

# Perfis com Eletrodos Galvânicos

# Introdução

- Ao aplicarmos uma diferença de potencial (ddp)  $V$  em um resistor  $r$ , há a circulação de uma corrente elétrica  $i$  através deste.  $V$ ,  $r$  e  $i$  se relacionam pela Lei de Ohm, dada por

$$V = r \cdot i$$

- A resistividade  $R$  de um resistor  $r$ , cujo comprimento é  $l$  e área de seção transversal  $A$  é dada por

$$R = r \cdot \frac{l}{A}$$

# Introdução

- Combinando essas duas equações, a resistividade pode ser obtida por

$$R = \frac{V}{i} \cdot \frac{A}{l}$$

na qual a ddp é a diferença de potencial entre duas esferas equipotenciais quaisquer, como na figura abaixo.

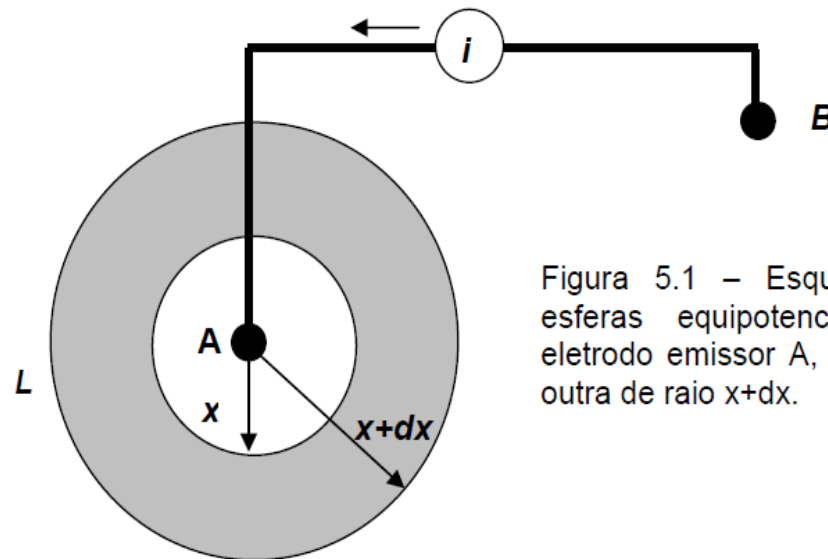
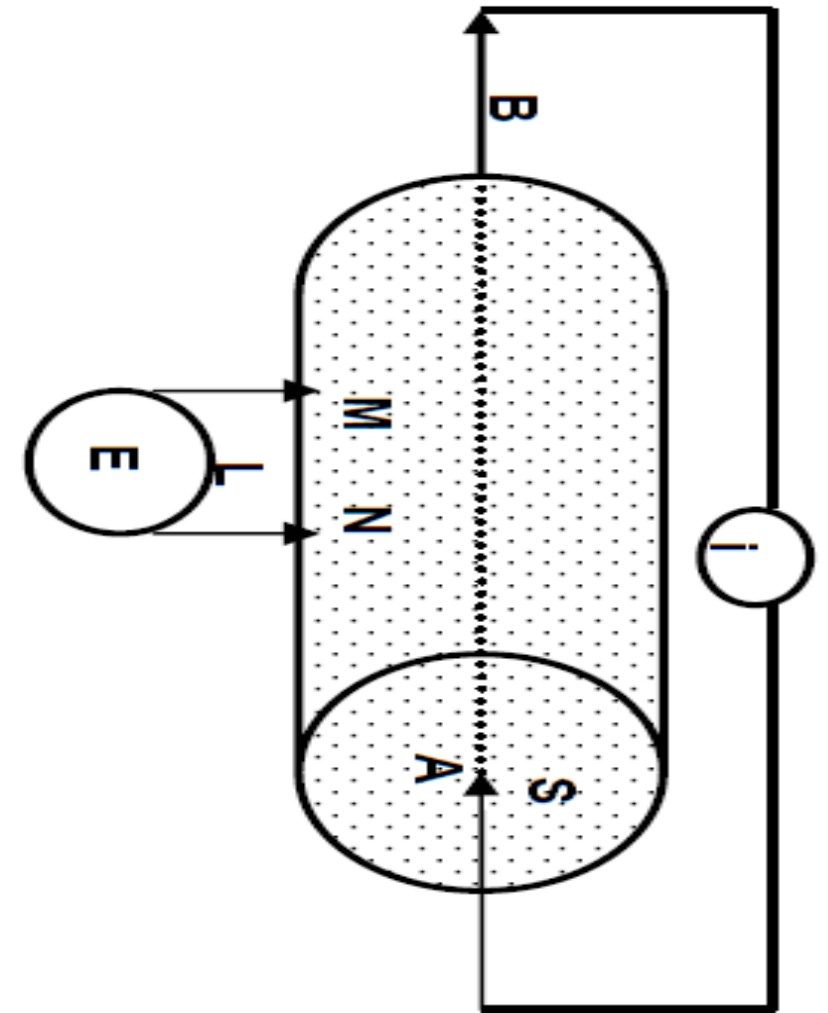


Figura 5.1 – Esquema mostrando duas esferas equipotenciais, concêntricas ao eletrodo emissor A, sendo uma de raio  $x$  e outra de raio  $x+dx$ .

# Introdução

- Os perfis elétricos com eletrodos galvânicos podem ser:
  - **macrovolumétricos** ou
  - **microvolumétricos**,
- podendo ser
  - **monoeletrodos** ou
  - **multieletrodos**.
- Os sistemas monoeletrodos funcionam com dois eletrodos apenas, conforme a figura anterior. Os sistemas multieletrodos podem ter uma configuração conforme a figura ao lado, com 4 eletrodos.



# Introdução

- Os **monoeletrodos** devem ser utilizados para correlação entre poços, definição de variações litológicas, determinação da espessura das camadas e, eventualmente, identificação de intervalos fraturados em rochas cristalinas ou de porosidade matricial nula. Conclusão - **são perfis de natureza qualitativa, ensejando quantificações puramente especulativas.**
- No sistema **multieletrodos**, há um emissor A e um receptor B de corrente, e os eletrodos M e N servem para medição.

# Sistemas Monoeletrodos

- Em desuso atualmente
- Influenciado fortemente pelo volume e resistividade da lama
- Em desmoronamento/cavernas/fraturas → mede apenas a lama
- Caso  $R_t > R_m$  → curto-circuito

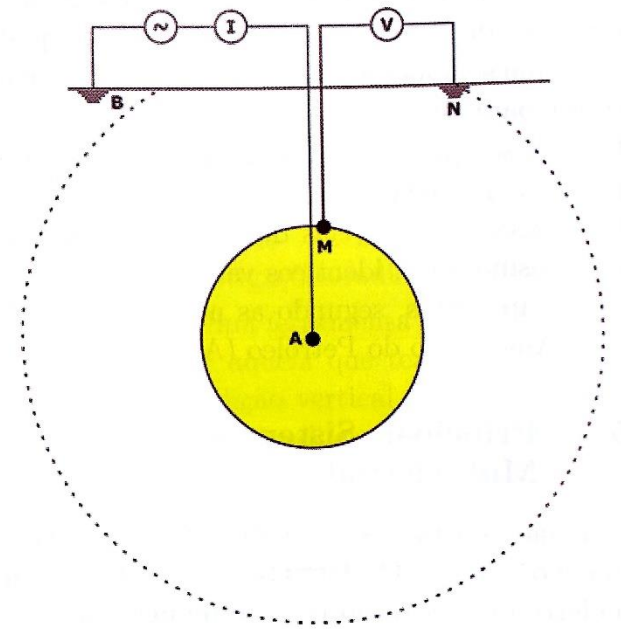
## Uso para

- Correlação entre poços
- Definição de variação litológica
- Determinação de espessura de camadas
- Identificação de intervalos fraturados em rochas cristalinas ou de porosidade matricial nula

# Sistemas Multieletrodos / Macrovolumétricos

- Dois são os arranjos principais: o normal e o lateral.
- O Macro Sistema Normal tem:
  - o eletrodo de retorno (B) e o de medição (N) posicionados a uma grande distância de A e M (na realidade, N e B ficam próximos à, ou na, superfície), portanto, no infinito elétrico.
  - Este sistema mede o potencial entre A e M e está subdividido em:
    - Normal Curto (distância AM igual a 16 polegadas)
    - e Normal Longo (distância AM igual a 64 polegadas).
  - Em ambos os casos as resistividades aparentes normal curta (denominadas de **RSN ou R16**) e longa (**RLN ou R64**) serão dadas por:

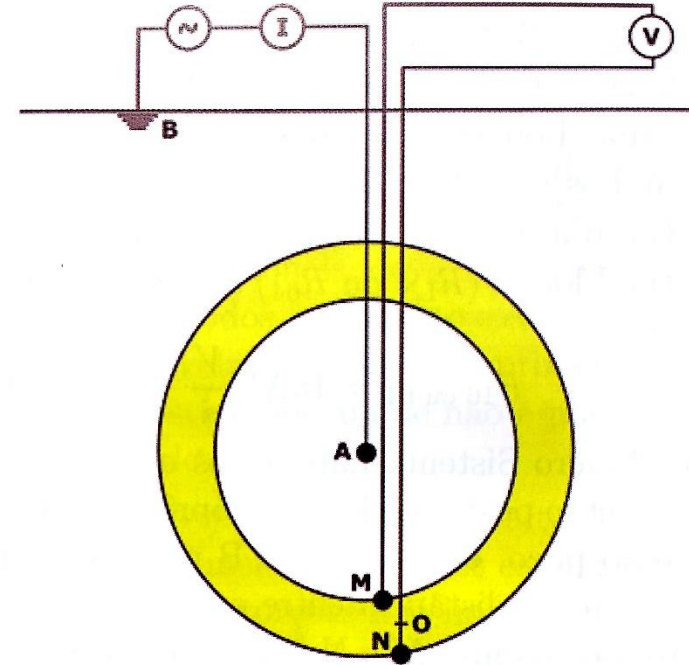
$$R_{16 \text{ ou } 64} = 4\pi \overline{AM} \cdot \frac{V}{i}$$



# Sistemas Multieletrodos / Macrovolumétricos

- No Macro Sistema Lateral:
  - os eletrodos (A, M e N), estão posicionados na própria sonda que desce ao poço, enquanto que “B” permanece na superfície.
  - A distância entre o eletrodo “A” e o ponto médio entre M e N é de 18 pés e 8 polegadas, daí sua também denominação de R18.8.
  - Este sistema mede o diferencial de potencial entre as esferas que passam em M e N.
  - Nesse caso a resistividade aparente lateral (**R<sub>Lat</sub> ou R18.8**) será:

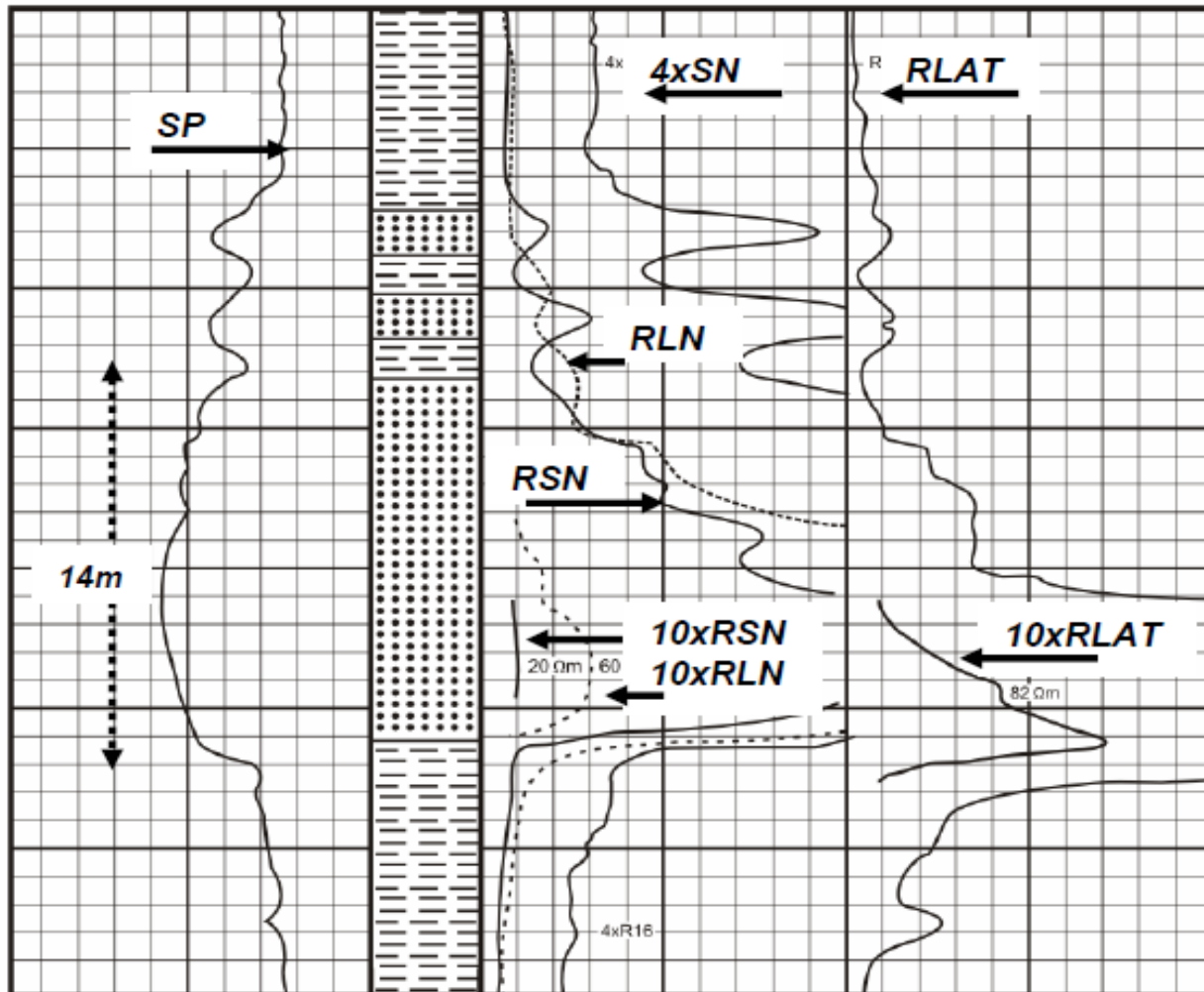
$$R_{LAT \text{ ou } 18.8} = \frac{4\pi V}{i \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right)}$$





- Teoricamente, em meio homogêneo, a RSN tem uma resolução radial da ordem de 16" (0,4064m) a partir do eixo da ferramenta, a RLN de 64" (1,6256m) e a RLAT de 18 pés e 8" (5,6896m). Compreende-se que para que as três citadas curvas leiam dentro de uma mesma camada, ela deverá ter no mínimo a espessura do dobro da maior investigação vertical (aproximadamente 12 metros). Caso contrário, cada curva realizará leituras verticais e radiais diferentemente e influenciadas pelas camadas sobre e sotopostas, prejudicando os cálculos quantitativos e as estimativas qualitativas.
- Portanto, a ferramenta ideal de resistividade deve ser aquela que tenha uma mesma investigação vertical (resolução vertical ou de espessura) e diferentes profundidades de investigação radial (resolução lateral).

# Sistemas Multielectrodos / Macrovolumétricos



# Sistemas Multieletrodos / Macrovolúmetricos

- Como, de um modo geral, o meio em que os eletrodos estão localizados não é eletricamente homogêneo, nem uniforme (lama + rochas), as leituras, em qualquer um dos sistemas elétricos discutidos acima, dependerá das resistividades radialmente dispostas (ou em série) entre os eletrodos A e B.
- Isto é: lama ( $R_m$ ) + reboco ( $R_{mc}$ ) + zona invadida pelo filtrado da lama ( $R_{xo}$ ) + zona virgem ( $R_o$  ou  $R_t$ ) + demais camadas entre os dois eletrodos.

# Sistemas Multieletrodos / Macrovolúmetricos

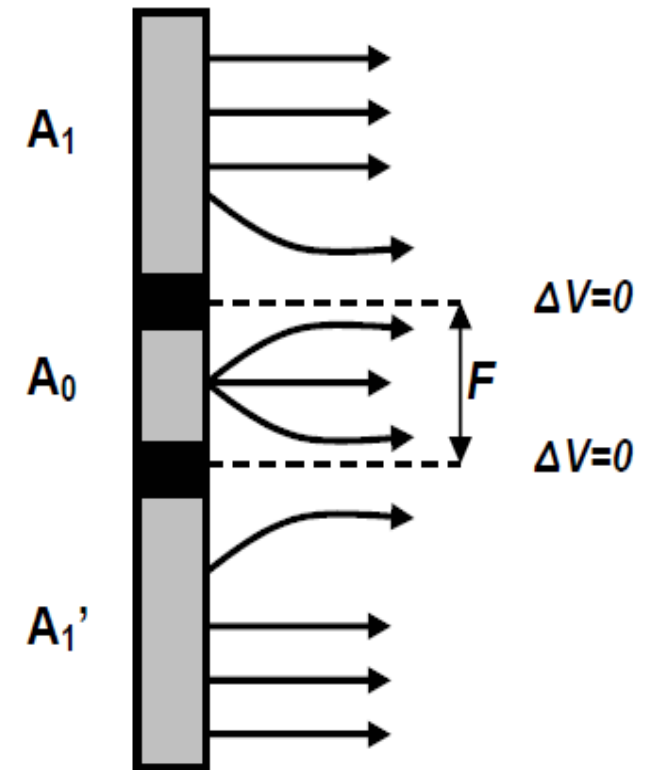
- Usos
  - Correlação entre poços
  - leituras aproximadas de  $R_{xo}$  (RSN) e  $R_i$  (RLN)
  - leitura aproximada de  $R_t$  (RLAT) → camadas espessas
  - análise qualitativa de zonas com água e/ou hidrocarbonetos (espessuras  $\geq 12$  m).
- Problemas
  - Poços com lama salgada ( $\geq 35.000$  ppm)
  - camadas finas ( $\leq 12$  metros)
  - distorções das linhas de fluxo de corrente pela falta de isotropia do meio ambiente
  - correções exageradas para a obtenção de  $R_t$  e/ou  $R_{xo}$
  - Perfil de natureza mais qualitativa que quantitativa.

# Sistemas Elétricos Focalizados

- Sistemas desenvolvidos a fim de focalizar a corrente elétrica para dentro da camada, de modo que essa não se disperse e fatores ambientais não tenham grande interferência na medida.

# Sistemas Eléctricos Focalizados

- Tal sistema consistia:
  - em um eletrodo cilíndrico central de corrente ( $A_0$ ), com potencial fixo,
  - posicionado entre dois outros ( $A_1$  e  $A'_1$ ), monitorados e mantidos com o mesmo potencial de  $A_0$ .
  - Tal configuração promove um bloqueio eléctrico, onde as linhas de correntes saídas de  $A_0$  não ultrapassam no sentido acima ou abaixo das posições de  $A_1$  e  $A'_1$
  - sendo, portanto, forçadas para dentro das camadas.
  - Este sistema proporciona maior profundidade de investigação radial que a observada nos macro perfis eléctricos (ES ou EL).

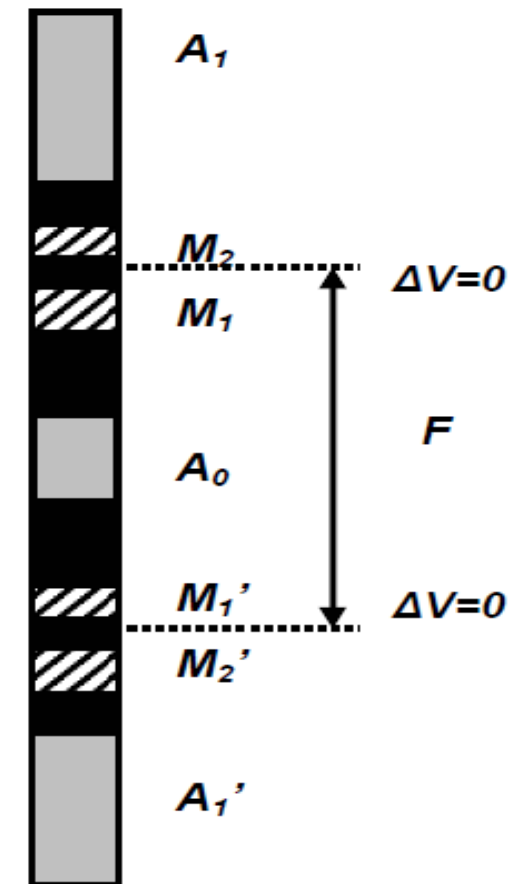


# Sistemas Elétricos Focalizados

- Embora a medida da resistividade tenha sido melhorada com esta configuração (em relação aos perfis elétricos convencionais), havia um problema denominado de SBR (“shoulder bed resistivity”) ou influência das resistividades das camadas sobre e sotopostas aquelas defronte a  $A_0$ , principalmente se resistivas.
- A corrente injetada por  $A_0$  perdia a focalização ( $\Delta V \neq 0$ ) e migrava em busca das camadas mais condutivas, ainda que o sistema de monitoramento  $A_1$ - $A_0$ - $A'_1$  estivesse acionado, para retorno a situação anterior ( $\Delta V = 0$ ).
- Além do mais, o comprimento dos eletrodos interferiam com as curvas de indução e SP, caso estivessem acopladas.

# Sistemas Elétricos Focalizados

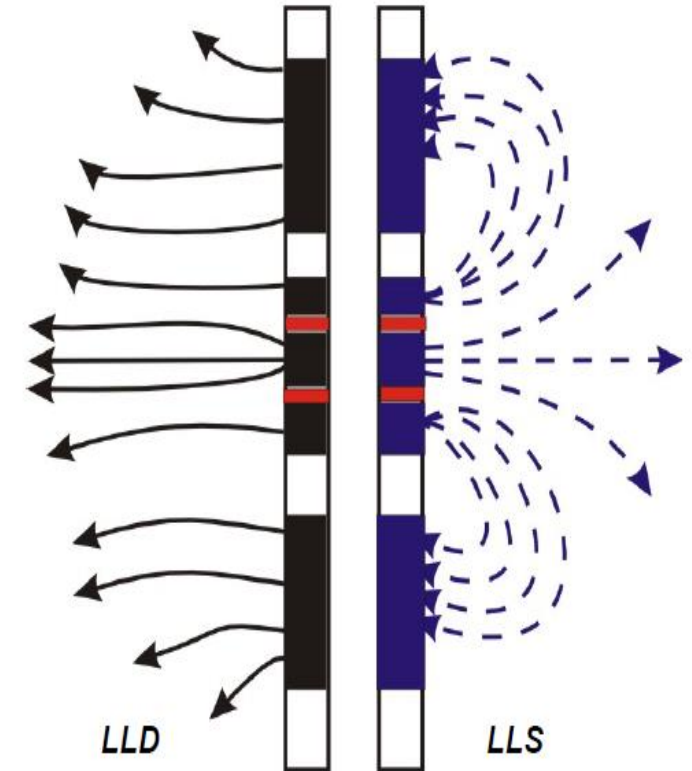
- Devido a tais dificuldades foi desenvolvido o LL-7 (figura ao lado):
  - com sete eletrodos cilíndricos bem mais curtos.
  - Dois dos eletrodos monitoram a corrente acima ( $M_2$  e  $M_1$ ) e abaixo ( $M_2'$  e  $M_1'$ ) do emissor  $A_0$ .
  - Dois outros ( $A_1$  e  $A_1'$ ), fazem um bloqueio, porque têm suas correntes ajustadas de tal modo que o potencial entre os monitores de cada par seja zerado, criando uma superfície equipotencial bastante próxima daquela do eletrodo central.
  - Em ambos os Lateroperfis, o potencial é medido entre um dos eletrodos monitores e o eletrodo central.
  - $F$  manteve igual distância da ferramenta anterior, isto é, 32 polegadas.





# Sistemas Elétricos Focalizados

- Posteriormente foi desenvolvido o DLL (Duplo Lateroperfil):
  - onde dois sistemas LL-7 foram montados em uma mesma ferramenta,
  - usando distintas frequências de trabalho (35 Hz e 280 Hz)
  - denominados, respectivamente, de LLD (“Deep”) e LLS (“Shallow”).



# Sistemas Elétricos Focalizados

- A medição das resistividades é feita por um sistema denominado de potência constante, no qual, tanto a corrente de medição como a voltagem variam, permanecendo constante o produto entre elas.
- A equação que rege os lateroperfis é dada por:

$$R = K \cdot \frac{V_o}{i_0}$$

na qual K é uma constante geométrica ou constante ferramental.

# Sistemas Elétricos Focalizados

Temos que:

- caso  $i_o$  seja constante (LL-3 e LL-7), então  $V_o$  será diretamente proporcional à resistividade medida. Para tanto, basta a leitura de  $V_o$  para a sua resolução;
- caso  $V_o$  seja constante (LL-3 e as ferramentas de focalização esférica, a discutir mais adiante), então  $i_o$  será diretamente proporcional à condutividade e inversamente proporcional à resistividade, e
- caso  $V_o$  e  $i_o$  sejam variáveis (LLD e LLS), então se mede tanto  $V_o$  como  $i_o$ , as quais devem resultar em um valor constante (“constant power”).

# Sistemas Elétricos Focalizados

- **O principal uso dos lateroperfis é para a obtenção de  $R_t$  das camadas.**
- É uma ferramenta que lê resistividades em série. Como o erro de leitura é muito baixo, eles são recomendados para altas resistividades e lamas condutivas (base de sal).
- É recomendável o uso de uma curva de  $R_{xo}$  para que se possam efetuar correções ambientais nas leituras rasa e profunda (DLL), por meio dos gráficos conhecidos como “Tornados”.

# Perfis de Microresistividade

- Os macroperfis de resistividades visam investigar grandes volumes de rocha para a obtenção da resistividade das zonas virgens das camadas ( $R_t$ ).
- Os perfis de microresistividade são miniaturas das macroferramentas.
- Tal artifício, por conseqüência, diminui sensivelmente o raio de investigação e investiga apenas as zonas próximas às paredes do poço ( $R_{mc}$  e  $R_{xo}$ ).
- Existe uma total analogia entre os princípios físicos, configurações e medições das macro e microferramentas.

# Microperfil Eléctrico (MEL)

- O Microperfil Eléctrico (MEL) produz duas curvas respostas:
  - a primeira é a Microinversa (MI – microlateral de dimensões reduzidas -> profundidade de investigação de 1,5”), bastante influenciada pela resistividade do reboco ( $R_{mc}$ ).
  - A segunda é a Micronormal (MN – macronormal de dimensões reduzidas -> profundidade de investigação de 2”), influenciada tanto por  $R_{mc}$  quanto  $R_{xo}$ , tendendo a  $R_{xo}$ .

# Interpretação Qualitativa do Microperfil

- Uma zona impermeável (folhelho, anidrita, etc.)
  - não sofre invasão nem apresenta zonas de separação fluida.
  - As curvas registradas pelo Microperfil, nesse caso, deverão ter, aproximadamente, o mesmo valor de resistividade da camada.
  - Se for um folhelho não consolidado, com bastante água, ambas resistividades serão baixas.
  - Caso seja uma anidrita, uma dolomita ou um calcário, impermeáveis, ou rocha de baixa porosidade, as leituras de ambas curvas serão altas.

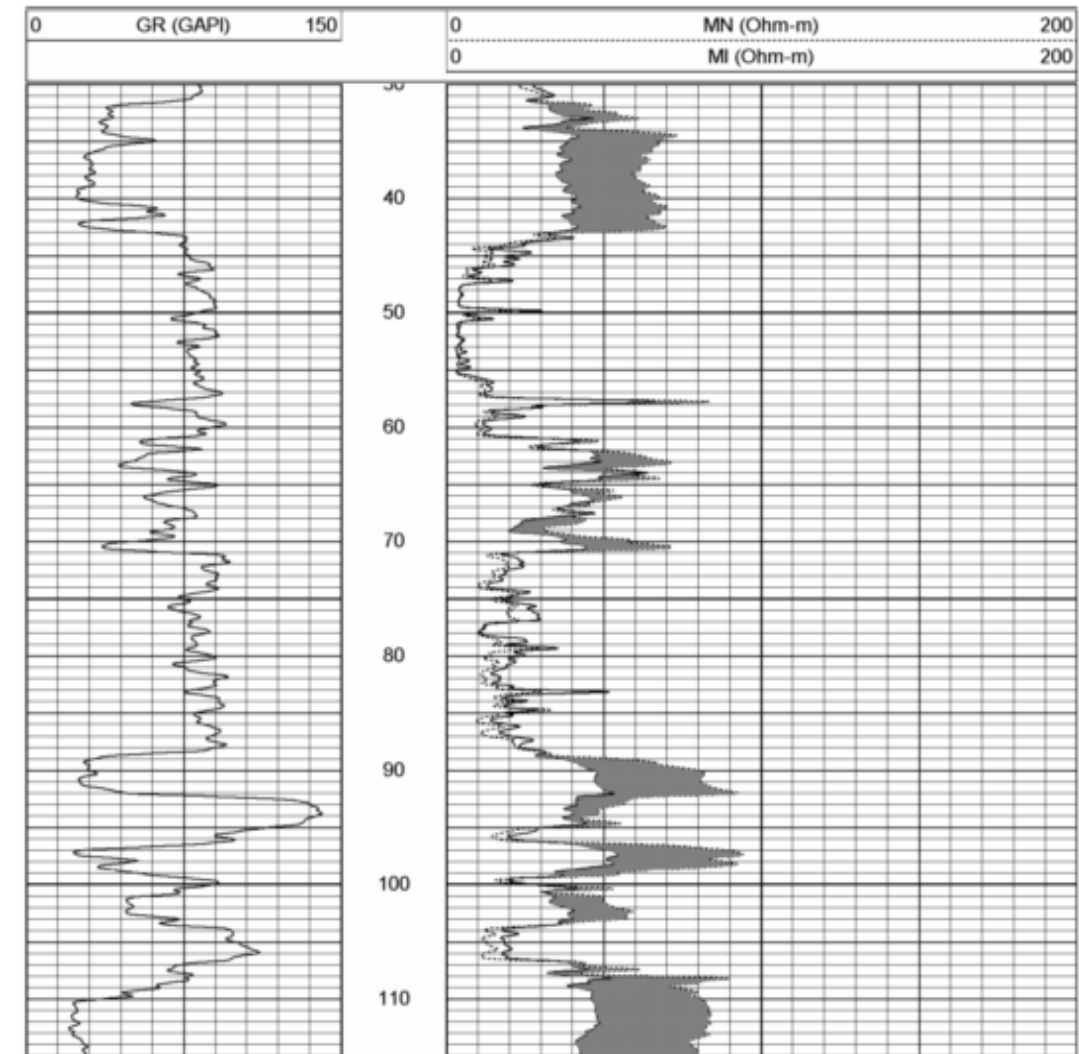
# Interpretação Qualitativa do Microperfil

- Uma zona permeável, por outro lado:
  - facilita naturalmente o processo da invasão.
  - A investigação mais rasa (MI), influenciada pelo reboco, apresentará um valor mais baixo que aquela curva de investigação mais profunda (MN).
  - Assim, as curvas mostrarão uma separação visual entre si, que foi convencionalizada de positiva.
- Existem outros perfis de microresistividade que, por possuírem uma única curva, não indicam a permeabilidade como o MEL, somente Rxo.



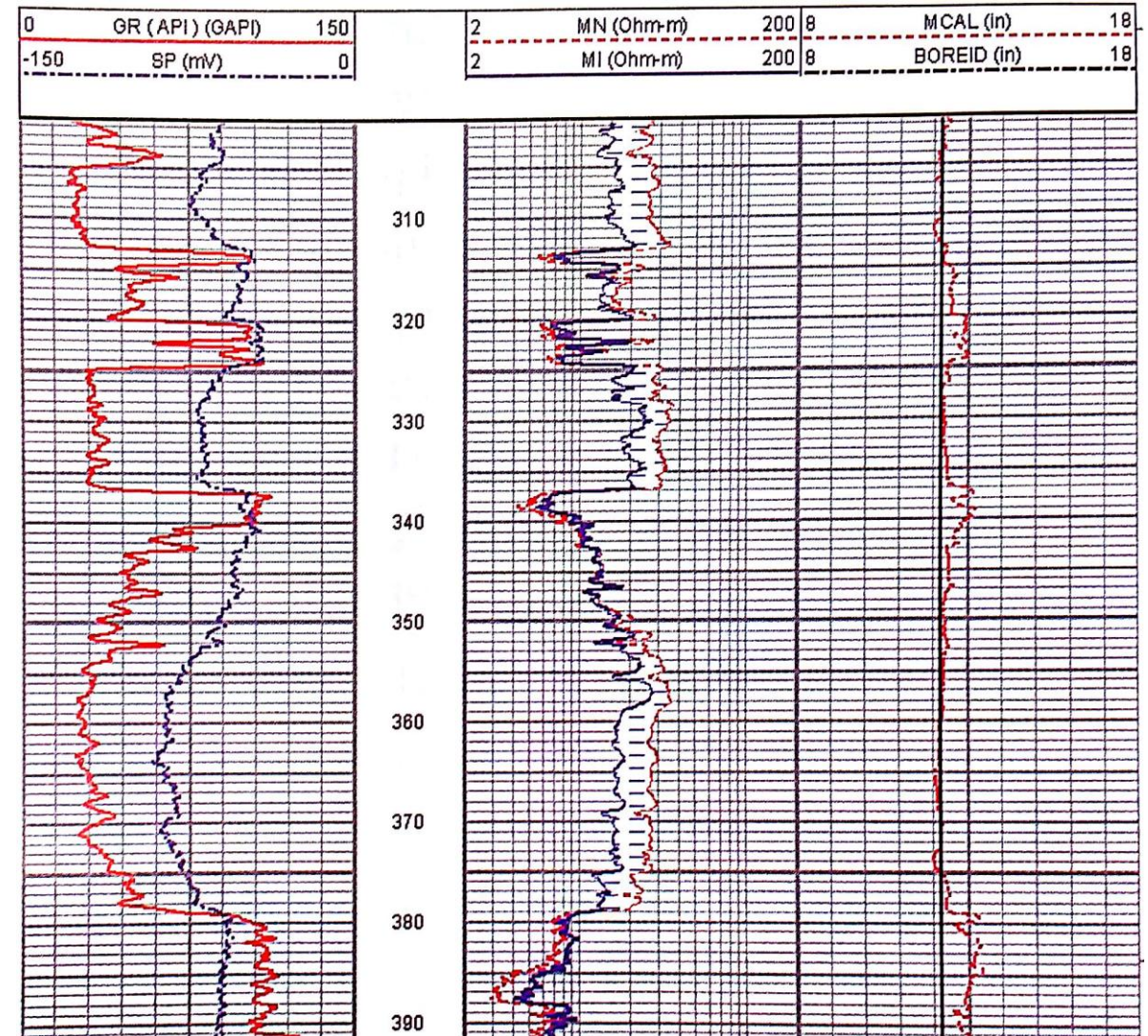
# Interpretação Qualitativa do Microperfil

- Na figura, observa-se na primeira faixa os Raios Gama, para uma visualização da litologia.
- Na segunda e terceira faixas, as curvas microinversa (MI - linha cheia) e micronormal (MN - linha pontilhada).
- Separações positivas, aquelas em que  $MN > MI$  (zonas escuras) são indicativas da presença de reboco (menos resistivo) defronte às camadas.
- Quaisquer que sejam as larguras das separações positivas jamais deverão ser traduzidas em milidarcies ou equivalentes.



# Interpretação Qualitativa do Microperfil

- Potencial aquífero entre 351 – 373m



# Microlateroperfil (MLL)

- Adaptou-se em uma almofada rígida a mesma configuração, porém reduzida, dos 7 eletrodos do LL-7, dispostos concentricamente.
- Por causa da focalização as linhas de correntes penetram profundamente na zona lavada (liberadas da permanência obrigatória dentro dos rebocos ou lamas condutivas, como no caso do MEL).
- Por registrar uma só curva, o MLL não dá ao intérprete a opção de estimar qualitativamente a permeabilidade das camadas, a exemplo do MEL, mas somente Rxo.

# Proximidade (PL)

- MLL não recomendado para espessuras de reboco  $> 3/8$  pol
- PL enxerga mais profundamente, sobrepondo tal problema
  - Pequena invasão -> leitura de  $R_t$
  - Maior intensidade de corrente elétrica

# Microesférica Focalizada (MSFL)

- A ferramenta Microesférica Focalizada (MSFL) foi idealizada no sentido de promover uma configuração esférica na distribuição da corrente enviada ao poço.
- A corrente de localização ou de bloqueio ( $I_b$ ) passa de  $A_0$  para  $A_1$ , preferentemente por dentro do reboco, tomando uma forma aproximada de uma esfera.
- A corrente de medição ( $I_o$ ) fica então confinada a uma trajetória diretamente para dentro da formação, onde se espalha e retorna a um eletrodo (B), localizado no próprio corpo da sonda.
- Para que isto seja possível, a corrente de bloqueio ( $I_b$ ) é ajustada de modo que a voltagem nos monitores permaneça sempre igual a zero.

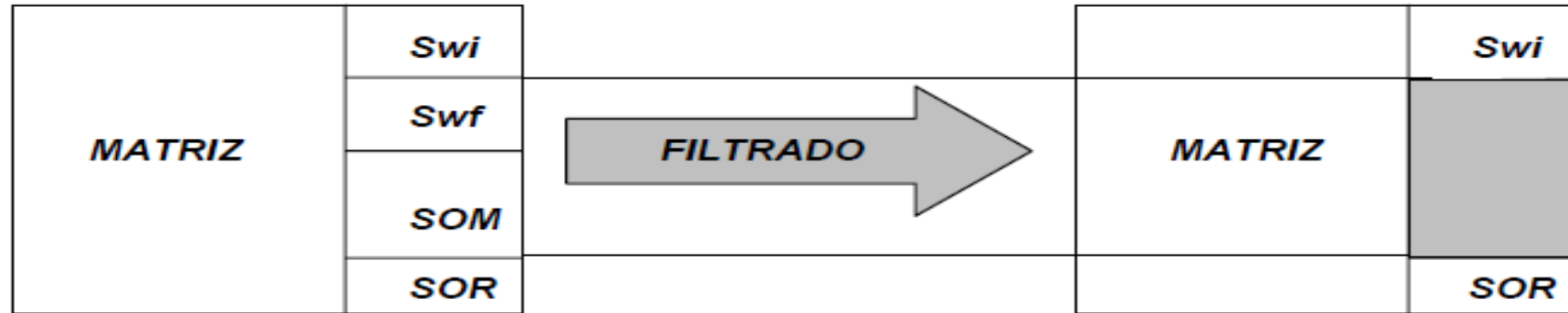
# Microesférica Focalizada (MSFL)

- Com esse sistema, o efeito do reboco é minimizado ao máximo e a ferramenta ainda permanece com uma investigação bastante rasa, sendo entre as ferramentas de microresistividades a que mais se aproxima de Rxo, a não ser quando o diâmetro de invasão for muito pequeno.
- Observamos que o desenvolvimento de uma nova ferramenta tem por objetivo eliminar os obstáculos apresentados pelas antecessoras. O que é vantajoso para uma ferramenta pode ser desvantajoso para outra.
- Este raciocínio tecnológico persiste até os tempos atuais, fazendo com que as companhias de serviço sejam dinâmicas na busca de processos e equipamentos de ponta, lançando com rapidez sistemas hoje atuantes e aceitos pela comunidade científica, no obsoletismo.

# Utilização Prática dos Perfis de Rxo (MLL, PL e MSFL)

- *MÉTODO DO ÓLEO MÓVEL (MOP)*
- observar na figura o comportamento de uma rocha permoporosa, antes e após a invasão do filtrado da lama e suas respectivas variações volumétricas.
- As saturações  $S_{wi}$  e  $S_{OR}$  representam, respectivamente, a água irreduzível e o óleo residual, incapazes de se deslocarem sob a influência do filtrado.
- $S_{wf}$  e  $S_{OM}$ , respectivamente, a água livre interporosa e o óleo móvel, portanto, facilmente deslocáveis, dentro do diferencial de pressão existente nos poços preenchidos por lama.

# Utilização Prática dos Perfis de Rxo (MLL, PL e MSFL)



- $Sw = \text{Saturação total em água} = Swf + Swi$ .
- $Swf = \text{Saturação em água móvel (livre interporosa)}$ .
- $Swi = \text{Saturação em água irreduzível (adsorvida aos grãos)}$ .
- $So = \text{Saturação de óleo total (móvel e/ou residual)} = SOM + SOR$ .
- $SOM = \text{Saturação de Óleo Móvel (livre para ser explotado)}$ .
- $SOR = \text{Saturação de Óleo Residual (imóvel sob condições normais)}$ .
- $Sxo = \text{Saturação de filtrado (que desloca os fluidos)}$ .



# Utilização Prática dos Perfis de Rxo (MLL, PL e MSFL)

- Do exposto, conclui-se:

$$Swf + Swi = 1 - (SOM + SOR) = 1 - So$$

- Fazendo-se o balanço dos materiais obtém-se:
  - Antes da invasão:  $Swf + Swi + SOR + SOM = 1$
  - Após a invasão:  $SOR + Swi + Sxo = 1$
- O que significa que

$$Sxo = 1 - SOR - Swi$$

# Utilização Prática dos Perfis de Rxo (MLL, PL e MSFL)

- Como, tanto antes como após a invasão,  $S_{wi}$  é um valor constante, não participativo da movimentação fluida, podemos, simplificadamente, dizer então que:

$$S_{xo} = 1 - SOR$$

principalmente, nos casos de camadas com granulometria média a grosseira, onde  $S_{wi}$  tende a apresentar baixos valores.

- Caso a rocha seja de granulometria fina a síltica, ou ainda muito argilosa, sua área específica (volume da superfície externa porosa/volume de rocha) será bastante elevada e  $S_{wi}$  terá valor numérico não mais desprezível, devendo ser levada em consideração nas equações acima.

# Utilização Prática dos Perfis de Rxo (MLL, PL e MSFL) – método do óleo móvel

- A Equação da Mobilidade, que correlaciona as saturações nas zonas virgens e lavada, é dada por:

$$\left( \frac{S_w}{S_{xo}} \right)^n = \frac{R_{xo}}{R_t} \cdot \frac{R_w}{R_{mf}}$$

- Na prática adotam-se as seguintes relações:
  - $\frac{S_w}{S_{xo}} > 1$  -> camada não produtora de hidrocarboneto.
  - $0,8 < \frac{S_w}{S_{xo}} < 0,9$  -> camada a ser testada para confirmação de capacidade produtiva.
  - $\frac{S_w}{S_{xo}} < 0,7$  -> camada produtora por excelência, sem muita necessidade de confirmação por testes de formação.

# Utilização Prática dos Perfis de Rxo (MLL, PL e MSFL) – perfil do óleo móvel

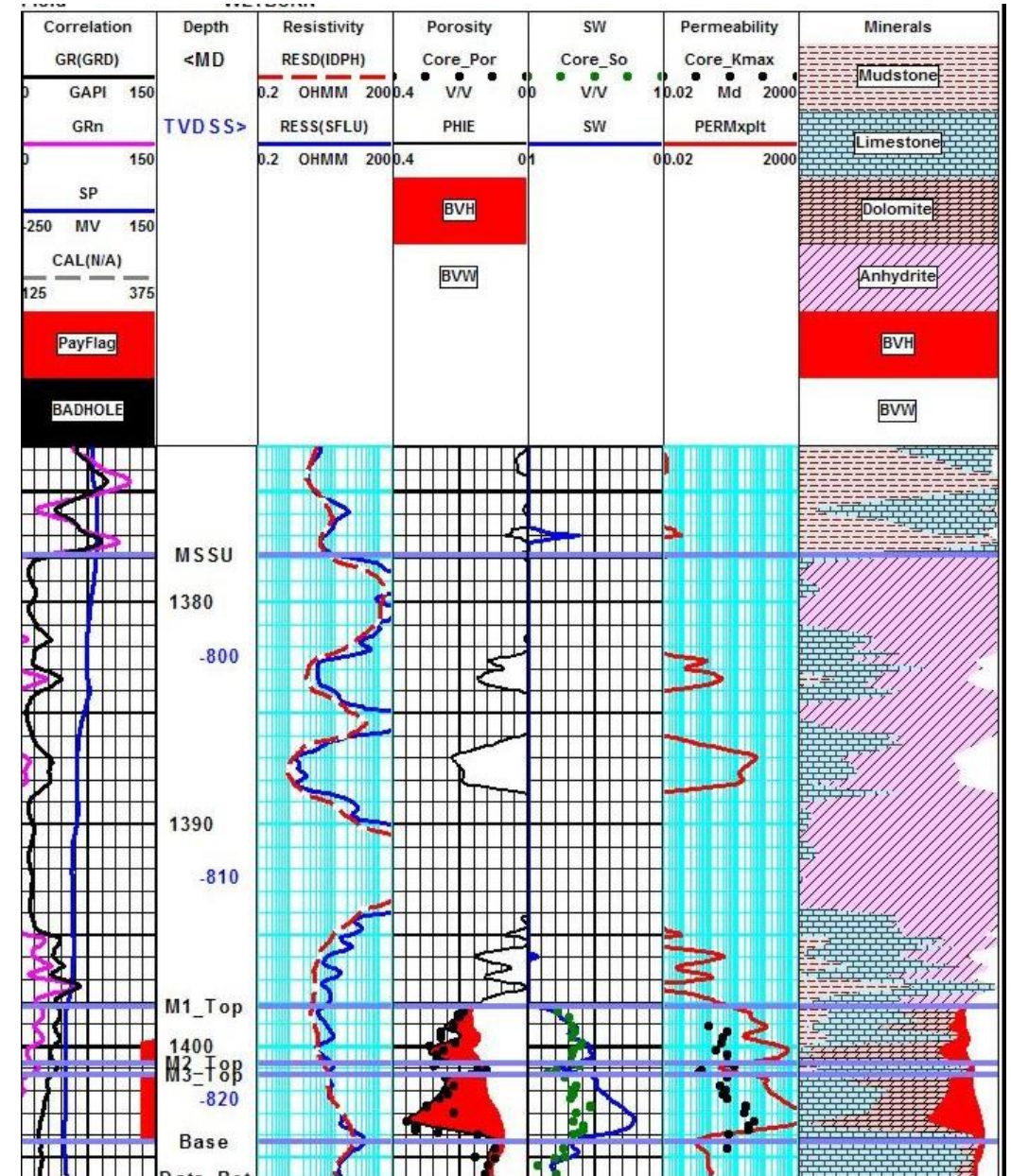
$$\phi = \frac{V_v}{V_t} \quad S_w = \frac{V_w}{V_v} \quad S_{xo} = \frac{V_{xo}}{V_v} \quad SOM = S_{xo} - S_w$$

- Volumes totais fluidos envolvidos

$$\phi S_w = \frac{V_w}{V_t} \quad \phi S_{xo} = \frac{V_{xo}}{V_t} \quad \phi SOM = \phi(S_{xo} - S_w)$$

- Perfil do óleo móvel é obtido via solução gráfica das equações acima.
- Três curvas em uma mesma faixa:
  - Porosidade total (1)
  - Volume total do filtrado (2)
  - Volume total de água (3)

# Utilização Prática dos Perfis de Rxo (MLL, PL e MSFL) – perfil do óleo móvel



# Resumo

- *O que estas ferramentas medem:* microvolumes de rochas, por meio de sistemas elétricos focalizados ou não (ML), acondicionados em patins ou sapatas, pressionados contra as paredes dos poços. São por tal razão denominados os perfis de Rxo, exceto o microperfil por não ser focalizado.
- *Utilização:* Corrigir Rt e Rxo pelo efeito da invasão; corrigir porosidades pelo efeito dos hidrocarbonetos; determinação do diâmetro de invasão; Essenciais nas interpretações nos casos de HC + água doce; Eventuais na quantificação da porosidade; Eventuais na identifica fraturas; Essenciais na confecção do MOP e interpretações avançadas dos perfis que exijam Rt e Rxo.
- *Problemas:* desmoronamentos/rugosidades; rebocos espessos; invasão rasa. Altos contrastes Rxo/Rmc favorecem a desfocalização da ferramenta perdendo sua razão de ser.