

Medição da Resistividade do Solo

1.1 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 $r \times a$, 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.

1.2 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, seccionador, 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.

1.3 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 uma 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 geolétricos, dentre os quais, o mais conhecido e utilizado é o Método de Wenner.

1.4 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 1.4.1.

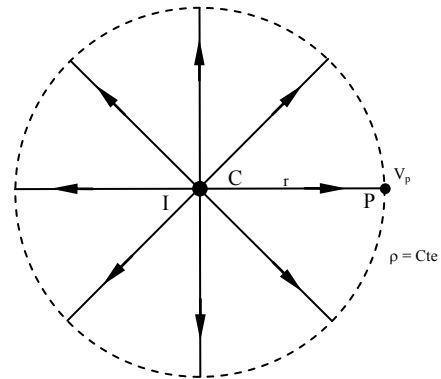


Figura 1.4.1: Linhas de Correntes Elétricas

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

$$E_p = \rho J_p \quad (1.4.1)$$

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:

$$J_p = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (1.4.2)$$

Portanto,

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

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

$$V_p = \int_r^\infty E dr \quad (1.4.3)$$

Onde:

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

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

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (1.4.4)$$

1.5 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 1.5.1.

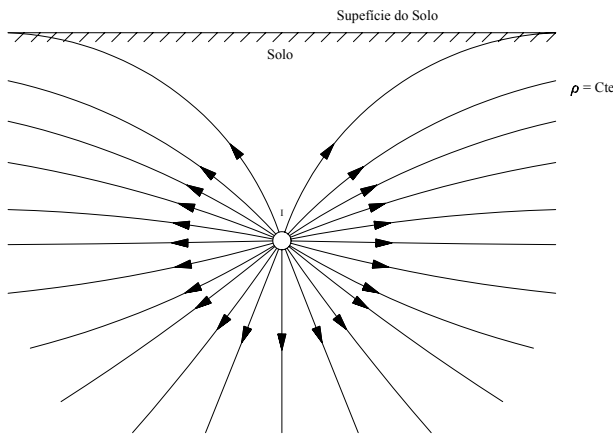


Figura 1.5.1: Linhas de Correntes Elétricas

As linhas de correntes se comportam como se houvesse uma fonte de corrente pontual simétrica em relação a superfície do solo. Figura 1.5.2.

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, o potencial do ponto p , basta usar duas vezes a expressão 1.4.4.

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

Como:

$$I' = I$$

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{1p}} + \frac{1}{r_{1'p}} \right) \quad (1.5.1)$$

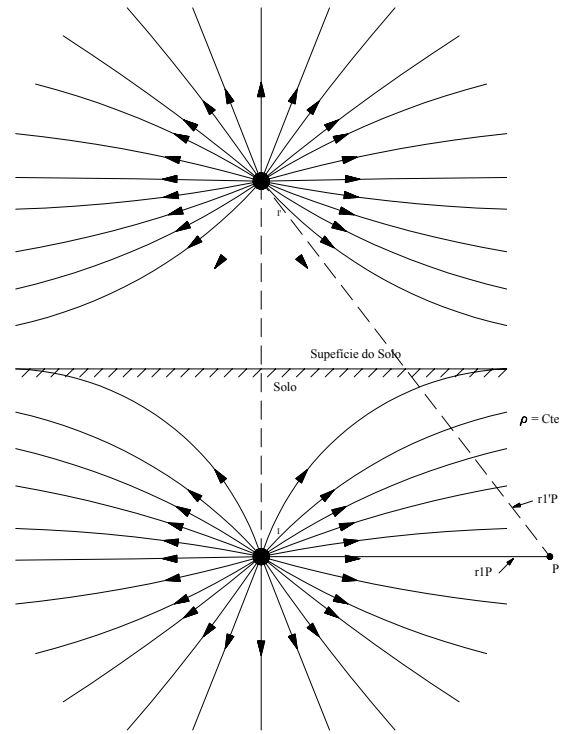


Figura 1.5.2: Ponto Imagem

2.6 Método 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 1.6.1.

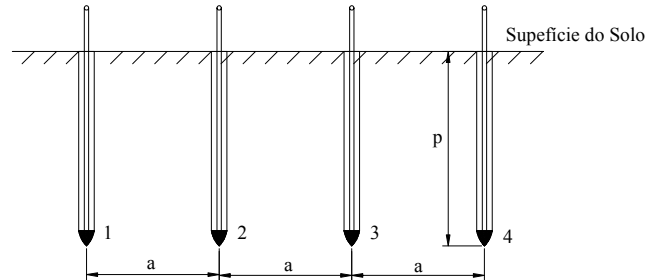


Figura 1.6.1: Quatro Hastas Cravadas no Solo

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 1.5, gera-se a figura 1.6.2 e obtém-se os potenciais nos pontos 2 e 3.

O potencial no ponto 2 é:

$$V_2 = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (1.6.1)$$

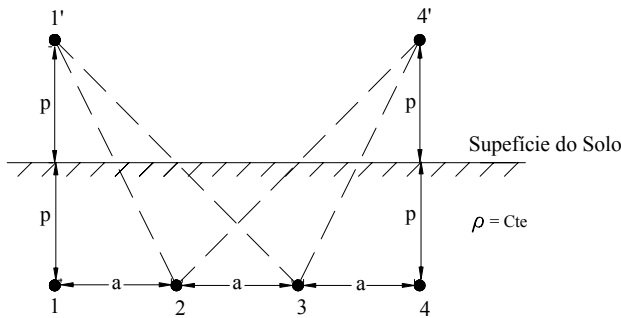


Figura 1.6.2: Imagem do Ponto 1 e 4

O potencial no ponto 3 é:

$$V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} \right) \quad (1.6.2)$$

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

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (1.6.3)$$

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:

$$R = \frac{V_{23}}{I} = \frac{\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (1.6.4)$$

A resistividade elétrica do solo é dada por:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad [\Omega.m] \quad (1.6.5)$$

A expressão 1.6.5 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, $a > 20 p$, a fórmula de Palmer 1.6.5 se reduz a:

$$\rho = 2\pi a R \quad [\Omega.m] \quad (1.6.6)$$

1.7 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 1.7.1.

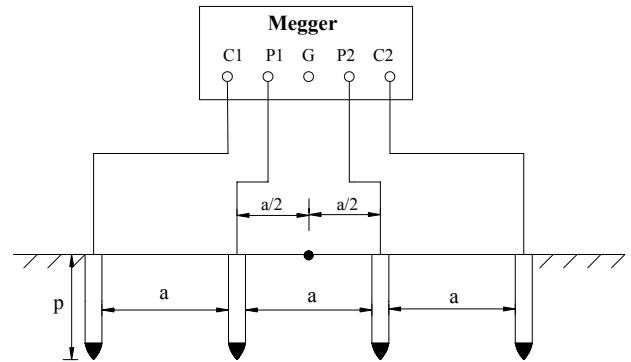


Figura 1.7.1: Método de Wenner

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 1.6.4.

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 1.7.2.

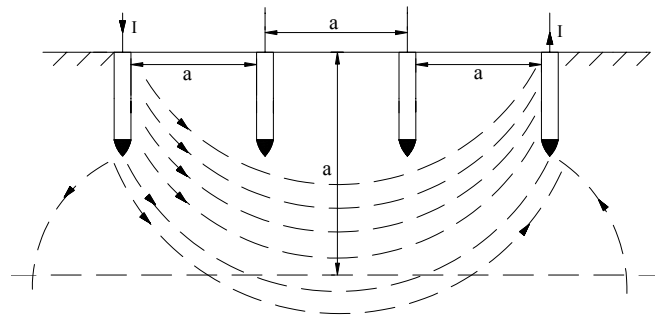


Figura 1.7.2: Penetração na profundidade “a”

A corrente que 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.

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

1.8 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 ocorrência 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.

1.9 Espaçamentos das Hastes

Para uma determinada direção devem ser usados os espaçamentos recomendados na Tabela 1.9.1.

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

Tabela 1.9.1: 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.

1.10 Direções a Serem Medidas

O número de direções em que as medidas deverão se 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 1.10.1.

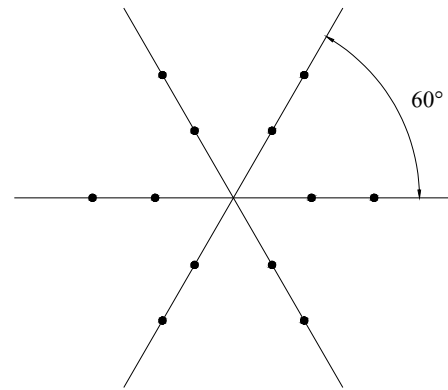


Figura 1.10.1: Direções do Ponto de Medição

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 a óleo e a SF₆, etc.

No caso de subestações deve-se efetuar varias 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.

1.11 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:

$$\rho_M(a_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i(a_j) \quad \forall \quad \begin{matrix} j=1, q \\ i=1, n \end{matrix} \quad (1.11.1)$$

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 $\rho \times a$, se necessária ao procedimento das aplicações dos métodos de estratificação do solo, assunto este, específico do capítulo seguinte.

1.12 Exemplo Geral

Para um determinado local, sob estudo, os dados das medições de campo, relativos a vários pontos e direções, são apresentados na Tabela 1.12.1.

Espaçamento a (m)	Resistividade Elétrica Medida ($\Omega.m$)				
	1	2	3	4	5
2	340	315	370	295	350
4	520	480	900	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	412

Tabela 1.12.1 : Medição em Campo

A seguir, apresenta-se a Tabela 1.12.2 com o valor médio de cada espaçamento e o desvio relativo de cada medida, calculados a partir da Tabela 1.12.1.

Espaçam. a (m)	Desvios Relativos (%)					ρ . média ($\Omega.m$)	ρ média re calculada ($\Omega.m$)
	1	2	3	4	5		
2	1,7	5,6	10,77	11,67	4,79	334	334
4	11,56	18,36	53,06	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	0,7	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	57,25	262	224,5

Tabela 1.12.2 : Determinação de Média e Desvios Relativos

Observando-se a Tabela 1.12.2, consta-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 1.12.2.

Os valores representativos do solo medido são os indicados na Tabela 1.12.3.

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

Tabela 1.12.3 : Resistividade do Solo Medido

Estratificação do Solo

2.1 Introdução

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 2.1.1 mostra o solo com uma estratificação em camadas horizontais.

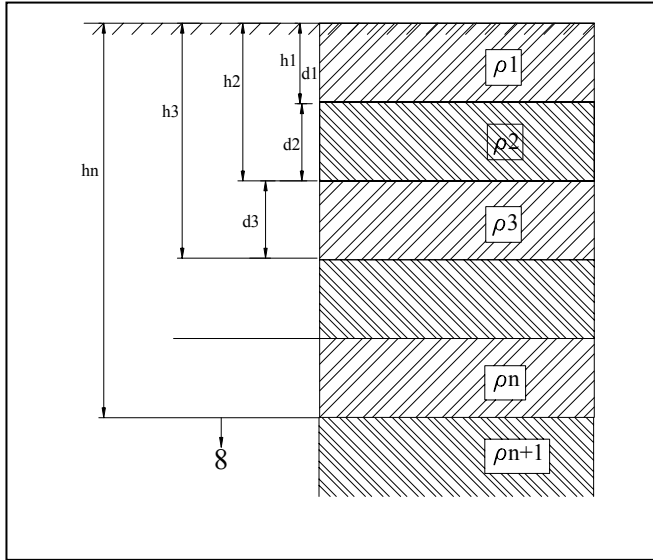


Figura 2.1.1 : Solo Estratificado

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

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

Apresenta-se também, outros métodos complementares.

2.2 Modelagem de 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 no ponto A , no solo de duas camadas da figura 2.2.1, gera potenciais na primeira camada, que deve satisfazer a equação 2.2.1, conhecida como **Equação de Laplace**.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.2.1)$$

V = Potencial na primeira camada do solo

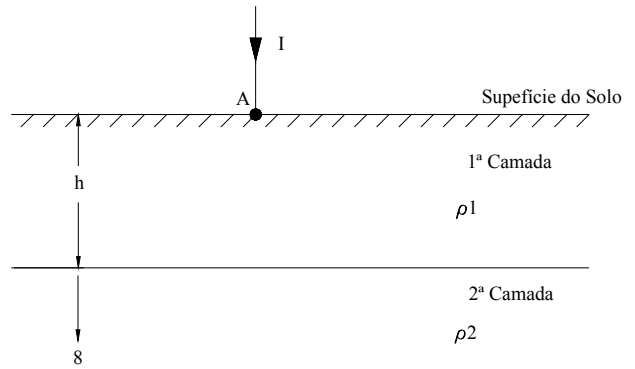


Figura 2.2.1 : Solo em Duas Camadas

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

$$V_p = \frac{I \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (2.2.2)$$

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:

ρ_2 = Resistividade da segunda camada

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\rho_2 - 1}{\rho_2 + 1} \quad (2.2.3)$$

Pela expressão 2.2.3, verifica-se que a variação do coeficiente de reflexão é limitada entre -1 e +1.

$$-1 \leq K \leq +1 \quad (2.2.4)$$

2.3 Configuração de Wenner

A expressão 2.2.2 será aplicada na configuração de **Wenner**, sobre o solo de duas camadas. Ver figura 2.3.1.

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 elétrodos 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 2.2.2, e efetuando a superposição, tem-se:

$$V_B = \frac{I \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a^2) + (2nh)^2}} \right] \quad (2.3.1)$$

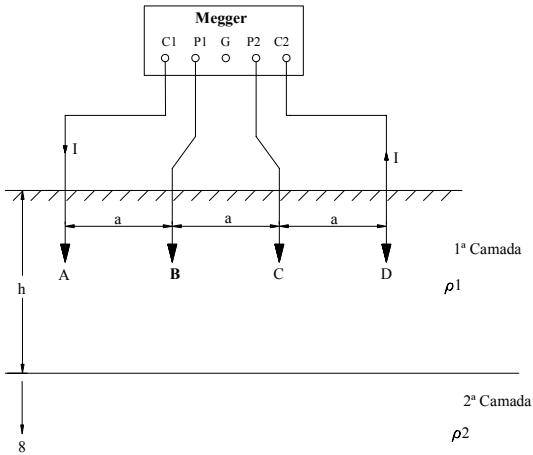


Figura 2.3.1 : Configuração de Wenner no Solo de Duas Camadas

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

$$V_C = \frac{I \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a^2) + (2nh)^2}} \right] - \frac{I \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (2.3.2)$$

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:

$$V_{BC} = \frac{I \rho_1}{2\pi a} \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right] \right\} \quad (2.3.3)$$

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

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

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

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

$$\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right] \quad (2.3.4)$$

A expressão 2.3.4 é fundamental na elaboração da estratificação do solo em duas camadas.

2.4 Método de Estratificação do Solo de Duas Camadas

Empregando estrategicamente a expressão 2.3.4 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 do primeiro método.

2.5 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 $\rho(a)/\rho_1$ em função de h/a para uma serie 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 $\rho(a)$ x a descendente, figura 2.5.1a, estão apresentadas na figura 2.5.2.

Já as curvas obtidas da expressão 2.3.4 para a curva $\rho(a)$ x a ascendente, figura 3.5.1b, para K variando na faixa positiva, são mostradas na figura 2.5.3.

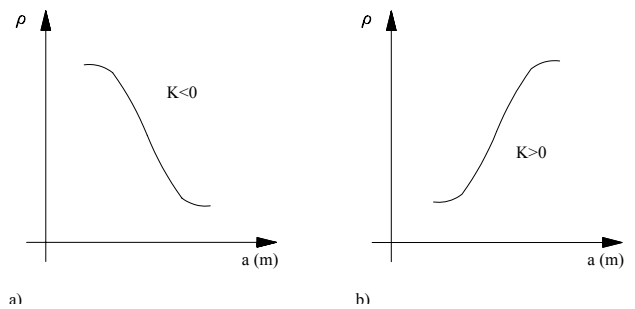
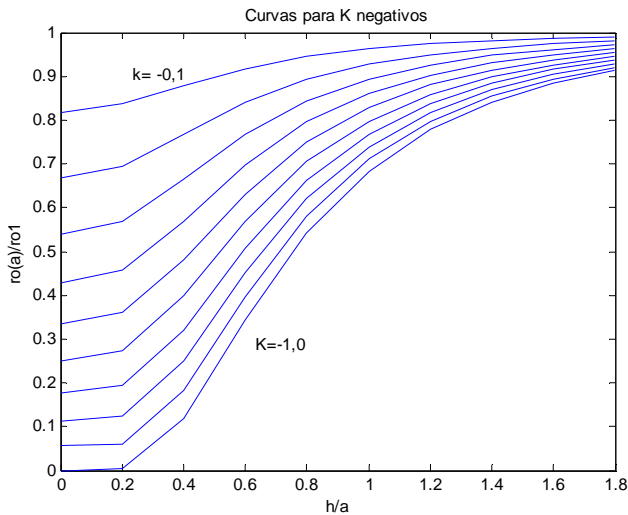


Figura 2.5.1 : Curva $\rho(a)$ x a Descendente e Ascendente

Com base na família de curvas teóricas das figuras 2.5.2 e 2.5.3 (geradas na prática 02), 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.



Figuras 2.5.2 e

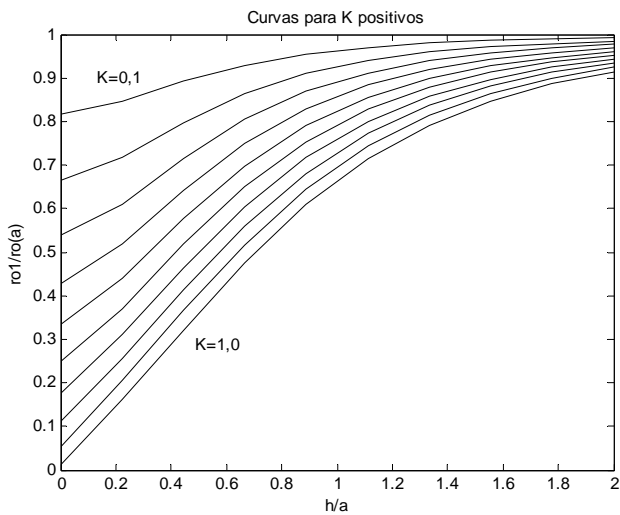


Figura 2.5.3

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

1º passo: Traçar em gráfico a curva $\rho(a) \times a$ obtida pelo método de Wenner;

2º passo: Prolongar a curva $\rho(a) \times a$ 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 $\rho(a) \times a$, 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 $\rho(a_1)/\rho_1$;
- Se a curva for ascendente, o sinal de K é positivo e efetua-se o cálculo de $\rho_1/\rho(a_1)$;

5º passo: Com o valor de $\rho(a_1)/\rho_1$ ou $\rho_1/\rho(a_1)$ 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 e h/a correspondentes.

6º passo: Multiplica-se todos os valores de 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 , 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 interseção das duas curvas $K \times h$ num dado ponto resultará nos valores reais de K e h , e a estratificação estará definida.

Exemplo 2.5.1

Efetuar a estratificação do solo pelo método apresentado no item 2.5, correspondente à série de medidas feitas em campo pelo método de Wenner, cujos dados estão na Tabela 2.5.1.

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

Tabela 2.5.1 : Valores de Medição de Campo

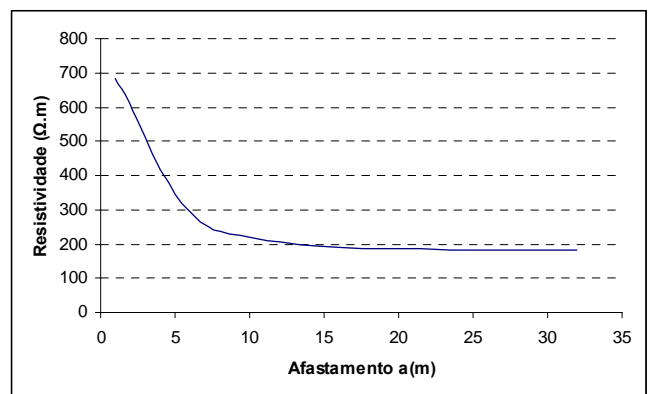


Figura 2.5.4 – Curva $\rho(a) \times a$

A solução é feita seguindo os passos recomendados.

1º Passo: Na figura 2.5.4 está traçada a curva $\rho(a)$ x a

2º Passo: Prolongando-se a curva, obtém-se $r_1 = 700 \Omega.m$

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

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 valor $r(a_1)/r_1 = 0,593$ levado na família de curvas teóricas da figura 2.5.2, procede-se a leitura dos respectivos K e h/a . Assim, gera-se a Tabela 2.5.2 proposta no sexto passo.

$a_1 = 4m$ $\rho(a_1)/\rho_1 = 0,593$		
K	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 2.5.2 : Valores do Quinto e Sexto Passo

8º Passo: Escolhe-se um outro espaçamento.

$$a_2 = 6m \rightarrow \rho(a_2) = 294 \Omega.m \rightarrow \rho(a_2)/\rho_1 = 294/700 = 0,42$$

Com esses dados constrói-se a Tabela 2.5.3.

9º Passo: A figura 2.5.3 apresenta o traçado das duas curvas K x h obtidas da Tabela 2.5.2 e 2.5.3.

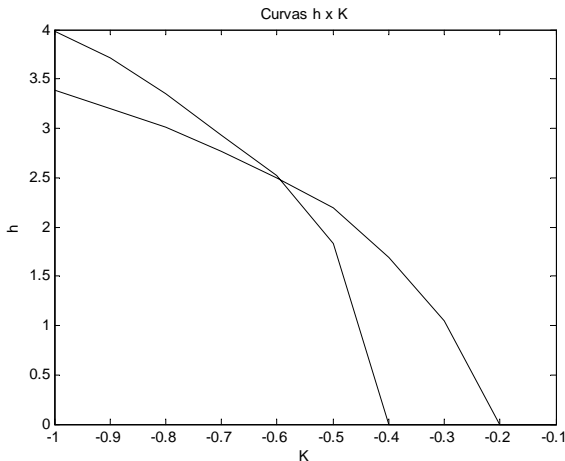


Figura 2.5.3

10º Passo: A intersecção ocorre em: $K = -0,616$ e $h = 2,574$ m

Usando a equação 2.2.3, obtém-se o valor de $\rho_2 = 166,36 \Omega.m$.

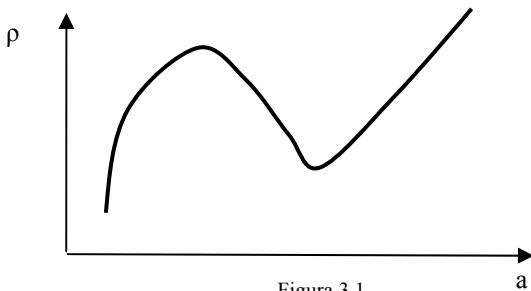
$a_2 = 6m$ $\rho(a_2)/\rho_1 = 0,42$		
K	h/a	h [m]
-0,1	-	-
-0,2	-	-
-0,3	-	-
-0,4	-	-
-0,5	0,305	1,830
-0,6	0,421	2,526
-0,7	0,488	2,928
-0,8	0,558	3,348
-0,9	0,619	3,714
-1,0	0,663	3,978

Tabela 2.5.3 : Valores do Quinto ao Sexto Passo

Método de Estratificação de Solos em Várias Camadas

3.1 – Introdução

Um solo com várias camadas apresenta uma curva $\rho(a)$ x a a ondulada, com trechos ascendentes e descendentes, conforme mostrado na figura 3.1



Dividindo a curva $\rho(a)$ x a em vários trechos típicos dos solos de duas camadas, é possível então, empregar métodos para a estratificação do solo com várias camadas, fazendo uma extensão do solo de duas camadas. Será desenvolvido a seguir o Método de Pirson para a estratificação do solo com várias camadas

3.2 O 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 são apresentados os passos a serem seguidos na metodologia adotada e proposta por Pirson;

1º passo – Traçar e um gráfica 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 – Prolongar 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 acurva $\rho(a)$ x a , característica de um solo de duas camadas, proceder como no item 2 e determinar os valores de ρ_1 e h_1 ;

5º passo – Para o segundo trecho, achar o ponto de transição a_t onde a derivada $d\rho/da$ é máxima, isto é, onde a derivada

segunda é nula: $d^2\rho/da^2 = 0$. Este ponto de transição está localizado onde a curva muda a sua concavidade; 6º passo – Considerando o segundo trecho da curva $\rho(a)$ x a , achar a resistividade equivalente vista pela terceira camada. Para isto, estimar a profundidade da segunda camada \hat{h}_2 (Obs.: o acento circunflexo significa “valor estimado”) pelo método de Lancaster-Jones, isto é:

$$\hat{h}_2 = d_1 + \hat{d}_2 = (2/3)a_t \quad (3.1)$$

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 = Espaçamento correspondente ao ponto de transição do segundo trecho.

Assim, são obtidos os valores estimados 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:

$$\hat{\rho}_2^1 = \frac{d_1 + \hat{d}_2}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{\hat{d}_2}{\rho_2}} \quad (3.2)$$

A resistividade $\hat{\rho}_2^1$ equivale a ρ_1 do método de duas camadas.

8º passo – Para o segundo trecho a curva, repetir todo o processo de duas camadas visto anteriormente, considerando $\hat{\rho}_2^1$ a resistividade da primeira camada. Assim, são obtidos os novos valores estimados de $\hat{\rho}_3$ e \hat{h}_2 .

Estes valores forma obtidos a partir um uma estimativa pela fórmula de Lancaster-Jones. Se num 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 a seguir 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

Efetuar a estratificação do solo pelo Método de Pirson, para o conjunto de medidas obtidas em campo pelo Método de Wenner, apresentado na tabela 3.1

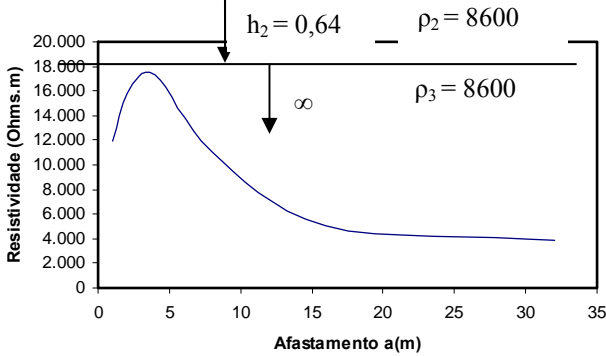
1º passo – Fazer a curva $\rho(a)$ x a (figura 3.2)

2º passo – Dividir a curva $\rho(a)$ x a em dois trechos, um ascendente e outro descendente. A separação é feita pelo ponto máximo da curva, isto é, onde $d\rho/da = 0$;

Espaçamento a(m)	Resistividade Medida (Ω.m)
1	11.938
2	15.770
4	17.341
8	11.058

$h_1 = 0,64$	5.	$\rho_1 = 8600$
	3.	0,26

Tabela 3.1

Figura 3.2 – Curva $\rho(a)$ x a

3º passo – Prolongar a curva $\rho(a)$ x a e obter a resistividade da primeira camada do solo $\rightarrow \rho_1 = 8600 \Omega.m$;

4º passo – Realizar os passos para a modelagem do solo em duas camadas e obter a tabela 3.2 relativas aos passos intermediários.

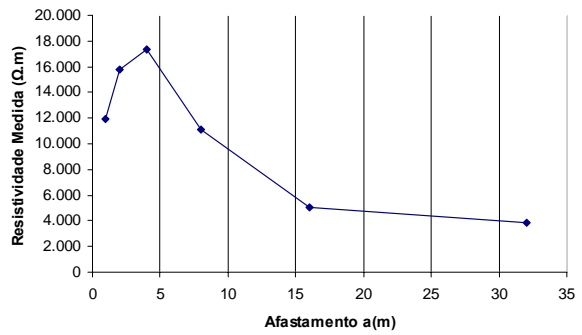
$a_1 = 1 \text{ m} \quad \frac{\rho_1}{\rho(a_1)} = 0,7204$			$a_2 = 2 \text{ m} \quad \frac{\rho_1}{\rho(a_2)} = 0,5475$		
K	h/a_1	h (m)	K	h/a_1	h (m)
0,2	0,23	0,23	0,2	-	-
0,3	0,46	0,46	0,3	0,05	0,10
0,4	0,60	0,60	0,4	0,28	0,56
0,5	0,72	0,72	0,5	0,40	0,80
0,6	0,81	0,81	0,6	0,49	0,98
0,7	0,89	0,89	0,7	0,57	1,14
0,8	0,98	0,98	0,8	0,65	1,30

Tabela 3.2

Para $a_1 = 1 \text{ m}$ obtém-se $\rho(a_1) = 11.938 \Omega.m$;
 Para $a_2 = 2 \text{ m}$ obtém-se $\rho(a_2) = 15.770 \Omega.m$.

Efetando o traçado das duas curvas K x h, verifica-se que as mesmas se interceptam no ponto $h_1 = d_1 = 0,64 \text{ m}$ e $K_1 = 0,43$, o que leva ao valor de $\rho_2 = 21.575 \Omega.m$;

5º passo – Ao examinar o segundo trecho da curva, pode-se concluir que o ponto da curva com espaçamento de 8 m apresenta a maior inclinação. (Fazendo a curva do tipo “liga-ponto” isto fica mais nítido). Portanto, o ponto de transição é relativo ao espaçamento de 8 m $\rightarrow a_t = 8 \text{ m}$;
 Obs.:Se for difícil visualizar o ponto de transição, faça a curva da fig. 3.2 ligando apenas os pontos por segmentos, como na figura 3.3:

Figura 3.3 – Curva $\rho(a)$ x a

6º passo – Considerar o segundo trecho da curva $\rho(a)$ x a e estimar a profundidade da segunda camada. Aplicando-se a fórmula 3.2 temos

$$\hat{h}_2 = d_1 + \hat{d}_2 = (2/3)a_t = 0,64 + \hat{d}_2 = (2/3) \times 8$$

$$\hat{h}_2 = 5,4 \text{ m e } \hat{d}_2 = 4,76 \text{ m}$$

7º passo – Calcular a resistividade média pela fórmula 3.2

$$\hat{\rho}_2^1 = \frac{d_1 + \hat{d}_2}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{\hat{d}_2}{\rho_2}} = \frac{0,64 + 4,76}{\frac{0,64}{8600} + \frac{4,76}{21.575}} = 18.302 \Omega.m$$

8º passo – Para o segundo trecho da curva $\rho(a)$ x a repetir o procedimento para modelagem em duas camadas e obter a tabela 3.3.

$a_1 = 8 \text{ m} \quad \frac{\rho(a_1)}{\hat{\rho}_2^1} = 0,604$			$a_2 = 16 \text{ m} \quad \frac{\rho(a_2)}{\hat{\rho}_2^1} = 0,2746$		
K	h/a	h (m)	K	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 3.3.

Para $a_1 = 8 \text{ m}$ obtém-se $\rho(a_1) = 11.058 \Omega.m$;
 Para $a_1 = 16 \text{ m}$ obtém-se $\rho(a_1) = 5.026 \Omega.m$.

Traçando-se as duas curvas K x h, as mesmas interceptam-se no ponto $h_2 = 5,64 \text{ m}$ e $K = -0,71$

$$\text{Assim } \rho_3 = \hat{\rho}_2^1 \frac{1+K}{1-K} \rightarrow \rho_3 = 18.302 \Omega.m$$

Portanto, a solução final é encontrada e o solo com três camadas estratificadas é mostrado na figura 3.4

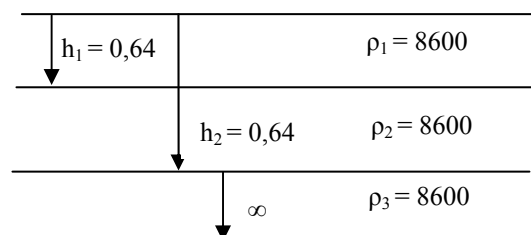


Figura 3.4 – Solo estratificado em 3 camadas