

GEO046 Geofísica

Aula nº 09
MÉTODOS ELÉTRICOS
Polarização induzida e
potencial espontâneo

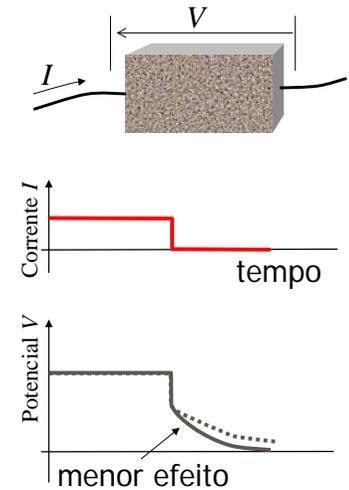
June 04

Hédison K. Sato

2

Fenômeno observado

- ⌘ Após a interrupção de uma corrente elétrica contínua, observa-se que o potencial elétrico não decai instantaneamente para zero, sugerindo o armazenamento de cargas, como em um capacitor.



3

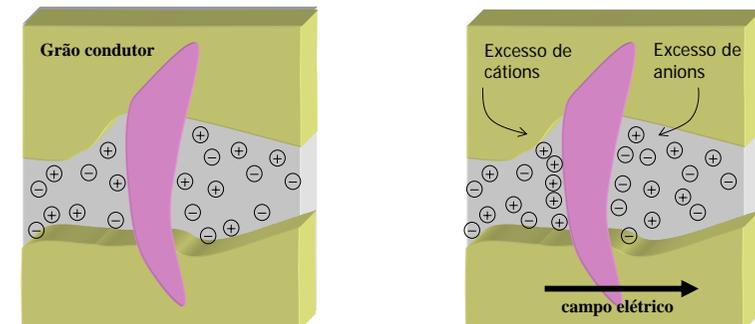
Polarização elétrica induzida

- ⌘ O fenômeno ocorre em rochas contendo:
 - ☒ minerais metálicos disseminados ou
 - ☒ minerais com capacidade de promover a troca iônica em contato com a solução eletrolítica preenchendo os poros.
- ⌘ Nos poros das rochas, devido a presença de minerais metálicos ou argilas e eletrólito, surgem regiões eletricamente mais carregadas que outras durante a passagem da corrente, sugerindo um armazenamento de cargas, como em um capacitor, ou seja, uma polarização elétrica induzida.

4

Polarização de eletrodo

- ⌘ Ocorre com a presença de minerais metálicos disseminados.

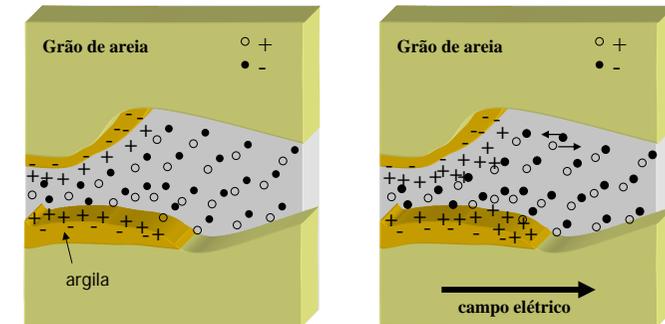


Polarização de superfície

- ⌘ O processo contínuo de redução do íon positivo (M^{n+}) no catodo pode ser dividido em três estágios:
 - ☒ Transferência dos íons, por difusão, da solução para a camada adjacente ao eletrodo,
 - ☒ seguida da transferência de elétrons do metal para o íon, reduzindo os íons ($M^{n+} + n e^- \rightarrow M$) e
 - ☒ convecção (migração) para sedimentos estáveis.
- ⌘ O mais lento destes processos determina o desempenho geral.

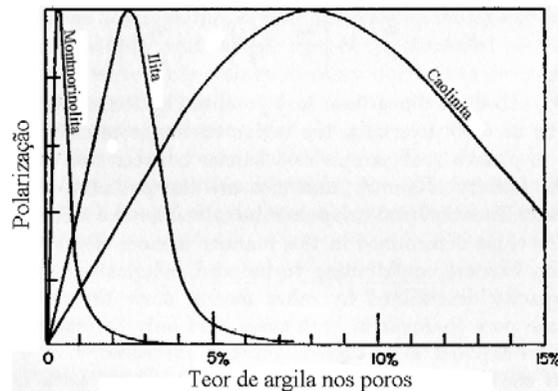
Polarização de membrana

- ⌘ Ação do campo elétrico na distribuição das cargas semi-ancoradas



Argilas

- ⌘ O efeito de polarização devido às argilas não cresce continuamente com os teores, e é função do tipo da argila.

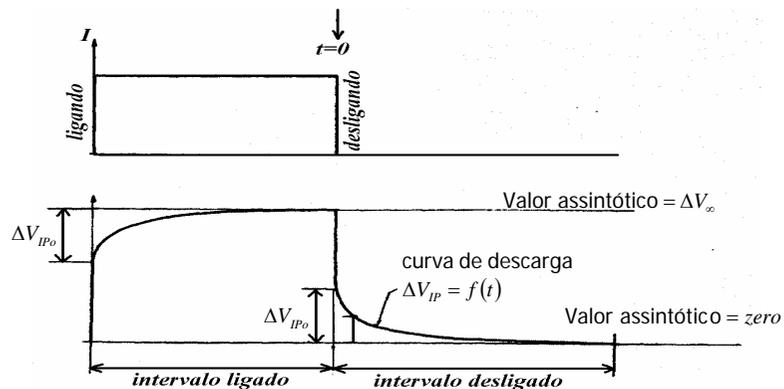


Polarização

- ⌘ O processo de IP é tipicamente superficial.
- ⌘ Entretanto, quando medido, a medição representa o efeito do volume amostrado.
- ⌘ O efeito da polarização induzida em rochas com mineralização disseminada:
 - ☒ é a soma dos efeitos das polarizações superficiais de cada partícula mineralizada.

Domínio do tempo

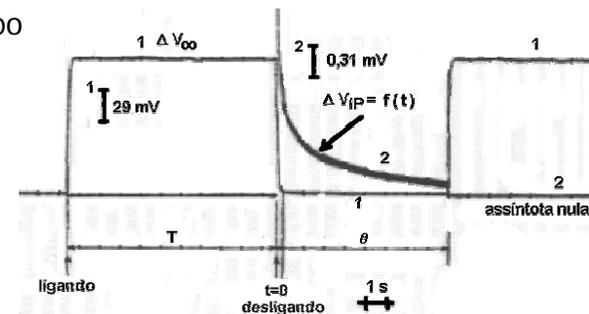
⌘ Esquema do fenômeno da polarização



Domínio do tempo

Medida de campo

AB = 400 m
 MN = 10 m
 I = 1.5 A
 Areia argilosa em subsuperfície



Domínio do tempo (medidas)

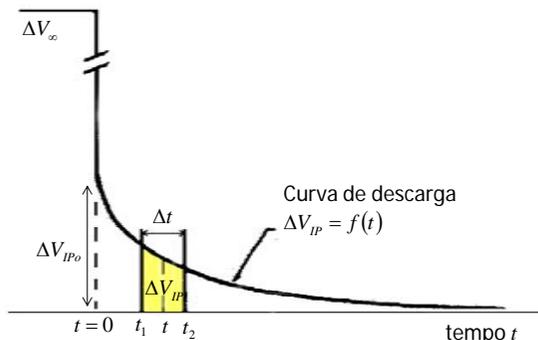
Amostragem
 Polarizabilidade

$$P_t = \frac{\Delta V_{IPt}}{\Delta V} \approx \frac{\Delta V_{IPt}}{\Delta V_\infty}$$

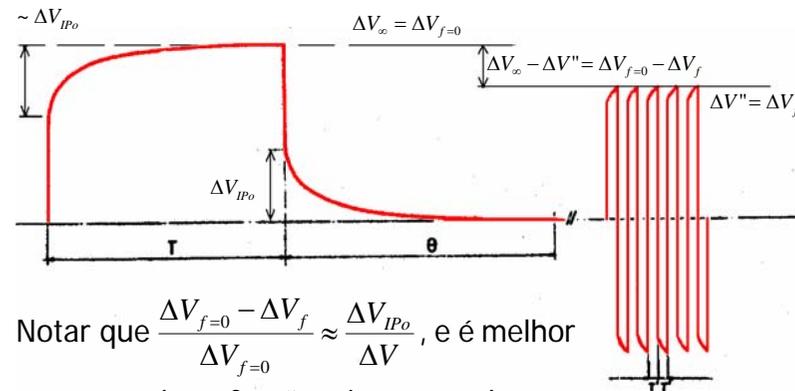
$$P_o = \frac{\Delta V_{IPo}}{\Delta V}$$

Área
 Chargeability

$$M_{t_1, t_2}^T = \frac{1}{\Delta V} \int_{t_1}^{t_2} \Delta V_{IPt} dt$$



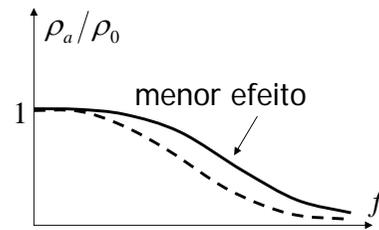
Domínio da frequência



Notar que $\frac{\Delta V_{f=0} - \Delta V_f}{\Delta V_{f=0}} \approx \frac{\Delta V_{IPo}}{\Delta V}$, e é melhor quanto maior a frequência f , ou seja é comparável à polarizabilidade P_0 .

Domínio do freqüência

- ⌘ Até agora, considerou-se a resistividade elétrica das rochas, à freqüência zero.
- ⌘ Ademais, a resistividade pode variar com o aumento da freqüência, geralmente reduzindo de valor.
- ⌘ O fenômeno reflete-se na eletrorresistividade feita com diversas freqüências.



Resistividade complexa

- ⌘ Corrente alternada

Considerando $I_0 \cos \omega t$, a corrente nos eletrodos A e B , a voltagem produzida nos eletrodos M e N tem a sua amplitude e fase φ variando com a freqüência $\omega/2\pi$.

Pode - se definir a resistividade aparente em corrente alternada, tal como se usa definir com corrente contínua, porém da forma complexa :

$$\rho_a(\omega) = |\rho_a(\omega)| \exp(i\varphi) = K \frac{V}{I}$$

Efeito (Percentual) em Freqüência

Efeito aparente em freqüência

$$EF = \frac{\rho_f - \rho_F}{\sqrt{\rho_f \rho_F}}$$

onde ρ_f e ρ_F representam resistividades aparentes medidas nas freqüências f e F , sendo $f < F$, com os eletrodos de corrente e potencial em posições inalteradas.

Efeito (Percentual) em Freqüência

Na prática são usados :

$$EF = \frac{\rho_f - \rho_F}{\rho_F}, \quad EF = \frac{\rho_f - \rho_F}{\rho_f}, \quad EPF = \frac{\rho_f - \rho_F}{\rho_F} \times 100\%$$

Como o resultado é função da freqüência, é importante especificar os valores das freqüências f e F .

Fator Metálico

$$FM_{f,F} = A \frac{\rho_f - \rho_F}{\rho_f \rho_F} = A \left(\frac{1}{\rho_F} - \frac{1}{\rho_f} \right) = A(\sigma_F - \sigma_f)$$

sendo A uma constante, algumas vezes igual a 10^5 .
O FM não é propriamente uma medida de IP (Induced Polarization), mas uma correção do IP como uma função da resistividade.

O FM se aplica também com as medidas no domínio do tempo. De forma geral, pode ser definida como a quantidade de IP dividida pela resistividade aparente:

$$FM = IP / \rho_a, \text{ onde } IP \text{ seria } P_t, M_{t_1, t_2}^T \text{ ou } EF_{f,F}.$$

Aquisição dos dados

- ⌘ Sistemas aterrados e não aterrados (EM).
- ⌘ Equipamentos específicos para medidas no domínio do tempo e no domínio da frequência.
- ⌘ Sistemas aterrados (AMNB):
 - ☑ Domínio do tempo: mede-se o potencial nos eletrodos MN, após a interrupção da corrente em AB, para se obter a condutividade, a "chargeability" ou a polarizabilidade.
 - ☑ Domínio da frequência: para diversas frequências, mede-se a condutividade complexa na forma de amplitude e fase.
 - ☑ Uso de eletrodos não polarizável é imprescindível.

SYSCAL R2

- ⌘ Unidade transmissor e receptor: controla e mede a intensidade da corrente elétrica e do potencial.
- ⌘ Realiza medidas simultâneas de eletrorresistividade, polarização elétrica induzida e potencial espontâneo.



Receptor SIP

- ⌘ Faz medidas da resistividade complexa, para diversas frequências: 0,25, 0,5, 1,0, ..., 512 Hz

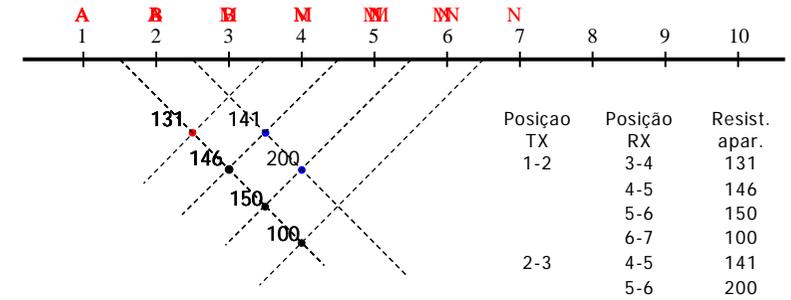


Eletrodo não polarizável

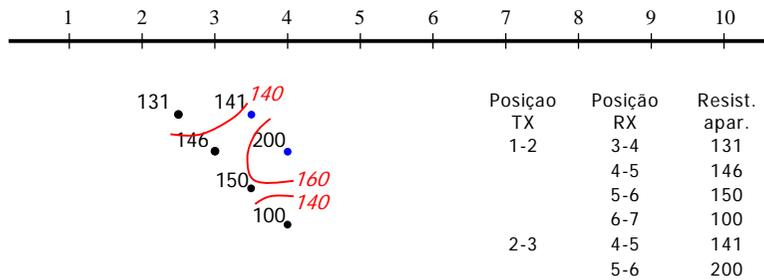
- ⌘ Fundamentais para as medições de potencial espontâneo e polarização elétrica induzida.
- ⌘ Pote poroso
- ⌘ Solução saturada de sulfato de cobre
- ⌘ Fio de cobre mergulhado na solução.



Exemplo com o arranjo dipolo-dipolo

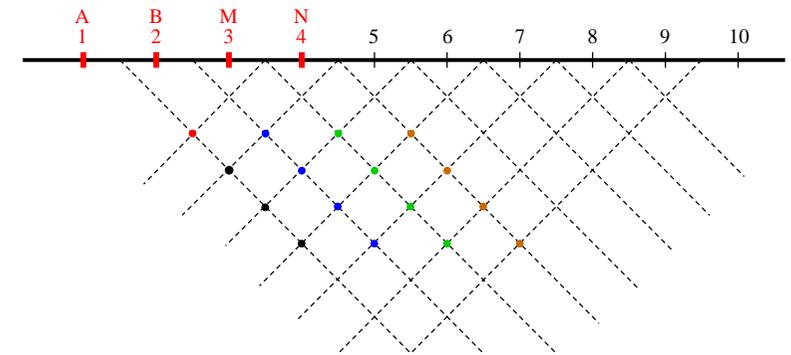


Exemplo com o arranjo dipolo-dipolo



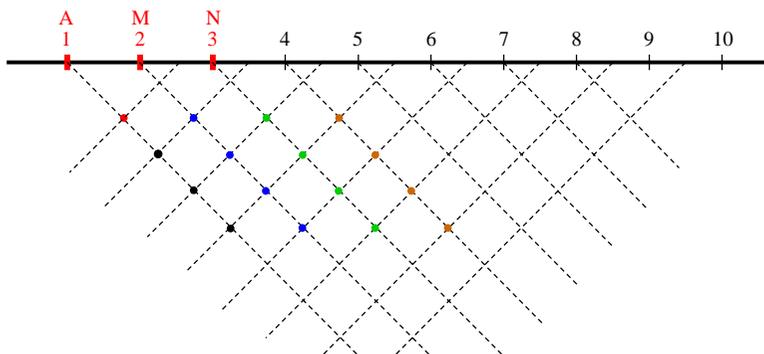
Lançamento de curvas de isovalores

Posição do locus no arranjo dipolo-dipolo



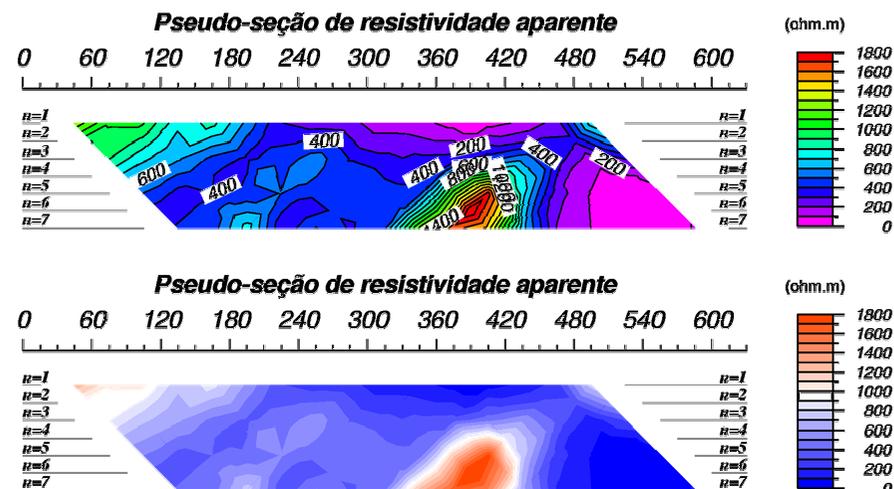
Posição do *locus* no arranjo polo-dipolo

25



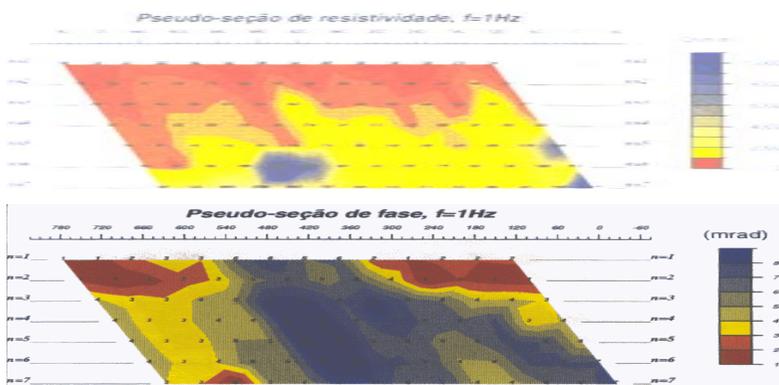
Pseudo-seção para dipolo-dipolo

26



Exemplo de SIP

27



Área de Baixa Funda (Vale do Curaçá, BA) - pirita

Potencial espontâneo: Origem

28

- ⌘ Potenciais elétricos naturais e espontâneos (SP) ocorrem naturalmente no interior das rochas e devem-se a:
 - ⊠ atividade bioelétrica da vegetação,
 - ⊠ variação de concentração dos eletrólitos,
 - ⊠ fluxo de fluidos e íons,
 - ⊠ fluxo de calor.
- ⌘ Portanto, a investigação com SP tem sido usada na localização e delimitação das fontes associadas com tais fluxos.

Aplicação do SP

- ⌘ Inicialmente aplicado extensivamente na exploração mineral, hoje, o método tem sido usado no estudo geotérmicos, de problemas de engenharia e meio ambiente.
- ⌘ Por oferecer rapidez e baixo custo, o método é adequado no reconhecimento preliminar, precedendo os estudos mais intensivos usando outras técnicas geofísicas e geotécnicas.
- ⌘ É uma medida usual em perfilagem de poços. Embora natural, ela é consequência do processo de perfuração e permite a investigação em poços.

Aplicação do SP

- ⌘ Mapeamento de vazamentos associados com barragens, diques, reservatórios subterrâneos e outras estruturas para armazenamento.
- ⌘ Estudos de fluxo de água subterrânea e delineamento dos seus padrões nas vizinhanças de encostas, poços, falhas, estruturas de drenagem, poços, túneis e sumidouros.
- ⌘ Estudos geotérmicos para o mapeamento das frentes de fluxo de vapor e incêndio em minas de carvão.
- ⌘ Gradientes de concentração química associados a contaminação em subsuperfície.

Fenômenos básicos

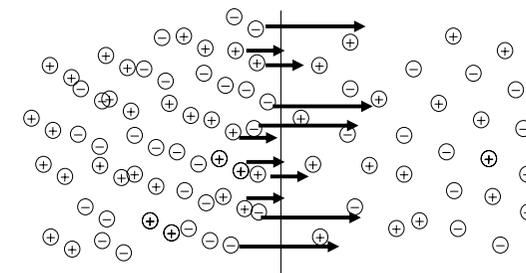
Potencial eletrocinético: ocorre quando uma solução de resistividade ρ e viscosidade η é forçada através de um meio poroso ou capilar. A diferença de potencial entre as extremidades da passagem é dada por

$$E_k = -\frac{\phi \Delta P \varepsilon \rho}{4\pi\eta},$$

onde ϕ = potencial de adsorção, ΔP = diferença de pressão, e ε = constante dielétrica da solução.

A quantidade ϕ é o potencial da dupla camada (sólido - líquido) entre o sólido e a solução.

Potencial de difusão



Supondo que os íons sejam Cl^- e Na^+ ,
a mobilidade do $\text{Cl}^- >$ mobilidade do Na^+

Potencial de difusão

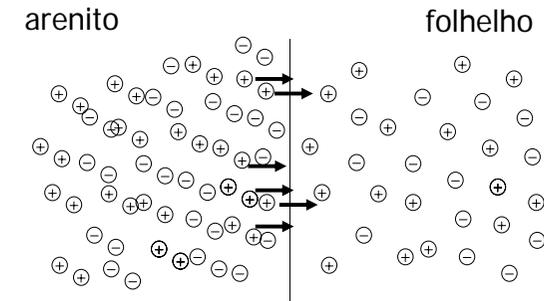
Potencial de difusão (junção líquida) :

Resulta da diferença entre as mobilidade dos íons :

$$E_d = -\frac{RT(I_a - I_c)}{Fn(I_a + I_c)} \ln(C_1/C_2),$$

onde $R = \text{const. dos gases } (8,31 \text{ J/}^\circ\text{C})$, $F = \text{const. de Faraday } (9,65 \times 10^4 \text{ C/mol})$, $T = \text{temp. absoluta}$, $n = \text{valência}$, I_a e $I_c = \text{mobilid. dos anions e cátions}$, C_1 e $C_2 = \text{concentr. das soluções}$. Nas soluções de NaCl, $I_a/I_c = 1,49$. Assim, $E_d = -11,6 \log_{10}(C_1/C_2)$ (mV), a 25°C .

Potencial de membrana



Supondo íons Cl^- e Na^+ , o folhelho é impermeável ao Cl^- .

Potencial de membrana

Potencial de membrana (potencial de folhelho ou Nernst) :

Por se carregarem negativamente, as argilas inibem a penetração dos anions.

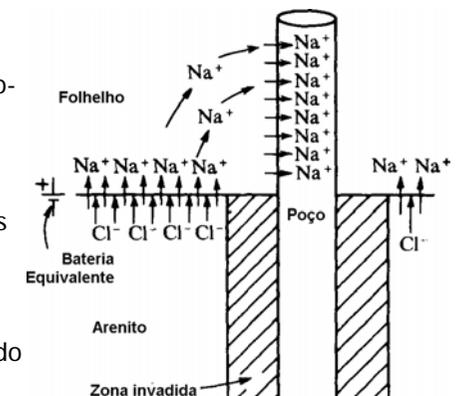
$$E_s = \frac{RT}{Fn} \ln(C_1/C_2).$$

Quando $n = 1$ (caso do NaCl), e $T = 25^\circ\text{C}$, o potencial fica

$$E_s = 59,1 \log_{10}(C_1/C_2)$$
 (mV)

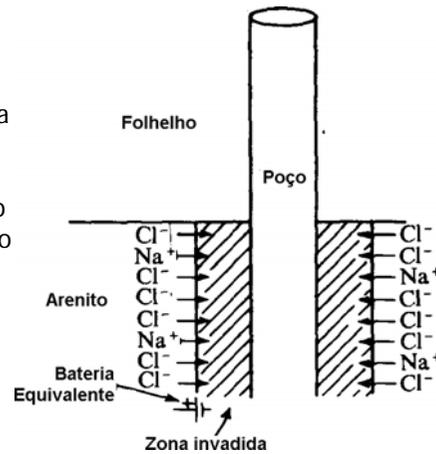
SP em poços para petróleo

- ⌘ Geralmente têm origem nas interfaces dos folhelhos, particularmente entre folhelho-areia.
- ⌘ Potencial de Nernst e de difusão.
- ⌘ Folhelhos são permeáveis aos cátions Na^+ e particularmente impermeáveis aos anions Cl^- .
- ⌘ Assim, um potencial é estabelecido quando Na^+ sai do eletrólito das areias para dentro dos folhelhos, seguido da entrada na água da lama.



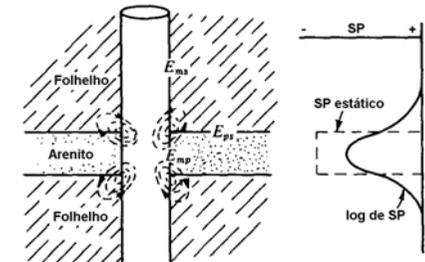
SP em poços para petróleo

- ⌘ Também, um potencial de difusão desenvolve-se na interface entre o filtrado na zona invadida e a água salgada da formação, como resultado da grande mobilidade do Cl^- em relação ao Na^+ , produzindo um balanço líquido em favor do Cl^- para dentro da zona invadida.



SP em poços para petróleo

- ⌘ Formação de células de SP.
- ⌘ Observar que o potencial medido do interior da areia para o poço através do folhelho tem o sinal contrário quando através da zona invadida.



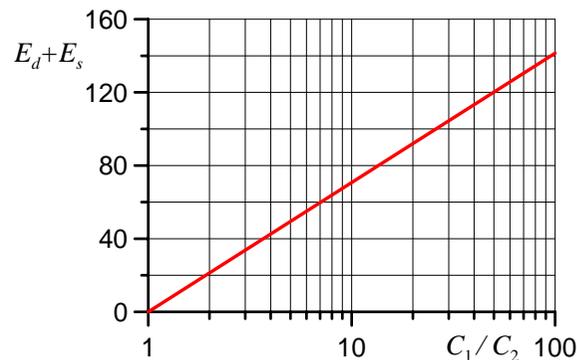
Potencial de membrana combinado com o de difusão

$$E_c = -59,1 \log_{10}(C_1/C_2) - 11,6 \log_{10}(C_1/C_2) - 70,7 \log_{10}(C_1/C_2) \quad (\text{mV})$$

Combinação dos potenciais

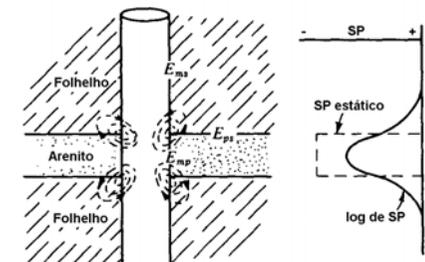
Potencial de membrana combinado com o de difusão

$$E_c = -70,7 \log_{10}(C_1/C_2) \quad (\text{mV})$$



SP em poços para petróleo

- ⌘ Entretanto, em poços, é mais conveniente a seguinte formulação que considera, também, a temperatura.

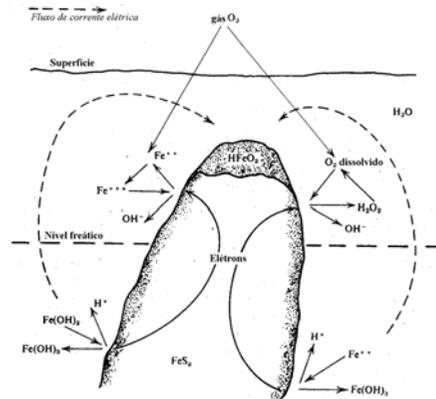


$$E_c = -70,7 \left(\frac{298}{273 + T} \right) \log_{10}(\rho_{mf} / \rho_w) \quad (\text{mV})$$

onde ρ_{mf} é a resistividade do filtrado da lama e ρ_w , resistividade da água original na formação.

Potencial de mineralização

- ⌘ Origem do potencial em mineralizações de sulfeto (Sato e Mooney, 1960).
- ⌘ Duas semi-células com reações eletroquímicas de sinais opostos:
 - a) catódica (acima do nível freático)
 - b) anódica (em profundidade)
- ⌘ Catódica: redução química das substâncias em solução.
- ⌘ Anódica: oxidação do corpo metálico.

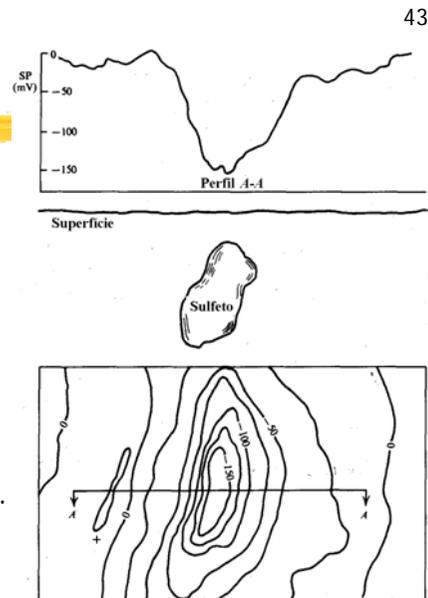


Potencial de mineralização

- ⌘ Apesar do avanço em relação a outros modelos, esta teoria ainda falha (Telford et al, 1978):
- ⌘ Sato e Mooney estimam potenciais máximos para a grafita (0,78 V), pirita (0,73 V) e galena (0,33 V) mas potenciais da ordem de 1,5 V, no campo, têm sido observados sobre zonas grafitosas.
- ⌘ Resultados anômalos tão expressivos assim são atribuídos à combinação das anomalias de zonas mineralizadas adjacentes, ou ao destaque provocado pela coincidência com potenciais elétricos regionais.

SP sobre sulfetos

O máximo negativo ocorre sobre o corpo. Quando a topografia não for plana, o centro se desloca. Usando os conceitos de eletrostática, pode-se estimar modelos com cargas elétricas localizadas.



43

44

Bibliografia e referências

- ⌘ Keller, G. V. e Frischknecht, F. C. (1966) Electrical methods in geophysical prospecting, Pergamon Press.
- ⌘ Luo, Y. e Zhang, G. (1998) Theory and application of spectral induced polarization. Geophysical monograph series: no. 8, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK.
- ⌘ Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. e Keys, D. A., 1978, Applied geophysics. Cambridge University Press.
- ⌘ Ward, S. H. (1990) Resistivity and polarization methods, In: Ward, S. H., Geotechnical and environmental geophysics, Vol. 1, 147-189, Society of Exploration Geophysicists.