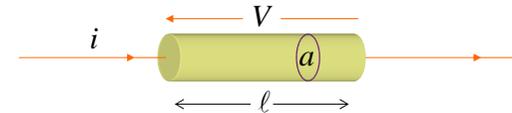


Condução elétrica

- ⌘ Encarando uma amostra de rocha como uma resistência elétrica, a corrente elétrica i que a atravessa é proporcional à diferença de potencial V , ou seja, $V = Ri$; sendo $R = \rho \ell / a$ onde ρ é a resistividade elétrica da rocha, ℓ , o comprimento e, a , a área da seção transversal.



Condução elétrica

- ⌘ A intensidade da corrente elétrica num meio, em resposta a um campo elétrico, depende de certas propriedades do meio material. Quando o meio é isotrópico e linear, essa relação permite definir a condutividade elétrica, geralmente representada pela letra grega σ .
$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{Lei de Ohm})$$
É usual a aplicação do inverso da condutividade elétrica, ou seja, a resistividade elétrica, geralmente representada pela letra grega ρ

Formas de condução elétrica

- ⌘ eletrônica - os metais constituem este grupo. Nestes materiais, certas características dos átomos permitem que, quando agrupados, se forme uma banda de energia na qual os elétrons podem mover-se facilmente quando sujeitos ao campo elétrico.
- ⌘ eletrolítica - a dissolução de substâncias em líquidos se faz com a separação das estruturas moléculares formando os íons (cátions e ânions).
 - ☒ Sob um campo elétrico, os íons movem-se formando uma corrente elétrica.
 - ☒ As velocidades dos íons são bem inferiores as dos elétrons da condução eletrônica.

Condução elétrica nas rochas

- ⌘ Nos ambientes terrestres em que a água se sustenta no estado líquido, a sua presença é o fator determinante da principal forma de condução elétrica nas rochas em que a matriz é isolante, ou seja, a forma eletrolítica.
- ⌘ Assim, também, não basta que haja porosidade. É necessário que os poros encontrem-se interligados a fim de permitir a migração dos íons quando sujeitos à ação de um campo elétrico externo.

Condução elétrica nas rochas

- ⌘ Por ser um solvente eficiente, a água interage com os minerais das rochas, dissolvendo-os. Desta forma transforma-se em eletrólito condutor de eletricidade.
- ⌘ Empiricamente, a resistividade da rocha é dada por

$$\rho_R = a\phi^{-m}s^{-n}\rho_E \quad (\text{Lei de Archie})$$
 onde ϕ é a porosidade, s , a fração dos poros contendo água (1- s é ocupado pelo óleo que não é condutor), ρ_E , a resistividade do eletrólito, a , m , e n são constantes e iguais, respectivamente, $0,5 \leq a \leq 2,5$, $1,3 \leq m \leq 2,5$, e $n \approx 2$.

Rochas e minerais

- ⌘ De todas propriedades físicas das rochas e minerais, a resistividade elétrica é a que se apresenta com o maior intervalo de variação.
- ⌘ Nos minerais metálicos, a resistividade pode ser da ordem de 10^{-7} ohm.m.
- ⌘ Nas rochas secas com grãos compactados, a resistividade é da ordem de 10^{+7} ohm.m.
- ⌘ Tomando exemplos mais extremos: ρ varia de $1,6 \times 10^{-8}$ ohm.m da prata nativa, a 10^{16} ohm.m do enxofre puro.

Resistividades das rochas

Rocha	ρ (ohm.m)	Rocha	ρ (ohm.m)
Conglomerados	2000 a 10^4	Granito	300 a 10^6
Arenitos	1 a 10^8	Sienito	100 a 10^6
Folhelhos	20 a 2000	Diorito	10^4 a 10^5
Calcáreos	50 a 10^7	Diabásio	20 a 5×10^7
Dolomitos	350 a 5000	Gabro	1000 a 10^6
Argilas	1 a 100	Basalto	10 a $1,3 \times 10^7$
Argila úmida inconsolidada	20	Gneisse	$6,8 \times 10^4$ a 3×10^6
Aluviões e areias	10 a 800	Mármore	100 a $2,5 \times 10^8$
Areia c/ óleo	4 a 800	Quartzito	10 a 2×10^8

Resistiv. dos minerais e água

Mineral	ρ (ohm.m)	Mineral	ρ (ohm.m)
Cuprita	10^{-3} a 300	Carvão	10 a 10^{11}
Calcopirita	10^{-5} a 0.6	Água de chuva	30 a 1000
Pirrotita	10^{-7} a 10^{-2}	Água em sedim.	0.1-100
Pirrotita (jazida)	10^{-4} a 10^{-5}	Água em ígneas	0.1 a 1000
Hematita	10^{-3} a 10^7	Água do mar	0.2
Magnetita	10^{-5} a 10^3	Água (3% sal)	0.15
Ilmenita	10^{-3} a 50	Água (20% sal)	0.05
Pirita (jazida)	10^{-1} a 300	Água mineral @25°C <i>Manajá</i>	180
Quartzo	10^{10} a 10^{14}	<i>Levisima</i>	526
Mica	900 a 10^{14}	<i>Maiorca</i>	232
Sal (rocha)	30 a 10^{13}	<i>Fratelli Vita</i>	265

Resistividades das rochas

⌘ Dos valores apresentados, depreende-se que

- ☒ não é possível estabelecer uma relação biunívoca entre a resistividade elétrica e o tipo de rocha.
- ☒ nas condições terrestres, a rocha apresenta uma forte variação da resistividade elétrica por esta ser função do teor de umidade e do tipo e quantidade de sais dissolvidos, além de sofrer influência de outros fatores: temperatura, pressão, padrão da granulidade, etc.

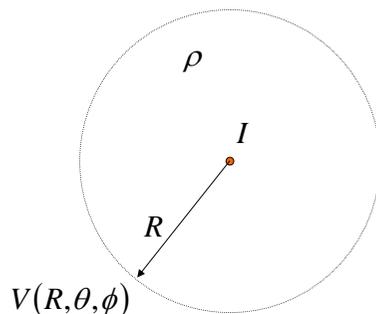
Potencial elétrico no espaço

11

Fonte de corrente elétrica pontual no espaço condutor, homogêneo e isotrópico :

$$V(R, \theta, \phi) = \frac{\rho I}{4\pi R}$$

onde I é a intensidade da fonte de corrente, ρ , a resistividade do meio, e (R, θ, ϕ) , as coordenadas esféricas do ponto de observação.



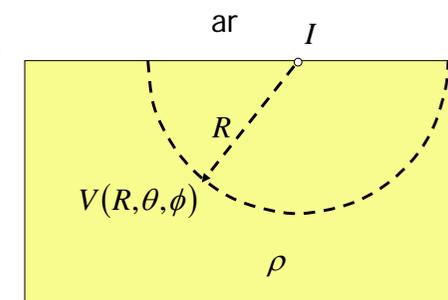
Potencial elétrico no semi-espaço

12

Fonte de corrente elétrica pontual na superfície de um semi-espaço condutor, homogêneo e isotrópico :

$$V(R, \theta, \phi) = \frac{\rho I}{2\pi R}$$

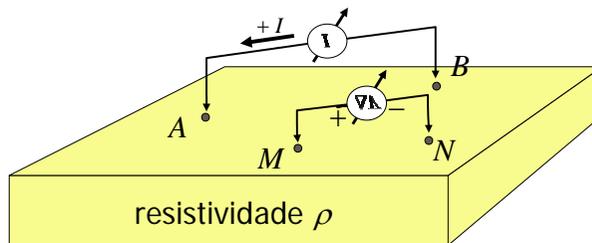
onde I é a intensidade da fonte de corrente, ρ , a resistividade do semi-espaço, e (R, θ, ϕ) , as coordenadas esféricas do ponto de observação.



Quatro eletrodos

- ⌘ Diferença de potencial entre os eletrodos M e N, com uma corrente elétrica I circulando nos eletrodos A e B.

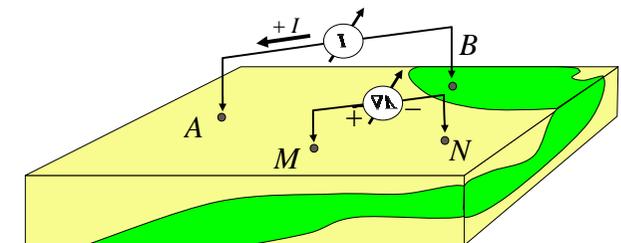
$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]$$



Resistividade aparente

- ⌘ Resistividade do semi-espço homogêneo, linear e isotrópico, respondendo como a situação heterogênea.

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \underbrace{\left(2\pi / \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \right)}_{\text{fator geométrico}}$$



Equipamento SYSCAL R2

- ⌘ Unidade transmissor e receptor: controla e mede a intensidade da corrente elétrica e do potencial.
- ⌘ Conversor DC-DC para elevar a tensão elétrica contínua fornecida por uma bateria de 12 V.



SYSCAL R2

- ⌘ Realiza medidas simultâneas de eletrorresistividade, polarização elétrica induzida e potencial espontâneo.
- ⌘ Fabricado pela Iris Instruments (França).



Eletrodos de metal

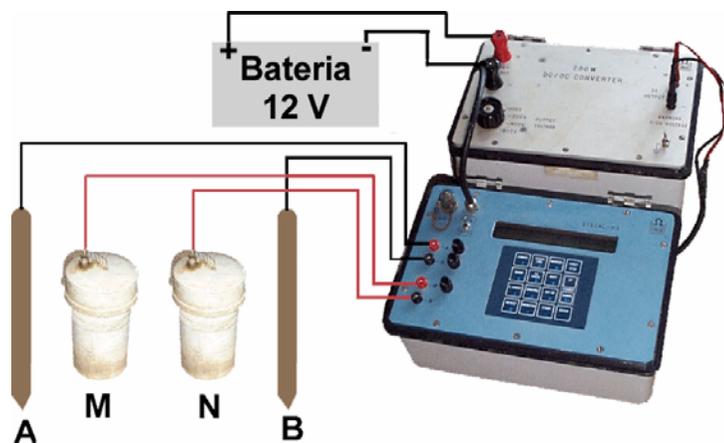
- ⌘ Barras de "terra" vendidas em lojas de materiais de construção, para se fazer o sistema de terra das instalações elétricas residenciais e comerciais.
- ⌘ As barras são de aço cobreados.
- ⌘ Desvantagem: oxidam (enferrujam)
- ⌘ Vantagem: não lançam lascas quando martelados para se fincar.

Eletrodo não polarizável

- ⌘ Fundamentais para as medições de potencial espontâneo e polarização elétrica induzida.
- ⌘ Pote poroso
- ⌘ Solução saturada de sulfato de cobre
- ⌘ Fio de cobre mergulhado na solução.



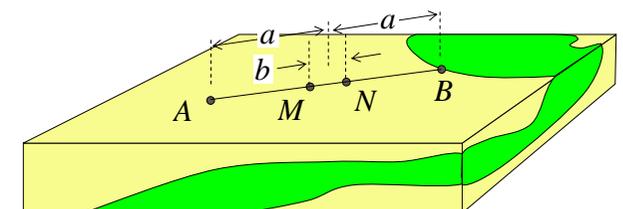
Montagem em campo



Arranjo Schlumberger

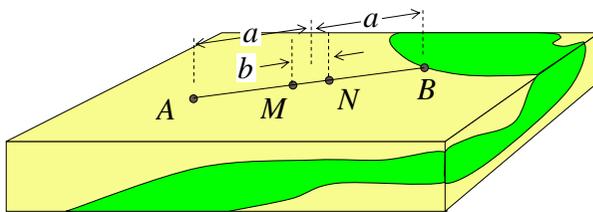
Quatro eletrodos em linha

$$\rho_{a,Schl.} = \frac{\Delta V}{I} \pi \left(\frac{a^2}{b} - \frac{b}{4} \right)$$



Arranjo Schlumberger

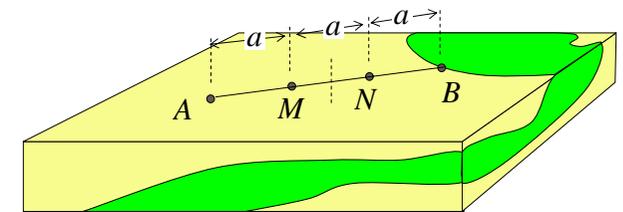
- Com o centro do arranjo fixo, os quatro eletrodos são afastados em linha. Em geral, os valores de a crescem em progressão geométrica. Os valores de b são mantidos pequenos ($<0.25a$).
- Exemplo 1: $a = \{1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, \dots\}$
- Exemplo 2: $a = \{1, 2, 3, 4, 8, 10, 20, 30, 40, 80, 100, \dots\}$



Arranjo Wenner

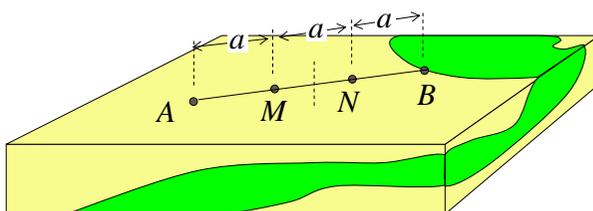
Quatro eletrodos em linha

$$\rho_{a,Wen.} = \frac{\Delta V}{I} 2\pi a$$



Arranjo Wenner

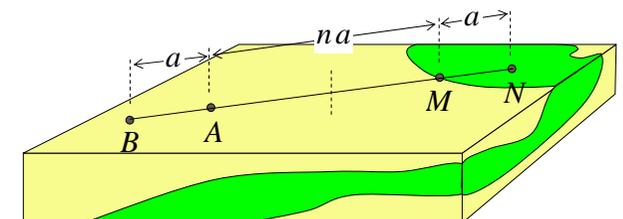
Similar ao arranjo Schlumberger, o centro do arranjo é fixado e os quatro eletrodos são afastados em linha, em geral, com os valores de a crescendo em progressão geométrica.



Arranjo dipolo-dipolo

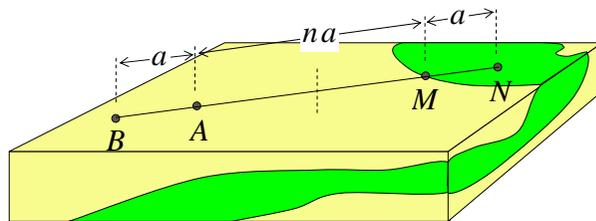
Quatro eletrodos em linha

$$\rho_{a,dd} = \frac{\Delta V}{I} \pi a n(n+1)(n+2)$$



Arranjo dipolo-dipolo

- ⌘ Dada uma posição de A e B, as medidas são feitas para $n = 1, 2, 3, 4, \dots, n_{\max}$. O valor de n_{\max} é determinado pela potência do sistema de medição, como também pela profundidade de exploração desejada.
- ⌘ Os eletrodos A e B são deslocados da distância a para a direita, e repete-se o procedimento.



Sondagem e perfilagem

Sondagem elétrica vertical (SEV) é um procedimento elaborado para detectar variações verticais em sub-superfície.

Consegue-se essa qualidade, aumentando-se as dimensões do arranjo.

Perfilagem elétrica visa, por outro lado, detectar as variações laterais.

Move-se o arranjo, mantidas suas dimensões.

Sondagem e perfilagem conjunta.

Modelagens

⌘ Modelagens analíticas

- ☒ problemas com geometria simples: contatos verticais, camadas horizontais, um interface inclinada e mais alguns poucos casos.
- ☒ os problemas são resolvidos analiticamente com uso de algumas técnicas. Método das imagens para os problemas mais simples e solução da equação diferencial em problemas um pouco mais complexos.

⌘ Modelagens numéricas

- ☒ problemas com geometria complexa
- ☒ métodos numéricos, incluindo a diferenças finitas, elementos finitos, entre outros.

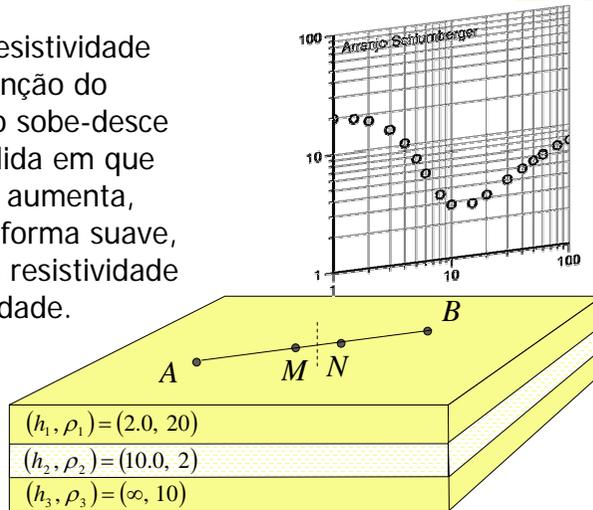
Modelo de camadas horizontais

⌘ É muito usado para interpretar dados obtidos em regiões sedimentares.

- ☒ Mesmo quando é forte a evidência da não horizontalidade das camadas geológicas.
- ☒ Ainda assim se adota o procedimento pois é simples a interpretação com a hipótese de camadas horizontais, inclusive podendo ser automática com programas de computador para a inversão de dados.
- ☒ A queda na discriminação das camadas mais profundas é fato inerente ao método da eletrorresistividade e, portanto, reduz-se a importância da interpretação com o uso de modelos detalhados.

SEV sobre camadas

No gráfico da resistividade aparente em função do espaçamento, o sobe-desce da curva à medida em que o espaçamento aumenta, acompanha de forma suave, as variações da resistividade com a profundidade.



SEV sobre 2 camadas Arranjo Wenner

Para duas camadas, a solução pode ser representada por :

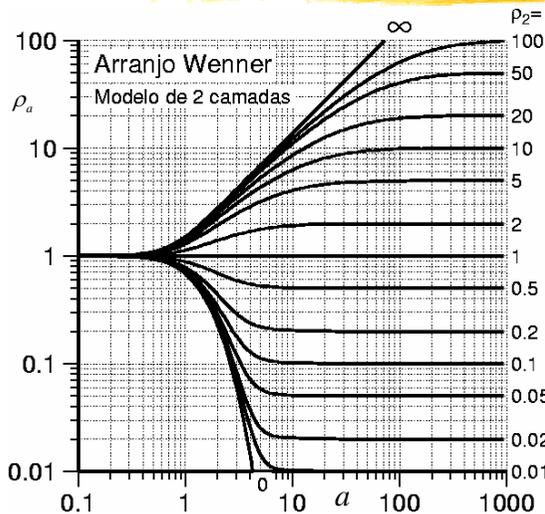
$$\rho_{a,W} = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{k_{21}^i}{\sqrt{1 + (2ih_1/a)^2}} - 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{k_{21}^i}{\sqrt{1 + (ih_1/a)^2}} \right]$$

onde $k_{21} = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1)$, é o coeficiente de reflexão; h_1 , a espessura da primeira camada, e $a = AM = MN = NB$. Note que, quando $\rho_2 = \rho_1$, k_{21} se anula e assim, $\rho_{a,W} = \rho_1$.

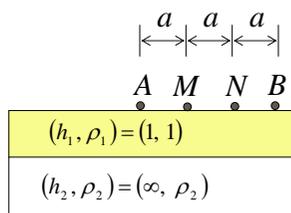
Por outro lado, quando $h_1 \rightarrow 0$,

$$\rho_{a,W} = \rho_1 \left[1 + 2k_{21} \sum_{i=0}^{\infty} k_{21}^i \right] = \rho_1 \left[1 + \frac{2k_{21}}{1 - k_{21}} \right] = \rho_2$$

SEV sobre 2 camadas



Para a crescente, observar o comportamento assintótico para a resistividade da segunda camada.



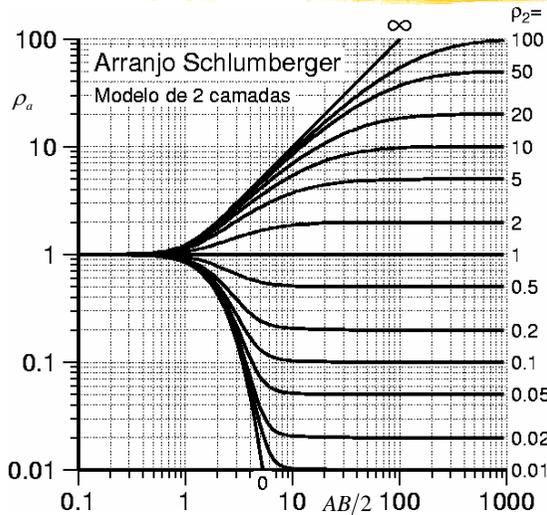
SEV sobre 2 camadas Arranjo Schlumberger

Para duas camadas, a solução pode ser representada por :

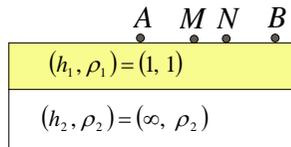
$$\rho_{a,S} = \rho_1 \left[1 + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{k_{21}^i}{\sqrt[3]{1 + (2ih_1/a)^2}} \right] \text{ (Schlumberger)}$$

onde $k_{21} = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1)$, é o coeficiente de reflexão; h_1 , a espessura da primeira camada, e $a = AB/2$.

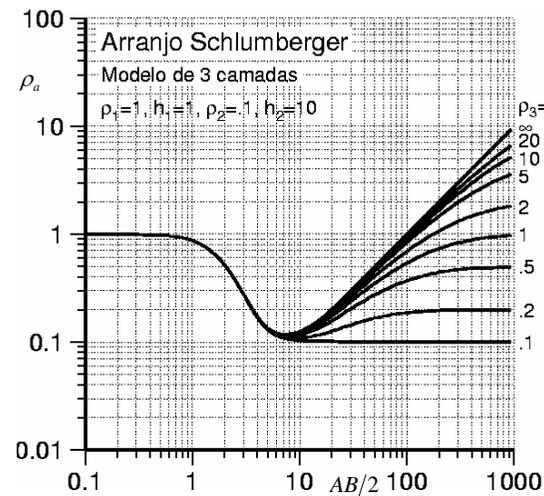
SEV sobre 2 camadas



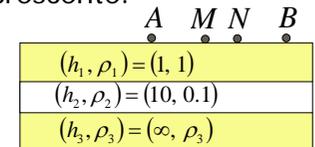
Para $AB/2$ crescente, observar o comportamento assintótico para a resistividade da segunda camada.



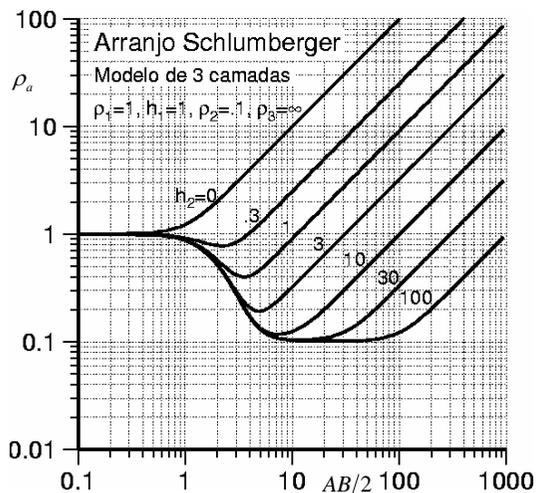
SEV sobre 3 camadas (tipo H)



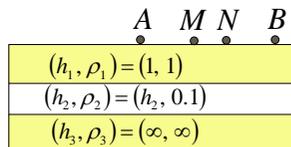
Para $AB/2$ crescente, observar a tendência assintótica para o valor ρ_3 , das curvas de resistividade aparente, e a redução da resolução entre as curvas para ρ_3 crescente.



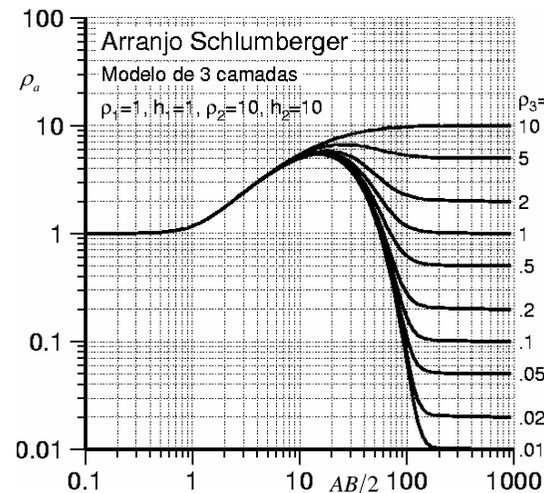
SEV sobre 3 camadas (tipo H)



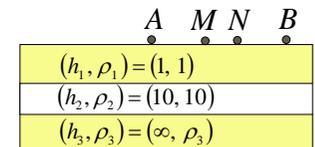
A segunda camada não se manifesta quando a sua espessura é pequena.



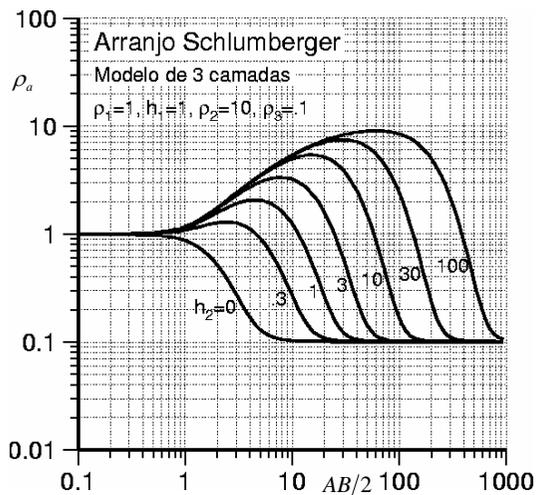
SEV sobre 3 camadas (tipo K)



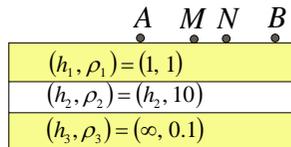
Para $AB/2$ crescente, observar como é marcante a tendência assintótica para o valor ρ_3 , das curvas de resistividade aparente.



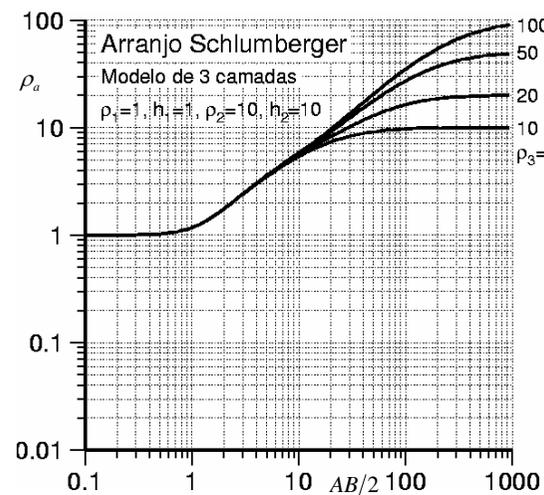
SEV sobre 3 camadas (tipo K)



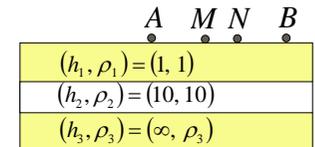
A segunda camada não se manifesta quando a sua espessura é pequena.



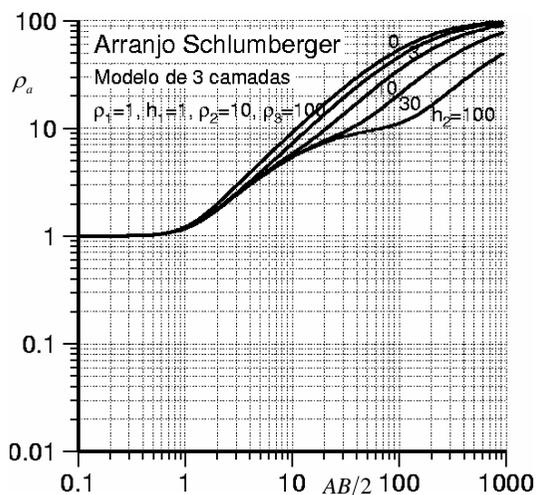
SEV sobre 3 camadas (tipo A)



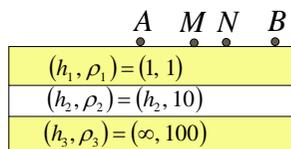
Repete-se a tendência assintótica para ρ_3 . Aumento da dificuldade para se reconhecer a 2ª camada para maiores valores de ρ_3 .



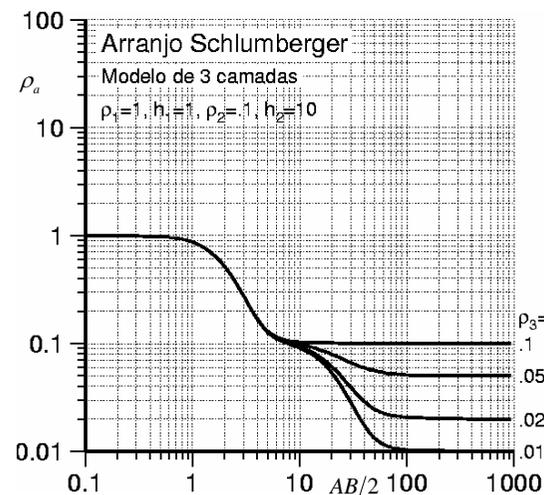
SEV sobre 3 camadas (tipo A)



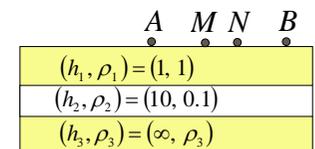
Observar a grande dificuldade para se reconhecer a 2ª camada, mesmo quando sua espessura é dez vezes maior que a da 1ª camada.



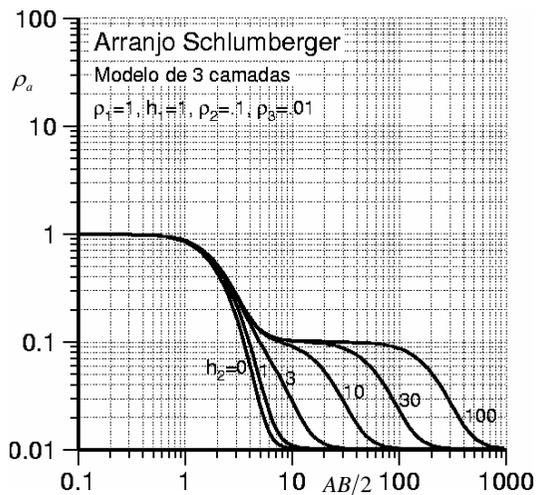
SEV sobre 3 camadas (tipo Q)



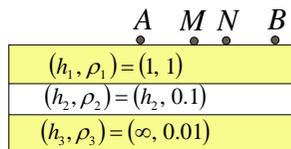
Para AB/2 crescente, observar como é marcante a tendência assintótica da curva da resistividade aparente para o valor ρ_3 .



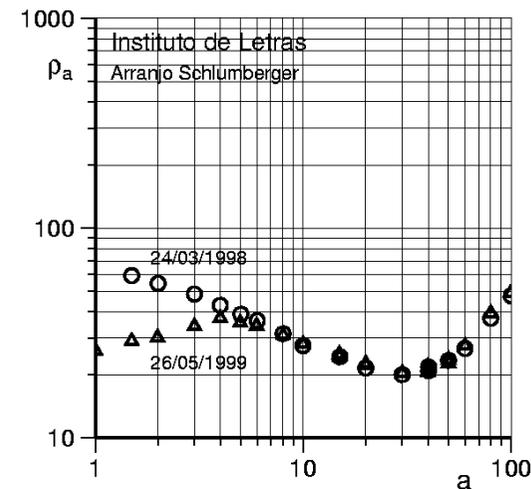
SEV sobre 3 camadas (tipo Q)



Dificuldade para reconhecer a 2ª camada, mesmo quando sua espessura é duas ou três vezes maior que a da primeira camada.



Exemplo SEV

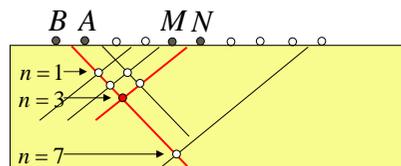


Duas SEVs realizadas ao lado do Instituto de Letras da UFBA. A influência do clima ocorre na parte mais superficial, conforme pode-se ver nos menores valores de a . Antes da SEV mais recente, ocorreria um longo período chuvoso. Curvas tipos QH e KH

Perfilagem dipolo-dipolo

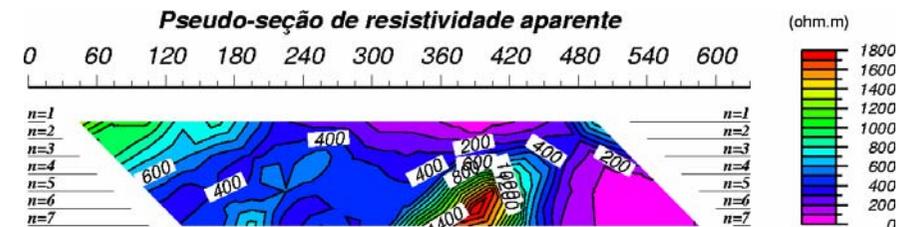
⌘ Método de Hallof para a construção de pseudo-seção

- com o arranjo dipolo-dipolo, após a realização das medições a diferentes valores de "n", ou seja, diversas posições de MN, os eletrodos AB deslocam-se da distância AB e o ciclo de medições se repete.
- Para cada valor medido, o ponto ao qual se atribuirá a medida é aquele determinado pela intersecção das retas medianas de AB e MN, a 45° com a horizontal, conforme o ponto destacado na figura.



Perfilagem dipolo-dipolo

⌘ Gráfico com dados reais segundo método de Hallof, seguido do traçado das linhas de isorresistividade aparente.



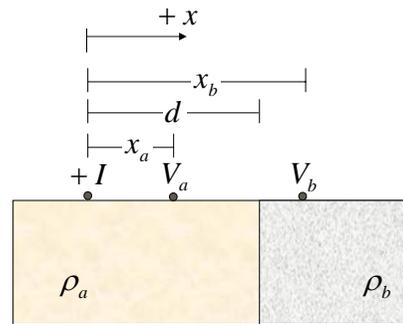
Contato vertical

O problema do potencial elétrico em contato vertical tem solução simples :

$$V_a = \frac{\rho_a I}{2\pi} \left(\frac{1}{|x_a|} + \frac{k_{ba}}{|2d - x_a|} \right)$$

$$V_b = \frac{\rho_b I}{2\pi} \left(\frac{1 - k_{ba}}{|x_b|} \right)$$

onde $k_{ba} = (\rho_b - \rho_a) / (\rho_b + \rho_a)$.

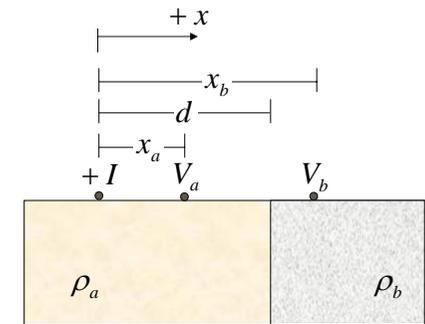


Contato vertical

Se um eixo y com a origem na fonte for considerado, as expressões ficam :

$$V_a = \frac{\rho_a I}{2\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{x_a^2 + y_a^2}} + \frac{k_{ba}}{\sqrt{(2d - x_a)^2 + y_a^2}} \right)$$

$$V_b = \frac{\rho_b I}{2\pi} \left(\frac{1 - k_{ba}}{\sqrt{x_b^2 + y_b^2}} \right), \text{ onde } k_{ba} = (\rho_b - \rho_a) / (\rho_b + \rho_a).$$



Referências:

- ⌘ Sharma, P. V., 1986, Geophysical methods in geology. 2. ed., Elsevier, New York.
- ⌘ Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. e Keys, D. A., 1978, Applied geophysics. Cambridge University Press.