixas correntes e valores de resistividade do solo não muito elevados, são desprezíveis os efeitos capacitivos e de ionização do solo e o mesmo comporta-se praticamente como uma resistência linear.

Nas aplicações de alta frequência (como, por exemplo, em telecomunicações), é necessário considerar-se o efeito capacitivo, principalmente nos solos de alta resistividade e,

também, a influência da reatância indutiva ao longo dos condutores e eletrodos. Tais efeitos estão também presentes para as ondas impulsivas de corrente e tensão, como aquelas associadas a descargas atmosféricas, pois as frequências representativas desse tipo de onda são bastante elevadas.

A figura 2.6 ilustra como a intensidade de corrente influencia o valor da impedância de um aterramento. No caso, considera-se a aplicação de uma onda impulsiva de corrente, que simula uma descarga atmosférica {14, 15, 37}, sobre um aterramento constituído por uma haste de pequenas dimensões. No gráfico se relaciona o valor de crista da onda de corrente (valor de pico) com a “impedância impulsiva” (relação entre os valores de pico das ondas de tensão e corrente).

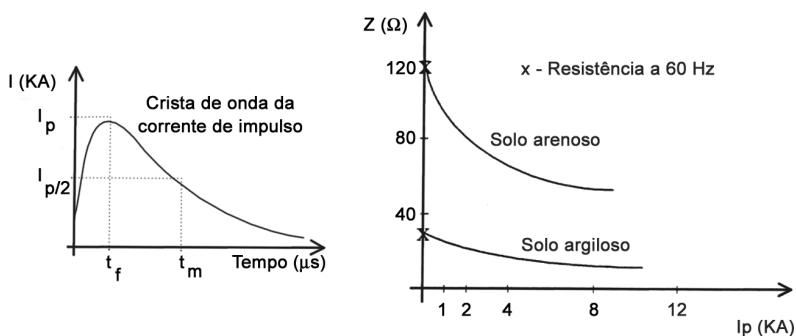


Figura 2.6 - Efeito da intensidade de corrente no comportamento do aterramento.

Observa-se que, para pequenos valores de crista, a impedância tem valor elevado, comportando-se praticamente como uma resistência. Quando a intensidade de corrente vai aumentando, começa a haver a ionização do solo em torno da haste, com o aparecimento de canais de descarga no solo. Tais canais, constituídos de plasma, têm natureza

condutora e o efeito equivalente dos mesmos é a formação de um cilindro de dispersão de corrente, com área ampliada em relação à superfície do condutor. Essa ampliação equivalente da superfície dos eletrodos, que será tanto maior quanto maior for o valor de pico de corrente, resulta no crescimento tanto da corrente condutiva quanto capacitiva no solo, com a conseqüente redução da impedância de aterramento {37, 45}.

Usualmente, em condições de baixa frequência e valores de impedância superiores a um ohm, é comum desprezar-se a componente reativa dessa impedância. Contudo, para valores inferiores a meio ohm, possíveis em grandes sistemas de aterramento, deve-se considerar a componente indutiva, pois esta pode influenciar não só no valor de uma possível corrente de falta, como também na distribuição desta corrente no solo, tendendo a tornar seu percurso próximo à linha de transmissão e alterando as linhas de potencial na superfície do solo {20, 21, 28}.

3.2 - Conceito e quantificação da “Resistência de Aterramento”

Por aterramento entende-se a ligação elétrica de um equipamento ou componente de um sistema elétrico à terra por meio de dispositivos condutores de eletricidade adequados. Como citado, ao ser percorrido por uma corrente, o aterramento comporta-se como uma impedância complexa. Em condições de baixa frequência, tal impedância aproxima-se de uma resistência.

O termo adotado para designar a resistência oferecida à passagem de uma corrente elétrica para o solo através de

um aterramento é “resistência de aterramento”. Contudo, a designação “resistência de terra” ganhou força entre os técnicos, sendo hoje a mais empregada.

A quantificação do valor da resistência de aterramento pode ser traduzida através da relação entre o valor da tensão resultante no eletrodo e o valor da corrente injetada no solo através do mesmo:

$$R_T = V_T / I \quad (2.3)$$

3.3 - Natureza da resistência de um aterramento

A resistência oferecida à passagem da corrente elétrica através de um eletrodo para o solo tem três componentes principais:

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

Para se considerar a influência da resistência da terra circunvizinha ao eletrodo, pode-se recorrer a uma estilização que aborda, de forma simplificada, a constituição da resistência de aterramento. Na figura seguinte considera-se o fluxo de uma corrente de condução para um solo homogêneo por meio de um eletrodo de formato hemisférico. Na estilização, o solo é aproximado por um conjunto de fatias hemisféricas de mesma espessura (Δd) e resistividade, cuja área cresce à medida que se afasta do eletrodo ($A = 2\pi r^2$).

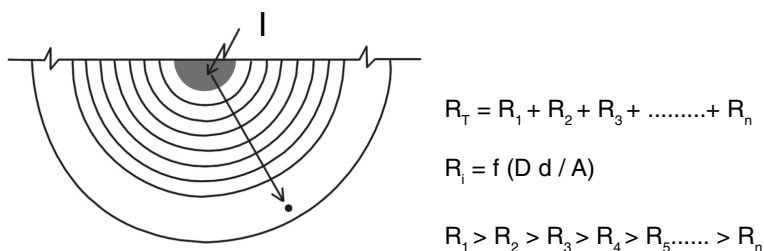


Figura 2.7 - Modelo de solo homogêneo aproximado por fatias.

Cada fatia de solo apresenta um certo valor de resistência. A soma da resistência de todas as fatias até uma distância infinita resulta no valor da Resistência do Aterramento. Como a espessura é a mesma para todas as fatias, quanto mais próxima do eletrodo está uma fatia, maior é sua resistência, pois a área atravessada pela corrente é menor. Por outro lado, quando a distância ao eletrodo é muito significativa, a área da fatia em consideração torna-se tão ampla que a sua resistência fica desprezível. Assim, quem determina efetivamente o valor da resistência de aterramento é a terra mais próxima do eletrodo, sendo muito reduzida a contribuição das fatias de solo mais distantes.

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

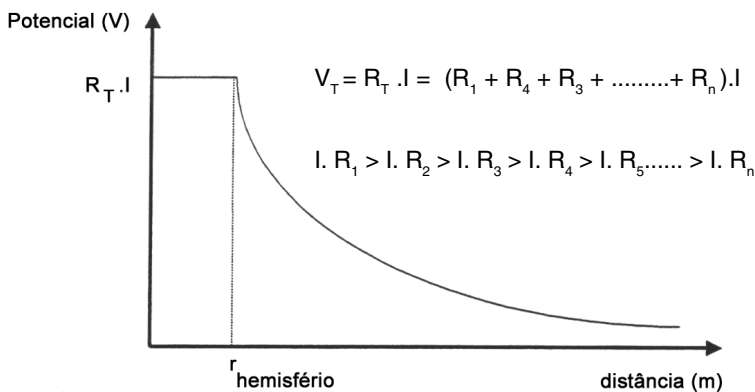


Figura 2.8 - Perfil de potencial no solo.

O mesmo tipo de estilização é válido para outras configurações de eletrodos (como hastes e eletrodos horizontais). Nesse caso, a forma das equipotenciais na região próxima ao eletrodo é semelhante à forma deste, e o mesmo

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO E DE RESISTIVIDADE DO SOLO

1 - Introdução

Para se efetuar a medição correta de uma grandeza, é necessário ter conhecimento das características da mesma, a fim de evitar-se interpretações equivocadas quanto ao significado dos resultados da medição. Tal conhecimento é particularmente importante no caso de grandezas de reconhecida complexidade, tais quais a resistividade do solo e a resistência de aterramento. No capítulo anterior, procedeu-se à abordagem cuidadosa dessas duas grandezas, suficiente para caracterização das mesmas, o que possibilita considerar, no presente capítulo, as correspondentes técnicas de medição.

2 - Distribuição de correntes e potenciais no solo

Os caminhos de corrente no solo apresentam uma geometria complexa e, por conseguinte, ao analisar a terra como um condutor de corrente, não se tem a mesma simplicidade de tratamento existente no caso de condutores metálicos lineares. Ao ser injetada no solo, a corrente tende

a se dispersar em todas as direções, percorrendo caminhos determinados pelas características do meio. A figura 3.1 dá uma idéia da maneira como a corrente circula entre dois eletrodos colocados no solo.

Para abordagem dessa questão, pode-se fazer referência aos desenvolvimentos dos itens 2.3 e 2.4 do capítulo anterior, correspondentes à configuração hemisférica.

Considera-se, inicialmente, o estabelecimento de uma diferença de potencial entre dois eletrodos hemisféricos enterrados num solo homogêneo, colocados a uma distância “d” muito superior aos seus raios “r” ($d \geq 10r$). A fonte de tensão deve ser alternada para minimização dos efeitos galvânicos junto à superfície dos eletrodos, os quais podem mascarar os resultados de medição.

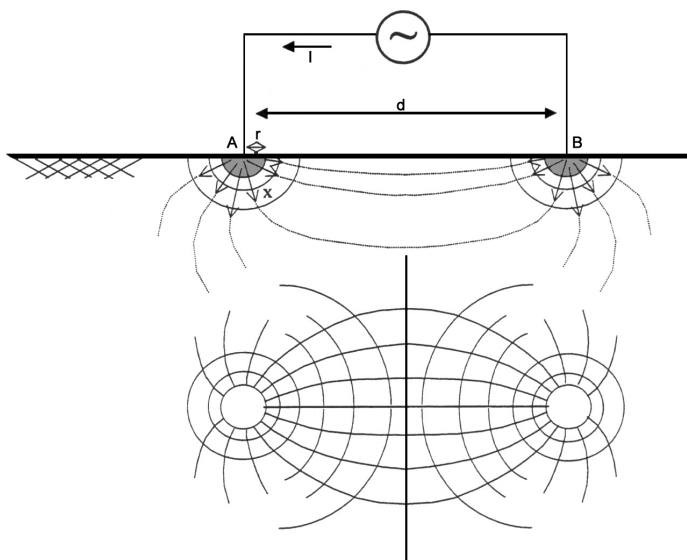


Figura 3.1 - Distribuição aproximada das linhas de corrente e equipotenciais no solo.

A corrente I flui para o solo através do eletrodo A, espalhando-se radialmente em todas as direções e concentrando-se, da mesma forma, à medida que se aproxima do outro eletrodo. A densidade de corrente “ J ” a uma distância “ x ” do centro do hemisfério (figura 3.2), e o campo elétrico no solo são dados respectivamente por (2.6 e 2.5):

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad \vec{E} = \rho \vec{J} \quad (\vec{J} = \sigma \vec{E})$$

Por outro lado, para se obter a diferença do potencial “ ΔV ” do ponto “ x ” em relação ao potencial do eletrodo (figura 3.2) basta calcular a integral de linha da intensidade de campo entre a superfície do eletrodo e o ponto “ x ”:

$$V_{r_{\text{eletrodo}}} - V_{r_x} = - \int_{r_x}^{r_{\text{eletrodo}}} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad \int_{r_x}^{r_{\text{eletrodo}}} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{\rho}{2\pi} I \left(\frac{1}{r} \right) \Bigg|_{r_x}^{r_{\text{eletrodo}}} \quad (3.1)$$

$$\text{Logo:} \quad V_{r_{\text{eletrodo}}} - V_{r_x} = \frac{\rho}{2\pi} I \left(\frac{1}{r_{\text{eletrodo}}} - \frac{1}{r_x} \right) \quad (3.2)$$

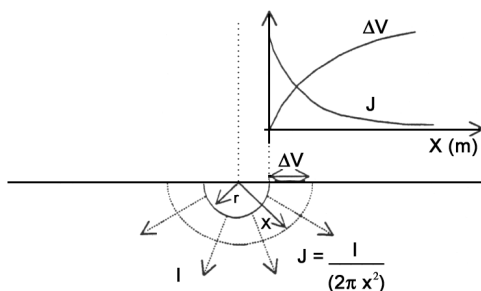


Figura 3.2 - Densidade de corrente e perfil do potencial no solo (em relação ao eletrodo).

Da expressão anterior, pode ser determinada a diferença de potencial entre o eletrodo hemisférico e um ponto x muito distante (tendendo para infinito):

$$V_{r_{\text{eletrodo}}} = \frac{\rho}{2\pi} I \left(\frac{1}{r_{\text{eletrodo}}} \right) \quad (3.3)$$

Esse ponto afastado é tomado como referência de potencial, sendo-lhe atribuído arbitrariamente o potencial zero e a denominação de “*terra remoto*”.

O valor da resistência elétrica sentida pela corrente que flui do eletrodo é fornecido pela razão entre o potencial deste (referido a infinito) e a corrente. A interligação dos pontos de mesmo potencial no solo gera superfícies equipotenciais, de formato hemisférico com centro nos eletrodos, conforme mostrado nas figuras 3.1 e 3.2.

Para obtenção do perfil do potencial na superfície do solo, pode ser implementada a montagem indicada na figura 3.3.

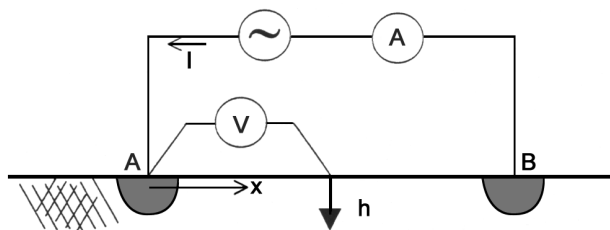


Figura 3.3 - Montagem para levantamento do perfil de potencial.

Uma fonte de tensão alternada estabelece a diferença de potencial entre os dois eletrodos, que faz circular uma determinada corrente entre os mesmos no solo. O deslocamento da haste de prova “h” ao longo do segmento de reta AB que liga os dois eletrodos permite tomar-se o potencial do ponto x (onde estiver enterrada esta haste) em relação ao potencial do eletrodo A. Traçando-se a curva dos potenciais medidos para as diversas distâncias “x”, obtém-se um gráfico similar ao apresentado na figura 3.4.

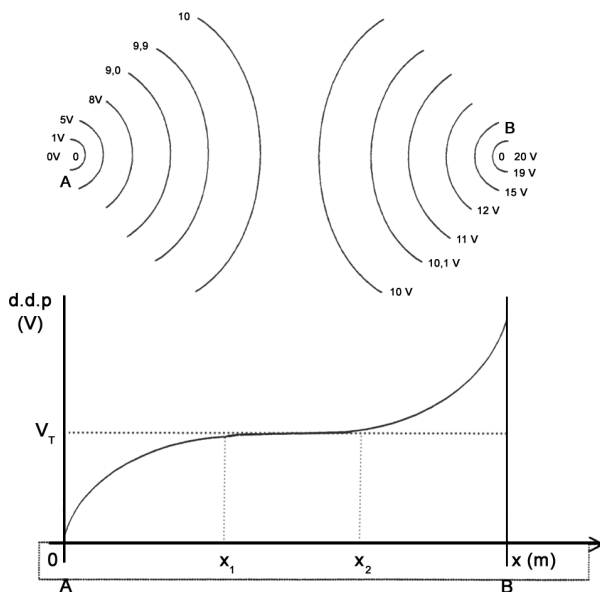


Figura 3.4 - Perfil de potencial na superfície do solo.

Na parte inicial da curva (entre A e x_1), o potencial é sensivelmente crescente. Como foi visto anteriormente, a maior parte da resistência de um aterramento localiza-se na terra mais próxima ao mesmo. À medida que se afasta do eletrodo, a área de condução de corrente vai se ampliando e

a resistência da “fatia” do solo correspondente a esta superfície vai diminuindo cada vez mais. Para pontos muito distantes tal resistência torna-se desprezível. Os pontos da curva correspondem justamente à somatória da queda de tensão que ocorre na resistência de cada elemento de volume desde o ponto A até o ponto x_1 em consideração. Ponderando-se que a corrente que atravessa cada superfície é a mesma e que a resistência das fatias elementares de solo vai diminuindo à medida que se afasta do aterramento, conclui-se que a queda de tensão é cada vez menor para os volumes elementares, embora a somatória destas seja ainda crescente. Isso justifica o formato da curva antes do patamar (crescente e com derivada decrescente entre A e x_1).

Entre os pontos x_1 e x_2 , a área da seção de condução é tão ampla que resulta numa densidade de corrente diminuída, sendo, então, a queda de tensão desprezível entre os dois pontos. Esta região é conhecida como patamar de potencial. A diferença de potencial entre os pontos nas extremidades do patamar corresponde a menos de 2% do potencial obtido entre A e x_1 . Em termos práticos, pode-se dizer que localiza-se neste patamar o “terra remoto” (ponto ao qual se atribui potencial zero e que está infinitamente afastado do aterramento), pois quase toda a diferença de potencial entre o eletrodo A e um ponto infinitamente afastado se localiza até o patamar (cerca de 98%).

A partir de x_2 , as áreas de condução começam a diminuir, pois, ao convergir para o eletrodo B, a corrente tem de atravessar superfícies hemisféricas centradas nesse eletrodo de área cada vez menor. Conseqüentemente, a resistência dos elementos de volume correspondentes aumenta com a aproximação de B. Isso justifica não apenas a característica

crescente da curva, mas também a característica crescente de sua derivada, à medida que se aproxima de B.

Observa-se nesta curva uma separação bem nítida entre a queda de tensão no aterramento A e aquela no aterramento de B, separação esta constituída pelo patamar de potencial. Isso ocorre porque os eletrodos A e B foram considerados suficientemente afastados. Para se avaliar a modificação do perfil de potencial com a diminuição da distância entre os eletrodos que injetam corrente no solo, é empregada a mesma montagem da figura 3.3, sendo medidos continuamente os potenciais entre os eletrodos A e B. Os resultados estão colocados na figura 3.5.

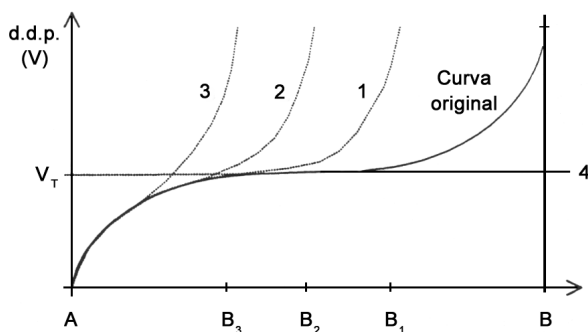


Figura 3.5 - Variação do perfil de potencial em função da distância entre os eletrodos de corrente.

A aproximação dos eletrodos causa a diminuição do patamar. Isso é mostrado na “curva 1” para a distância AB_1 entre os eletrodos A e B. Diminuindo-se ainda mais a distância, atinge-se uma situação crítica, em que o patamar está prestes a se extinguir, indicada na “curva 2”, para a distância AB_2 . Se a distância é diminuída além desse ponto, o patamar desaparece, não sendo mais possível distinguir as regiões de

queda de tensão dos dois aterramentos, como é mostrado pela “curva 3”. Passa a existir uma interferência entre as regiões de aterramento dos dois eletrodos, como resultado do acoplamento mútuo resistivo entre ambos.

A “curva 4” mostra o perfil de potencial obtido quando as tensões são medidas ao longo da reta que une A e B, mas do lado oposto ao eletrodo A. Nota-se que a curva tem o crescimento um pouco mais lento, tendendo a alcançar o potencial do patamar para pontos muito distantes. O potencial não ultrapassa o valor do potencial do patamar, pois na direção em questão não se tem a concentração das linhas de corrente como no caso em que se aproxima de B.

Na curva da figura 3.4, a igualdade no valor da queda de potencial para os dois aterramentos decorre da configuração idêntica (forma e dimensão) dos eletrodos. Se o raio do eletrodo A fosse igual à metade daquele de B, a queda de tensão no aterramento de A seria o dobro daquele da resistência de B, pois a corrente que circula entre ambos é a mesma e o valor da resistência de aterramento de A seria o dobro daquele do de B. A figura 3.7 (a) ilustra um caso em que as dimensões dos dois eletrodos colocados em solo homogêneo são diferentes.

3 - Alterações produzidas na distribuição de correntes e potenciais no solo pelo emprego de outros tipos de eletrodos e pela não-homogeneidade do solo

Quando são empregados eletrodos de formato diferente, os caminhos de corrente nas proximidades do eletrodo são modificados. A corrente é sempre ortogonal às su-

perfícies equipotenciais. Estas têm formato semelhante ao do eletrodo e são ampliadas à medida que se afasta do mesmo, tendendo a se abaularem até tornarem-se hemisféricas. Assim, a grandes distâncias do aterramento, a distribuição de correntes e potenciais no solo deve aproximar-se daquelas que ocorrem para eletrodos hemisféricos, não importando a forma do eletrodo. Até mesmo para uma malha constituída de vários eletrodos pode se considerar essa distribuição se as dimensões da malha são reduzidas em relação às distâncias em questão (aproximadamente quatro vezes menor). Na figura 3.6 estão representadas as superfícies e linhas equipotenciais, além da curva do perfil de potencial, para um eletrodo vertical (haste).

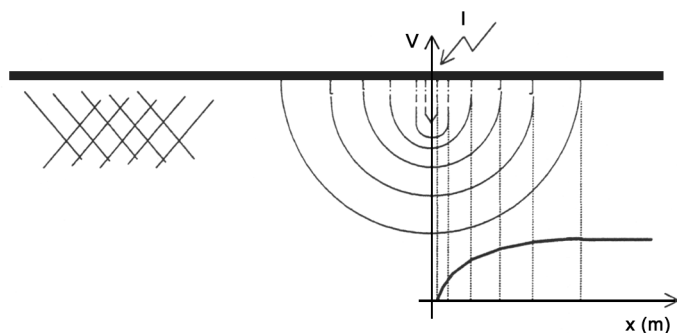


Figura 3.6 - Equipotenciais no solo para eletrodo tipo haste.

As heterogeneidades do solo podem alterar sensivelmente os caminhos de corrente e conseqüentemente a distribuição de potenciais na sua superfície. Por exemplo, um corpo condutor de longas dimensões enterrado pode concentrar a corrente que passa no solo, alterando as linhas de potencial. A estratificação do solo em camadas de resistividades diferentes pode fazer que os caminhos de corrente

sejam mais superficiais ou mais profundos, de acordo com a resistividade das camadas, conforme ilustrado na figura 3.7 {1}. Esta mostra as linhas de corrente, as equipotenciais e o perfil de potencial na superfície do solo, quando se aplica uma diferença de potencial entre dois eletrodos hemisféricos de raios diferentes (o diâmetro do eletrodo A vale 10 m e o de B vale 1 m). Os dois eletrodos estão enterrados a uma distância de 1.000 metros.

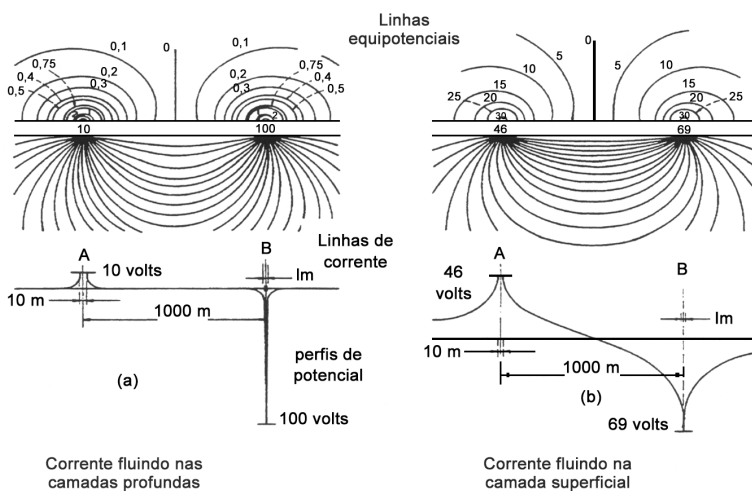


Figura 3.7 - Efeito da estratificação do solo no perfil de potencial da superfície.

Na primeira parte da figura, o solo é homogêneo quanto à resistividade e é aplicada uma diferença de potencial de 110 V entre os eletrodos. Nota-se que a maior parte da queda de tensão no solo localiza-se próxima ao eletrodo de menor diâmetro. Na segunda parte da figura considera-se a aplicação de uma diferença de potencial de 113 V entre os eletrodos, colocados num solo estratificado em duas camadas, sendo a camada superficial de resistividade bem menor.

CONCEITOS BÁSICOS DE SEGURANÇA EM ATERRAMENTOS

1 - Introdução

O tema “Segurança em Aterramentos” constitui-se num capítulo específico no tópico “Projeto de Aterramentos”. Para fins de caracterização das condições básicas de segurança, julga-se oportuno a apresentação de alguns conceitos fundamentais de segurança no presente texto, ainda que de forma introdutória. Aspectos detalhados sobre o tema podem ser referenciados em outros textos relativos a projetos.

Como já fora mencionado anteriormente, as aplicações dos Aterramentos Elétricos estão fundamentalmente associadas a dois fatores:

- o desempenho do sistema ao qual o aterramento está conectado;
- as questões de segurança de seres vivos e de proteção de equipamentos.

No primeiro caso se situam as questões associadas à forma pela qual o comportamento do aterramento afeta o desempenho do sistema. No que concerne à implantação

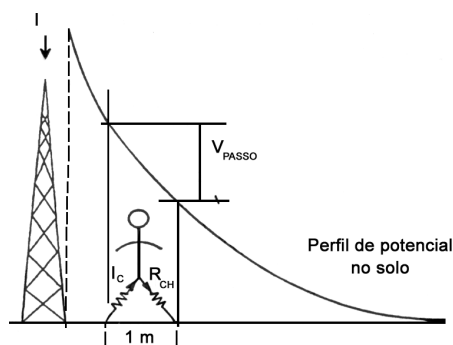
do aterramento, os aspectos de segurança podem ser enfocados segundo duas perspectivas.

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

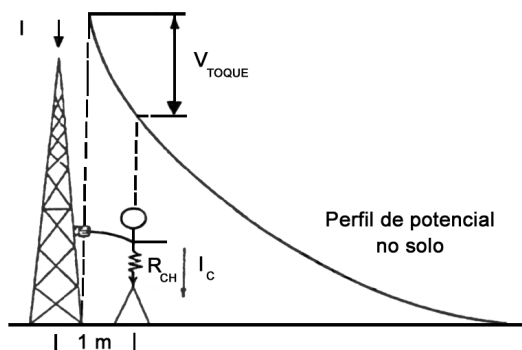
Outra perspectiva refere-se aos riscos associados à implantação de um aterramento destinado especificamente a assegurar um bom desempenho para determinado sistema elétrico ou eletrônico (aterramento de serviço). Embora a segurança não seja a finalidade primeira da instalação do aterramento, também neste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

2 - Caracterização de condições de risco

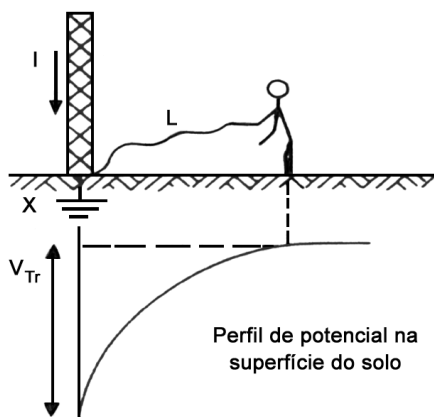
Quando as partes do corpo humano são submetidas a uma diferença de potencial, o mesmo é percorrido por uma corrente elétrica, que pode resultar em diversos efeitos para o indivíduo, configurando, em diversas situações, condições de risco. No que concerne ao aterramento elétrico, é possível caracterizar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



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



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



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

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

corrente máxima pelo aterramento (determinada pela solicitação crítica da instalação, por exemplo, máxima corrente de curto), os valores máximos de tais tensões sejam inferiores àqueles que poderiam causar no corpo correntes capazes de gerar efeitos patológicos.

3 - Efeitos da corrente elétrica no corpo humano

3.1 - Introdução

Um primeiro aspecto fundamental a ser considerado é que tais efeitos são efetivamente determinados pela corrente e seu percurso pelo corpo humano, não sendo uma função direta do nível do potencial que a originou. Nesse sentido, vale citar que é possível tocar, sem maiores riscos, um condutor energizado com alta tensão. Nesse caso, o corpo não pode estar fechando um circuito entre pontos aos quais esteja aplicada uma diferença de potencial significativa, o que poderia ocasionar um fluxo de corrente pelo corpo. Satisfeito este cuidado, o corpo simplesmente iria adquirir o potencial do condutor energizado, sendo eventualmente sujeito apenas a algum Efeito Corona, se o nível de tensão for muito elevado.

A avaliação de tais efeitos apresenta certa complexidade, pois os mesmos dependem de muitos fatores (percurso no corpo, intensidade e tempo de duração do choque, tipo de onda e frequência da corrente, valor da diferença de potencial que gera a corrente, condições orgânicas do indivíduo etc.).

São várias as formas de manifestação desses efeitos. Numa escala progressiva associada à intensidade de

corrente, pode-se dizer que os mesmos evoluem numa certa seqüência:

- simples formigamento (ou aquecimento);
- enrijecimento muscular;
- inibição dos centros nervosos (com possibilidade de parada respiratória);
- alteração do ritmo cardíaco (em alguns casos causando a fibrilação ventricular);
- ocorrência de queimaduras profundas com necrose dos tecidos;
- alterações no sangue (provocadas por efeitos térmicos e eletrolíticos da corrente).

3.2 - A impedância do corpo humano

A intensidade de corrente resultante no corpo depende basicamente da diferença de potencial aplicada e da impedância apresentada pela parte do corpo percorrida pela corrente.

Tal impedância contém duas componentes: a impedância interna do corpo (Z_i) e a impedância da pele (Z_p), como é representado pelo circuito equivalente da figura 5.1.

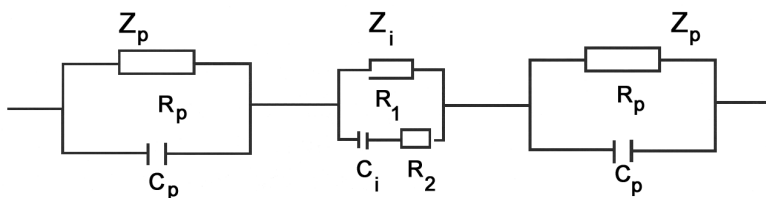


Figura 5.1 - Circuito equivalente para a impedância do corpo humano.

A impedância total do corpo é uma função da tensão aplicada, apresentando um valor de ordem não superior a $1\text{ k}\Omega$ (choque entre mãos ou entre uma mão e pé, do mesmo lado) para 95% da população e diferença de potencial superior a 200 V. O valor da impedância é bem maior para tensões inferiores. Na figura 5.2 mostra-se um gráfico com a impedância total do corpo em função da tensão aplicada (choque entre mãos ou entre uma mão e pé, do mesmo lado).

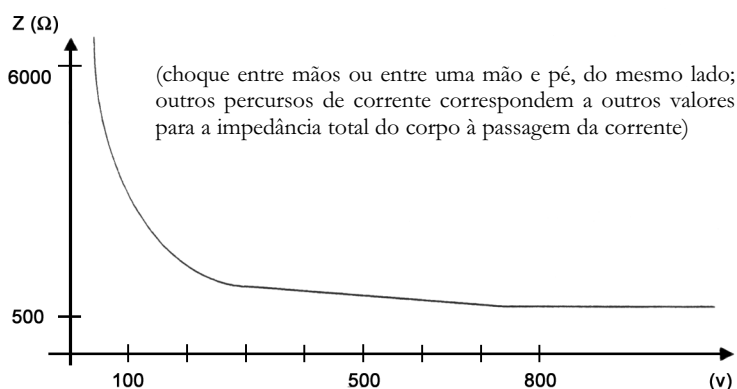


Figura 5.2 - Comportamento aproximado da impedância do corpo em função do nível da diferença de potencial aplicada.

Para baixas tensões (inferiores a 50 V), a impedância da pele exerce um papel importante na limitação da corrente. Entretanto, à medida que a tensão cresce, sua importância é diminuída, até que a ruptura da pele nos pontos de contato elimine tal impedância no circuito equivalente (nesse caso, algumas vezes observa-se, inclusive, a marcação dos pontos de injeção de corrente no corpo). Nos instantes iniciais, a corrente é praticamente limitada apenas pela componente interna da impedância, que tem a ordem de $500\ \Omega$. Tal impedância é que limita ondas impulsivas e de curta duração.

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

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

Tabela 5.1 - Fator de corrente do coração para diferentes caminhos de corrente.

3.3 - Avaliação dos efeitos da corrente no corpo

Para fins de se estabelecer referências quantitativas que expressem a magnitude dos efeitos da corrente no corpo humano, são considerados a seguir especificamente os efeitos observados ou projetados para correntes de 50 e 60 Hz. Tais resultados podem ser ajustados para condições diferentes, através de uma posterior análise de sensibilidade.