

PROTEÇÃO

Comportamento de eletrodos de aterramento diante de descargas atmosféricas

MERCADO DE EQUIPAMENTOS PARA ATERRAMENTO
Pesquisa sonda o tamanho dos mercados de produtos específicos deste segmento e revela quais são os dispositivos mais comercializados

Em debate: a polêmica Belo Monte
Confiabilidade em sistemas fotovoltaicos
A história da certificação de produtos e processos no Brasil

Cinase
encerra ciclo 2011
com recorde
de público

Capítulo XI

Medição da resistividade do solo

Jobson Modena e Hêlio Sueta*

O projeto da norma ABNT NBR 7117, atualmente em revisão, estabelece os requisitos para a medição da resistividade e a determinação da estratificação do solo. Estima-se que esta norma seja publicada no início de 2012. O texto do projeto apresenta diversos métodos de medição com vários arranjos para o método dos quatro eletrodos. Este capítulo apresenta, de forma resumida, estes métodos e arranjos. Lembrando que resistividade elétrica do solo ou resistividade do solo é a resistência entre faces opostas do volume de solo, consistindo em um cubo homogêneo e isótropo cuja aresta mede uma unidade de comprimento.

O solo tem uma composição bastante heterogênea, sendo que o valor da sua resistividade pode variar de local para local em função do tipo (argila, calcário, areia, granito, etc.), do nível de umidade (seco, molhado), da profundidade das camadas, da idade de formação geológica, da temperatura, da salinidade e de outros fatores naturais. A resistividade do solo geralmente é afetada também por fatores externos, como contaminação e compactação do solo. O projeto da ABNT NBR 7117 apresenta a Tabela 1 com exemplos da variação da resistividade do solo, reproduzida a seguir:

TABELA 1 – VALORES TÍPICOS DE RESISTIVIDADE DE ALGUNS TIPOS DE SOLO

TIPOS DE SOLO	FAIXA DE RESISTIVIDADES ($\Omega \cdot m$)
ÁGUA DO MAR	MENOR DO QUE 10
ALAGADIÇO, LIMO, HUMUS, LAMA	ATÉ 150
ÁGUA DESTILADA	300
ARGILA	300 – 5.000
CALCÁRIO	500 – 5.000
AREIA	1.000 – 8.000
GRANITO	1.500 – 10.000
BASALTO	A PARTIR DE 10.000
CONCRETO ⁽¹⁾	MOLHADO: 20 – 100 ÚMIDO: 300 – 1000 SECO: 3 k $\Omega \cdot m$ – 2 M $\Omega \cdot m$

⁽¹⁾ A categoria molhado é típica de aplicação em ambientes externos. Valores inferiores a 50 $\Omega \cdot m$ são considerados altamente corrosivos.

O solo é, geralmente, constituído por diversas camadas, sendo que cada camada apresenta um valor de resistividade e uma espessura. A determinação destes valores e a estratificação do solo são muito importantes para o cálculo das características do sistema de aterramento, essenciais para o desenvolvimento dos projetos e estudos, assim como para a determinação de potenciais de passo e solo.

O projeto de norma apresenta na Figura 1 exemplos que representam solo real (a) e o solo estratificado (b).

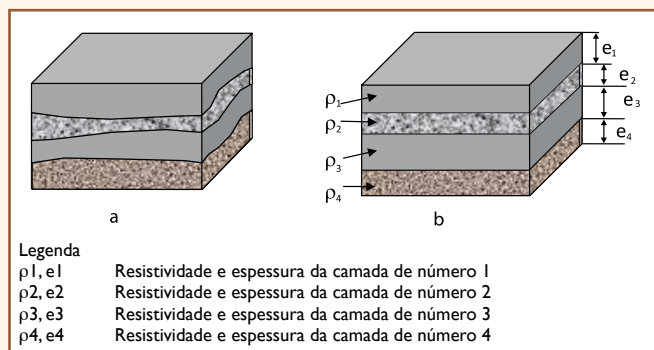


Figura 1 – Solo real (a) e solo estratificado (b).

São apresentados também os seguintes métodos de medição:

- Amostragem física do solo
- Método da variação de profundidade
- Método dos dois pontos
- Método dos quatro eletrodos, com os seguintes arranjos:
 - o Arranjo do eletrodo central
 - o Arranjo de Lee
 - o Arranjo de Wenner
 - o Arranjo Schlumberger – Palmer

AMOSTRAGEM FÍSICA DO SOLO

Este método é utilizado geralmente como um critério comparativo com os resultados obtidos em campo pelo método

dos quatro pontos. Neste método são levantadas, em laboratório, as curvas de resistividade em função da quantidade de água adicionada ao solo e também da capacidade que o solo tem de retê-la. Desta forma, o perfil do comportamento da variação da resistividade com o teor de água para um determinado solo mostra os valores mínimos de resistividade (solo saturado com água) e o valor da resistividade com o solo totalmente seco. Com a determinação da capacidade de retenção de água pela análise de penetração da água no solo pelo efeito de capilaridade, pode-se estimar a umidade que o solo terá na maior parte do tempo. Assim, o valor da resistividade nessa porcentagem de umidade apresenta um valor representativo da resistividade do solo.

Método da variação de profundidade

Este método consiste em ensaios de medição de resistência de terra executados para várias profundidades (L) do eletrodo de ensaio de diâmetro (d). Por este motivo também é conhecido como “método de três eletrodos”.

A resistência de aterramento de uma haste enterrada em um solo uniforme, para fins práticos, é dada pela fórmula:

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot L} \left\{ \ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1 \right\}$$

É possível se estimar o valor da resistividade aparente em função do valor da resistência média e dos valores do comprimento (L) da haste. Assim, quando colocado graficamente em função de L , fornece uma ajuda visual para a determinação da variação da resistividade do solo com a profundidade.

Método dos dois pontos

Este método também apresenta valores aproximados servindo para avaliar a ordem de grandeza da resistividade de pequenos volumes de solo.

Neste método, dois eletrodos iguais são cravados em uma mesma profundidade, afastados a uma distância adequada (maior ou igual a $5 \times L$). Os eletrodos são interligados por um cabo isolado eletricamente e mede-se a resistência em série destes eletrodos com um terrômetro tipo alicate, com a pinça enlaçando o cabo de interligação.

A resistência medida para os dois eletrodos R_m é duas vezes a de cada eletrodo, R_{1e} :

$$R_m = 2 \cdot R_{1e} = 2 \cdot \frac{\rho_{2e}}{2\pi L} \cdot \ln\left(\frac{2L}{r}\right) = \frac{\rho_{2e}}{\pi L} \cdot \ln\left(\frac{2L}{r}\right)$$

Daí, a resistividade média do solo entre os eletrodos será:

$$\rho_{2e} = \frac{R_m \pi L}{\ln\left(\frac{2L}{r}\right)}$$

Em que:

" ρ_{2e} " é a resistividade média vista pelos dois eletrodos em ($\Omega \cdot m$); " R_m " é a resistência medida em (Ω); " L " é a profundidade de cravação (m); e " r " é o raio do eletrodo (m).

Método dos quatro eletrodos

Este é o método mais utilizado para a medição da resistividade média de grandes volumes de terra.

De uma forma geral, pequenos eletrodos são cravados no solo a pequenas profundidades, alinhados e espaçados em intervalos não necessariamente iguais. A corrente de ensaio I é injetada entre os eletrodos externos e a diferença de potencial V é medida entre os eletrodos internos utilizando um voltímetro de alta impedância ou um potenciômetro. A resistividade é dada pela fórmula:

$$\rho_1 = \frac{2\pi}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_3} - \frac{1}{(d_1 + d_2)} - \frac{1}{(d_2 + d_3)}} \cdot \left(\frac{V}{I}\right)$$

A Figura 2 a seguir apresenta um esquema da medição por este método:

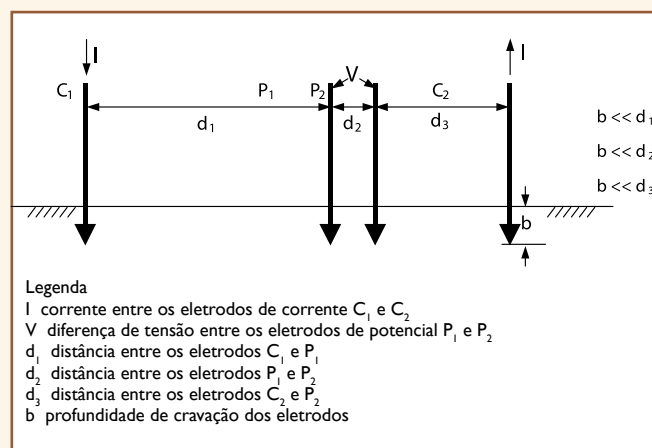


Figura 2 – Método dos quatro eletrodos (geral).

Vários arranjos podem ser utilizados neste método:

O arranjo do eletrodo central é recomendado para prospecção a grandes profundidades ou em locais em que a resistividade é alta.

Neste arranjo, o eletrodo C_2 é fixado no centro da área a ser medida, variando-se a posição de C_1 , P_1 e P_2 , e obedecendo-se a condição: d_3 muito maior que d_1 e d_2 , conforme a Figura 3. A resistividade para uma profundidade H (dada pela média aritmética das distâncias d_1 , d_2 e d_3) é obtida (admitindo-se erro de 1%) pelas fórmulas:

$$H = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3}$$

Em que:

$$\rho_{(H)} = \frac{2\pi \cdot d_1 \cdot (d_1 + d_2)}{d_2} \times \frac{V}{I}$$

Em particular, se $d_1 =$

d_2 :

$$\rho = 4 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot \frac{V}{I}$$

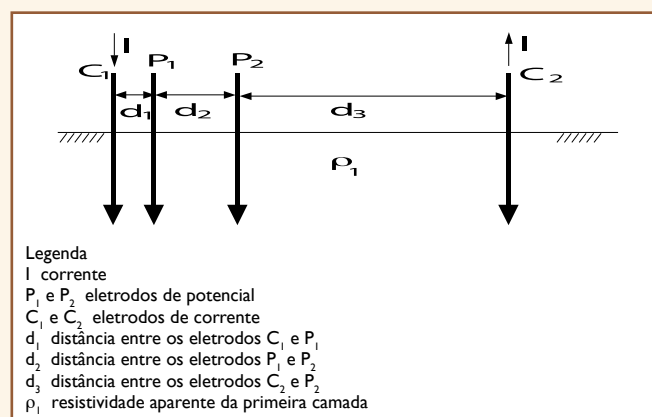


Figura 3 – Arranjo do eletrodo central.

O arranjo de Lee requer duas medidas por espaçamento e permite detectar variações nas espessuras das camadas do solo. Este arranjo utiliza 5 hastes (ver Figuras 4, 5 e 6).

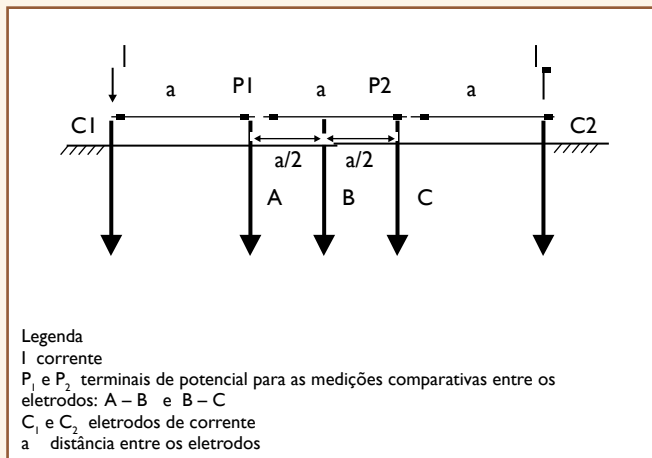


Figura 4 – Arranjo de Lee (ou das 5 hastes).

$$1^{\text{a}} \text{ medição: } \rho_{1a} = 4\pi a \cdot V_{AB}/I; \quad 2^{\text{a}} \text{ medição: } \rho_{2a} = 4\pi a \cdot V_{BC}/I$$

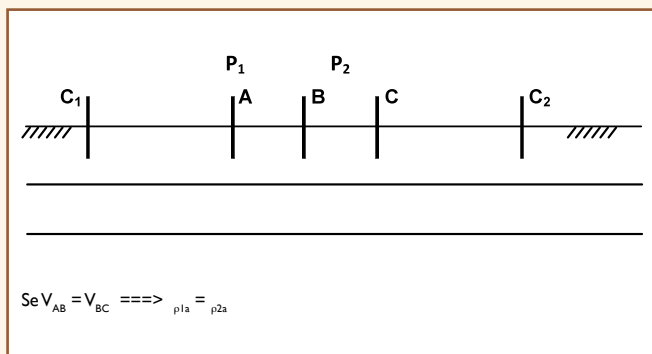


Figura 5 – Solo com camadas sem variação de espessura.

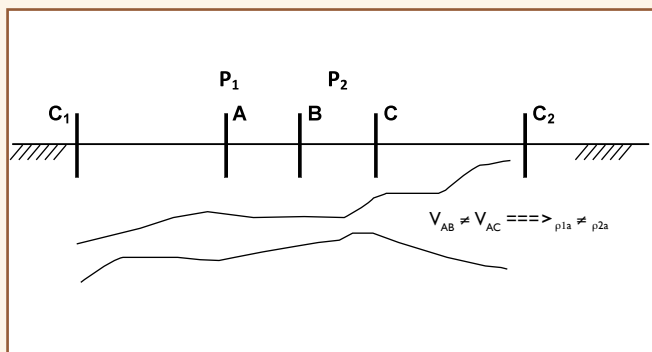


Figura 6 – Solo com camadas de espessuras variáveis.

O arranjo dos quatro pontos igualmente espaçados (ver Figura 7), mais conhecido como arranjo de Wenner é o mais conhecido e utilizado. Antes da revisão, a NBR 7117 tratava apenas deste método. C1 e C2 são os eletrodos de corrente. A tensão é medida entre os eletrodos P1 e P2 do arranjo. Sendo "a" a distância entre eletrodos adjacentes e "b" a profundidade de cravação destes, a resistividade em função de a e b é dada por:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \left(\frac{V}{I}\right)}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

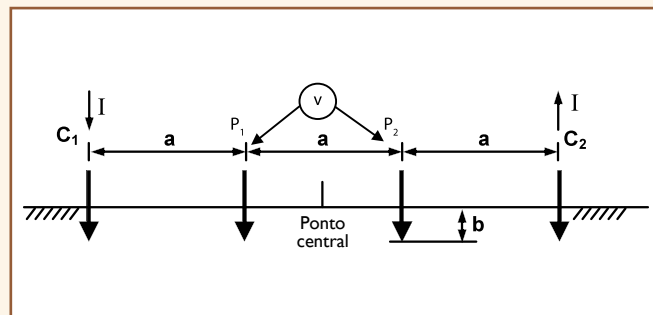


Figura 7 – Arranjo de Wenner.

Na prática, são usados quatro eletrodos localizados em uma linha reta em intervalos 'a', enterrados a uma profundidade que não exceda a 10% de "a". Quando $b \leq a/10$, a equação pode ser simplificada pela fórmula:

$$\rho_{(a)} = 2\pi \cdot a \cdot (V/I)$$

Devem ser realizadas diversas medições com vários espaçamentos entre eletrodos para a obtenção da variação da resistividade com a profundidade.

O arranjo de Schlumberger é uma configuração do arranjo de 4 pontos em que o espaçamento central é mantido fixo (geralmente a uma distância de 1 metro), enquanto os outros espaçamentos variam de forma uniforme. A Figura 8 é um esquema deste arranjo.

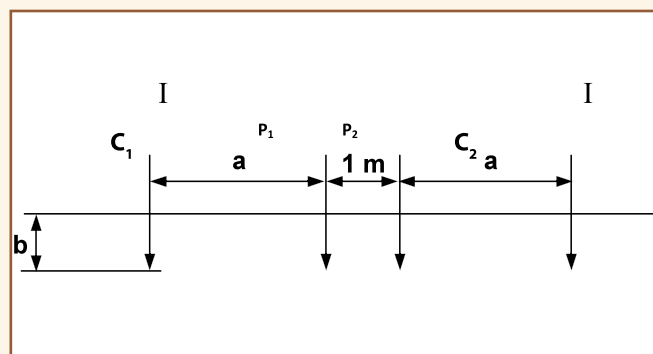


Figura 8 – Arranjo de Schlumberger.

As curvas padrão para arranjo de Schlumberger em duas camadas são obtidas pela fórmula:

$$\rho_{as}(u, v) = \rho_1 \cdot \left(\frac{u^2 - v^2}{2 \cdot v^2} \right) \cdot \int_0^\infty K(x) \cdot (J_0(xu - xv) - J_0(xu + xv)) dx$$

Em que:

ρ_{as} = Resistividade do arranjo de Schlumberger

u = metade do afastamento das hastes de potencial = $(1,0) / 2$

v = metade do afastamento das hastes de corrente = $(a + 1,0 + a) / 2$

$K(x)$ = função kernel das camadas

$J_0(y)$ = função de Bessel de primeira classe de ordem zero

O arranjo de Schlumberger – Palmer é utilizado para medição

de resistividade com grandes espaçamentos, geralmente em terrenos de alta resistividade, da ordem de 3.000 ohm.m ou maior. A Figura 9 apresenta este arranjo em que os eletrodos de potencial são situados muito próximos aos eletrodos de corrente correspondentes para melhorar a resolução da medida da tensão.

Se a profundidade b do eletrodo é pequena comparada com as separações d e c , então a resistividade medida pode ser calculada pela seguinte fórmula:

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

JOBSON MODENA é engenheiro eletricista, membro do Comitê Brasileiro de Eletricidade (Cobei), CB-3 da ABNT, em que participa atualmente como coordenador da comissão revisora da norma de proteção contra descargas atmosféricas (ABNT NBR 5419). É diretor da Guismo Engenharia.

HÉLIO SUETA é engenheiro eletricista, mestre e doutor em Engenharia Elétrica, diretor da divisão de potência do IEE-USP e secretário da comissão de estudos que revisa a ABNT NBR 5419:2005.

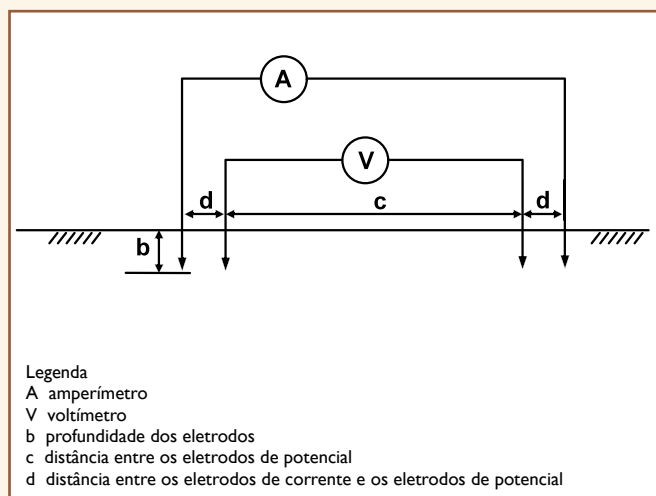


Figura 9 – Arranjo Schlumberger – Palmer.

Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br