

# O Perfil de Potencial Espontâneo

Baseado nas notas de aula do professor Geraldo Girao Nery

# Intro

- Lama necessária para (propriedades controladas)
  - Preservação de seções
  - Evitar desmoronamentos
  - Lubrificar broca
  - Lubrificar a coluna de perfuração
  - Suprir amostras de calha
- Peso da coluna fluida -> pressão hidrostática -> filtração -> dissociação da lama
- Fração líquida penetra radialmente
- Parte sólida -> reboco ou filme

# Origem do Potencial Espontâneo em um Poço

- O perfil de potencial espontâneo é o registro das ddp desenvolvidas em um poço entre filtrado e as águas das formações.
  - Processos eletrocinéticos e eletroquímicos.
- Processo eletrocinético (ou eletrofiltração): movimento de eletrólito no meio permeável
  - Penetração do filtrado devido à pressão da coluna hidrostática.
  - Desprezível em poços rasos (água), relevante em poços profundos.

# Origem do Potencial Espontâneo em um Poço

- Potencial eletroquímico (espontâneo natural): contato de diferentes soluções dentro de um poço.
  - Pares de geração de potencial espontâneo natural: lama-filtrado / filtrado-água de formação / água de formação-folhelho / folhelho-lama.
  - Elo lama-filtrado gera ddp desprezível.
- Elo água de formação-folhelho -> potencial de membrana ( $E_m$ )
- Elo filtrado-água de formação -> potencial de junção líquida ( $E_j$ )

# Potencial de Junção de Líquido ( $E_j$ )

- Aparece devido ao contato entre duas soluções distintas
  - [NaCl].
  - Difusão da mais salina para a menos salina (fem) até atingir o equilíbrio.
  - Movimentação iônica sempre da + para – concentrada.
  - $\text{Cl}^-$  mais veloz que  $\text{Na}^+$ .
- Filtrado condutor de corrente elétrica.
- Contato filtrado-água interporosa gera correntes elétricas naturais.
- Conclusão:  $E_j$  resulta da movimentação de cargas elétricas na zona de contato
  - Requer diferentes mobilidades entre cátions e ânions

# Potencial de Junção de Líquido (Ej)

- Para soluções monovalentes de NaCl

$$Ej = - \left( \frac{v - u}{v + u} \right) \cdot \left( \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \right) \cdot \ln \left( \frac{a_1}{a_2} \right)$$

- sendo: R= 8,314 Joules (constante dos gases);
- T = temperatura absoluta;
- n= valência dos íons envolvidos no processo;
- F = Faraday (nº de Avogadro vezes a carga do elétron = 96.540 Coulomb);
- v = mobilidade do Cl<sup>-</sup>; u = mobilidade do Na<sup>+</sup>;
- Ln = logaritmo natural e
- a<sub>1</sub> e a<sub>2</sub> = atividades das soluções antes e após a diluição, respectivamente.

# Potencial de Junção de Líquido (Ej)

- Atividade da solução é a capacidade de movimentação de cargas iônicas de uma dada solução.
  - Depende da relação entre a concentração do soluto e do solvente. Uma solução concentrada é mais ativa do que uma diluída.
- NaCl
  - $\text{Cl}^- \rightarrow v = 7,91 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s/V}$  e transporta 60% da cargas
  - $\text{Na}^+ \rightarrow u = 5,19 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s/V}$  e transporta 40% da cargas
  - $\text{Cl}^-$  mais ativo/veloz que o  $\text{Na}^+$

# Potencial de Membrana (Em)

- Ej pouco significativo quantitativamente.
  - Ordem de milésimos de volt.
- Potencial de membrana surge na presença de
  - Interlaminações
  - Disseminações de folhelho ou argila
  - E o movimento de íons gera esse potencial de membrana
- Folhelho
  - 60% argilominerais
  - 40% grãos de quartzo, carbonatos, matéria orgânica, minerais – sedimentados com os argilominerais e grãos < 4 mm
- Argilominerais se comportam como membrana seletiva para cargas elétricas.



# Potencial de Membrana (Em)

- Células cristalinas unitárias dos argilominerais apresentam carga periférica negativa.
  - Seco -> íons adsorvidos
  - Em solução -> separação desses íons
- Parte dos cátions permanece solubilizada, parte fica presa aos argilominerais.
  - Repulsão das cargas positivas
- Folhelho que separa duas soluções de distintas concentrações de sais dificulta mobilidade dos cátions mas não dos ânions
- Cada folhelho possui um Em diferente a depender:
  - da composição, tipo e percentual dos argilominerais.
  - Da capacidade de troca catiônica com o meio
- Folhelhos constituídos de illita e esmectita têm um Em superior aos folhelhos caoliníticos ou cloríticos.

# Potencial de Membrana ( $E_m$ )

- Na equação  $E_j = -\left(\frac{v-u}{v+u}\right) \cdot \left(\frac{R.T}{n.F}\right) \cdot \ln\left(\frac{a_1}{a_2}\right)$ , um folheto inibidor parcial da movimentação de cátions faz  $u \rightarrow 0$ , enquanto  $v$  permanece finito.

- Portanto,

$$E_m = -\left(\frac{R.T}{n.F}\right) \cdot \ln\left(\frac{a_1}{a_2}\right)$$

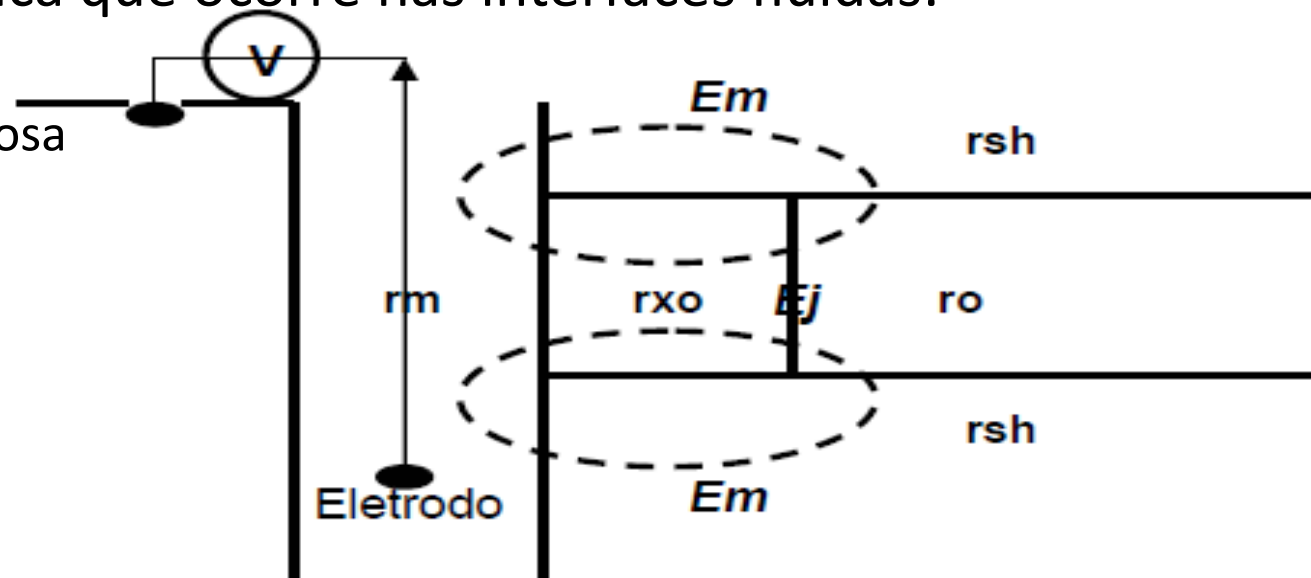
- Transferência de cargas 5x maior que  $E_j$
- Sendo o folheto uma membrana seletiva perfeita, nenhuma carga negativa o atravessará.

# Potencial Espontâneo Estático (SSP)

- O máximo potencial que se desenvolve no circuito lama/rocha/folhelho/lama é denominado de Potencial Espontâneo Estático (ou SSP) e corresponde a soma dos potenciais.
- Como  $E_k \approx 0$ ,

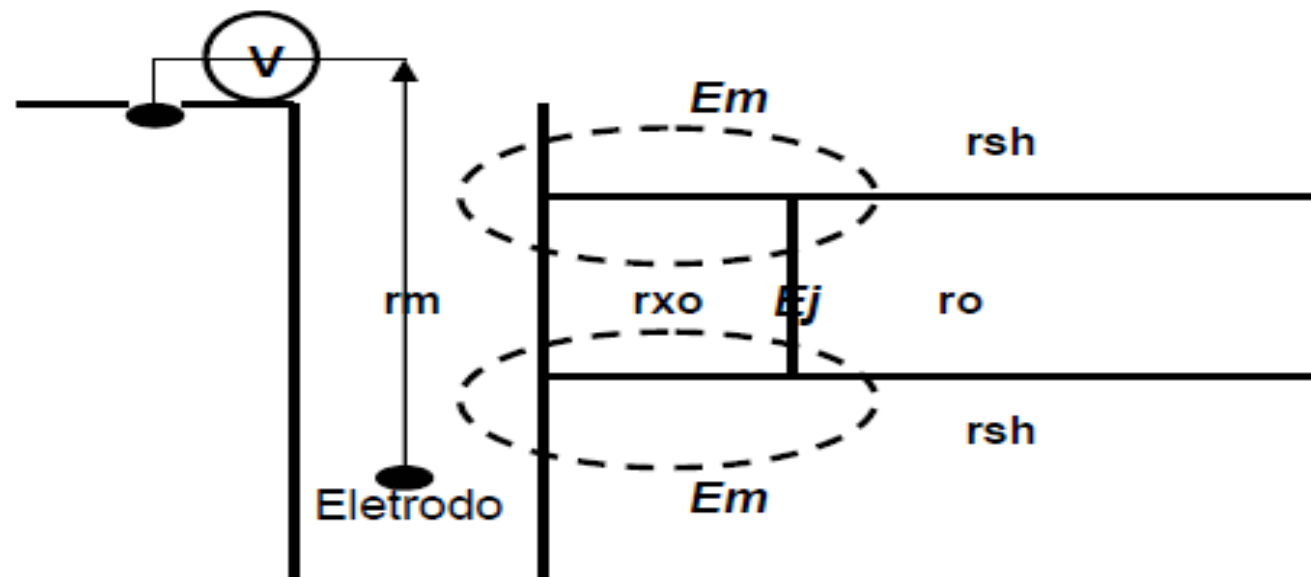
$$SSP = E_j + E_m$$

- O SSP é formado pela queda ôhmica que ocorre nas interfaces fluidas:
  - Fluxo lama -> folhelho
  - Fluxo folhelho -> camada permoporosa
  - Fluxo camada permoporosa -> lama
  - (ou vice versa)



# Potencial Espontâneo Estático (SSP)

- A movimentação de íons será no sentido (horário)  $rm-rxo-ro-rsh-rm$  se a salinidade da lama/filtrado for maior que a da água de formação.
- No sentido anti-horário caso contrário.
- $E_j$  -> diferença de salinidades  $rxo-ro$
- $E_m$  -> tipo de folhelho que se interpõe ao fluxo



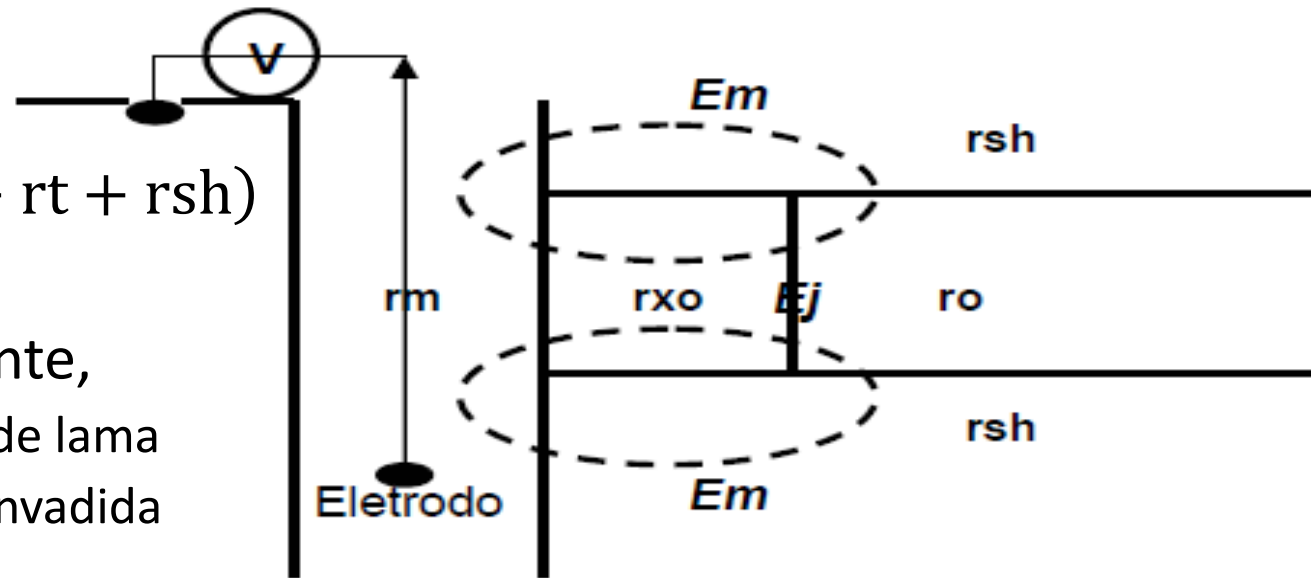
# Potencial Espontâneo Estático (SSP)

- Então

$$SSP = E_j + E_m = i \cdot (r_m + r_{xo} + r_t + r_{sh})$$

- Sendo,  $r_{xo}$ ,  $r_t$  e  $r_{sh}$ , respectivamente,

- $r_m$  -> resistência elétrica da coluna de lama
- $r_{xo}$  -> resistência das zonas lavada/invadida
- $r_t$  -> resistência da camada virgem
- $r_{sh}$  -> resistência da camada do folhelho adjacente
- $i$  -> a corrente que se desenvolve devido ao fluxo iônico provocado pela diferença de concentração entre as soluções filtrado e água da formação.

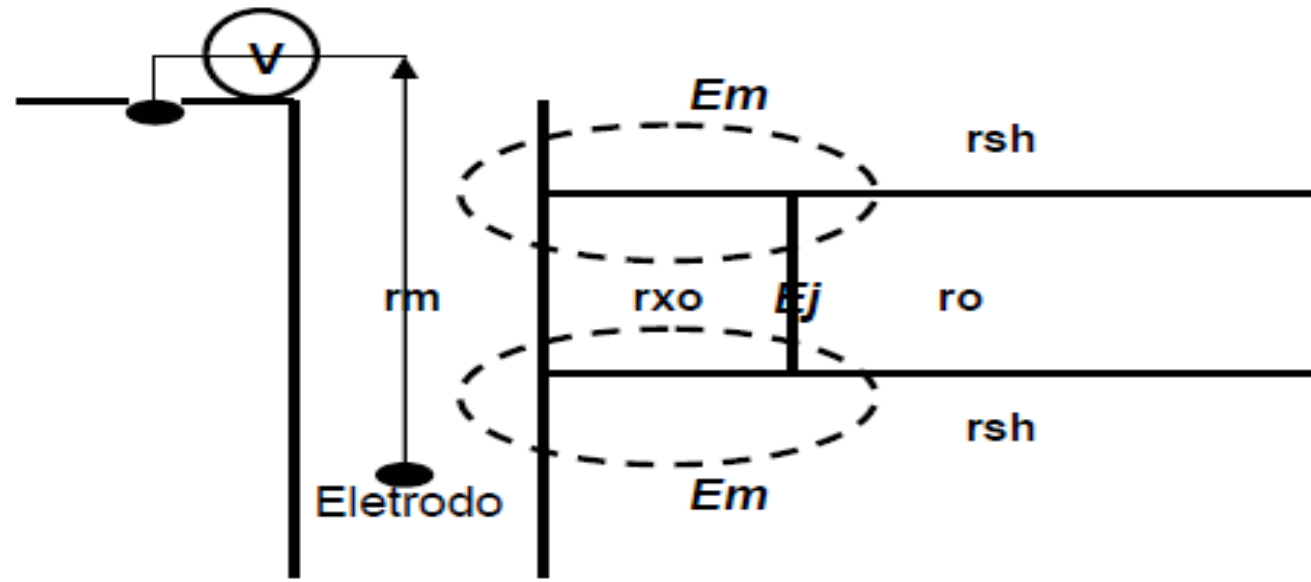


# Potencial Espontâneo Estático (SSP)

- Não se registra SSP em um poço, e sim uma fração de SSP.
- O perfil SP registra o potencial que se desenvolve na lama.

$$SP = i \cdot r_m$$

- Condução de corrente em solução eletrolítica -> participação de todos os sais dissolvidos.
- Dados medidos em laboratório são deveras mais completos.



# A medida SP em um poço

- Perfilagem opta pela abordagem termodinâmica do problema

$$SSP = Em + Ej = -k \cdot \log \left( \frac{a_w}{a_{mf}} \right)$$

- sendo K uma constante que depende da temperatura da camada e engloba todos demais elementos das equações citadas, inclusive transformação de logaritmo natural para decimal ( $K = 65 + 0,24 \times \text{temperatura da camada em } ^\circ\text{C}$  ou  $K = 61 + 0,133 \times \text{temperatura em } ^\circ\text{F}$ ).
- $a$  é a atividade da solução (w -> água; mf -> filtrado)
- Para baixas [NaCl], a atividade química  $a \propto 1/R$ , de modo que reescrevemos a equação acima como

$$SSP = -k \cdot \log \left( \frac{R_{mf@FT}}{R_w} \right)$$

- $R_{mf@FT}$  é a resistividade do filtrado à temperatura da profundidade que se escolheu para o cálculo de  $R_w$

# A medida SP em um poço

- Linearidade entre atividades e resistividades apenas para  $R > 0.1 \Omega \cdot m$
- Muito sal abaixo deste limite
  - Maioria das águas das rochas sedimentares profundas.
- Modificações empíricas na fórmula
- Onde NaCl não seja dominante (águas superficiais), relação complexa entre atividades e resistividades.
- Um modelo é:

$$SSP = -K \cdot \log \left[ \frac{(a_{Na} + \sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}})_w}{(a_{Na} + \sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}})_{mf}} \right]$$

- Inexiste, até o momento, bibliografia que relacione as atividades de todos os cátions bivalentes com as suas respectivas resistividades, a exemplo do NaCl.
- Transformação para concentrações equivalentes a soluções de NaCl.



# Efeitos Ambientais ou Fatores que Afetam a Curva do Potencial Espontâneo

- $SSP = E_m + E_j + E_k$
- SP é fração do SSP

$$SP = \frac{SSP}{1 + \left( \frac{rxo + rt + rsh}{rm} \right)}$$

- sendo rxo a resistência elétrica da zona lavada, rt da zona virgem, rsh do folhelho adjacente e rm da lama.
- Desenvolvida a partir da teoria elétrica do SP
  - Trajetórias e áreas transversais das camadas
  - Difícil de se estabelecer em um perfil
- Portanto, a curva SP tem a ótica termodinâmica.
- A ótica elétrica mostra fatores que afetam a curva.

# Efeitos Ambientais ou Fatores que Afetam a Curva do Potencial Espontâneo

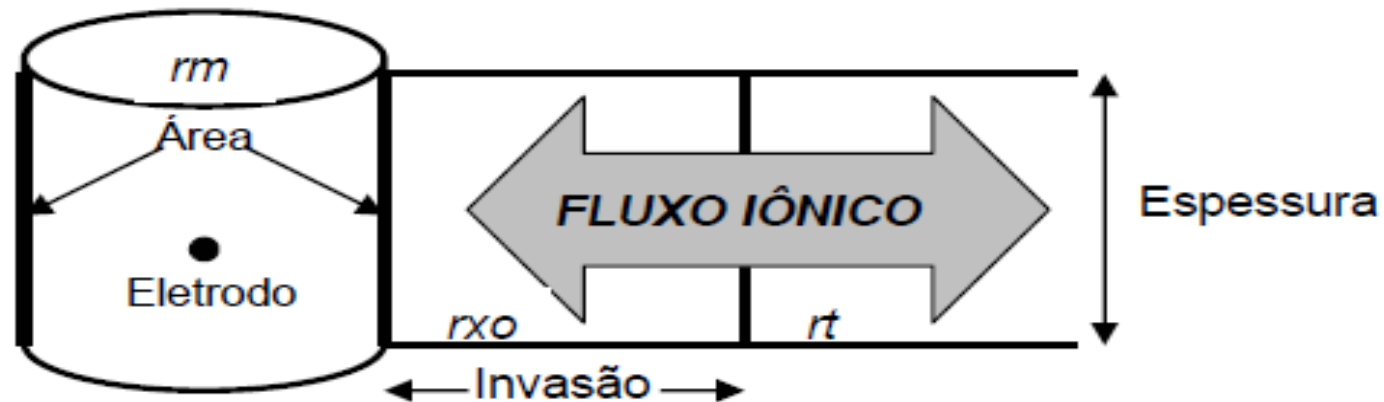
- De  $SP = \frac{SSP}{1 + \left(\frac{rxo+rt+rsh}{rm}\right)}$ , observa-se que  $SP \cong SSP$  se  $\left(\frac{rxo+rt+rsh}{rm}\right) \rightarrow 0$
- Fatores alheios influenciam a forma e amplitude da curva SP.
  - Condições do poço: diâmetro do poço, diâmetro de invasão, tipo de lama e espessura das camadas.
- Resistência da lama não é alterada
  - Fatores econômicos
  - Lama com resistividade alta (isolante) não permite o fluxo de íons entre a lama e a água de formação.
- Deve-se raciocinar com rxo, rt e rsh

$$r_j = R_j \frac{L_j}{A_j}$$

na qual  $j$  representa a  $j$ -ésima zona estudada.

# Efeitos Ambientais ou Fatores que Afetam a Curva do Potencial Espontâneo

- Correntes eletroquímicas movimentam-se entrando ou saindo das camadas
  - $A_j$  -> superfície interna da parede do poço
  - $L_j$  -> profundidade de invasão da camada em questão



# Efeitos Ambientais ou Fatores que Afetam a Curva do Potencial Espontâneo

Considerando-se  $r_m$  constante, as seguintes situações podem ser observadas:

1. Quando se compara duas camadas idênticas, uma com menor espessura que a outra, a de maior espessura apresentará um SP mais desenvolvido, independentemente da relação  $R_{mf} / R_w$ .
2. O desmoronamento do poço atua diretamente sobre o volume e a resistência da lama. Portanto, quanto mais desmoronado o poço, menor a amplitude do SP.
3. O diâmetro de invasão de uma camada permoporosa qualquer atua diretamente sobre a intensidade da corrente ( $i_{rm}$ ) no poço. Quanto mais profunda a invasão, menor a amplitude do SP.

# Efeitos Ambientais ou Fatores que Afetam a Curva do Potencial Espontâneo

(continuação...) Considerando-se  $r_m$  constante, as seguintes situações podem ser observadas:

4. Quando se usa lama muito salgada, as correntes permanecem dentro do poço, em curto circuito, e a curva não se desenvolve totalmente.
5. Os hidrocarbonetos aumentam consideravelmente a resistência das rochas, de sorte que o termo  $r_t/r_m$  dentro do parêntese não pode ser desprezado. Comparando-se uma mesma camada reservatório, o SP observado na zona com hidrocarboneto é um pouco menor que o observado na zona com água.
6. A argilosidade dispersa em uma camada permoporosa qualquer atua diretamente sobre a movimentação iônica, barrando ou atrasando a passagem dos cátions.

Para finalizar, lembrar que se estudou os 6 fatores isoladamente, o que pode não ocorrer na maioria dos casos. Uma camada real pode ter pequena espessura, estar desmoronada, ter argila e hidrocarboneto, tudo ao mesmo tempo.

# Qualidade da Curva SP

- De frente a folhelhos de iguais características petrofísicas, a curva do SP mostra uma tendência a um valor constante denominado de linha base dos folhelhos (LBF).
- De frente a camadas permeáveis (onde ocorre invasão do filtrado), a curva apresenta deflexões para a direita quando o filtrado for mais salgado do que a água intersticial e para a esquerda, quando a água intersticial for mais salgada que o filtrado.
  - $SSP = -k \cdot \log\left(\frac{R_{mf@FT}}{R_w}\right)$
- O sinal do SP é, portanto, função entre o contraste de atividades, ou resistividades, entre a água da formação e o filtrado da lama.
- Por convenção, dá-se o sinal positivo para as deflexões à direita da LBF e negativo, para a esquerda.

# Qualidade da Curva SP

- Camadas impermeáveis não mostram movimentações no SP, sinalizando ausência de invasão ou difusão de sais.
- Também não há movimentação nas camadas com igualdade de salinidade entre o filtrado e a água ( $\log \{R_{mf}/R_w\} = 0$ ).
- Em ambos os casos o termo LBF não se aplica. Quer dizer, tanto uma camada impermeável como uma rocha permeável pode mostrar uma mesma linha base, desde que esta última tenha água de salinidade igual à do filtrado da lama.
- É um erro comum, portanto, computar uma espessura maior que a real para uma camada de folhelho, podendo vir a descartar possíveis reservatórios.
- Dúvidas de interpretação são tiradas com um maior número de perfis possíveis. Jamais usar uma só curva, ou um só perfil, para conclusões intempestivas.

# Qualidade da Curva SP

Sendo o SP o resultado da circulação de uma corrente continua e bastante fraca (mV), ele poderá ser perturbado ou influenciado por quaisquer correntes espúrias (ruídos), que ocorram na vizinhança do poço, induzidas por fontes naturais e/ou artificiais.

- Armadura de aço do cabe de perfilagem, desenvolve efeito bateria (acúmulo de cargas).
  - Cabo estacionário, efeito estático -> deslocamento da curva como um todo
  - Cabo em movimento, potencial variável -> impossível quantificar
- Demais fontes de ruídos:
  - Magnetização do cabo
  - Revestimento ou peças metálicas (próximos ou dentro do poço)
  - Redes de alta tensão
  - Tempestades magnéticas
  - Movimentação de fluidos dentro de um poço (em produção)
  - Rádio
  - Etc

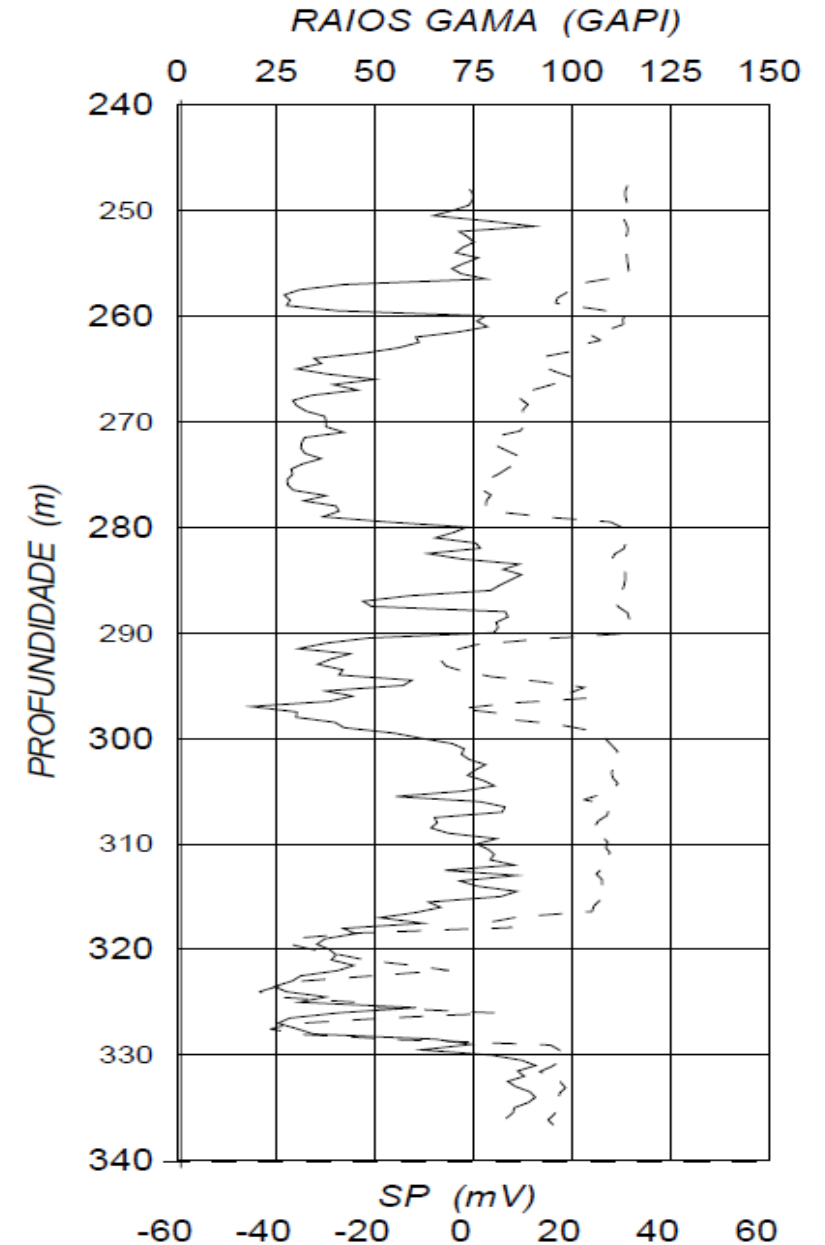


# Interpretação do Perfil SP

- Para se calcular corretamente a  $R_w$  de uma camada a uma profundidade conhecida, deve-se primeiramente tomar algumas precauções, para se evitar o uso de leituras de SP (fração aparente do total do circuito) no lugar do SSP (valor total ou estático).
- Assim a escolha deve recair sobre aquelas camadas (respeitando sempre os limites de topo e base de uma mesma formação, ambiente deposicional, etc.), que:
  - apresentam baixas resistividades (indicativa de uma possível zona com  $S_w = 100\%$ )
  - que tenham espessuras maiores que 5 metros
  - argilosidade igual ou tendendo a 0%
  - e que não esteja desmoronada

# Interpretação do Perfil SP

- Perfil RG (cheia) e SP (pontilhada)
  - Arenitos e folhelhos
- Folhelhos são a base prática para interpretação
  - Similar ao perfil RG
- Correlação entre RG e SP
  - Folhelhos para a direita
  - Areias para a esquerda
- 1º passo: controlar qualidade da curva
- 2º passo: definição da LBF, tangente à média dos valores máximos dos folhelhos
  - CUIDADO na escolha da LBF: deve corresponder a um tipo de evento/formação.



# Interpretação do Perfil SP

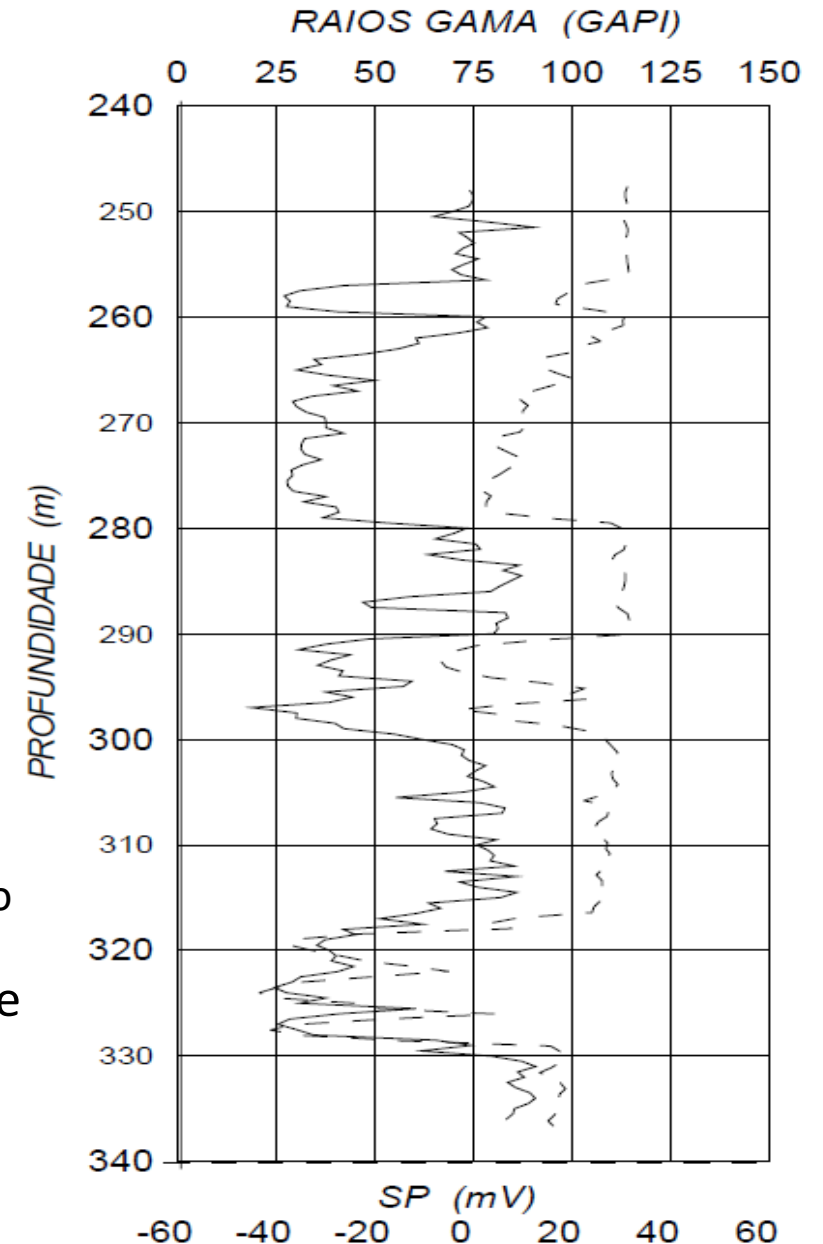
- LBF = + 30 mV
- Este valor deve ser definido como o de zero de potencial (0 mV)
- Para SP negativo, de acordo com

$$SSP = -k \cdot \log \left( \frac{Rmf@FT}{Rw} \right)$$

$Rmf > Rw$

ou seja, filtrado da lama deve ser mais doce do que a água de formação.

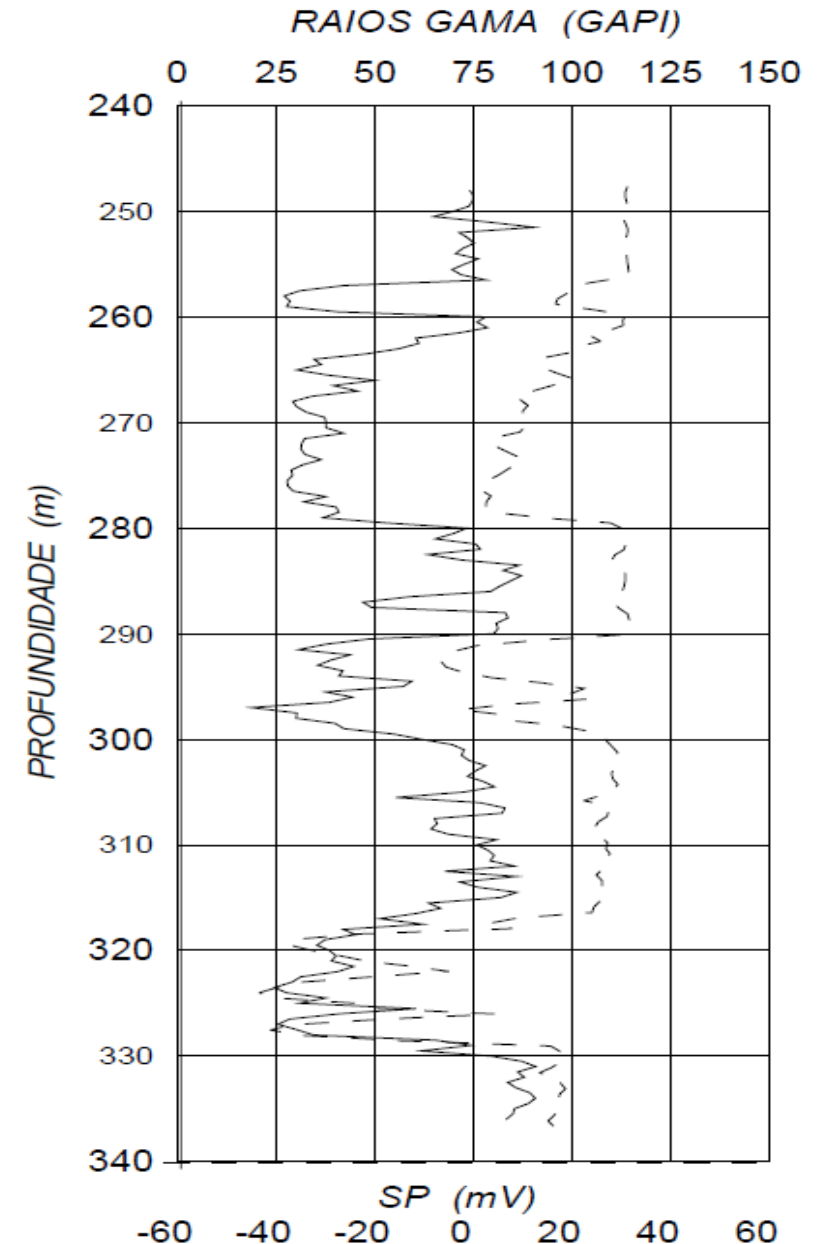
- Arenitos sempre à esquerda da LBF
  - Maior concentração de cargas negativas está na água de formação (mais salgada)
- Interpretar o SP resume-se a calcular resistividade/salinidade da água intersticial do arenito localizado entre 262 e 279 metros com a equação acima.



# Interpretação do Perfil SP

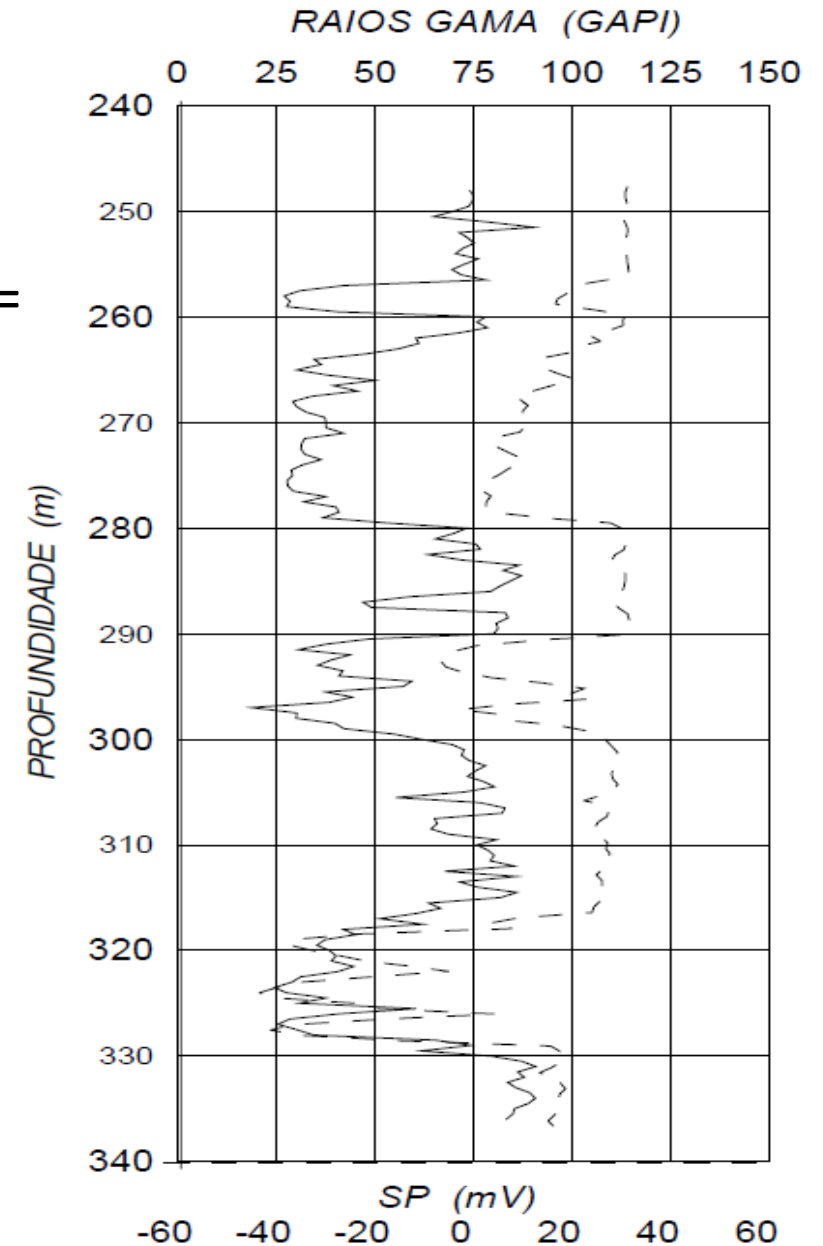
São os seguintes os passos para a interpretação quantitativa da curva:

1. Definir a LBF (+30 mV)
2. Ler a deflexão da curva no ponto mais afastado da LBF (278m = +3mV) e calcular:  $SSP = +3 - +30 = -27$  mV ;
3. Ler no cabeçalho do perfil o valor de Rmf e sua respectiva temperatura. Neste exemplo, Rmf = 10 Ohm.m @ 25 °C, que é a temperatura da superfície;
4. Calcular a temperatura na profundidade escolhida para a leitura (FT@278m):  $FT = \text{Profundidade} \times \text{Gradiente Geotérmico} + \text{Temperatura da Superfície} = 278 \text{ m} \times (1\text{m} / 30 \text{ }^{\circ}\text{C}) + 25 \text{ }^{\circ}\text{C} = 34,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;



# Interpretação do Perfil SP

5. Calcular o valor do  $R_{mf}@FT$ , i.e., @ 278m:  $R_{mf} = 8,33 \text{ Ohm.m}@34,3 \text{ °C}$  (aumenta a temperatura, diminui a resistividade);
6. Calcular a constante K da equação:  $K = 65 + 0,24 \times FT = 73,232$
7. Usar  $SSP = -k \cdot \log\left(\frac{R_{mf}@FT}{R_w}\right)$  para finalizar o problema:  $R_w = 3,56 \text{ Ohm.m}@34,3 \text{ °C}$ .
8. Considerando-se que a camada exemplo tenha uma água rica em NaCl, a resistividade calculada corresponderá a uma salinidade de 1.425 ppm.



# Interpretação da curva do SP na presença de soluções bivalentes

- A interpretação realizada anteriormente -> NaCl
  - Toda a teoria do SP desenvolvida para tais casos
  - NaCl predominante em campos de petróleo
- Para sais bivalentes:

$$• \text{SSP} = -K \cdot \log \left[ \frac{(a_{Na} + \sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}})_w}{(a_{Na} + \sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}})_{mf}} \right]$$

# Cálculo da Argilosidade (VSH)

- A amplitude do SP diminui a proporção em que aumenta linearmente a quantidade de argila das camadas.
- Assim, a equação definida por meio da figura poderá ser utilizada para o cálculo da argilosidade VSHSP

$$VSHSP = \left( \frac{SP - SP_{min}}{SP_{max} - SP_{min}} \right)$$

- A utilização desta equação é simples, bastando lembrar que o SP é o valor realmente lido em na camada de interesse,  $SP_{max}$  é o valor para a camada com o maior valor de SP e  $SP_{min}$  é o valor de SP na camada mais limpa possível, considerando todos os arenitos.