

UNIDADE III

"MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA E RESISTIVIDADE DO SOLO"

1. INTRODUÇÃO

A realização de uma instalação de aterramento requer conhecer previamente o perfil da resistividade do terreno conforme a profundidade. Desta forma, facilita a escolha da configuração do aterramento que proporciona melhores resultados técnico-econômicos.

Por outro lado, devem ser realizadas medições para conhecer a resistividade do terreno; no entanto, em instalações de baixa potência pode-se estimar a resistividade por meio das tabelas de resistividades típicas, (tabela 2.2 e 2.3) do capítulo 2, nas quais constam alguns valores referenciais.

Um dos parâmetros mais importantes que caracteriza um aterramento é o valor da sua resistência. Define-se como o cociente entre o potencial adquirido por ela e a corrente conduzida à terra.

$$R = \frac{U}{I_f}$$

Devido a que existem diferentes espessuras dos estratos e com resistividades diferentes cada um, a fim de obter um valor baixo de resistência, é necessário selecionar o tamanho e a forma dos eletrodos (como barras ou malhas) a enterrar, já que disso dependerá a resistência.

2. COMPORTAMENTO DO ATERRAMENTO

A instalação de um sistema de aterramento deve assegurar:

- Um valor requerido de impedância.
- Que as tensões de passagem e contato não sejam perigosas.

Os fatores que incidem na impedância são:

- As dimensões físicas e atributos do sistema de eletrodos de terra.
- As condições do solo (composição, conteúdo de água, etc.).

O sistema de eletrodos metálicos apresenta uma impedância ao fluxo de corrente que consiste de três partes principais: a resistência do material do eletrodo, a resistência de contato entre o eletrodo e o terreno e, finalmente, uma resistência de contato volumétrica dependem das características do terreno. Esta última normalmente é a mais significativa e é necessária a sua medição.

3. FINALIDADE DA MEDIÇÃO

A medição da resistência tem as seguintes finalidades:

- Obter a resistência de cada estrato ou camada.
- Encontrar a profundidade dos estratos ou camadas.
- Localização ótima das instalações de aterramento.

4. SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Antes de realizar uma medição de resistividade é necessário selecionar adequadamente o equipamento a utilizar e para tanto é necessário saber quais são os componentes do instrumento, ou seja, a fonte de potência, o sistema de medida, os requisitos mínimos que deve cumprir e a que tipo de ensaio deve ser submetido este equipamento.

Existem tradicionalmente equipamentos analógicos e digitais, equipamentos que trabalham à manivela e à bateria.

Na atualidade, os equipamentos modernos devem cumprir os seguintes requisitos:

- a) Compactos e de fácil deslocamento
- b) Interface para PC, armazenamento de informação e controle por microprocessador
- c) Opção para medição multipolo (2, 3, 4)
- d) Facilidade de uso de pinças e sem estacas (hastes auxiliares)
- e) Ao usar transdutores de medição devem ser de similar classe de precisão
- f) Devem ter certificações dos seguintes ensaios tipo: ensaio de isolamento, ensaio de compatibilidade eletromagnética, ensaios climáticos, ensaios mecânicos, ensaio de classe de precisão.

ENSAIOS TIPO

Os equipamentos de medição para seu funcionamento adequado, em qualquer condição e para apresentar uma leitura confiável, devem cumprir com ensaios tipo e devem ter certificações dos mesmos. A seguir indicam-se algumas referências aos diferentes ensaios tipo:

REFERÊNCIAS PARA AS CERTIFICAÇÕES DOS ENSAIOS TIPO

- Isolação: IEC 61000 – 4 – 2, IEC 61010 – 1
- Compatibilidade eletromagnética: IEC 61000 – 4 – 2, IEC 61326 – 1
- Climáticos: DIN 40040
- Mecânicos: IEC 529, DIN 40050
- Fabricação: DIN ISO 9001
- Conforme as normas de cada país.

5. CONSIDERAÇÕES PARA A MEDIÇÃO

É necessário conhecer as precauções que se devem ter presentes antes de realizar uma medição e também em quais casos não é recomendável realizar uma medição.

5.1 PRECAUÇÕES PARA A MEDIÇÃO

Recomenda-se realizar as medições em épocas apropriadas. Por exemplo, na serra, na estiagem e na costa, no verão.

- a) Os eletrodos de exploração devem ter um bom contato com o terreno.
- b) Se o terreno for deslizável, remover o material solto até encontrar terra firme.
- c) Se o solo tem camada grossa de areia, colocar água no ponto de cravamento dos eletrodos.
- d) Verificar o ponto de contato da borneira dos instrumentos e a tomada dos eletrodos.
- e) Verificar os condutores gastos para evitar pontos de degradação do isolamento.
- f) Verificar a presença de correntes induzidas.

5.2 CASOS NÃO RECOMENDÁVEIS PARA AS MEDIÇÕES

As recomendações que se devem levar em conta para não realizar medições são as seguintes:

- a) Depois de uma chuva.
- b) Durante alta umidade ambiental.
- c) Quando há condutores descascados e não se obtém um bom contato não conectado.
- d) Durante horas de tormenta.
- e) Durante a execução de trabalhos de manutenção sobre a infraestrutura nas proximidades.

6. MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Atualmente, existem diferentes métodos de medição tanto para a resistividade quanto para a resistência.

6.1 MÉTODOS DE MEDIDA DA RESISTIVIDADE

Para uma análise real do terreno é fundamental realizar a medição da resistividade do terreno. Os métodos de medição podem ser classificados pelo número de eletrodos utilizados:

- Método de três eletrodos.
- Método de quatro eletrodos.
- Configuração de Wenner.
- Configuração de Schlumberger.

6.1.1 MÉTODO DOS TRÊS ELETRODOS

Basicamente consiste primeiro em medir a resistência de aterramento de um eletrodo de dimensões conhecidas, enterrado em um terreno cuja resistividade se deseja conhecer.

Previamente realiza-se o cravamento do eletrodo (Figura 3.1):

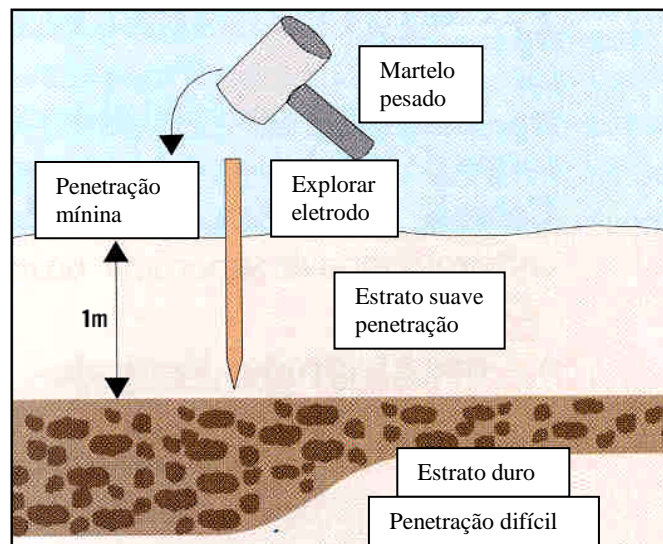


Figura 3.1 Cravamento do eletrodo explorador

Para realizar a medida da resistência de dispersão (R) do eletrodo (por exemplo com $L = 1,2$ m; $d = 0,013$ m) pelo método de queda de potencial (Figura 3.2) serão realizadas duas medições de resistência " R ", do eletrodo explorador C1 até dois desdobramentos de eletrodos P2 e C2, cravados em solo firme (somente em terrenos homogêneos) a

0,15 m de profundidade, ambos em linha reta radial, com a qual é calculada finalmente a resistividade:

$$\rho = 1,10 R$$

Sendo:

$$R = \frac{U}{I}$$

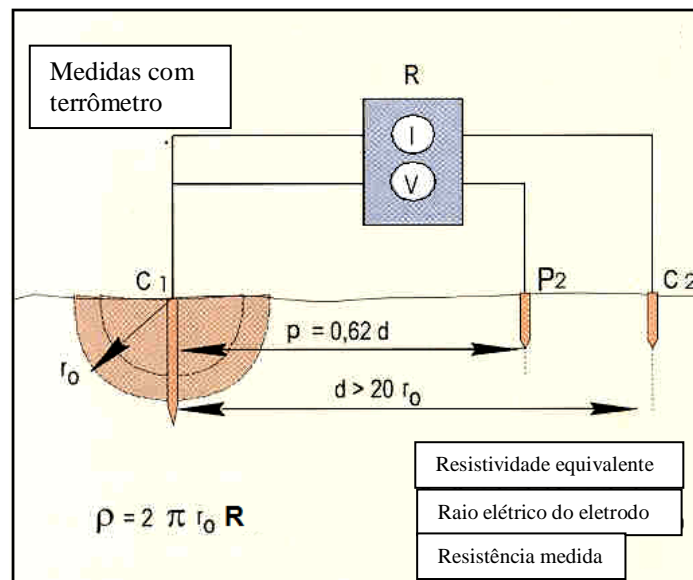


Figura 3.2 Método de três eletrodos para a medição de resistividade

6.1.2 MÉTODO DOS QUATRO ELETRODOS

O princípio deste método baseia-se na medição da diferença de potencial entre dois dos eletrodos, após ter injetado no terreno uma corrente através dos outros dois. A corrente injetada pode ser corrente contínua ou corrente alternada de baixa frequência (menores de 200 Hz), por razões de acoplamento entre os condutores.

A equação fundamental para a medição de resistividade mediante quatro eletrodos, levando em conta a (Figura 3.3), é:

$$\rho = \frac{2\pi U}{I} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)}$$

Onde:

U: Diferença de potencial entre dois eletrodos.

I: Corrente injetada.

r_1, r_2, r_3, r_4 : Distância entre os eletrodos de acordo com a figura 3.3

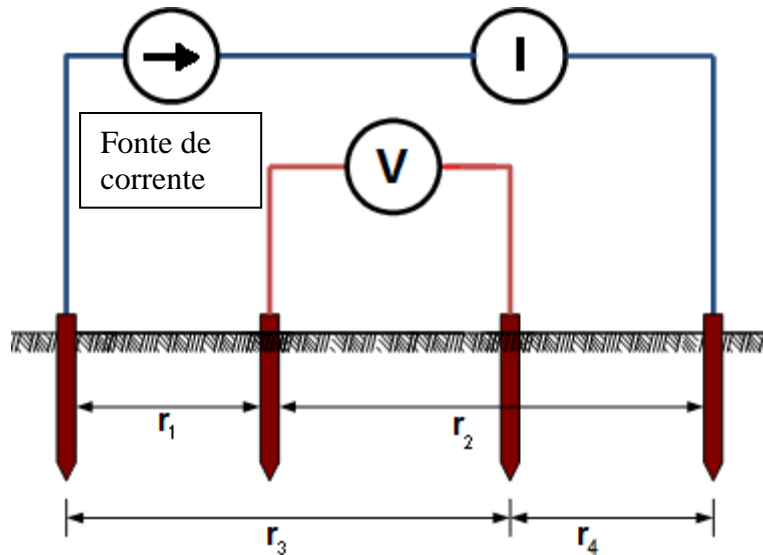


Figura 3.3 Medição da resistividade pelo método dos quatro eletrodos

Se o terreno considerado for homogêneo, o valor da resistividade medida por este método corresponderá ao valor único de resistividade presente no terreno; mas se não for homogêneo, então o valor obtido será fictício, chamando-se resistividade aparente e designa-se por ρ_a .

6.1.3 CONFIGURAÇÃO DE WENNER

Para esta configuração, os quatro eletrodos colocam-se em linha reta, com igual afastamento e profundidade de penetração no terreno (Figura 3.4). O método de medição baseia-se na equação desenvolvida pelo Dr. Frank Wenner, onde os eletrodos 1 e 4 (externos) utilizam-se para injetar a corrente e os eletrodos 2 e 3 (centrais) servem para medir a diferença de potencial, que, ao ser dividida pela corrente injetada, dá um valor de resistência R.

A resistividade é determinada mediante a seguinte equação:

$$\rho = \frac{4 \pi a R}{\left[1 + \frac{2a}{(a^2 + 4b^2)^{0.5}} \right] - \frac{2a}{(4a^2 + 4b^2)^{0.5}}}$$

Onde:

ρ : Resistividade aparente do terreno ($\Omega - m$)

R: Resistência medida (Ω)

a: Distância entre eletrodos (m)

b: Profundidade de penetração dos eletrodos (m)

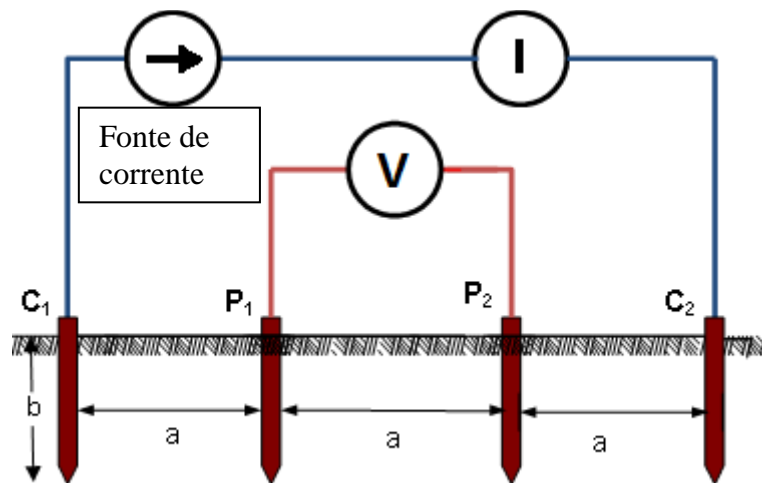


Figura 3.4 Configuração de Wenner

Se a distância enterrada (b) for pequena comparada à de separação entre eletrodos (a), ou seja $a > 20 \cdot b$, a seguinte fórmula simplificada pode ser aplicada:

$$\rho = 2 \pi a R$$

A resistividade obtida como resultado das equações representa a resistividade média de um hemisfério de terreno de um raio igual ao afastamento dos eletrodos.

Como exemplo, se a distância entre eletrodos (a) for de 3 metros, (b) for 0.15 m e a leitura do instrumento for de 0.43 ohms, a resistividade média do terreno é de 8.141 ohm-m conforme a fórmula completa e de 8.105 ohms-m, conforme a fórmula simplificada.

Na figura 3.5 também se pode observar o método da configuração de Wenner utilizando um instrumento específico.

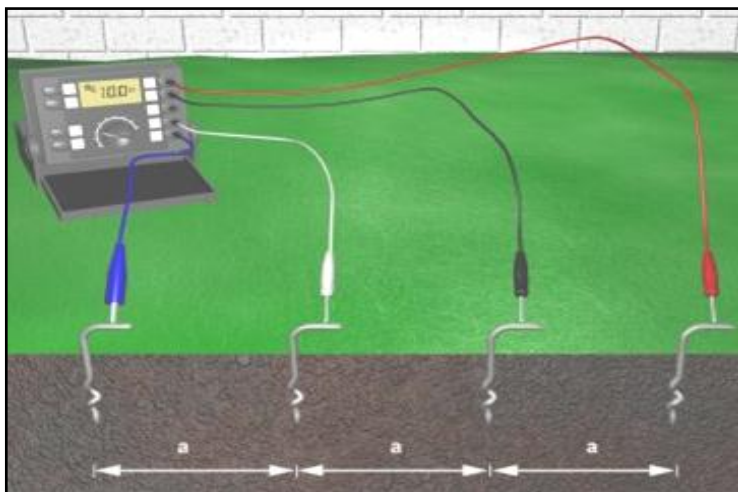


Figura 3.5 Configuração de Wenner

6.1.4 CONFIGURAÇÃO DE SCHLUMBERGER

Para esta configuração, os quatro eletrodos colocam-se também em linha reta, mantendo o afastamento entre eletrodos centrais ou de potencial P_1 e P_2 constante (a), enquanto que os eletrodos exteriores C_1 e C_2 variam seu afastamento a partir dos eletrodos interiores, a distâncias múltiplas (na) do afastamento base dos eletrodos centrais, conforme mostra a Figura 3.6. A equação fundamental para este caso é:

$$\rho = \pi R(n+1) na$$

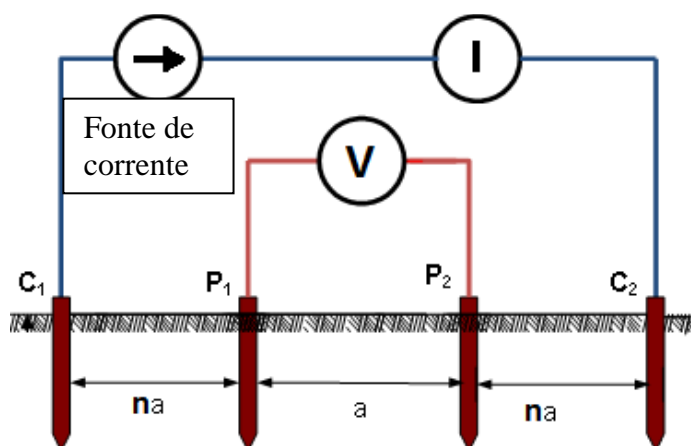


Figura 3.6 Configuração de Schlumberger

O método de Schlumberger é de grande utilidade quando é necessário conhecer as resistividades de camadas mais profundas, sem necessidade de realizar muitas medições como com o método Wenner. Utiliza-se também quando os aparelhos de medição são pouco sofisticados. Somente recomenda-se fazer medições a 90 graus para que não sejam afetadas as leituras por estruturas subterrâneas.

6.2 MÉTODOS DE MEDIDA DA RESISTÊNCIA

Os métodos de medição da resistência em aterramentos podem ser classificados em:

a) PELO TIPO DE FONTE:

- Método volt – amperimétrico.
- Uso do terrômetro.

b) PELO NÚMERO DE ELETRODOS UTILIZADOS:

- Método de dois eletrodos.
- Método de três eletrodos.

6.2.1 MÉTODO VOLT- AMPERIMÉTRICO

Basicamente consiste em medir a resistência de aterramento de um eletrodo de dimensões conhecidas. Injeta-se tensão alternada entre os terminais do eletrodo de aterramento e o eletrodo auxiliar de corrente (Figura 3.7). Com um amperímetro bastante sensível (mA), mede-se a corrente localizando-o entre a saída da fonte de tensão e o eletrodo de corrente. Depois mede-se a tensão colocando um voltímetro sensível (mV) entre o eletrodo de aterramento e o eletrodo de potencial.

A divisão entre a leitura do voltímetro e a leitura do amperímetro nos dá a resistência de aterramento; é preciso indicar que no caso de que seja utilizado um instrumento específico, a leitura da resistência será direta em ohms.

A validade deste método será mais segura se for utilizado um transformador de isolamento entre a fonte de tensão e o circuito de medição.

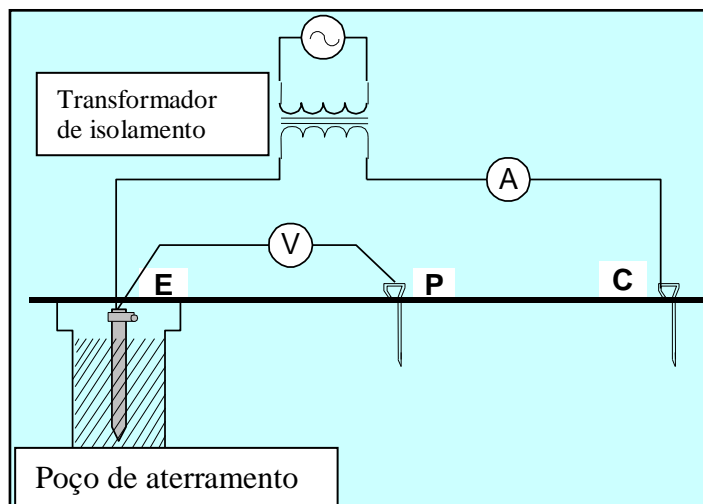


Figura 3.7 Método volt – amperimétrico

Na figura 3.8 considera-se o solo como se tivesse resistividade uniforme (ρ) e aplica-se o princípio de “Queda de Potencial”, com um circuito de corrente (C_1 , C_2) e um circuito de potencial (C_1 , P_2) definindo-se três pontos essenciais:

- C1: Eletrodo de aterramento.
- P2: Eletrodo de potencial.
- C2: Eletrodo de referência.

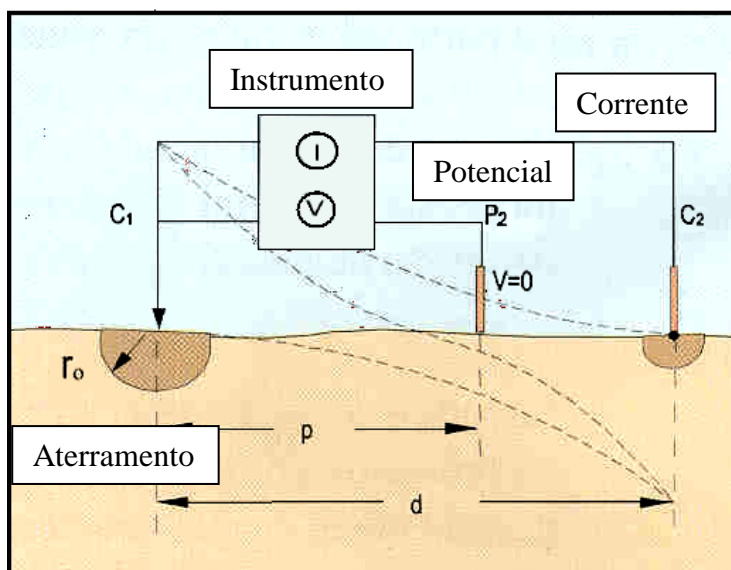


Figura 3.8 Princípio de queda de potencial

Para medir o aterramento com eletrodo vertical, considera-se:

$$d \geq 20 r_o$$

$$r_o = 1,10 \text{ m. (raio equivalente)}$$

$$p = 0,618 d$$

Então devem ser realizadas as medições às seguintes distâncias:

$$C1 \ C2 = d = 20 \times 1,1 \text{ m} = 22 \text{ m}$$

$$C1 \ P2 = p = 0,618 \times 22 \text{ m} = 13,5 \text{ m}$$

6.2.2 USO DO TERRÔMETRO

Quando forem utilizados instrumentos específicos como o terrômetro deve-se realizar a conexão respectiva como mostrado na figura 3.9; neste caso, proceder-se-á à medição da seguinte forma:

- Desconecta-se o circuito de terra.
- Conecta-se o borne E do aparelho ao eletrodo de aterramento e os eletrodos de corrente C e potencial P.
- Verifica-se o estado da bateria.
- Verifica-se a tensão de injeção que fornece o equipamento ao circuito.
- Coloca-se o seletor em medição de resistência e pressiona-se o pulsador para logo estabilizar a tensão de injeção com ajuda do dial de resistências e, desta forma, obtém-se diretamente o valor de R em ohms.

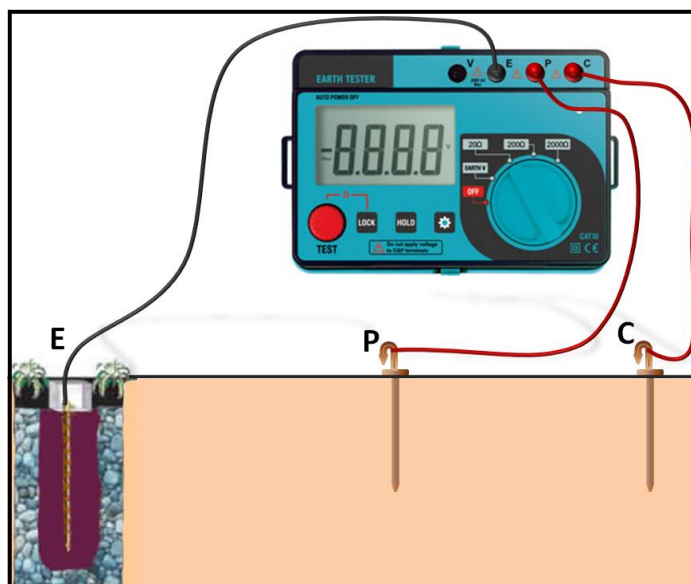


Figura 3.9 Medição de resistência do terreno

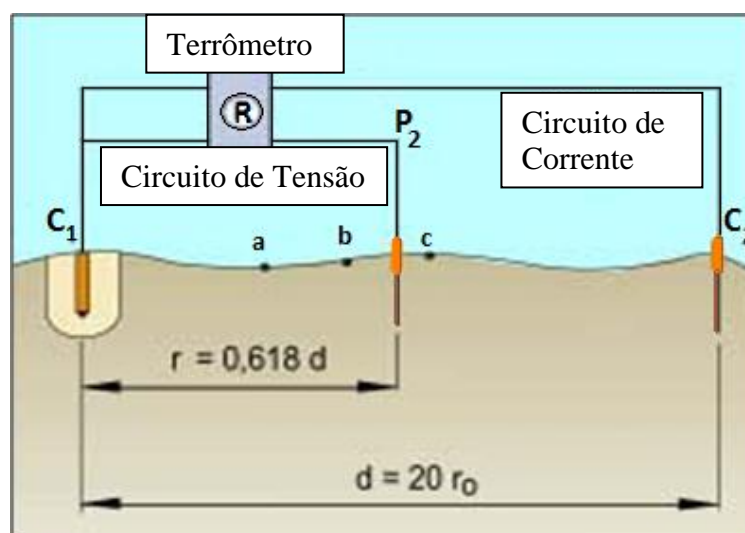


Figura 3.10 Dimensões para a medida de resistência do terreno

6.3 MÉTODO DOS DOIS ELETRODOS

Este método é uma simplificação do método de três eletrodos e usa-se quando a resistência da tubulação (metálica) de água é insignificante comparada com a resistência a ser medida.

A distância entre E e a tubulação deverá ser superior a 5 metros, como observa-se na Figura 3.11.

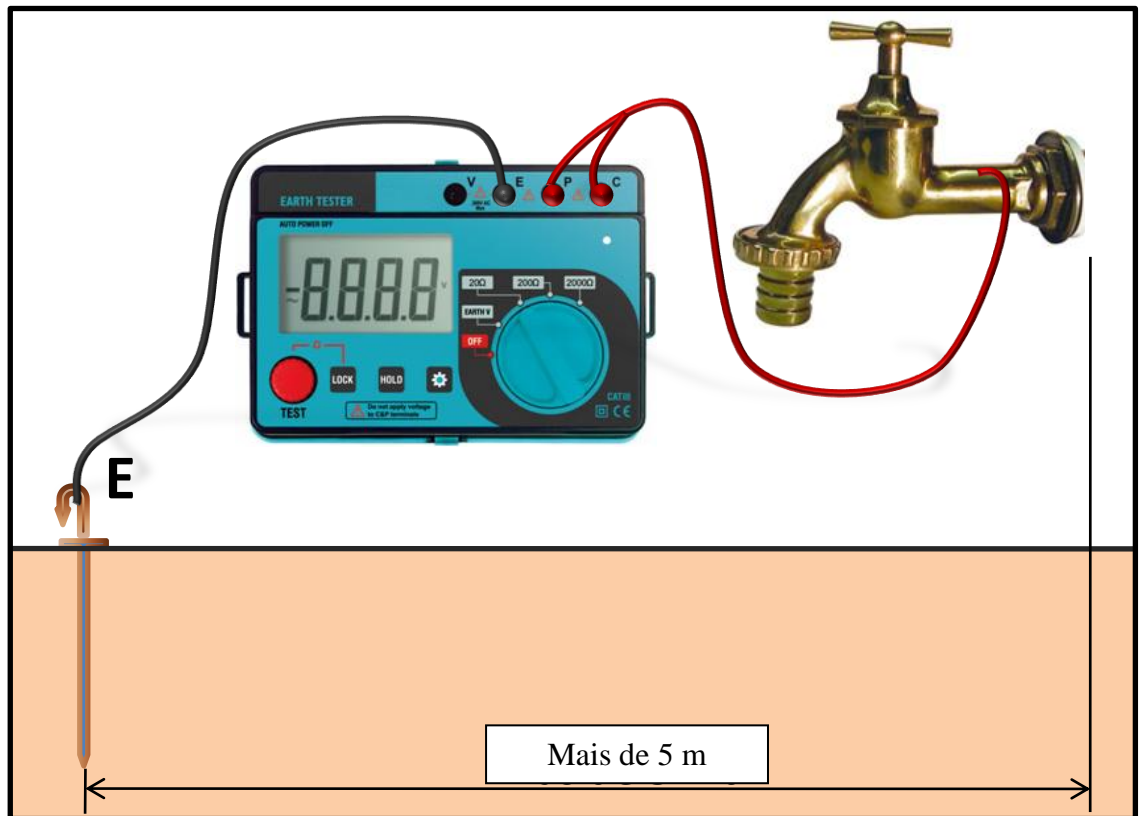


Figura 3.11 Medição de aterramento com dois eletrodos

Na Figura 3.12 pode-se ver o método de dois eletrodos utilizando um instrumento digital.

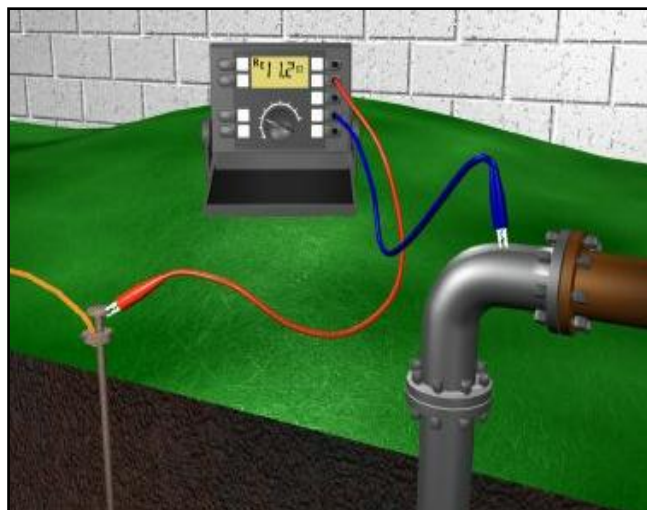


Figura 3.12 Medição de aterramento com dois eletrodos com instrumento digital

7. INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

7.1 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE

Durante a realização da medida de resistividade com os métodos mencionados, pode-se desenhar uma curva de resistividade versus separação de eletrodos.

Esta curva proporcionará informação com relação à estrutura geral do terreno na localidade, identificando leituras estranhas e ajudando a decidir quantas medidas são necessárias. Se há grandes flutuações nos valores medidos, é provável que as condições do solo sejam variáveis, devido a que a terra foi compactada ou existem tubulações enterradas na área. Em tais casos, as medidas devem ser tomadas em algumas direções transversais através do local. Algumas destas transversais devem ser em ângulo reto com relação às outras, para permitir a identificação de interferências de cabos elétricos próximos.

Na figura 3.13 mostra-se um exemplo de curva de resistividade de um terreno para um solo relativamente uniforme.

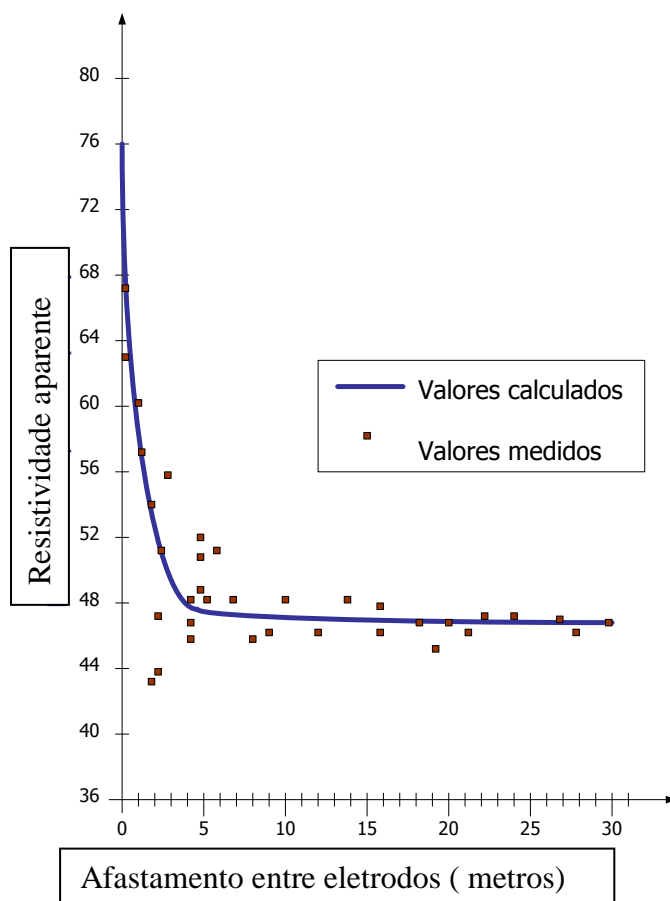


Figura 3.13 Resistividade aparente do solo calculada em função do afastamento das estacas de prova

Para interpretar os resultados é necessário ter conhecimento sobre a estrutura do solo, ou seja, se é homogêneo ou tem várias camadas.

ESTRUTURA EQUIVALENTE DO SOLO

Na maioria dos casos, os terrenos apresentam características de não homogeneidade, fenômeno que pode ser verificado através da interpretação das medições de resistividade, as quais permitirão determinar a representação do solo como um modelo homogêneo ou um modelo estratificado.

a) SOLO HOMOGÊNEO

O valor da resistividade aparente medida para qualquer afastamento entre os eletrodos será mantido constante e coincide com o valor da resistividade do solo.

b) SOLO ESTRATIFICADO DE DUAS CAMADAS

Ao aplicar um método de medição de resistividade pode-se obter esta classe de solo, onde o modelo apresenta dois tipos possíveis de combinações (Figura 3.14a e b), cujas características principais são:

- Tendência assintótica no começo e no final da curva.
- Um único ponto de inflexão no gráfico de toda a curva.

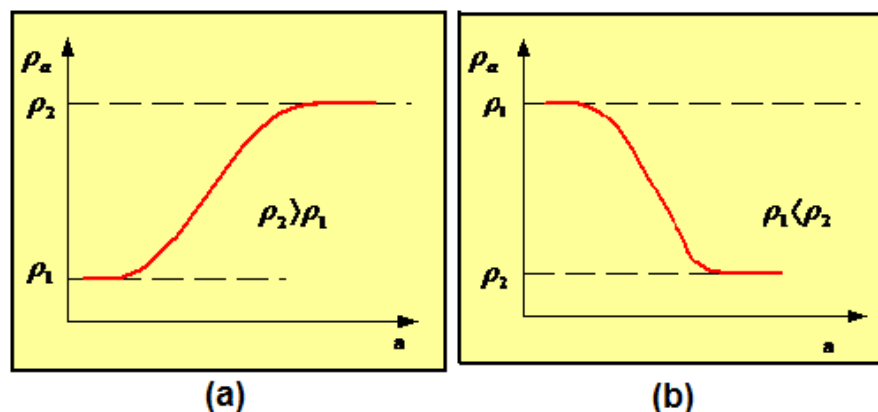


Figura 3.14 Solo estratificado de duas camadas

c) SOLO ESTRATIFICADO DE TRÊS CAMADAS

No modelo de três camadas há quatro tipos possíveis de combinações (Figura 3.15a até d), onde pode-se observar que as curvas correspondentes a este modelo possuem dois pontos de inflexão.

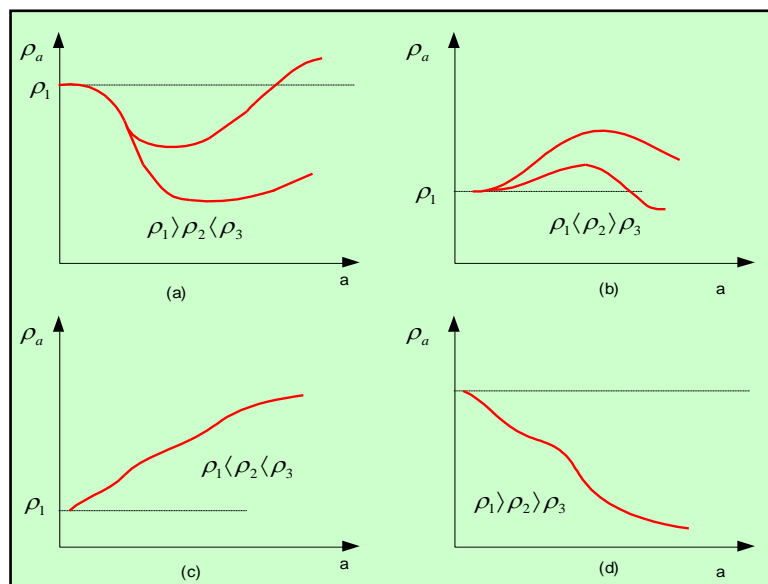


Figura 3.15 Solo estratificado de três camadas

Em geral, por geometria uma curva de n camadas pode ter $2^{(n-1)}$ tipos de combinações e até $(n - 1)$ pontos de inflexão.

7.2 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA

Mediante o método volt-amperimétrico obtém-se uma série de resultados ao deslocar os eletrodos auxiliares. Com estes resultados se obterá uma curva cujo equivalente se verá como a seguinte:

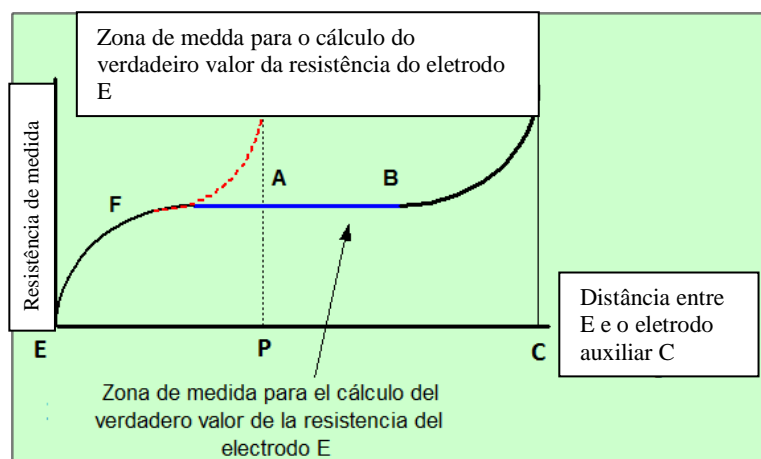


Figura 3.16 Curva para determinar a resistência de aterramento de um eletrodo

O trecho horizontal da curva nos indicará aproximadamente o valor da resistência do aterramento.