

Perfilagem Geológica de Poços

Concurso para Professor na Área de Geologia

Subárea de Geologia do Petróleo

EDITAL Nº 252, DE 02 DE ABRIL DE 2014

UNIFESP

Plano de Aula

1- Introdução

1.1- Perfilagem de Poços

1.2- Aplicações

1.3- Ambiente de Poço

2- Perfis Básicos

2.1- Perfil Caliper

2.2- Perfis de Porosidade: Sônico, Densidade, Nêutrons

2.3- Perfis Elétricos: Potencial Espontâneo, Resistividade

3- Perfis Especiais

3.1- Perfil Dipmeter (mergulho)

3.2- Perfis de Imagens: Resistiva e Acústica

3.3- Ressonância Magnética Nuclear

4- Considerações finais

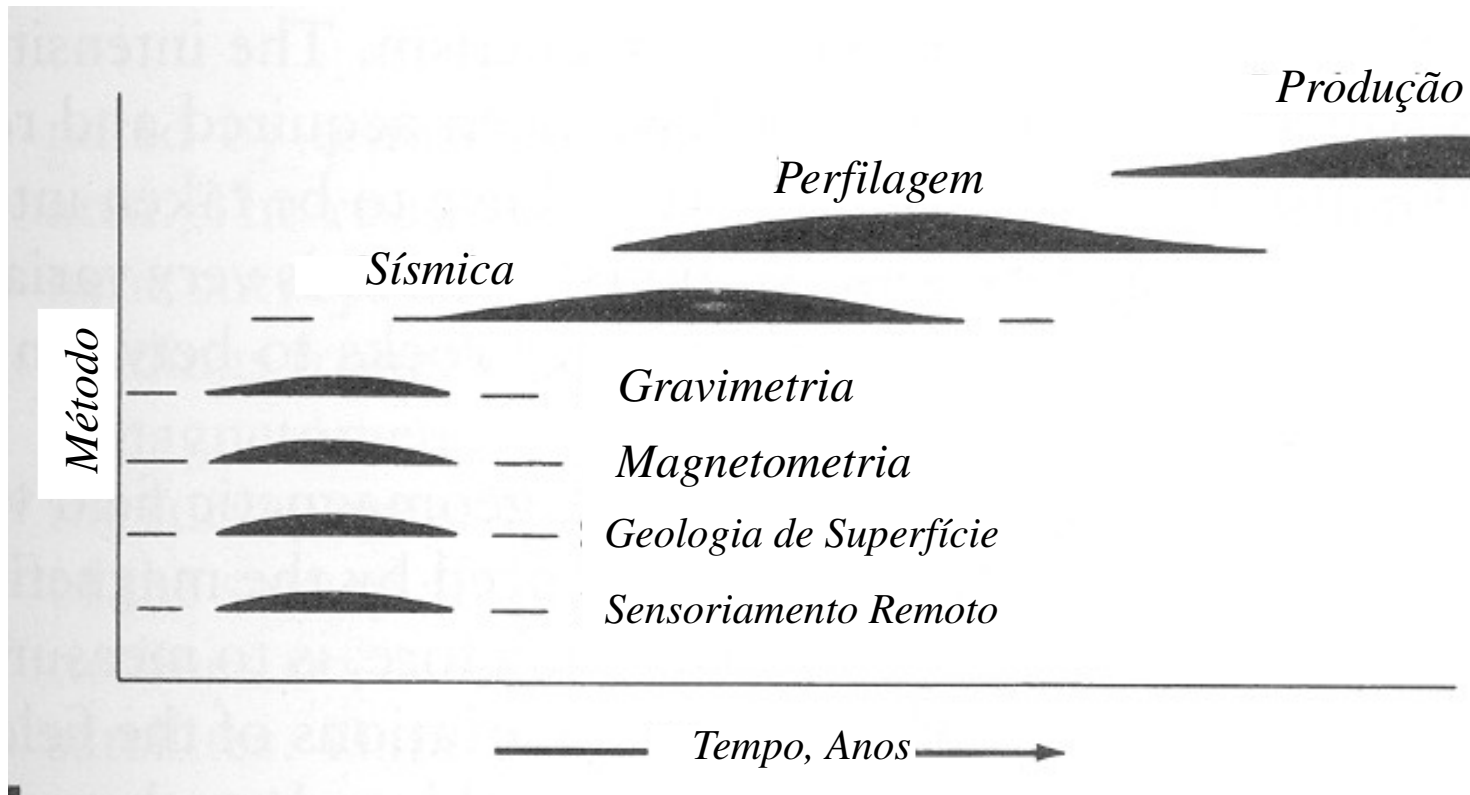
Métodos de exploração

- Principais ferramentas geofísicas, utilizadas na exploração e produção de hidrocarbonetos envolvem:

a) Sísmica de Reflexão

b) Petrofísica

c) Perfilagem de Poços



Perfilagem Geológica de Poços

a) Caracterização de Reservatórios

Litologia

Qualidade do reservatório

Tipo de fluido/ Saturação / Cálculo Reservatório

Horizontes dos Fluidos

b) Correlação Sísmica-Poço

c) Planejamento Produção

d) Aplicação na Oceanografia– Perfilagem de Testemunhos em expedições

Perfilagem

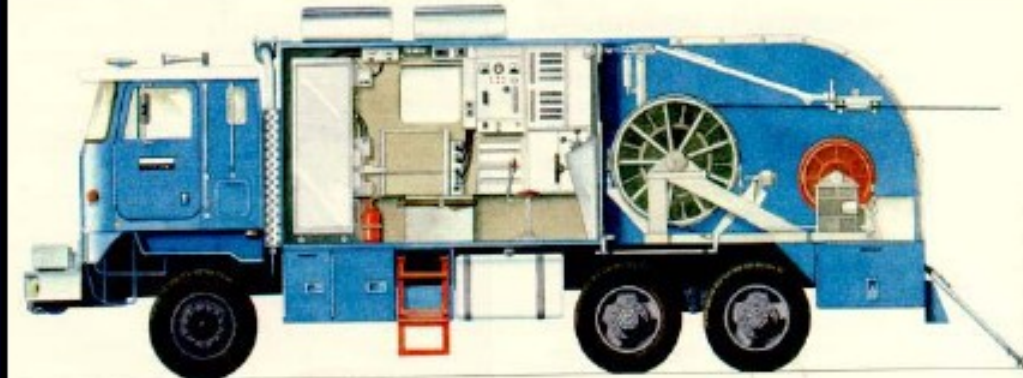
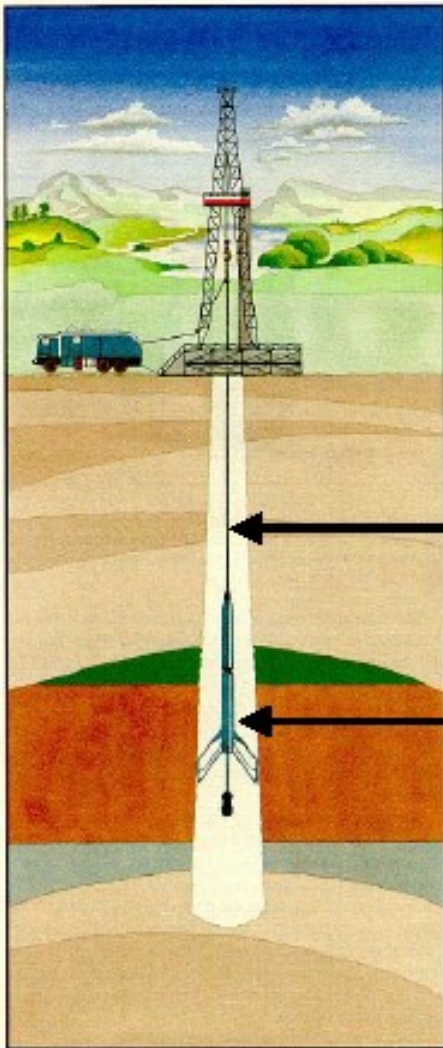
- POÇO ABERTO

- Wireline (a cabo)
- TLC – Tough Logging Condition System
(Sistema de Perfilagem em Condições Difíceis)
- LWD – Logging While Drilling
(Perfilagem Durante a Perfuração)

-POÇO REVESTIDO

Tipos de Perfilagem em Poço Terrestre

Perfilagem a Cabo - Wireline



**Cabo de
Perfilagem**

**Sonda de
Perfilagem**

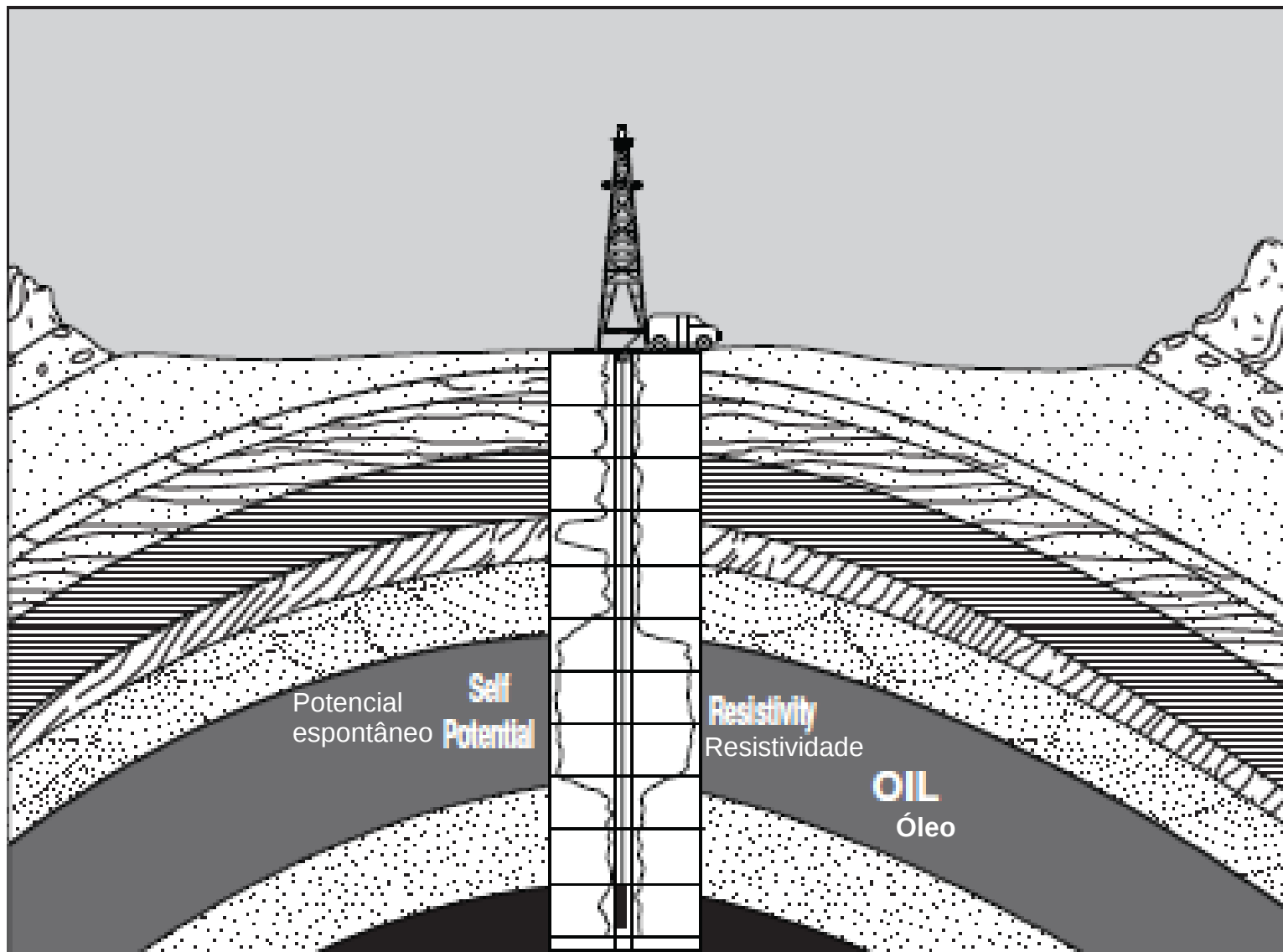
**Unidade de
Perfilagem**

Contem os
equipamentos
que realizam a
aquisição dos
dados

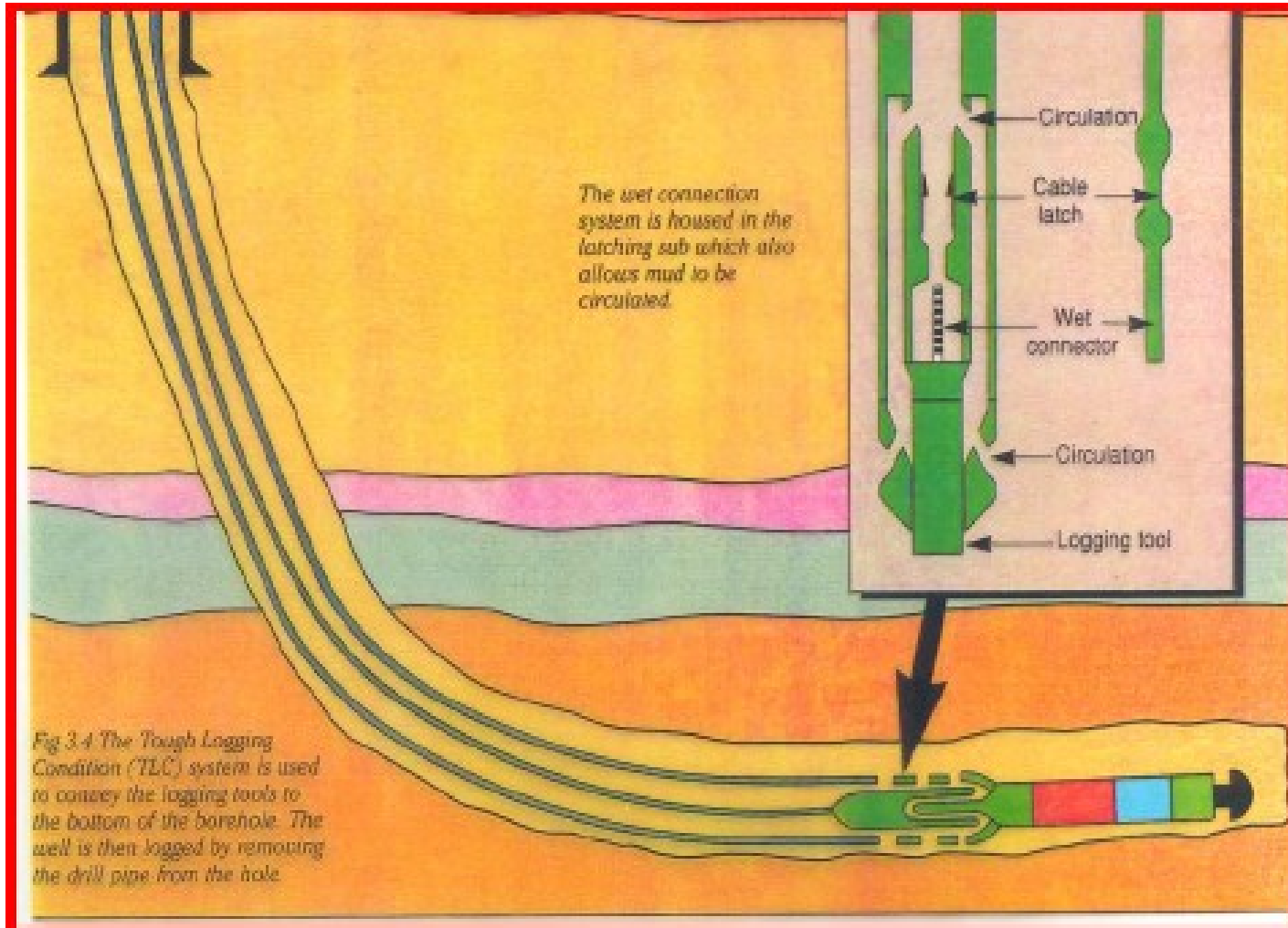
Equipamentos de Perfilagem Terrestre



Flores *et al.* (2006)



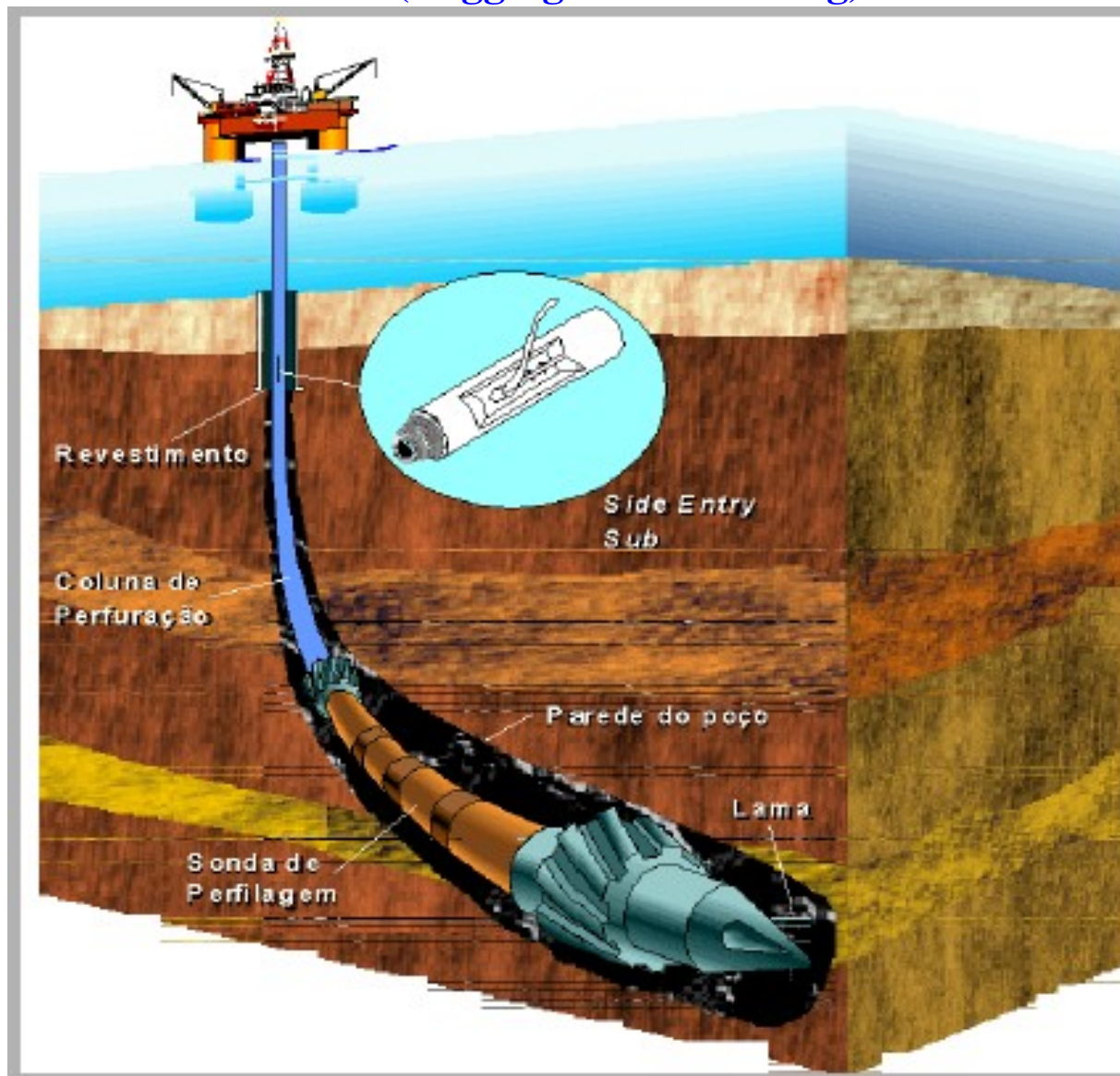
Perfilagem TLC (Tough Logging Condition System) (Sistema de Perfilagem em Condições Difíceis) Inclinações maiores que 60°



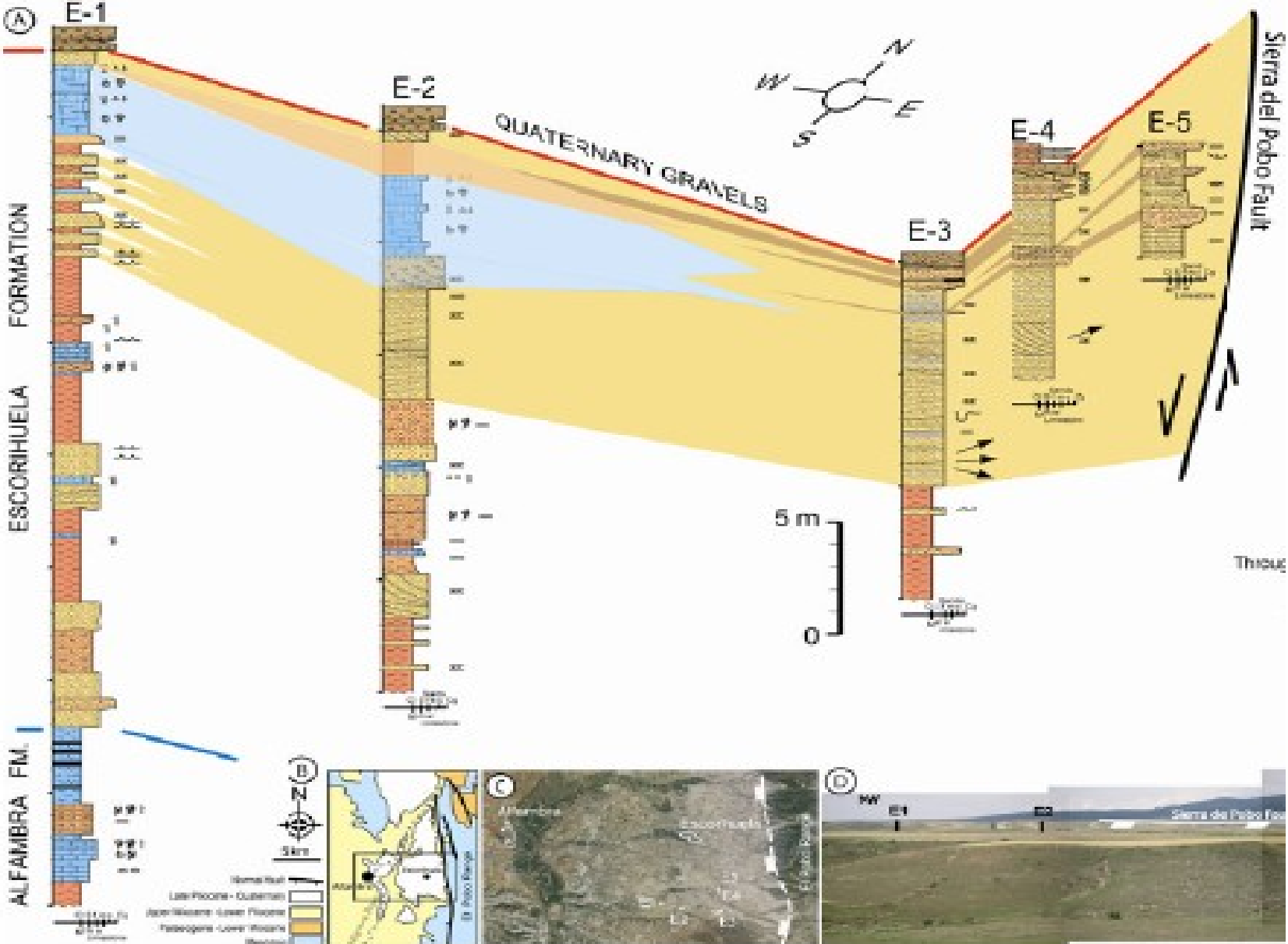


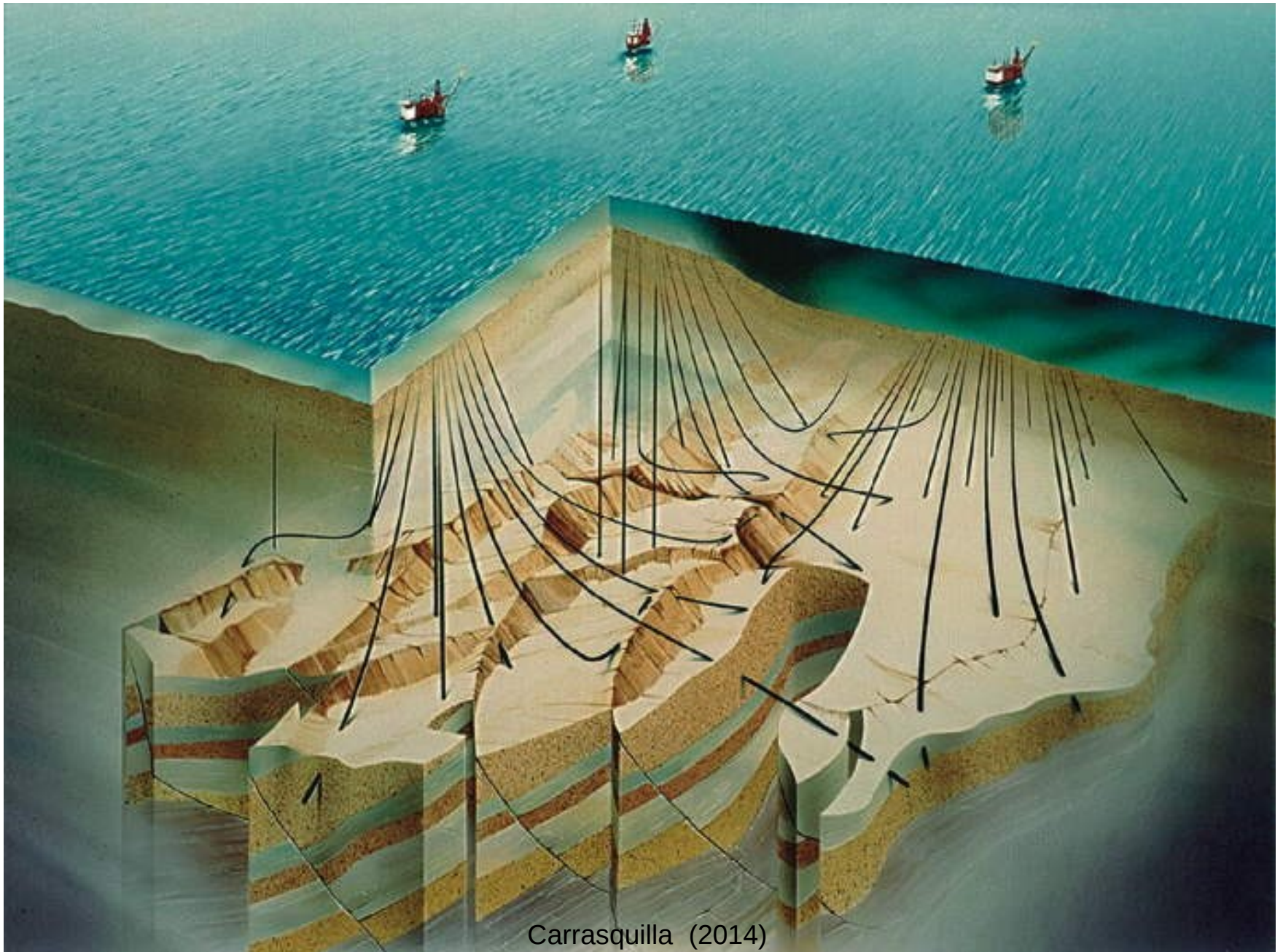
Carrasquilla (2014)

Perfilagem durante a perfuração LWD - (Logging While Drilling)

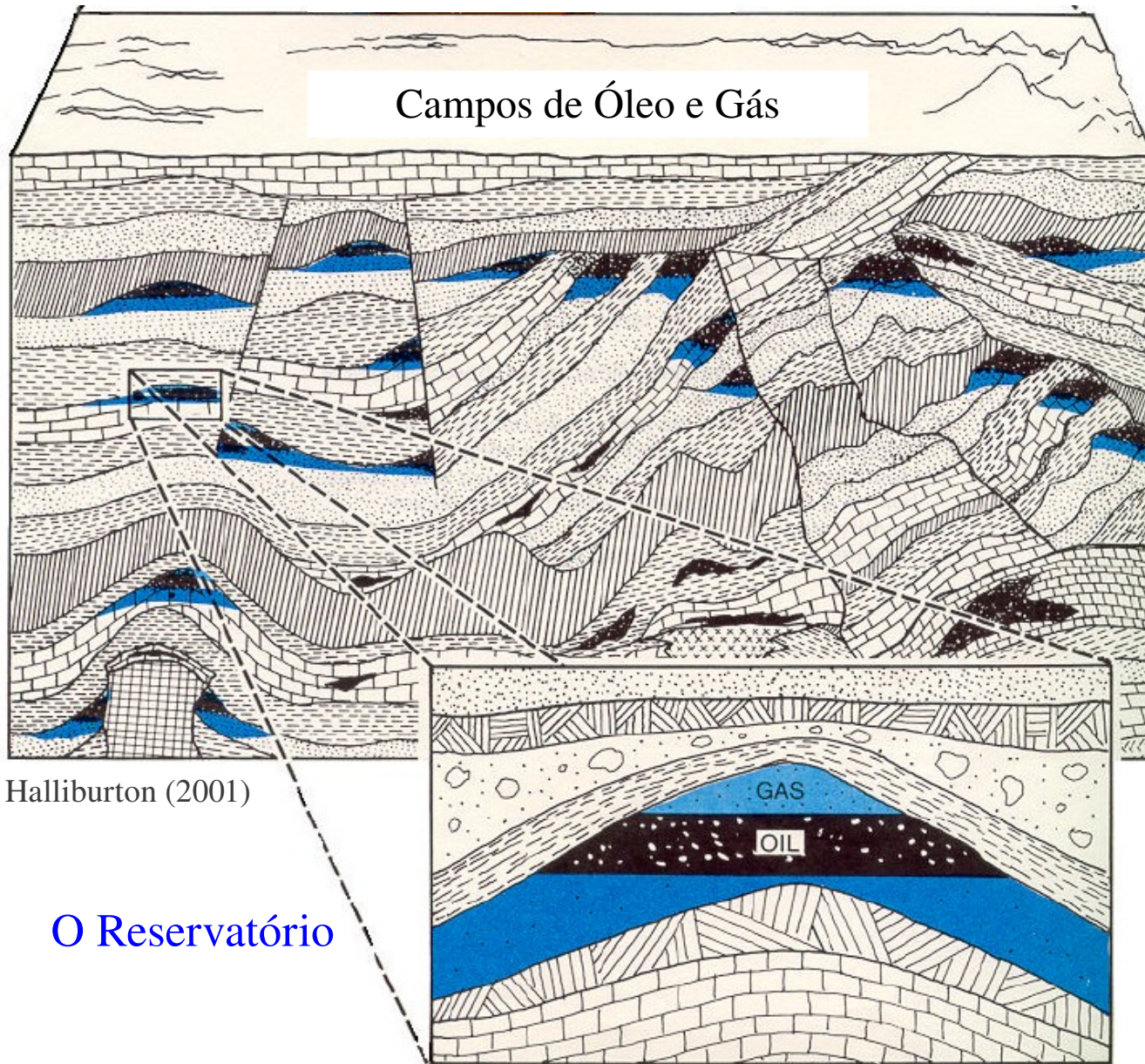


- Correlação estratigráfica entre poços.





- Correlação estratigráfica entre poços: Contexto Geológico complexo



Halliburton (2001)

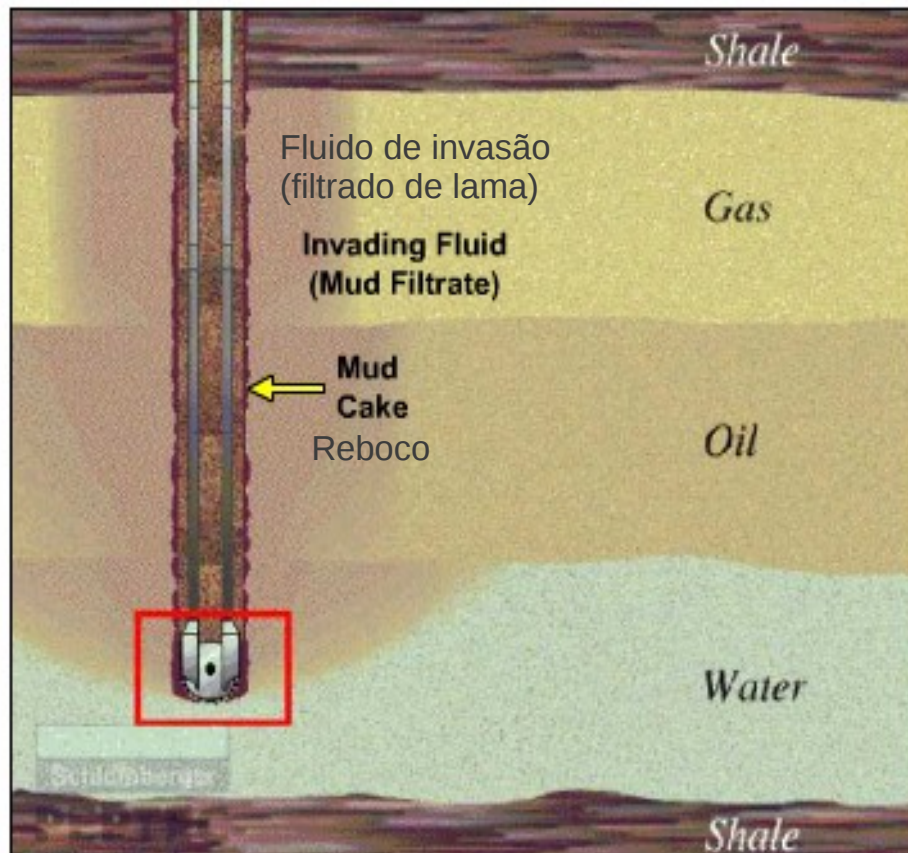
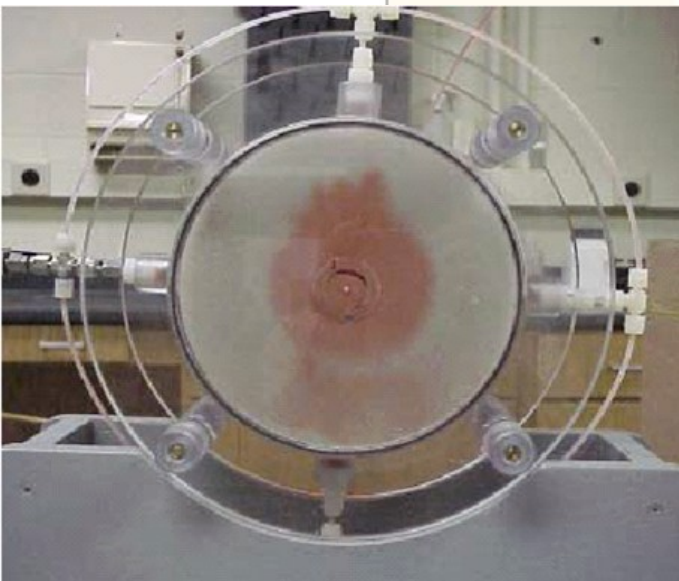
O Reservatório

Fluido de Perfuração

- Importância:
- resfriar e lubrificar a broca
 - transportar fragmentos de rocha até a superfície
 - manter a pressão do reservatório
 - evitar “*blowout*”
 - sustentar as paredes do poço
 - auxílio obtenção de dados perfilagem

Fluido de Perfuração

Invasion Invasão



Folhelho

Reservatório com gás

Reservatório com óleo

Reservatório com água

Folhelho

Feijó (2005)

Propriedades Petrofísicas da Rochas

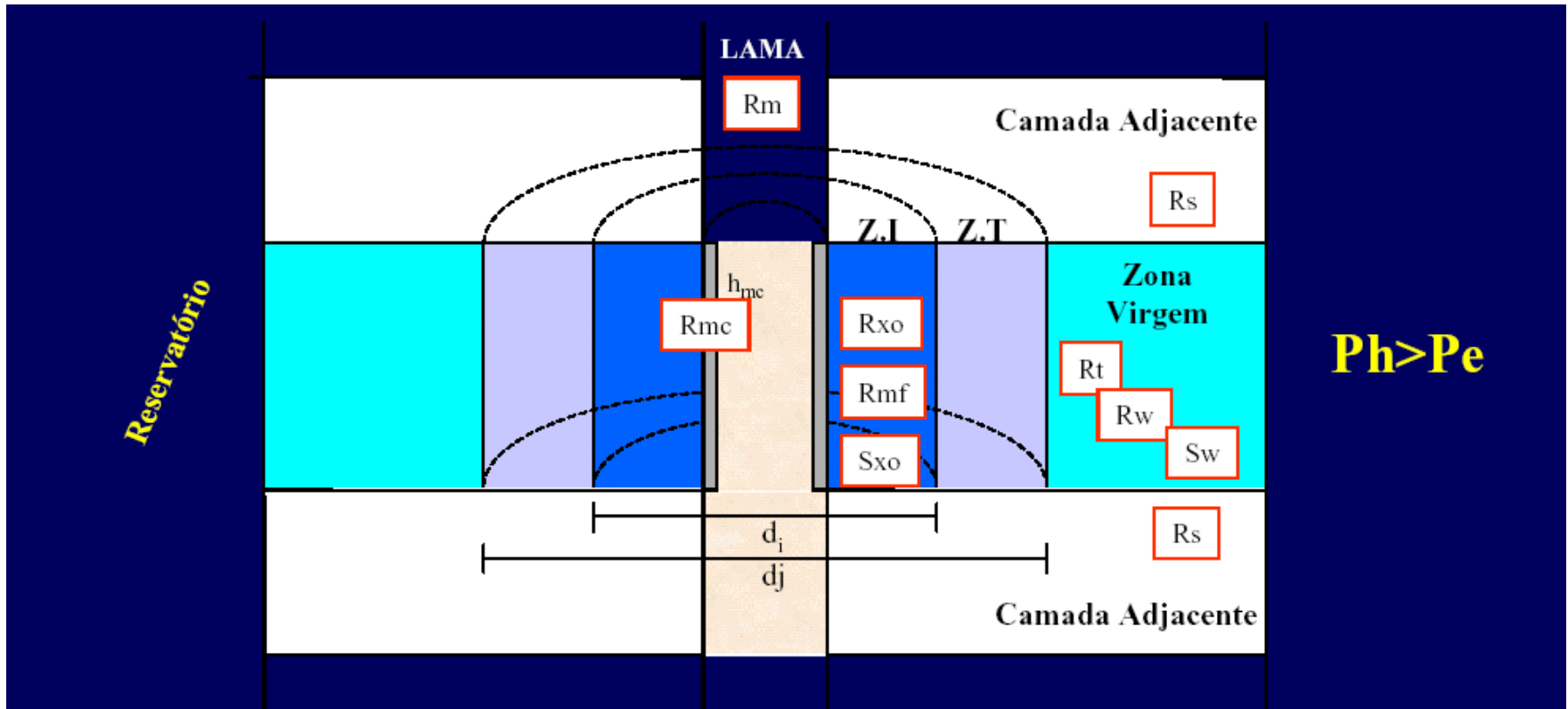
– Resistividade (ou Condutividade) Elétrica

Resistividade: é definida como sendo a medida da capacidade de um material qualquer de contrapor (de resistir) à passagem de corrente elétrica.

Condutividade: é a habilidade de um material qualquer de permitir ou facilitar o fluxo elétrico.

- ➔ Os **Hidrocarbonetos (óleo ou gás), água doce** agem como **isolantes**, (não-condutivos e altamente resistivos)
- ➔ A **água salgada é condutora**, baixa resistividade.

Ambiente de Poço – aquisição de parâmetros



R_m =Resistividade da Lama
 R_{mc} =Resistividade do Reboco
 R_{mf} =Resistividade do Filtrado
 R_{xo} =Resistividade da Zona Lavada
 R_w =Resistividade da Água

R_t =Resistividade da Formação
 h_{mc} =Espessura do Reboco
 R_s =Resistividade da Camada Adjacente
 S_{xo} =Saturação da Zona lavada
 S_w =Saturação de Água

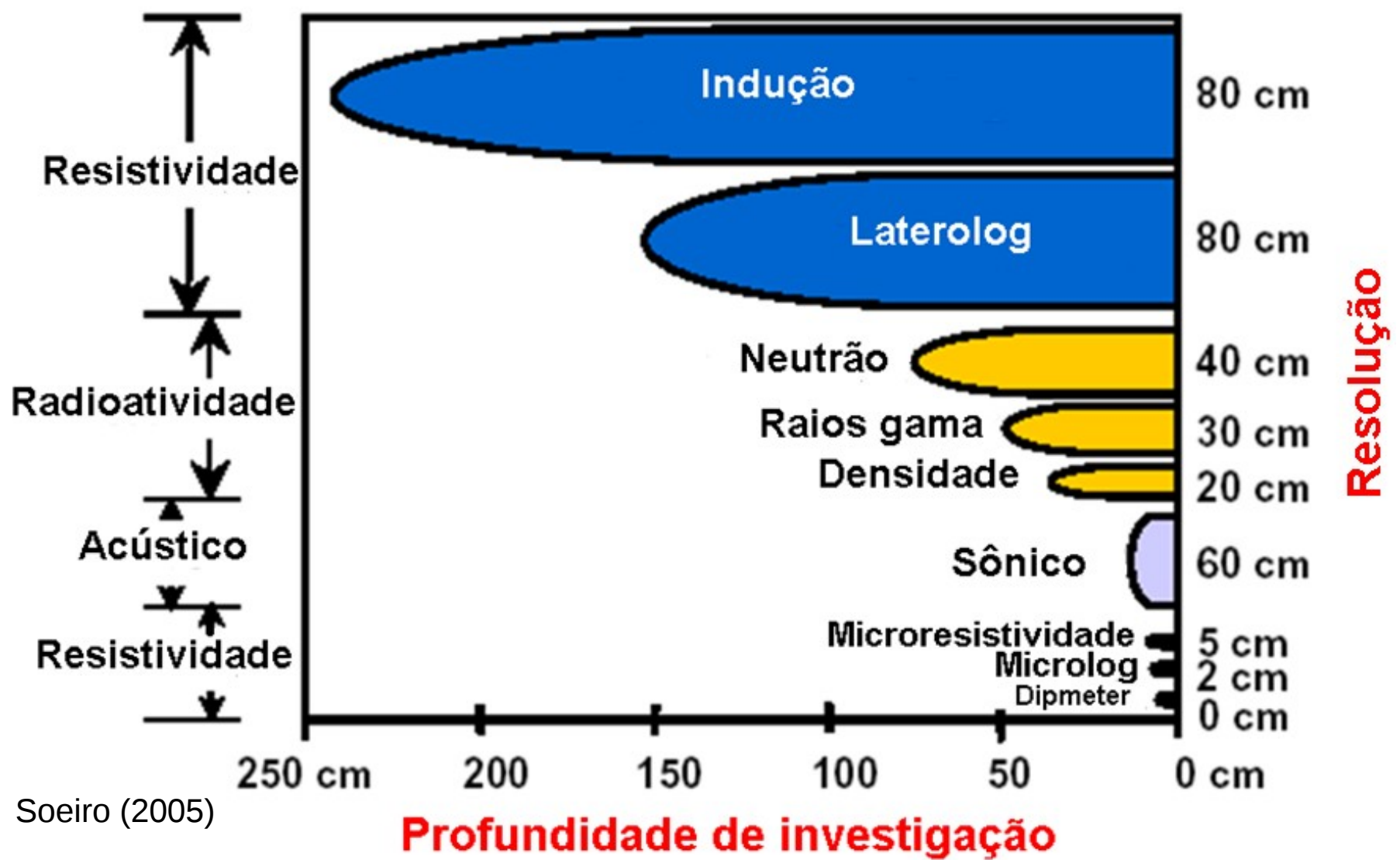
Principais Perfilagens Básicas

- Calibre (Caliper)**
- Raios Gama (natural)**
- Densidade (Gama-Gama)**
- Sônico**
- Nêutrons (Neutrão)**
- Resistividade**
- Potencial Espontâneo (SP)**

Principais Perfilagens Especiais

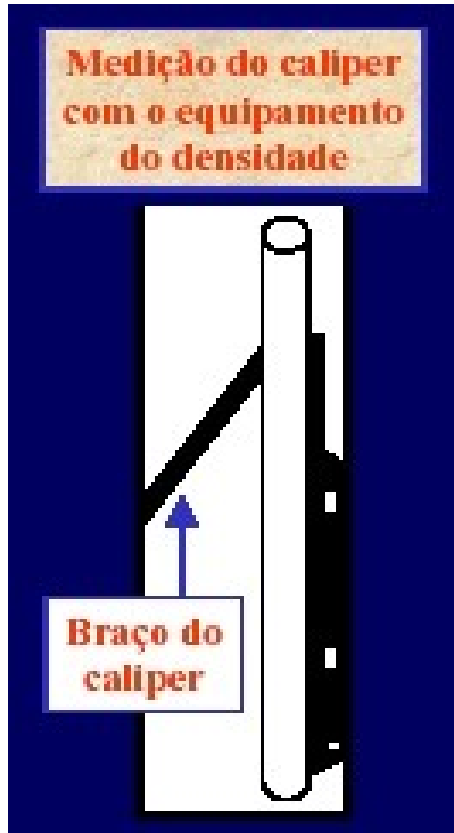
- Perfil Dipmeter (Mergulho)**
- Perfil de Imagem Resistiva**
- Perfil de Imagem Acústica de Poço**
- Ressonância Magnética Nuclear**

Ferramentas de poço: resolução e profundidade de investigação



Soeiro (2005)

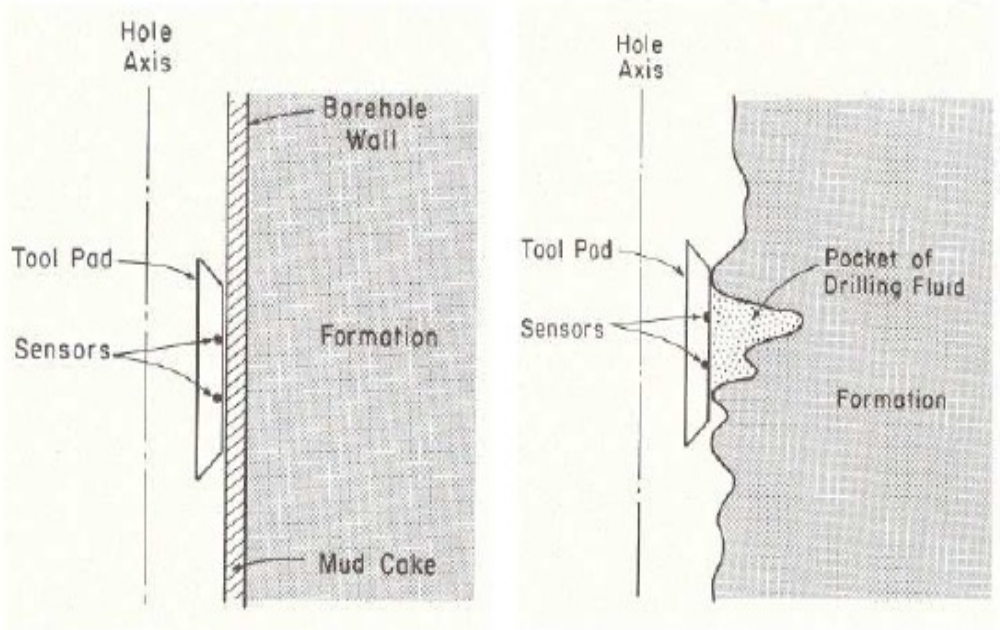
Perfil de calibre do poço - Caliper



- O movimento de abertura ou fechamento dos braços, acoplados a uma bobina, geram **respostas elétricas** nestas bobinas.

Soeiro (2005)

Determinar zonas com invasão



Soeiro (2005)

PERFIS DE RAIOS GAMA



```
graph TD; A[PERFIS DE RAIOS GAMA] --> B[RAIOS GAMA NATURAIS]; A --> C[RAIOS GAMA INDUZIDOS]; B --> D[CONVENCIONAL]; B --> E[ESPECTRAL]; C --> F[PERFIL DE DENSIDADE  
(Análise de Porosidade)];
```

RAIOS GAMA NATURAIS

RAIOS GAMA INDUZIDOS

CONVENCIONAL

ESPECTRAL

**PERFIL DE
DENSIDADE**

(Análise de
Porosidade)

Perfil. Básicas: Raio Gama

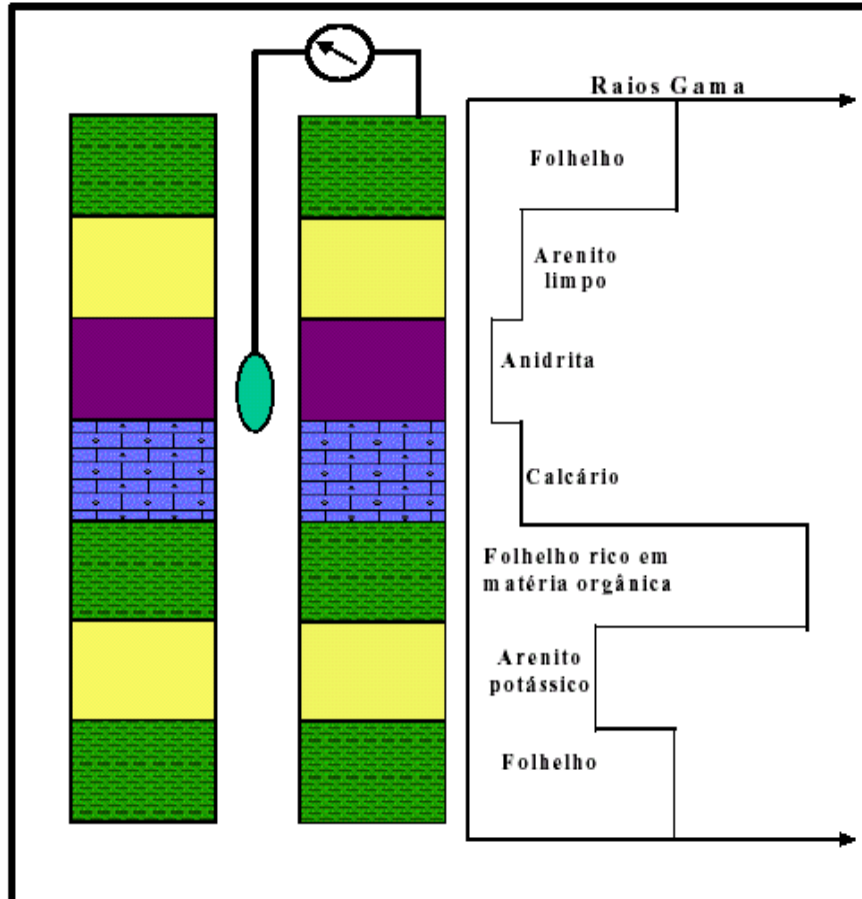
Perfis de Raios Gama Naturais – Gama Ray (GR)

- Principais elementos radioativos presentes em minerais de rochas:
 - **Urânio** (U^{238}) ex: – argilas orgânicas (selo ou geradora)
 - **Tório** (Th^{232}) ex: – arenitos com fragmentos de rochas
 - **Potássio** (K^{40}) ex: – **feldspato**: Arcóseo – arenito com feldspato
– **ilita**: Argila em Arenito
– **mica**: Siltito, Rocha Vulcânica

Princípio:

- cristais de iodeto de sódio, acoplado a um fotomultiplicador, emitem luz ao receber radiação gama – convertido em impulsos elétricos.

Medida do Raios Gama em Tipos Litológicos

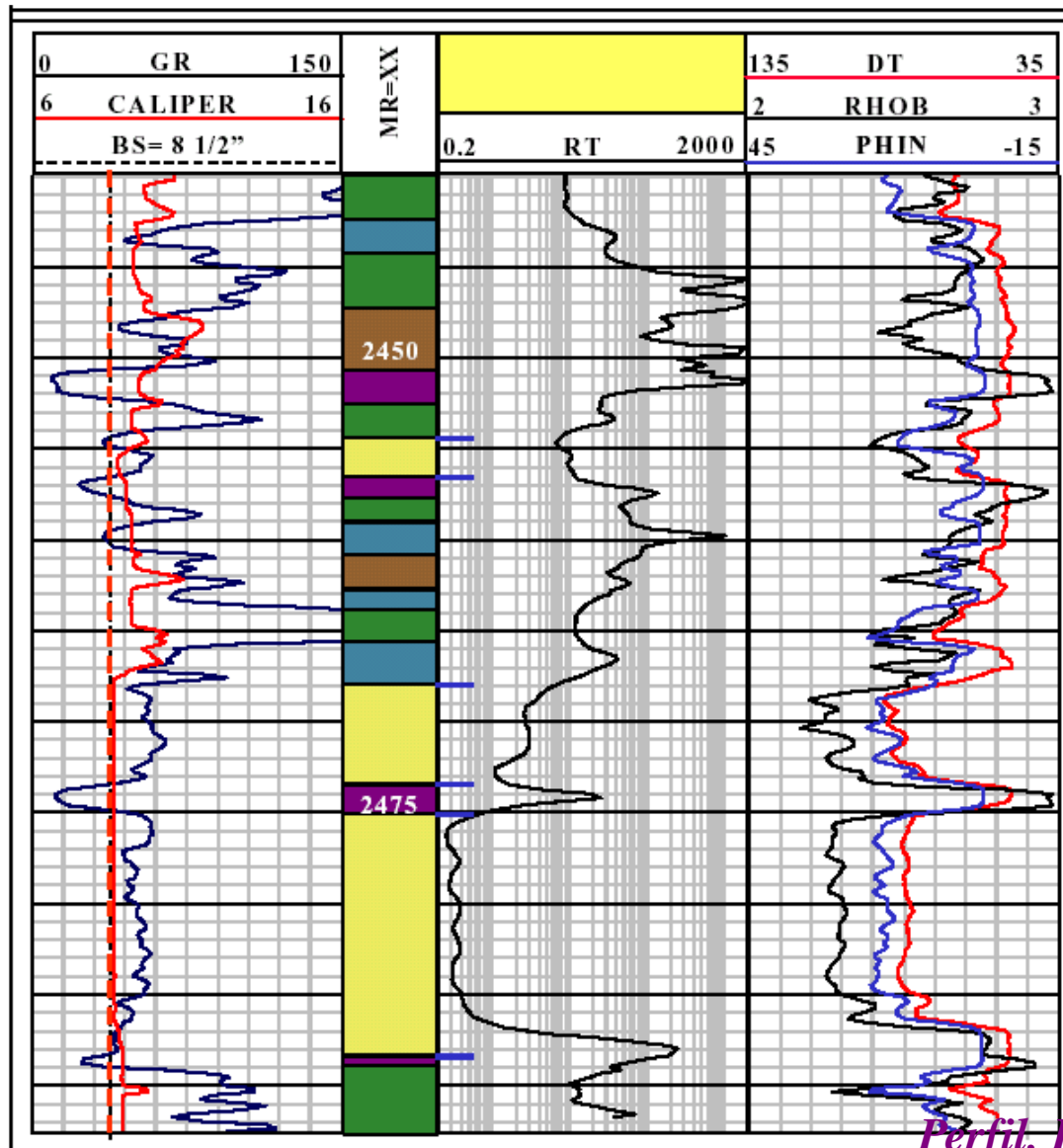


Unidade de medida: API

Fonte: Soeiro (2005)

Perfil. Básicas: Raio Gama

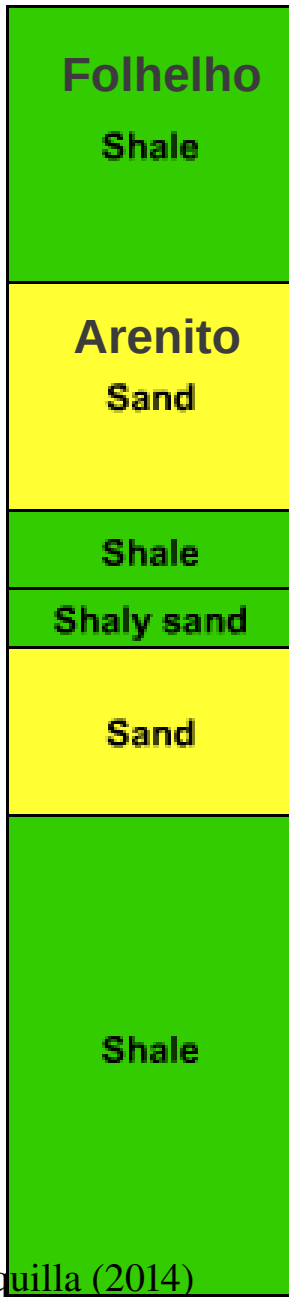
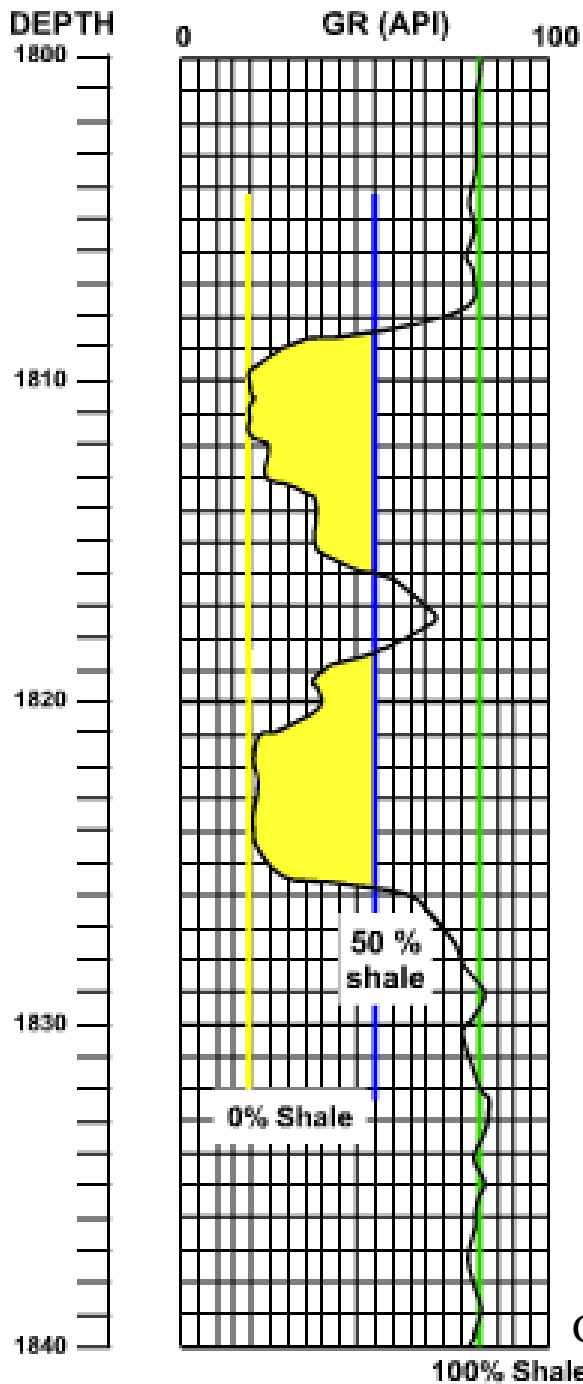
Representação do caliper com Raios Gama Convencional



Soeiro (2005)

Perfil. Básicas: Raio Gama

Interpretação do perfil de raios gama



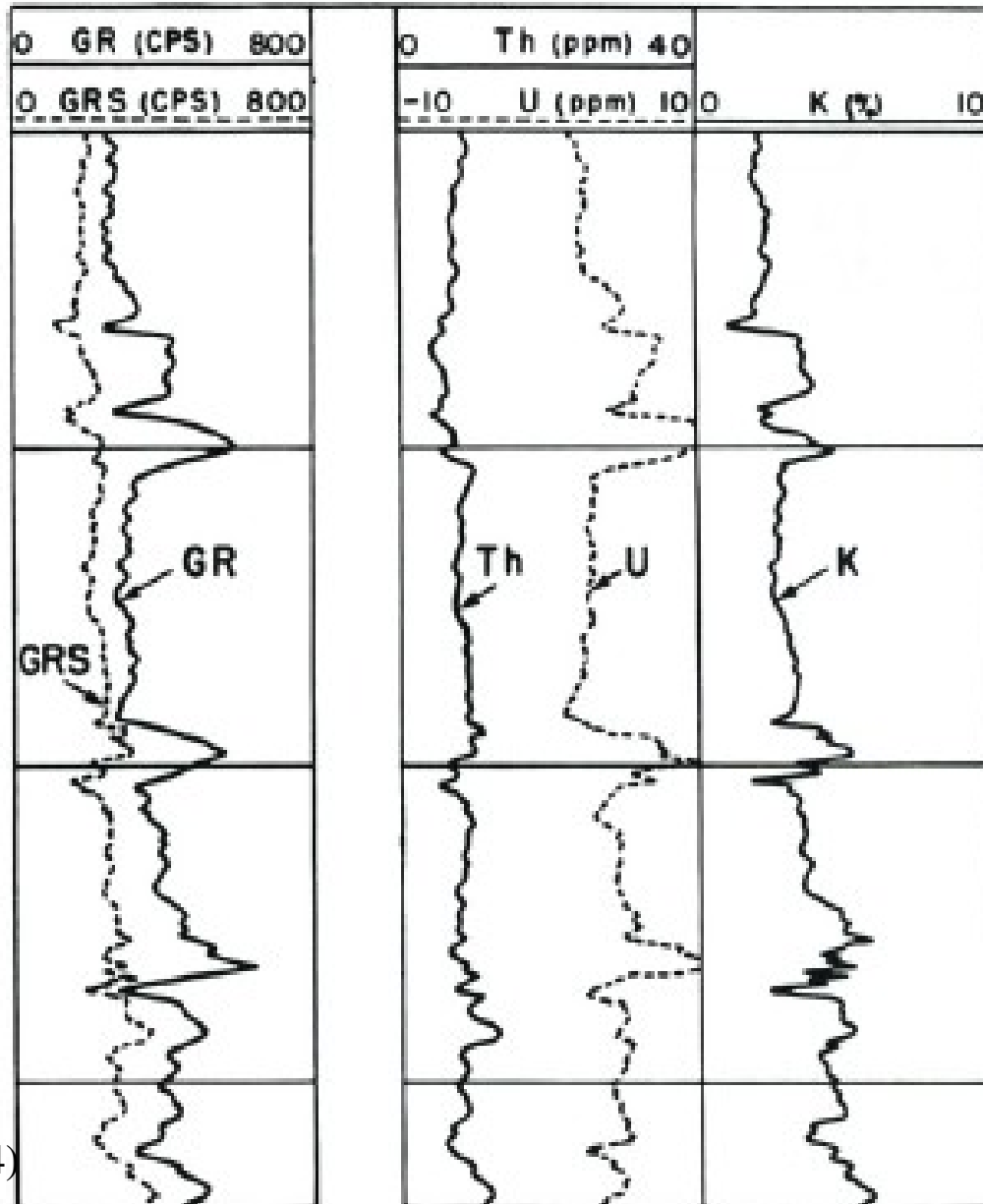
$$I_{GR} = V_{sh} = \frac{GR(lido) - GR_{min}}{GR_{máx} - GR_{min}}$$

Folhelho
Arenito argiloso
Arenito
Folhelho

Carrasquilla (2014)

Perfil. Básicas: Raio Gama

Raios Gama de Espectral



Fonte: Bassiouni (1994)

Perfis de Porosidade

- Perfil Sônico (DT)
- Perfil de Densidade (RHOB)
- Perfil Nêutrons (NPHI)

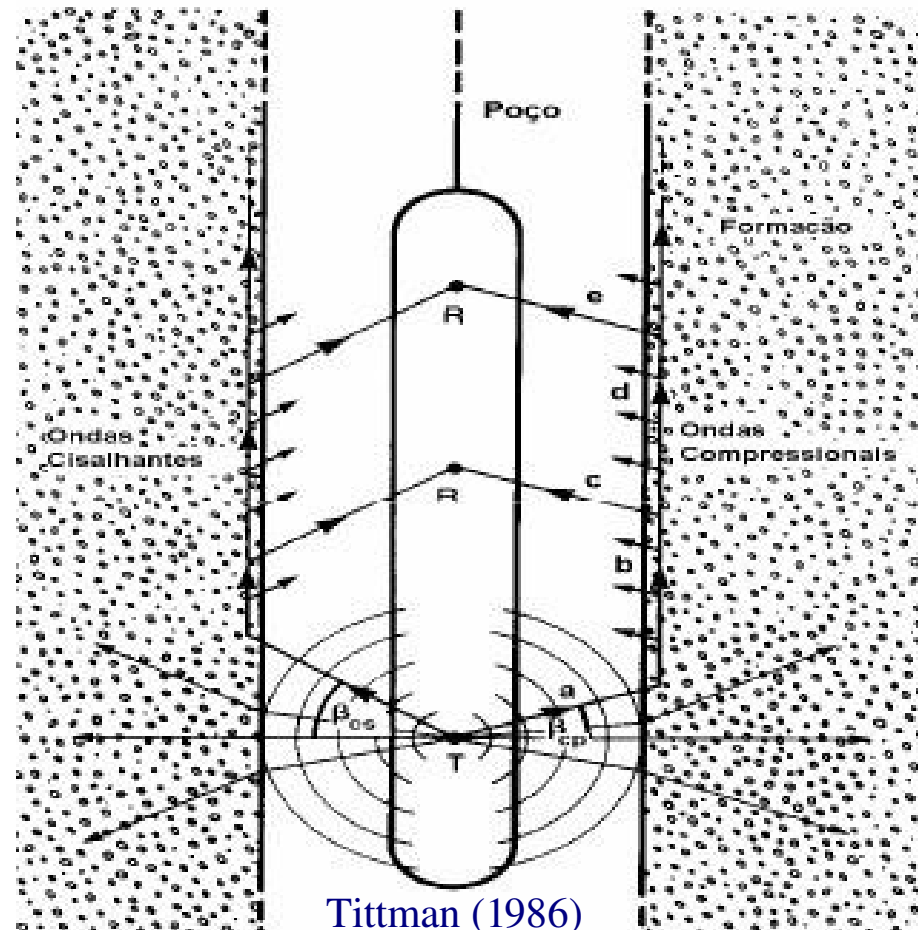
Perfil Sônico (ou Acústico)

- Registra o tempo decorrido entre o momento em que um **pulso sonoro compressional** é emitido por um transmissor até sua chegada a dois receptores distintos (sobre o mesmo mandril).

- A diferença entre os dois tempos de chegada é chamada de:

tempo de trânsito (Δt)

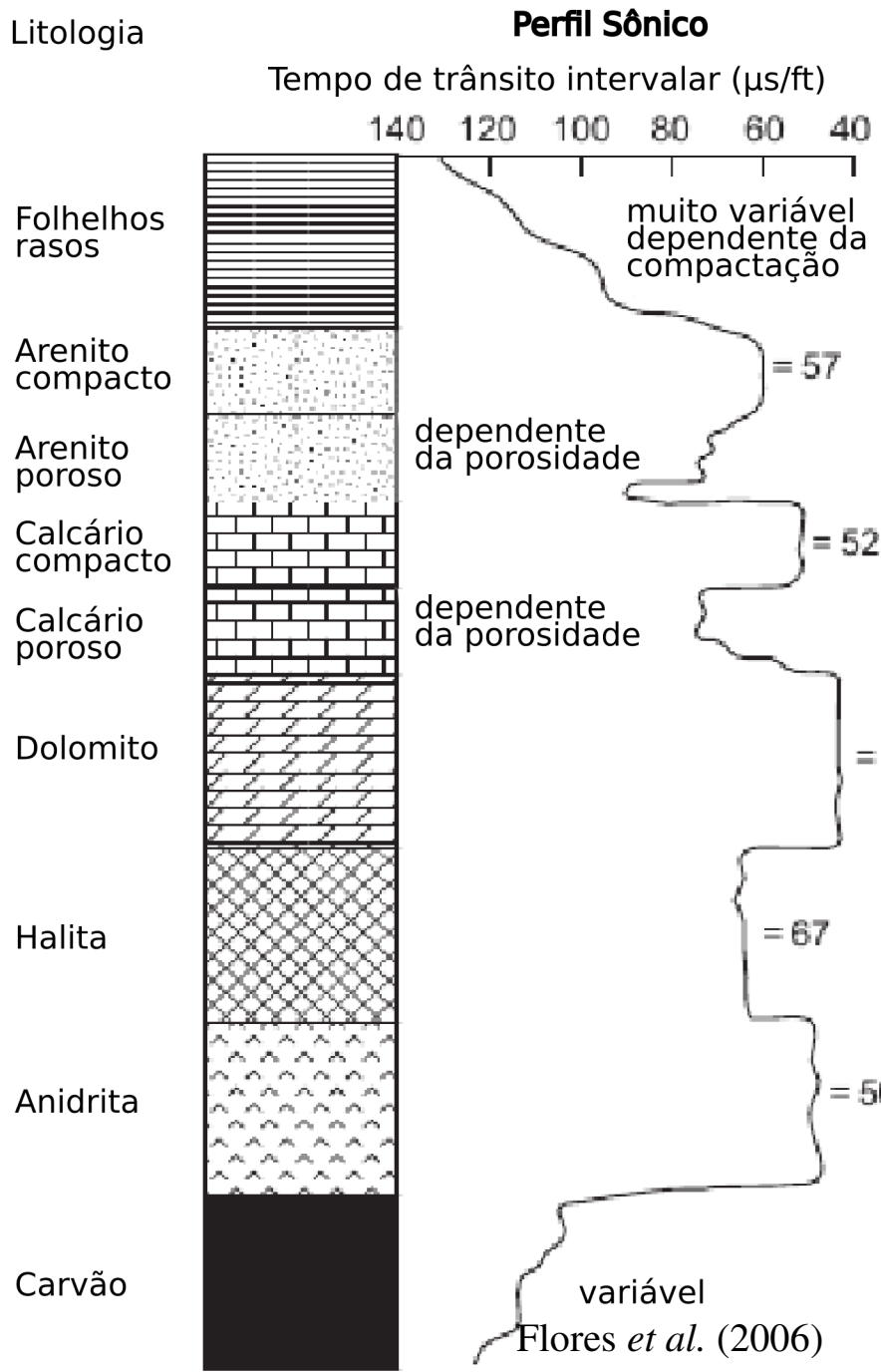
ou *delay time* (DT)



Velocidades de rochas (V) e os Tempos de trânsito (Δtm) dos principais tipos de rochas sedimentares, não porosos e Fluidos.

MEIO	VELOCIDADE SÔNICA	TEMPO DE TRÂNSITO
	(ft/s)	(μ s/ft)
ARENITO	18.000 - 19.500	55,5 - 51,2
CALCÁRIO	21.000 - 23.000	47,6 - 43,5
DOLOMITA	23.000 - 26.000	43,5 - 38,5
ANIDRITA	20.000	50,0
SAL	15.000	67,0
ARGILA	6.000 - 16.000	167,0 - 62,5
ÁGUA	5.000 - 5.300	200,0 - 189,0
PETRÓLEO	4.300	232,0
FERRO	17.500	57,0

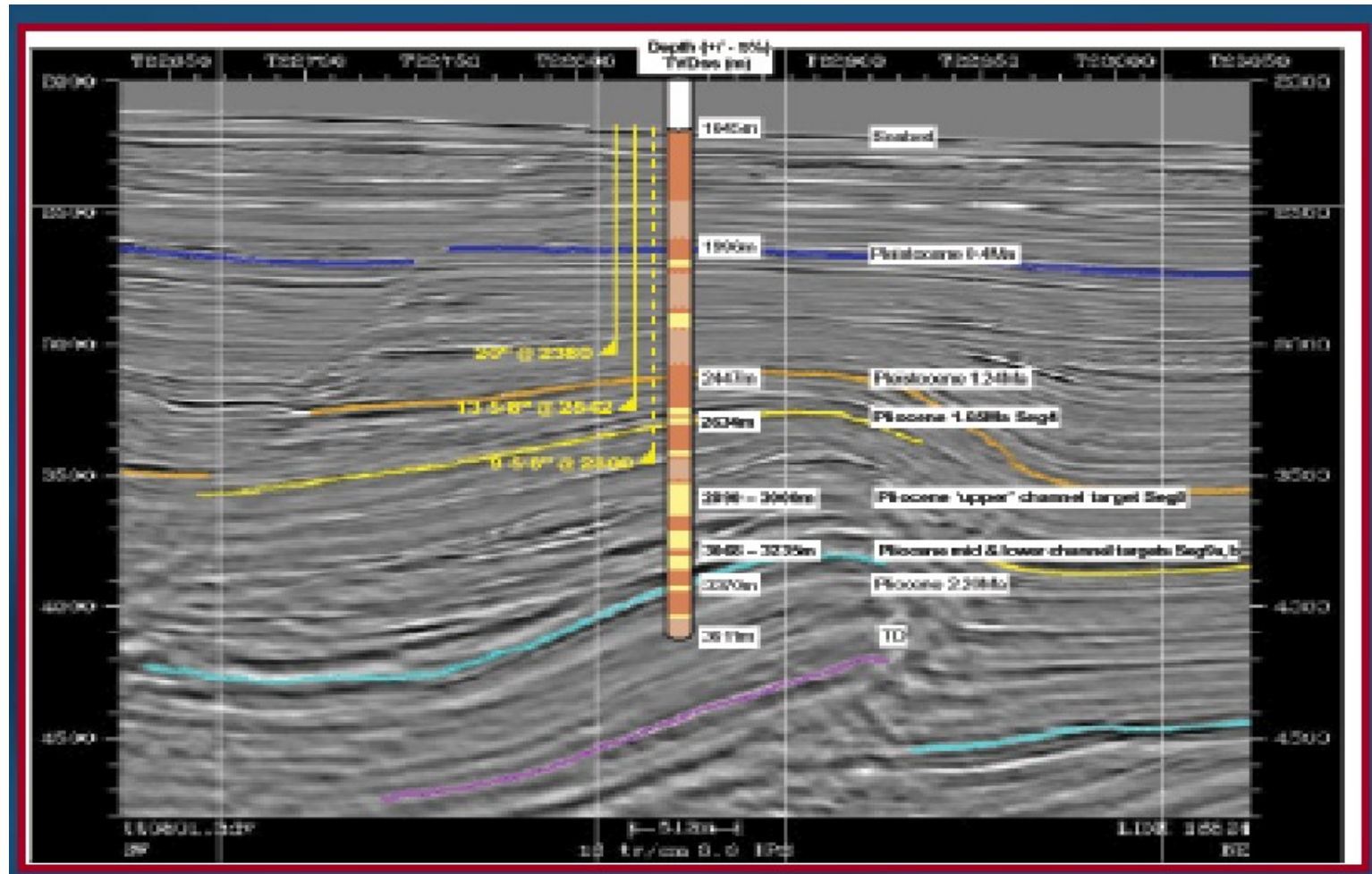
ÁGUA SALGADA: 189 μ seg/ft
 ÁGUA DOCE: 200 μ seg/ft

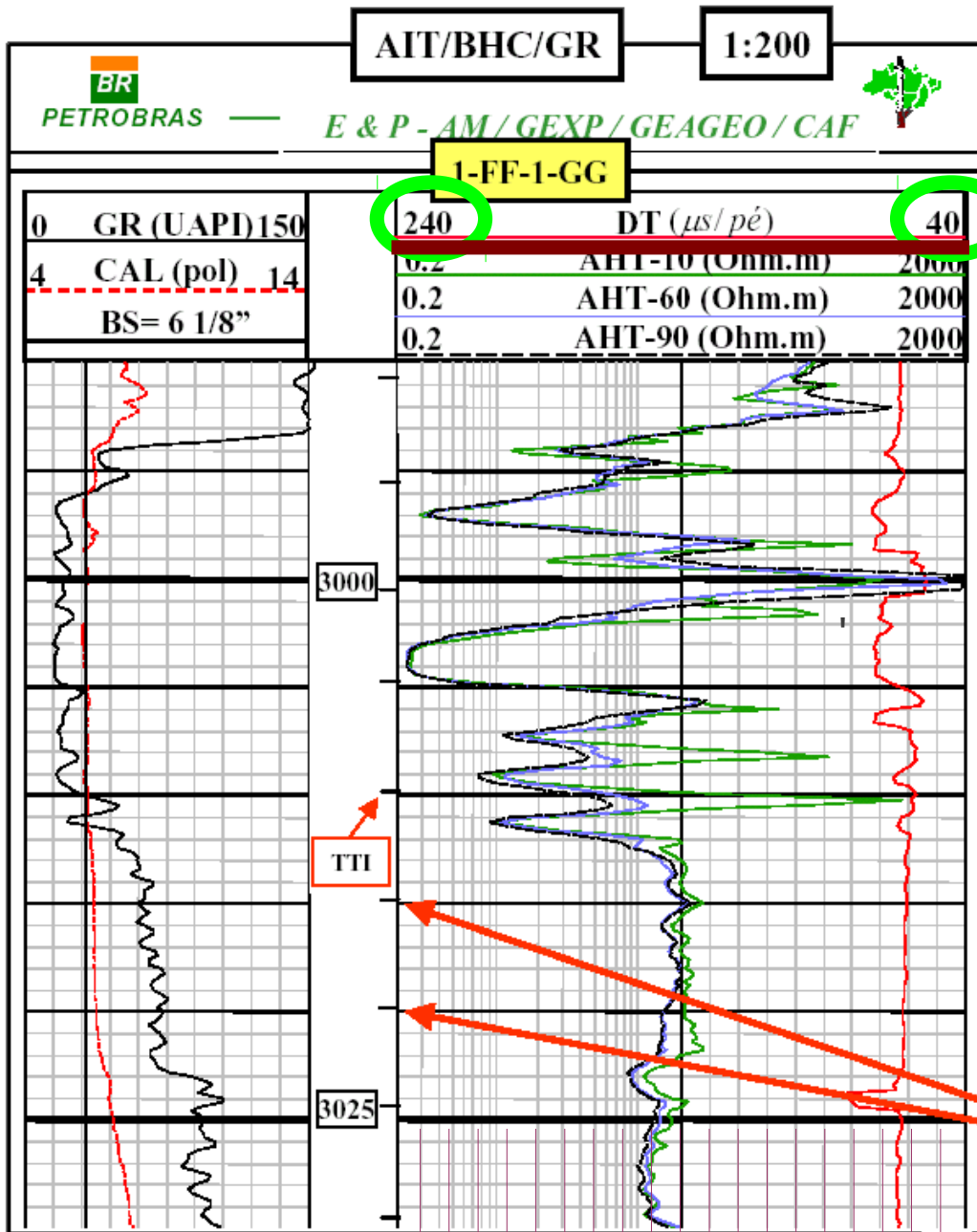


Quanto menor o tempo de trânsito, mais densa é a rocha (menos porosidade)

Perfil Sônico e Calibração Sísmica

O perfil sônico posiciona a geologia na sísmica, utilizando o tempo de trânsito integrado (TTI), e ajuda a caracterizar importantes superfícies.





APRESENTAÇÃO DO PERFIL SÔNICO

PISTA 4

Tempo de Trânsito Integrado-TTI posicionado ao lado direito da pista de profundidade. Para se testar se o integrador está bem calibrado, lê-se em um intervalo de tempo de trânsito aproximadamente constante o valor de DT e, a distância entre dois “pips” é definida como:

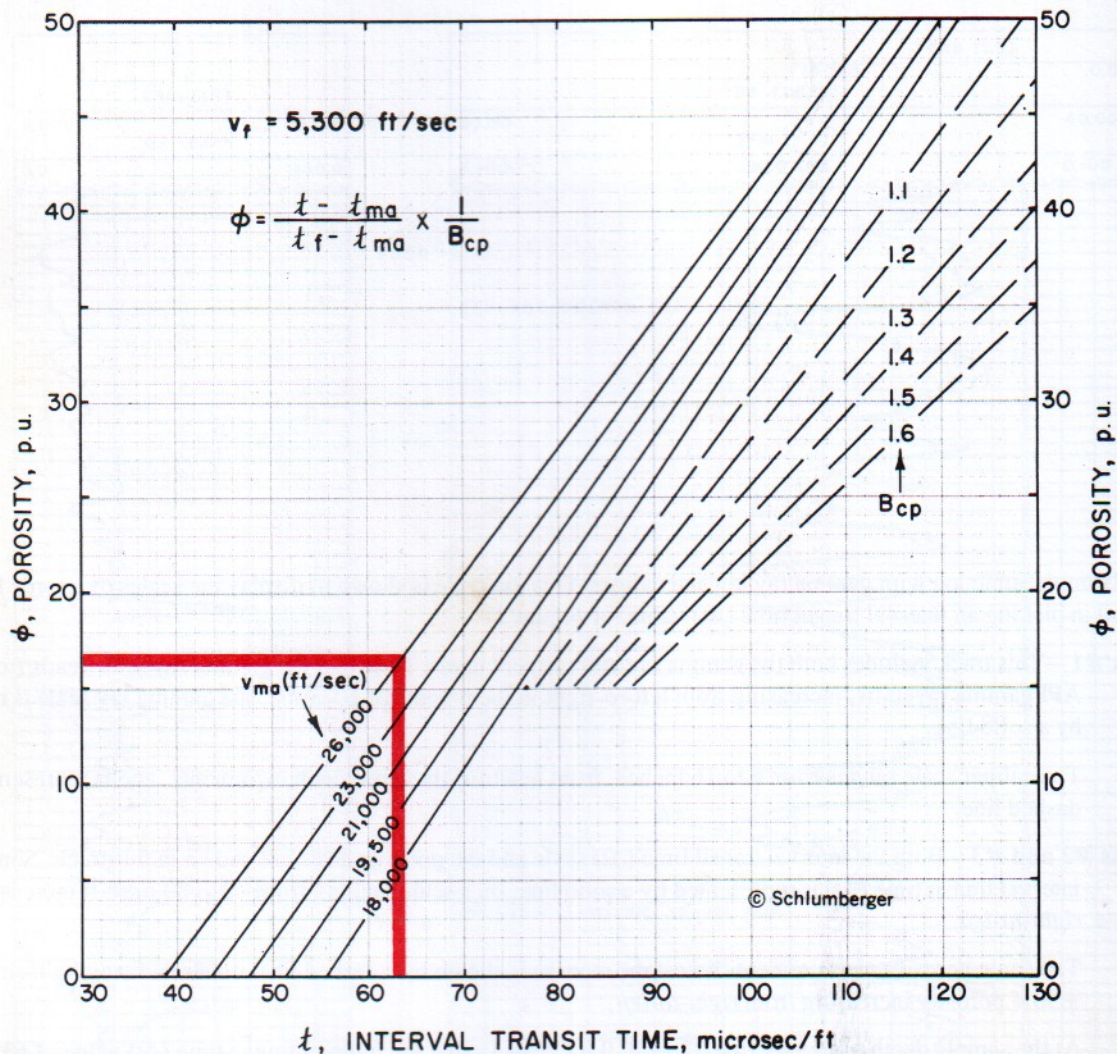
$$D = \frac{304,8}{DT}$$

$$D = \frac{304,8}{60} = 5,08m$$

Soeiro (2005)

POROSITY EVALUATION FROM SONIC

POROSITY EVALUATION FROM t



	v_{ma} (ft/sec)	t_{ma} (microsec/ft)
Sandstones	18,000-19,500	55.5 - 51.3
Limestones	21,000-23,000	47.6 - 43.5
Dolomites	23,000-26,000	43.5 - 38.5

Inclinação da reta

Tempo de Trânsito da matriz (Rocha)

$$\phi t = 0,625 \times \left(\frac{\Delta t - \Delta t_m}{\Delta t} \right)$$

Tempo de Trânsito lido

Asquish and Gibson (1982)

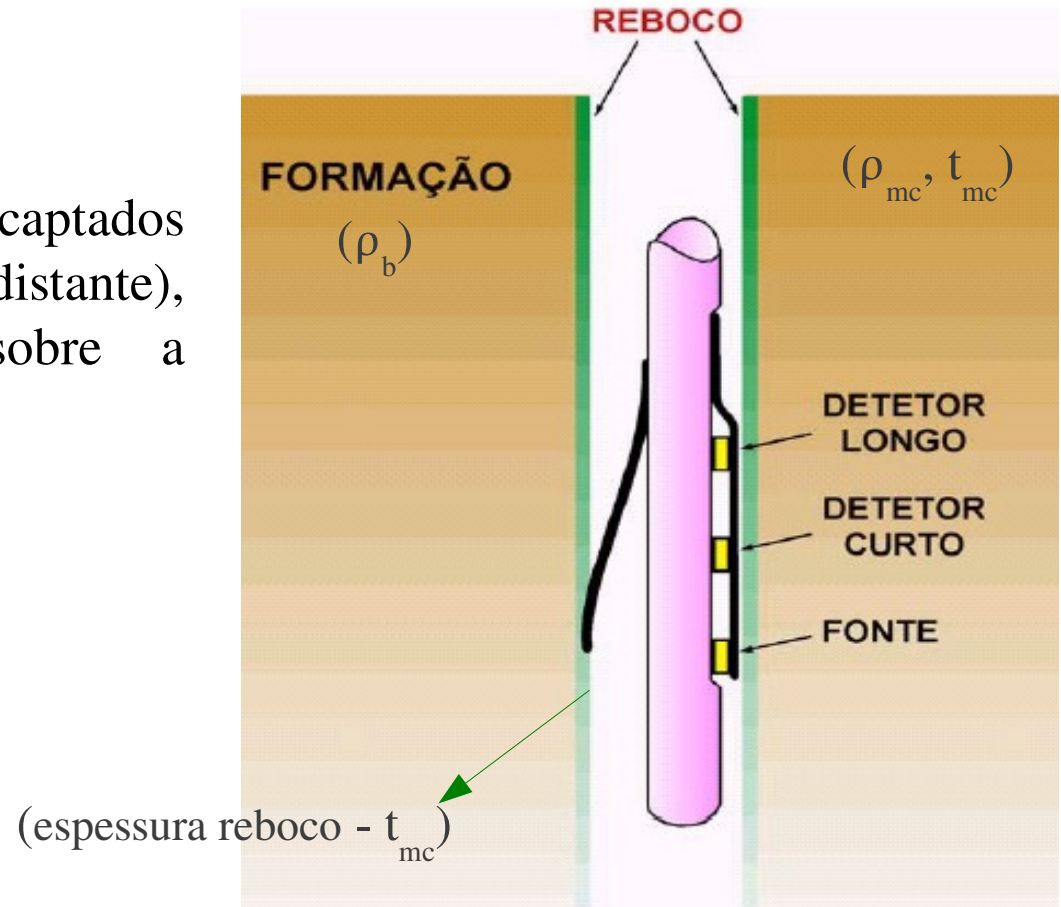
Perfil de Densidade – FDL (Formation Density Log)

- A densidade da rocha depende:
 - a) da densidade da parte sólida da rocha (grãos, cimento, argila)
 - b) da porosidade
 - c) da densidade dos fluidos presentes nos poros

Perfil de Densidade – Princípio

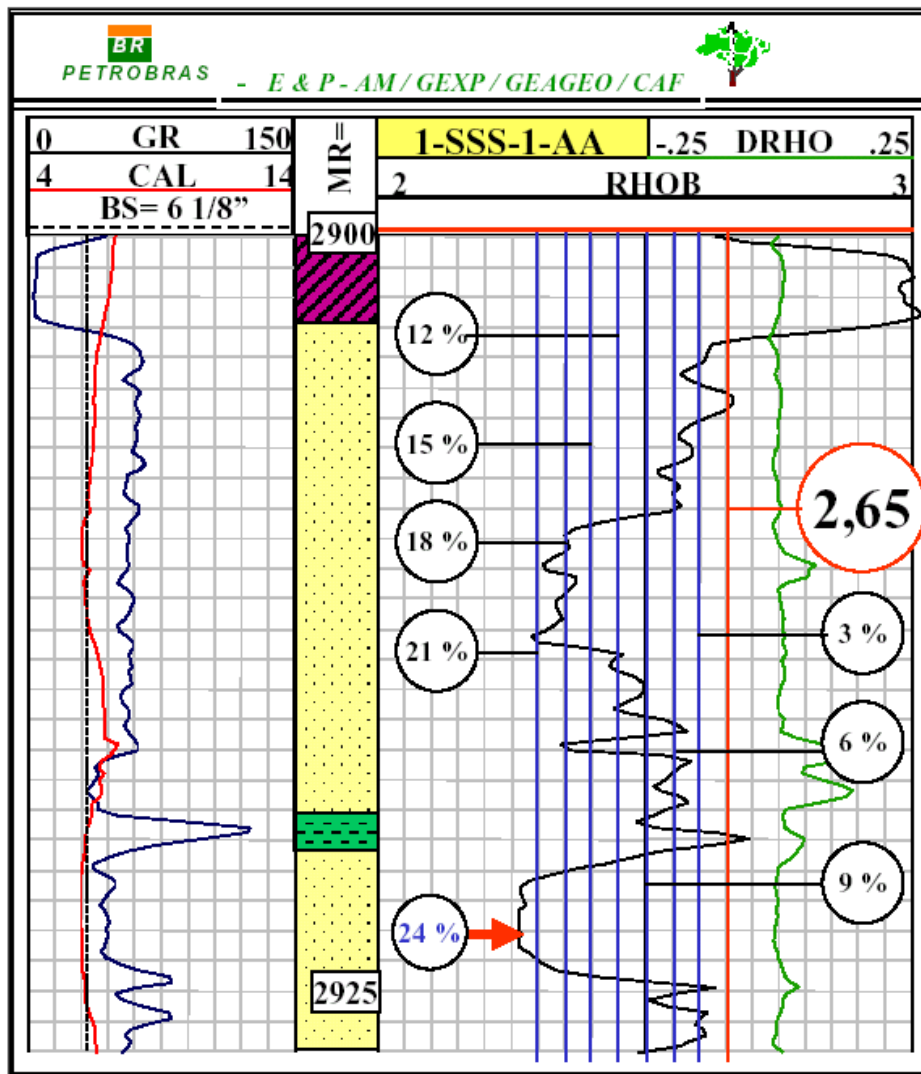
- Uma fonte radioativa (Césio-137) é aplicada na parede do poço, emitindo raios gama, que interagem com os elétrons dos átomos da formação.
- Ocorre a perda de energia dos raios gama com a colisão.

- Após sofrerem dispersão, são captados por dois detectores (próximo e distante), que fornecem informação sobre a densidade da rocha.



Quanto mais densa a formação (rocha), mais elétrons ela possui e mais raios gama de espalhamento são detectados

PERFIL DE DENSIDADE



Leitura de Porosidade Direta
no Perfil sem Correção

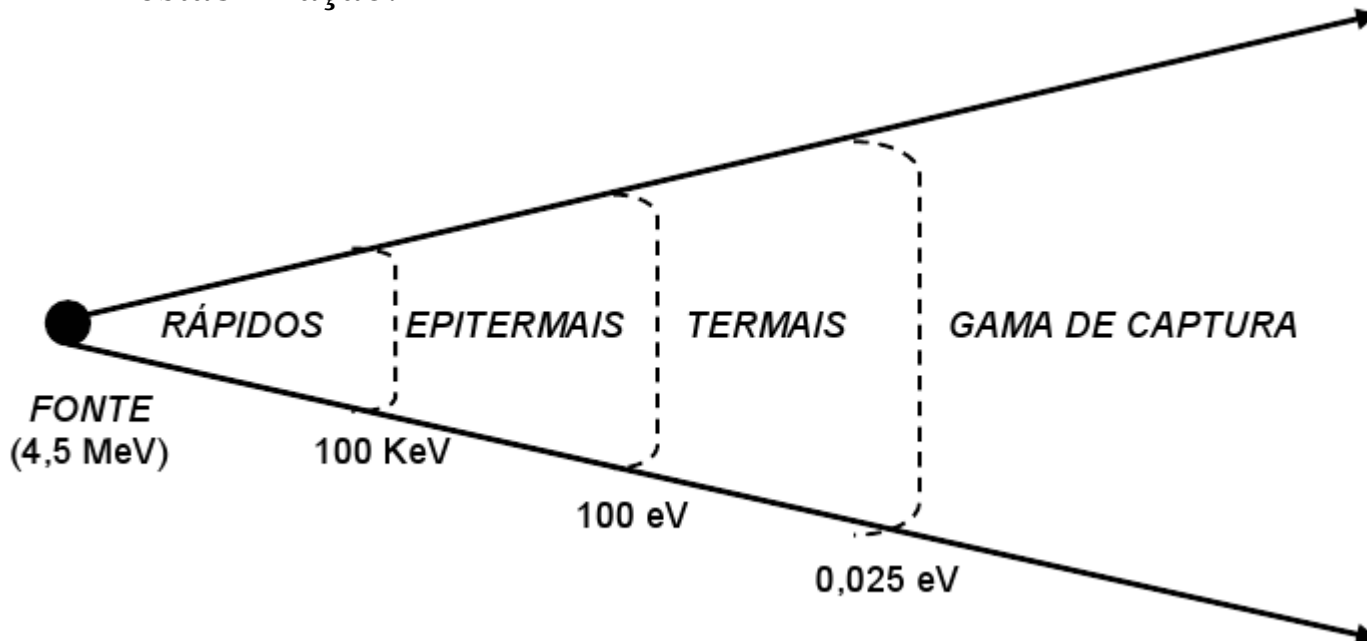
Passos

- 1-Identificar a Densidade da Matriz
- 2-A partir desta, cada linha á esquerda vale 3% de unidade de porosidade.

	$\rho_b(g/cm^3)$
Quartzo	2,65
Calcita	2,71

Perfil Nêutrons

- Nêutrons (emitidos pela ferramenta)
- Perda da energia por colisões inelásticas e elásticas (perda de energia é maior com núcleos de massa praticamente igual ao seu - ex. Núcleo de H).
- Ao atingirem a velocidade e a energia termal do meio (0,025 eV – elétronsVolts), difundem-se erráticamente (sem mais perda de energia), até serem capturados por qualquer núcleo (H, Cl, B, etc).
- O núcleo que o captura é excitado e emite raios gama de alta energia, até sua estabilização.



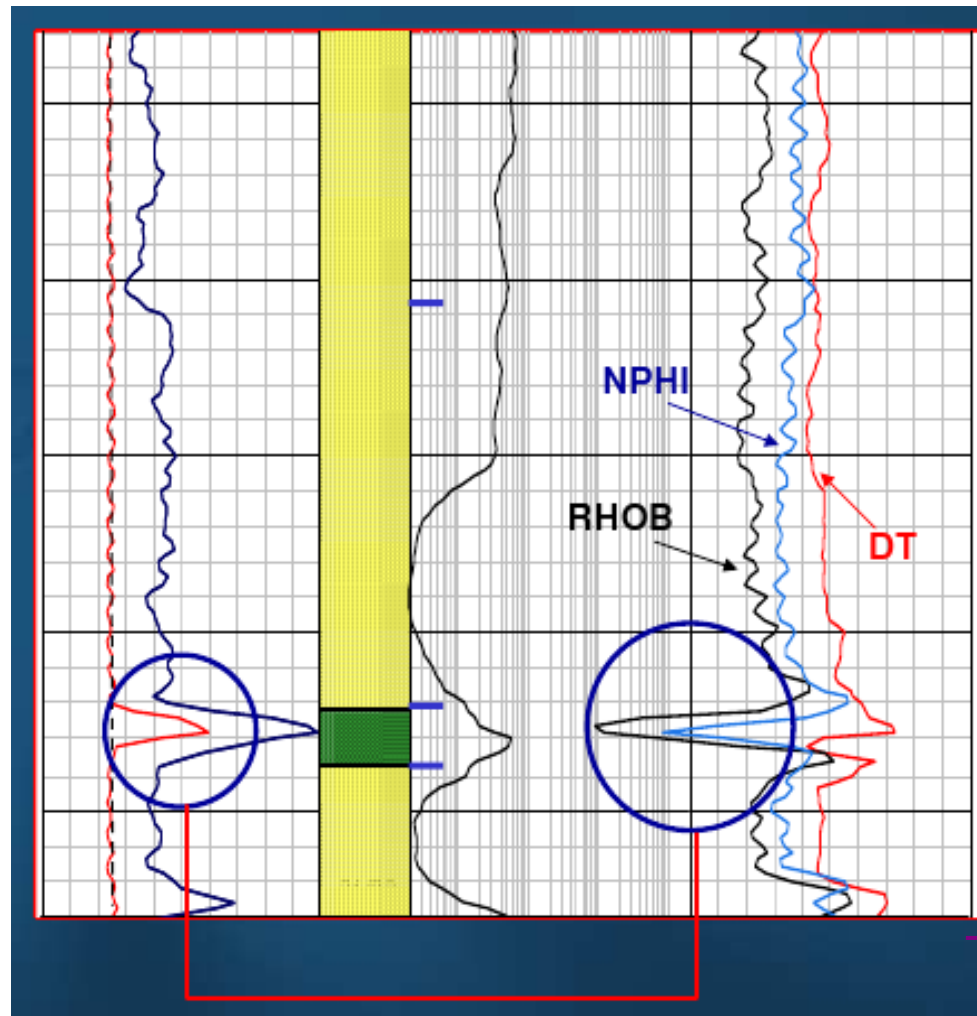
QUANTO MAIOR O ÍNDICE DE “H”, MENOR É A CONTAGEM DE NÊUTRONS TERMAIS NOS RECEPTORES

ASSIM, INTERPRETA-SE UM MAIOR VALOR DA POROSIDADE

(influenciada pela quantidade de H)

CUIDADO:

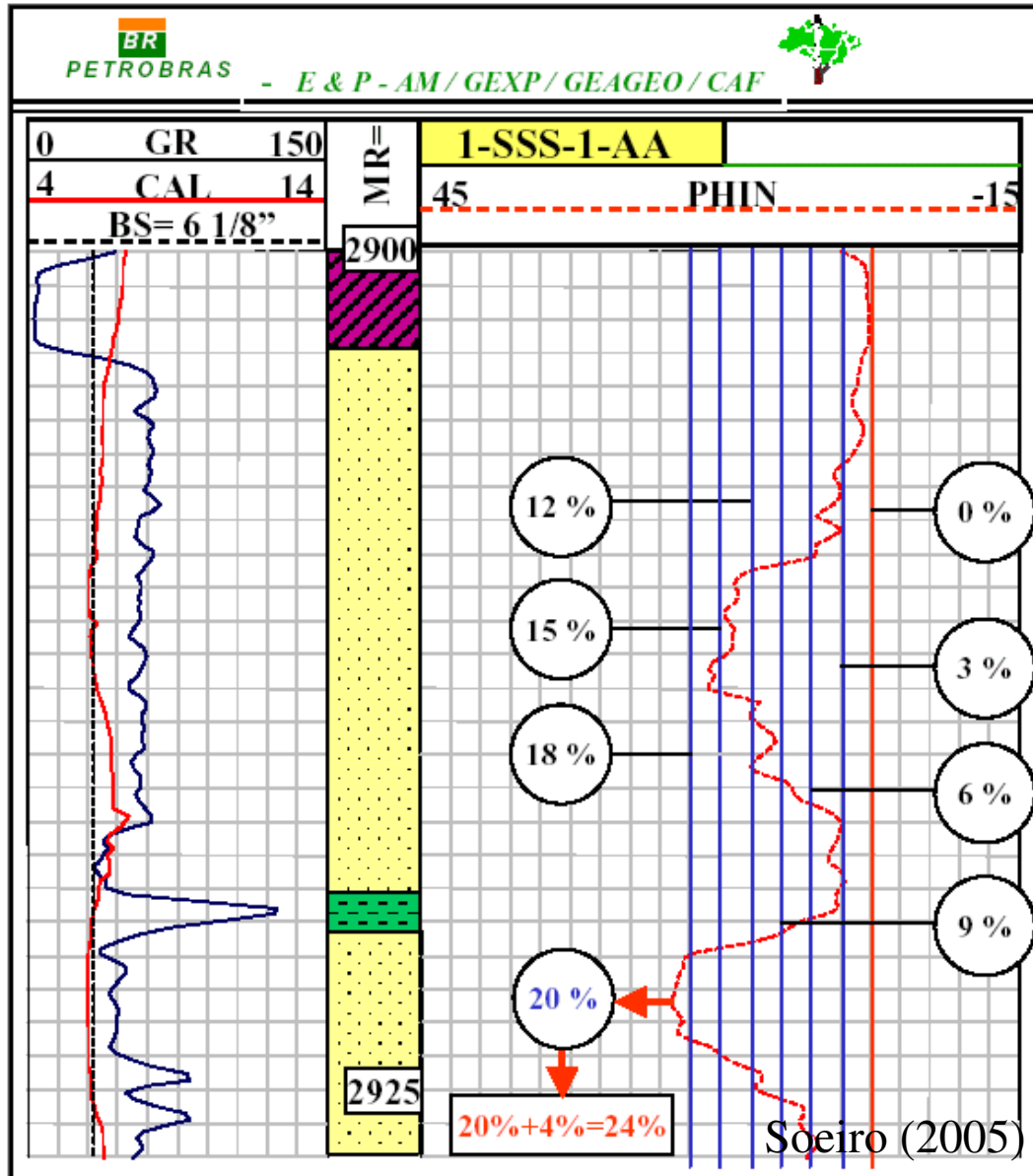
- Os elementos **Boro, Cd, Cl e Ba** (*elementos absorvedores*)-porosidades $>$ a 30% e as concentrações das águas maiores do que 50Kppm de NaCl.
- O Cloro (**Cl**) chega a ser 100 vezes mais absorvedor que o **H**.
- Folhelhos e argilas possuem muita água estrutural.



Soeiro (2005)

Perfil. Básicas:
Nêutrons

PERFIL NEUTRÃO



Soeiro (2005)

LEITURA DE POROSIDADE PASSOS

- 1-) A escala é de porosidade
- 2-) Determinar o zero de porosidade
- 3-) Cada linha vertical equivale a 3% de porosidade.
- 4-) O valor lido do ponto assinalado é 20%.
- 5-) Como a ferramenta é calibrada para calcário, temos que adicionar mais 4 % ao valor lido. Portanto a porosidade real é 24%.

Perfil. Básicas: Nêutrons

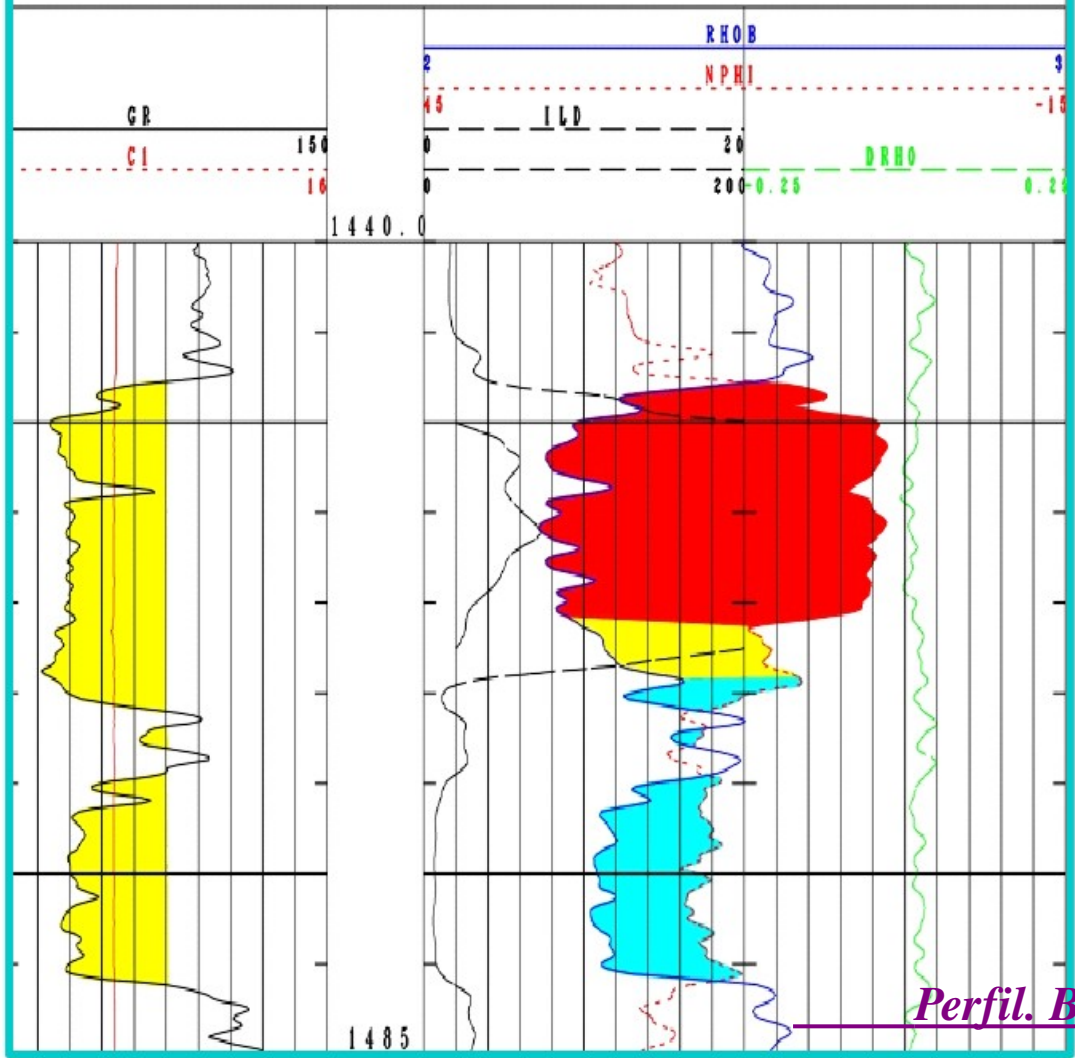
Detecção de Gás

A ferramenta de nêutrons, comparada com a de densidade, é utilizada na identificação da presença de hidrocarbonetos leves nas rochas reservatórios.

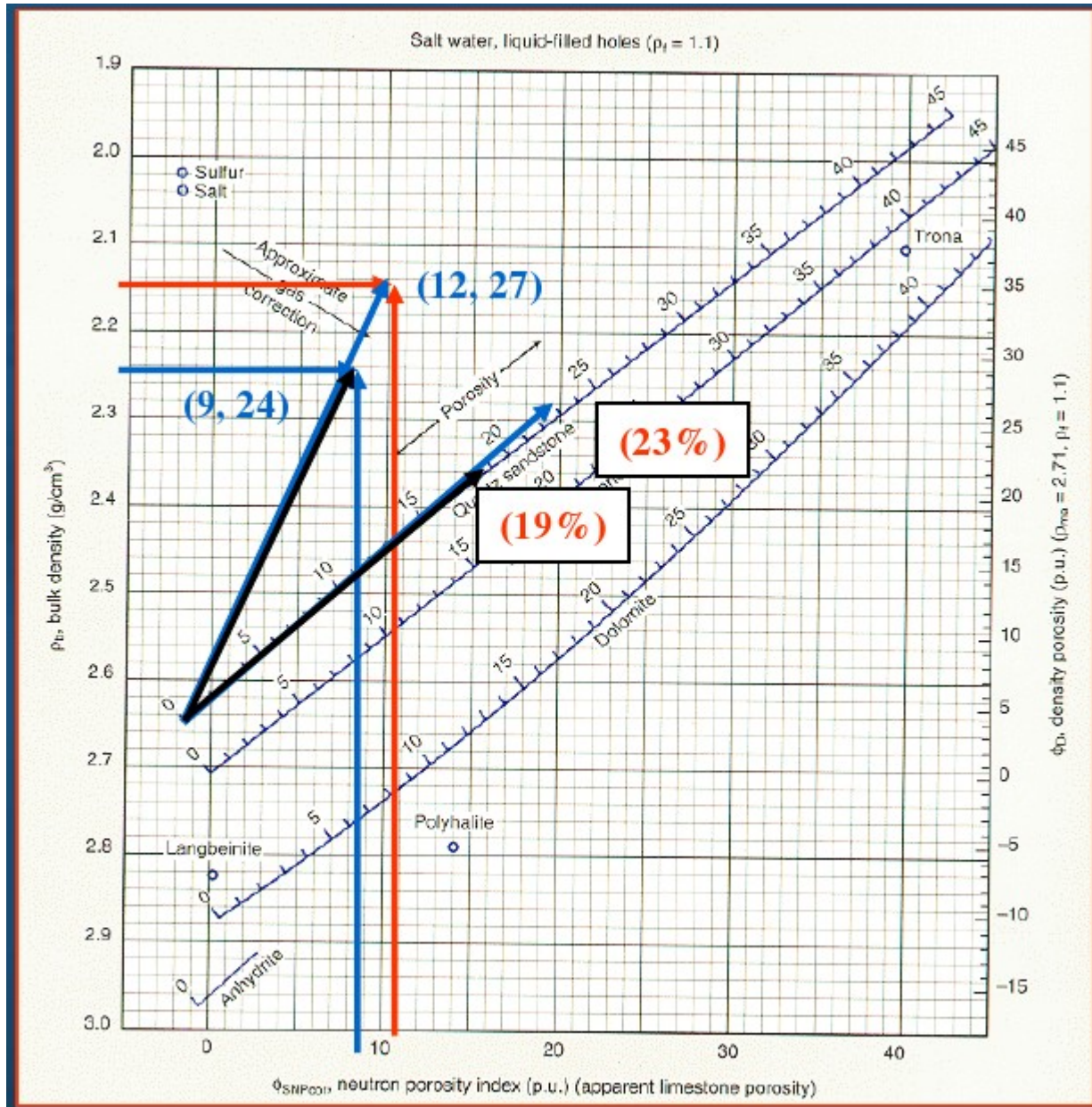
COMPOSITE

POCO:

ESCALA: 1/500



Correção da Porosidade – Efeito de Gás

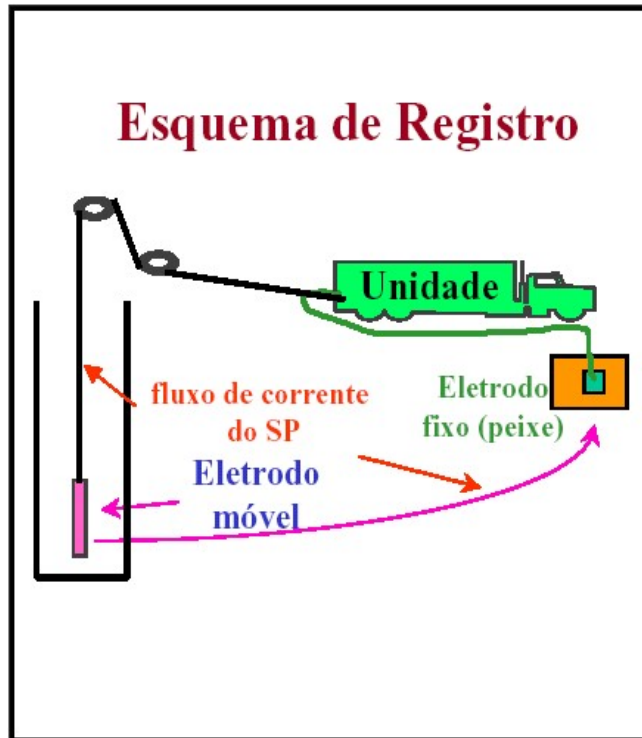


Potencial Espontâneo (SP)

Perfis de Resistividade

Perfis de Potencial Espontâneo (SP)

- O Cloreto (mais solúvel) migra mais rápido de um fluido concentrado para o outro mais diluído.
- A corrente (eletroquímica) se propaga pelos fluidos intersticiais existentes nos poros.
- Quando o equilíbrio salino é estabelecido, cria-se um diferencial de carga.

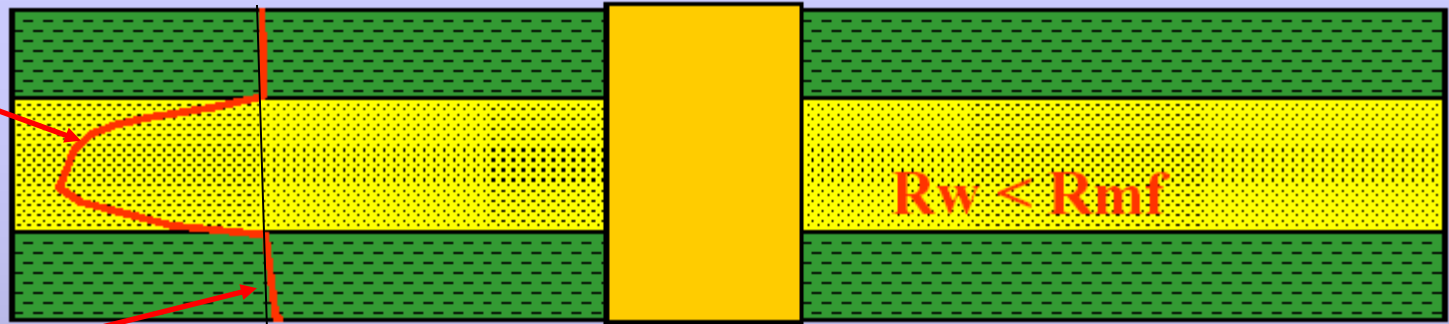


SP
É um registro da diferença de potencial entre dois eletrodos: um móvel dentro do poço e outro fixo, na superfície

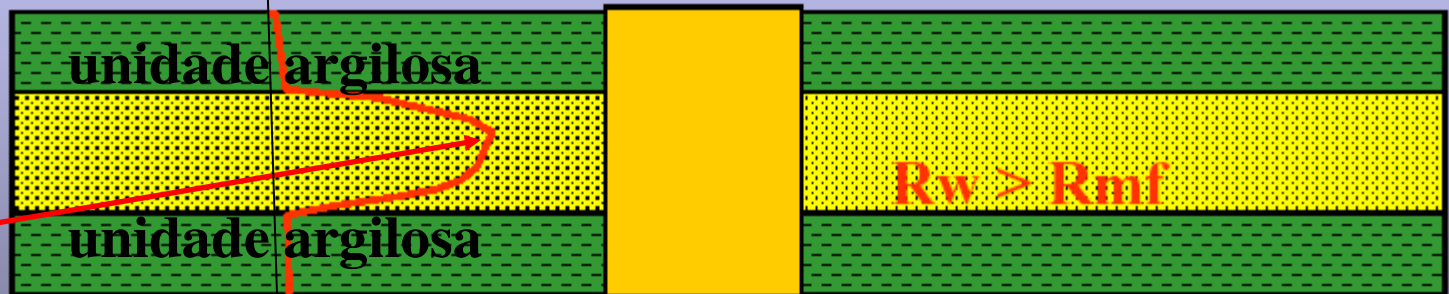
Deflexão da Curva SP

A deflexão é proporcional à diferença de resistividade entre o fluido de perfuração e o fluido da formação.

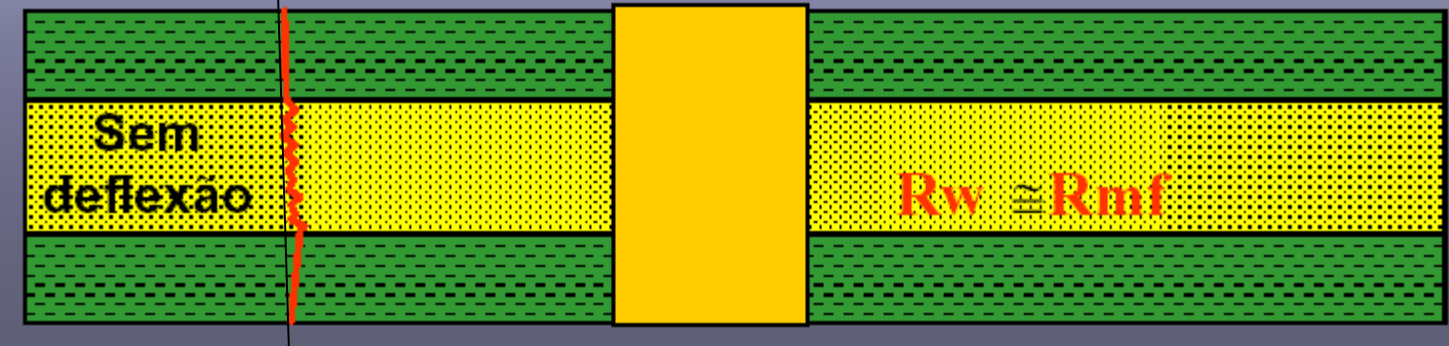
Deflexão negativa



Linha base do folhelho



Deflexão positiva



Soeiro (2005)

R_w : resistividade do fluido da formação

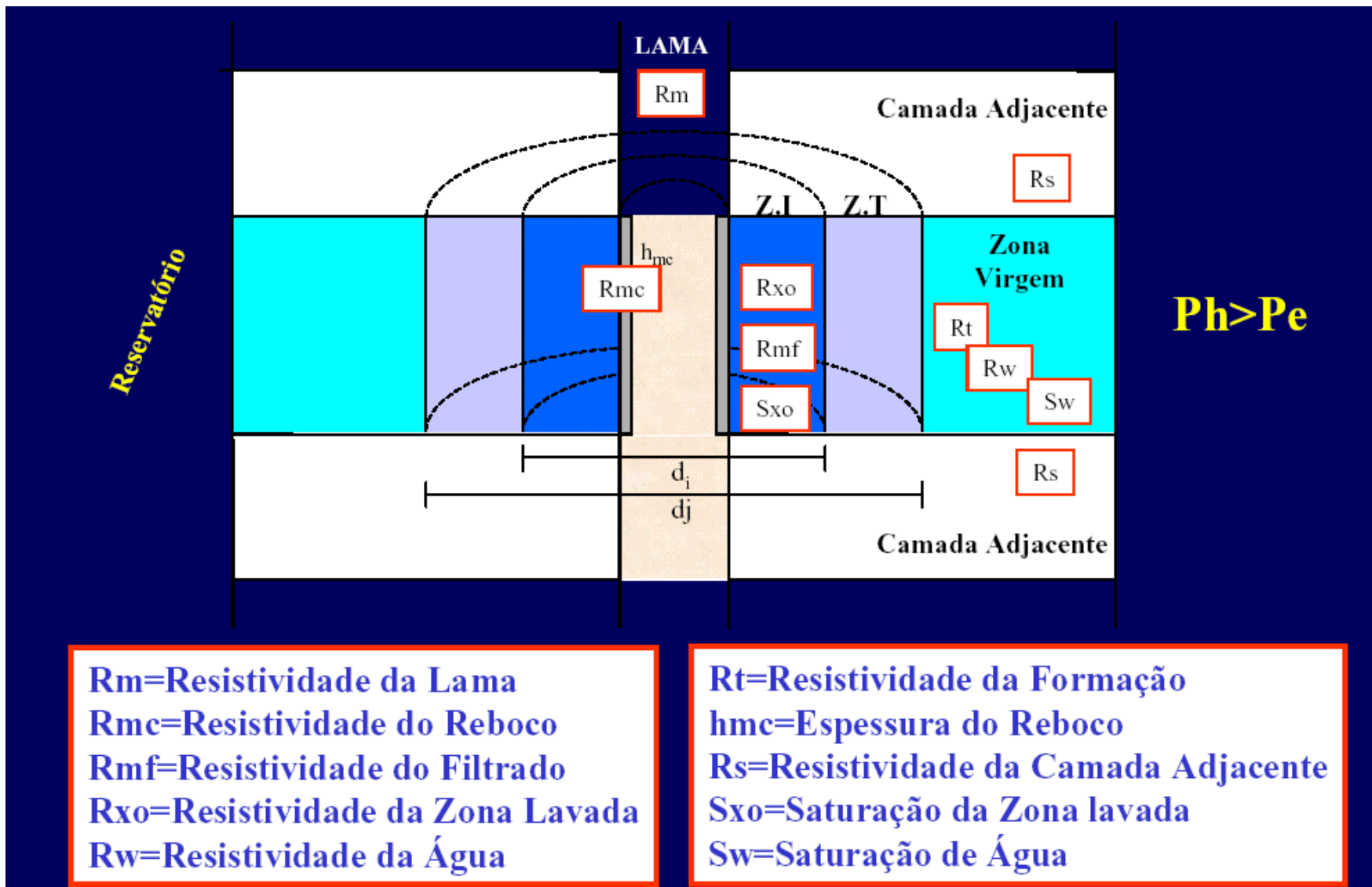
R_{mf} : resistividade do filtrado (fluido de perfuração)

Perfis Elétricos: Potencial Espontâneo

Perfis de Resistividade

- Obter R_t (resistividade da formação)
- Avaliar heterogeneidades de reservatórios
- Indicação qualitativa de permeabilidade
- Medir resistividade da água da formação (R_w) – obter a composição dos fluidos dos poros
- Calcular saturação de água (S_w)
- Identificação de zonas portadoras de hidrocarbonetos
- Contatos entre fluidos

Ambiente de Poço – aquisição de parâmetros



Tipos de Perfilagem de Resistividade

- As ferramentas de medição de resistividade são configuradas para medir a resistividade da formação em diferentes distâncias (profundidades) dentro da formação (da rocha).

1- Elétrico convencional

2- Perfil de Indução (Bobina)

3- Perfil com Eletrodos Focados (Latero-Perfil)

4- Microresistividade

Tipos de Perfis de Indução

1- Indução Elétrica – IEL

curvas Profunda (40’), Rasa (16’) e curva SP

2- Indução Esférico Focalizado – ISF

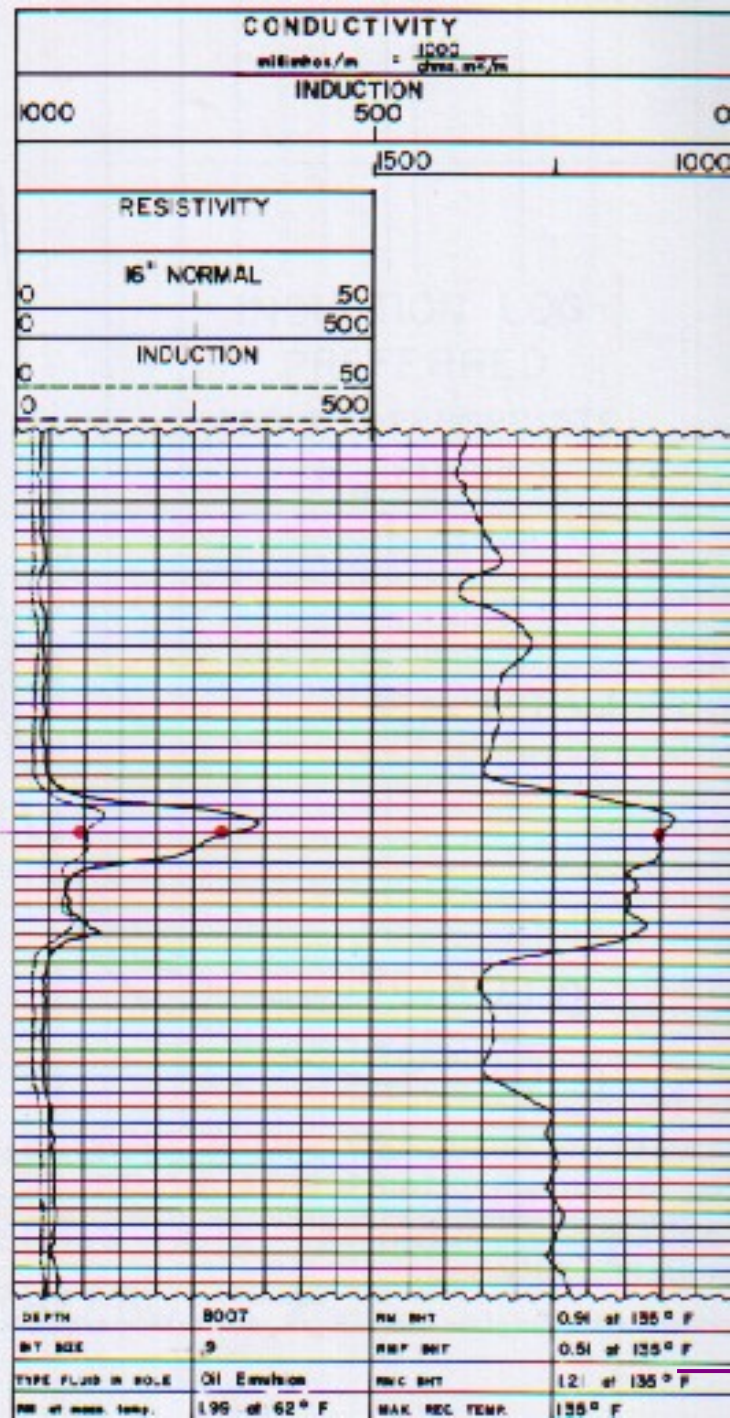
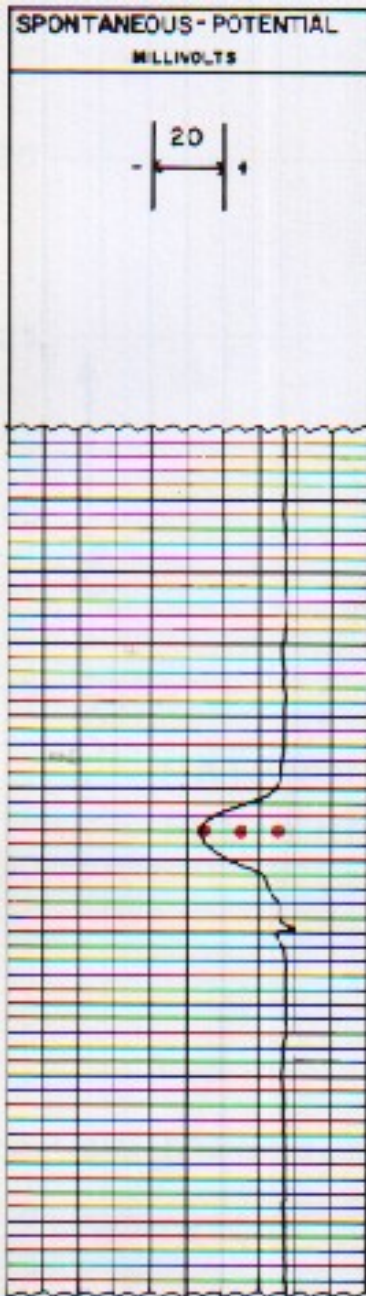
curvas Ild (profunda) e Sflu (rasa)

3- Dupla Indução – DIT / DIL – poços com arrombamento

curvas Ild (profunda), Ilm (média) e Sflu (rasa)

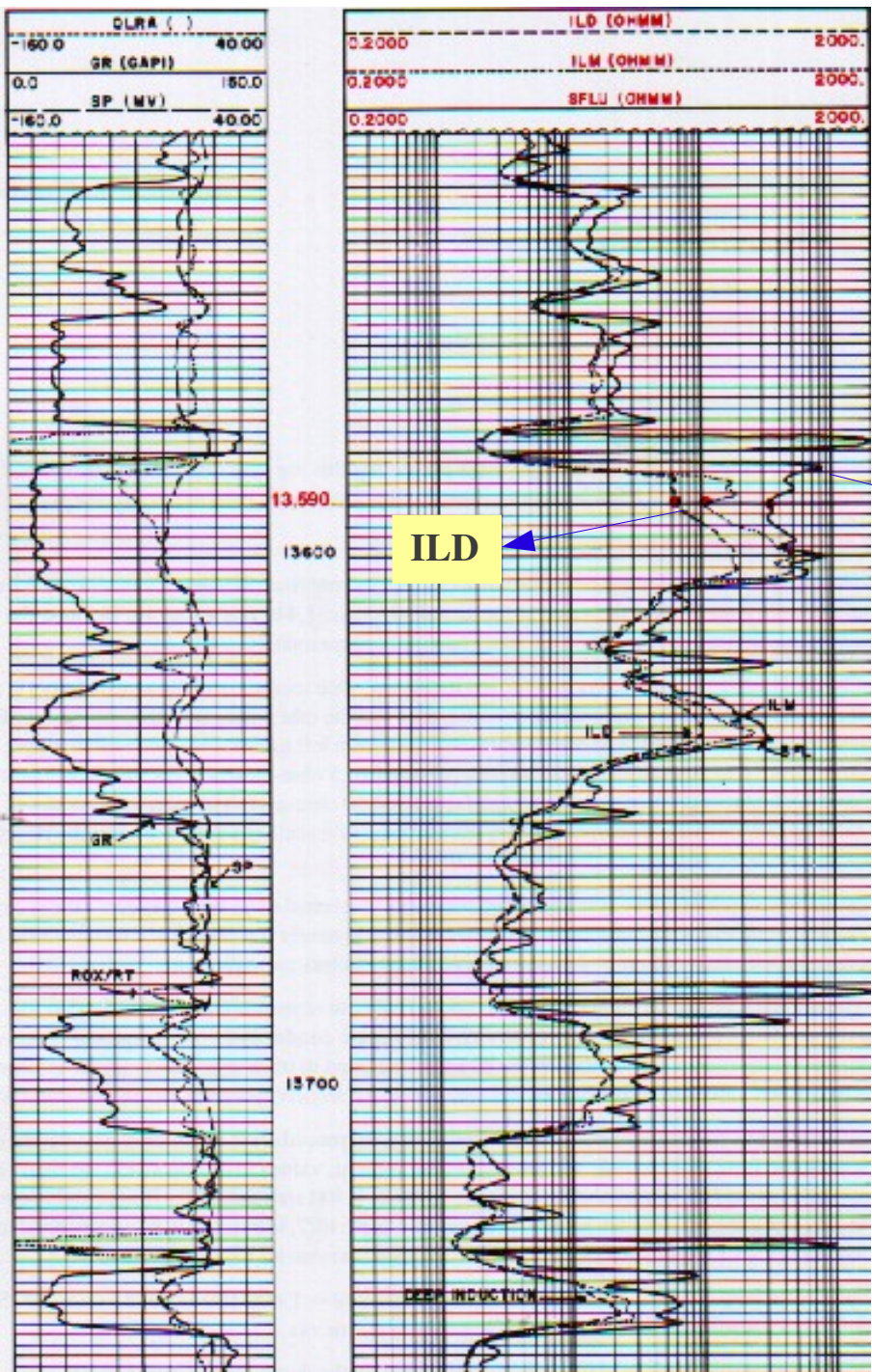
4- Array Induction Imager Tool – AIT

5 curvas com diâmetros de investigação (10’, 20, 30’, 60’ e 90’)



Exemplo de perfil de Indução Elétrica

- O Perfil de Indução Elétrica é geralmente usada quando $R_{mf} \gg R_w$.
- Pista 1: Perfil SP.
- Pista 2: Indução Elétrica
- Pista 3: Condutividade



Exemplo de perfil de Dupla Indução Focada

Asquith and Gibson (1982)

Nota:

Os valores de resistividade obtidos nestas três curvas correspondem à resistividade em uma dada profundidade (R_{ILD}).

Estes valores são corrigidos, sendo plotados no **Gráfico de Tornado** e, então, obtém-se a resistividade verdadeira da formação (R_t).

Valores corrigidos de Rt e Rxo:

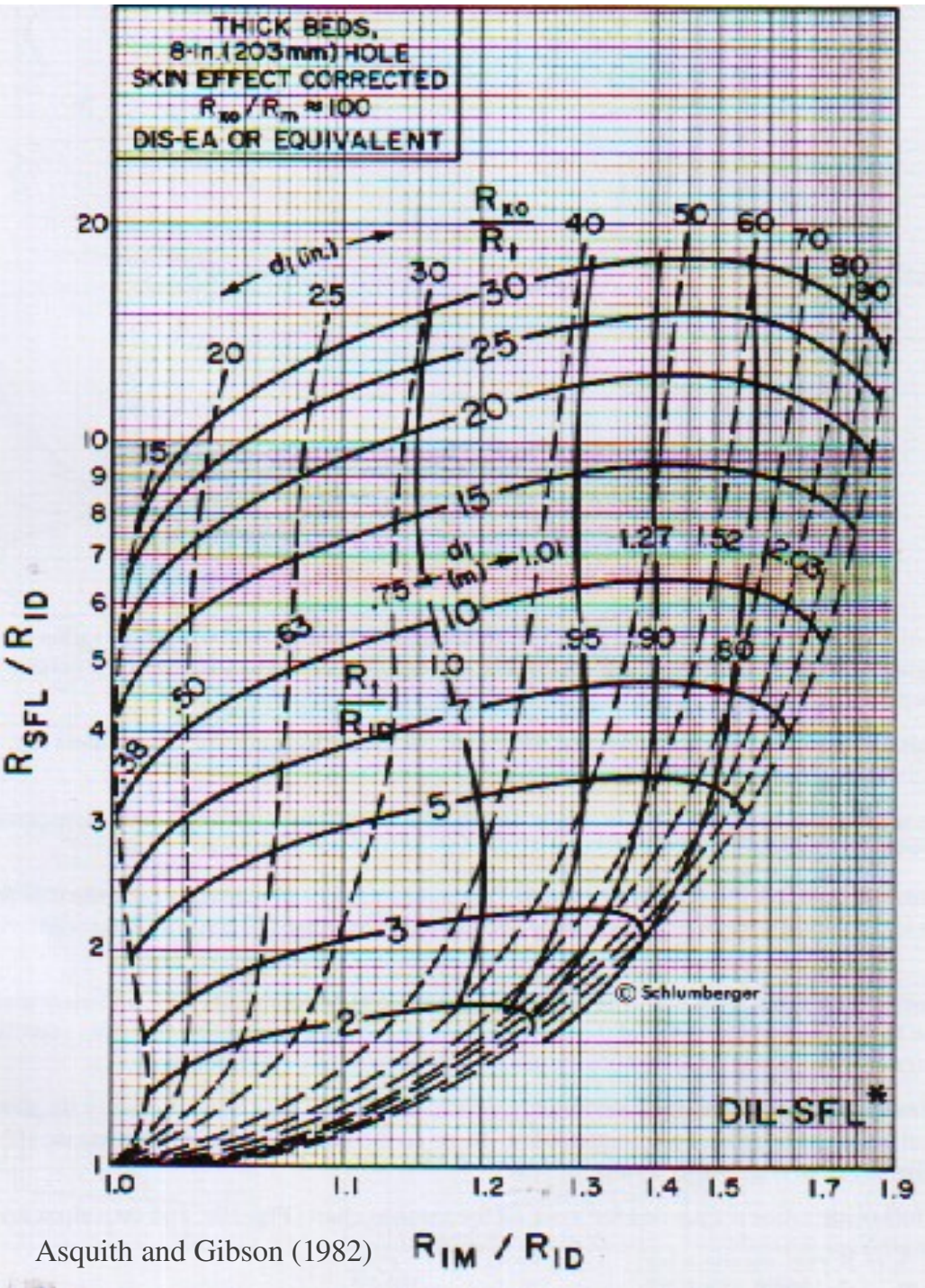
a) Valor de **Rt** corrigido:

$$(R_t / R_{ILD}) \times R_{ILD}$$

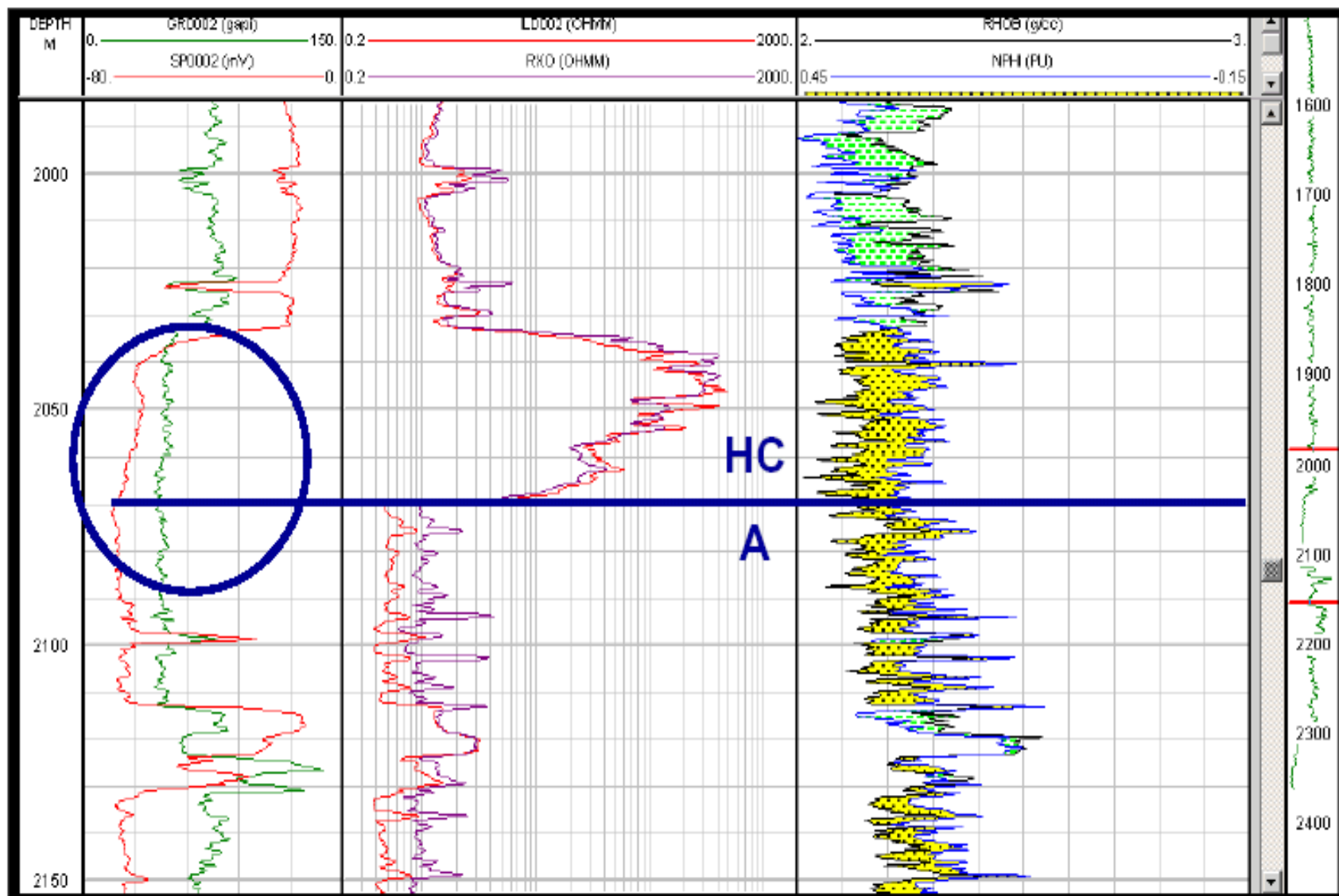
b) Valor de **Rxo** corrigido:

$$(R_{xo} / R_t) \times R_t$$

c) Determina o diâmetro de invasão (di).



Asquith and Gibson (1982)

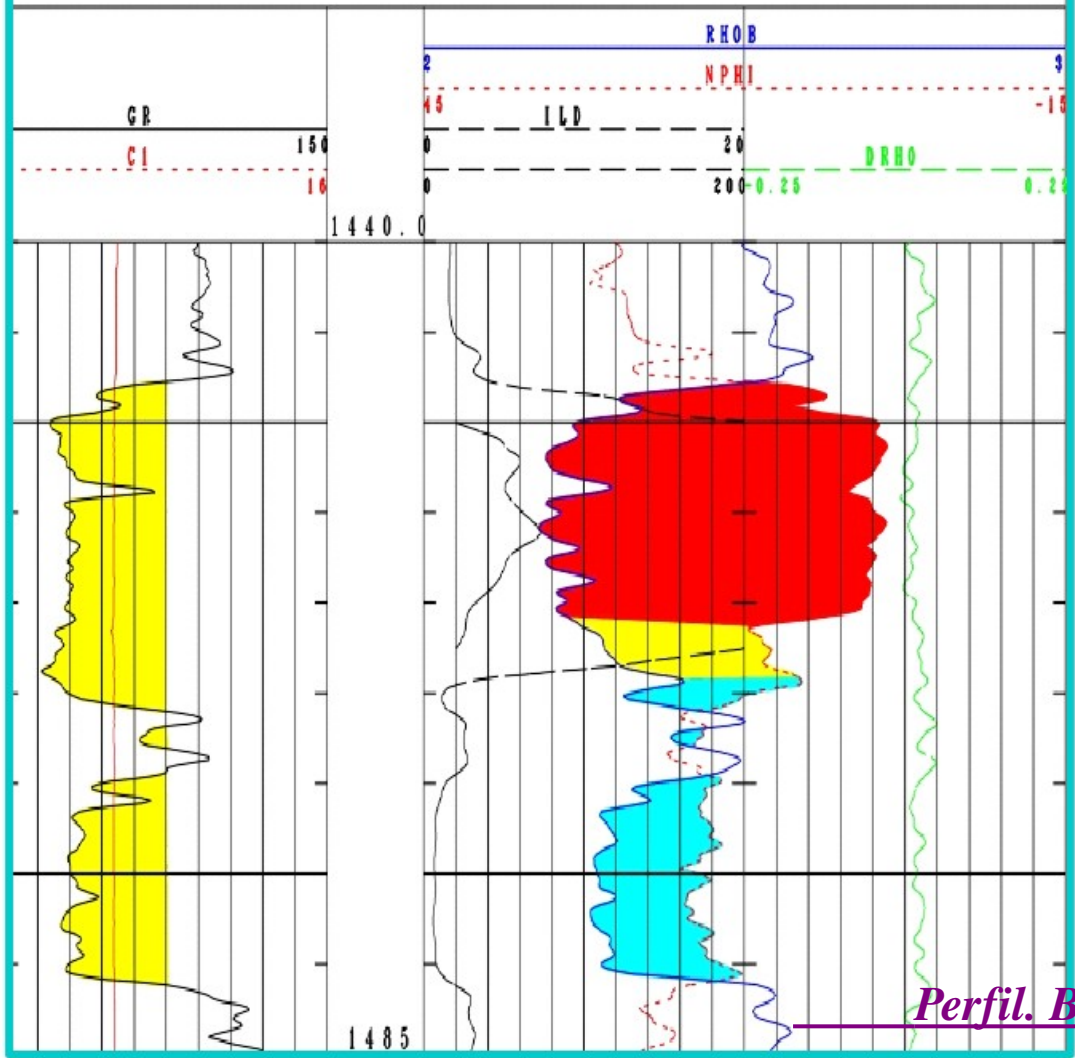


Perfis Eléctricos: Resistividade

COMPOSITE

POCO:

ESCALA: 1/500



Perfilagens Especiais

- **Perfis de Mergulho - Dipmeter**
- **Perfis de Imagem Resistiva**
- **Perfis de Imagem Acústica**
- **Perfis de Ressonância Magnética Nuclear**

Perfis de Mergulho - Dipmeter

- Fornece atitudes:
 - estruturas sedimentares
 - falhas
 - limite erosivo / litológicos.
- Direção e mergulho do poço, pelo clinômetro e magnetômetro (posicionados na ferramenta).

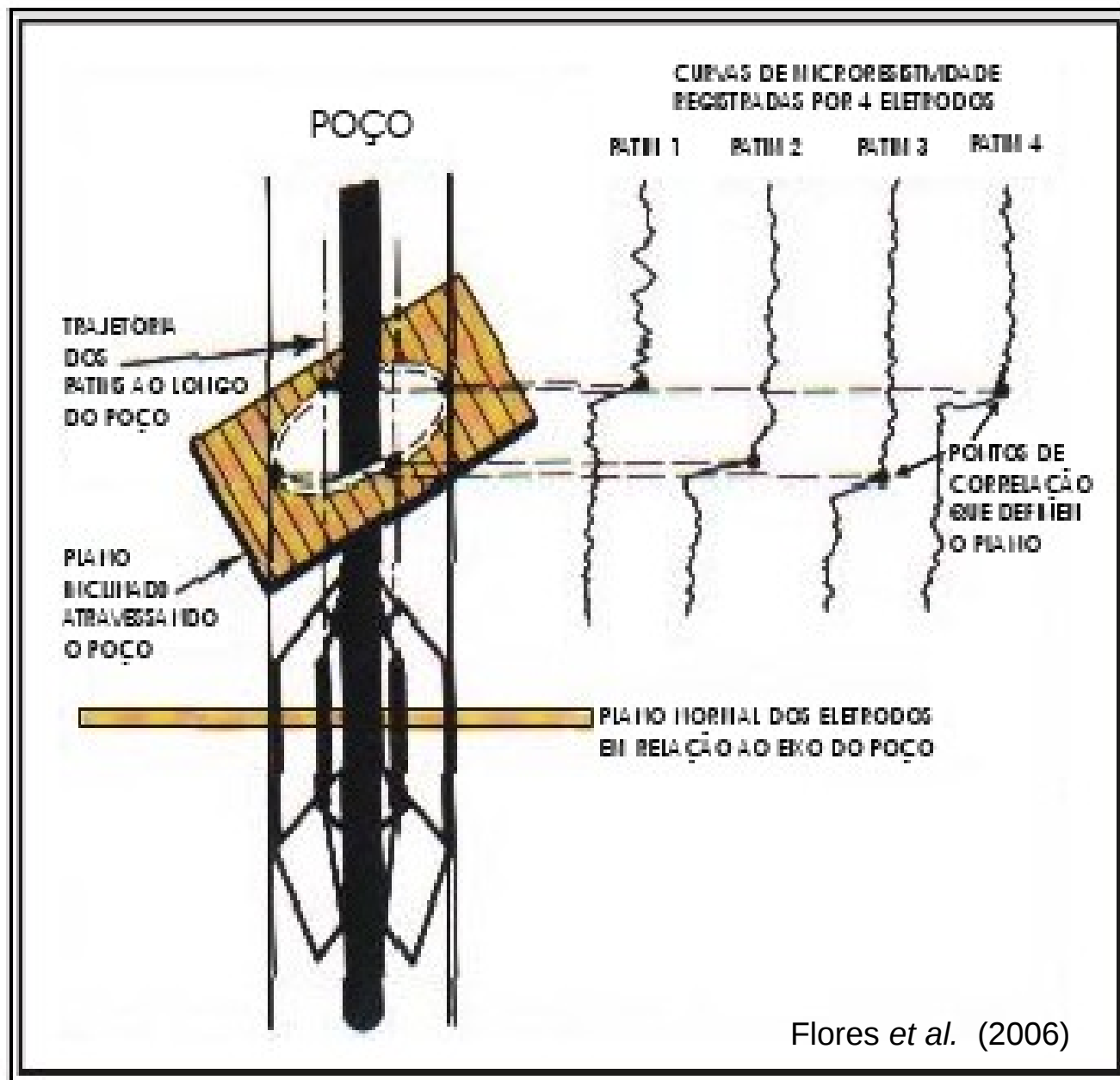
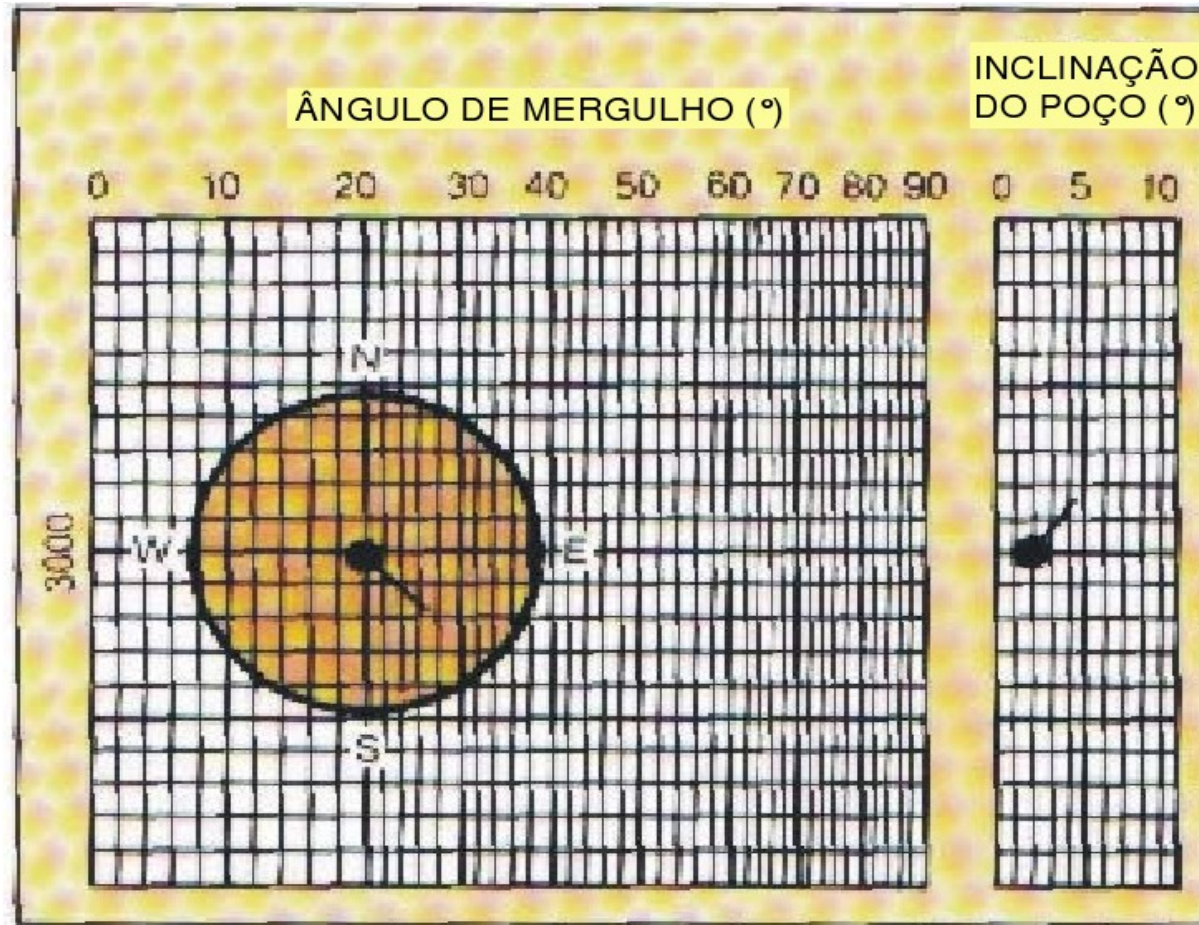


Figura 50 – Princípio da ferramenta *dipmeter*. Perfil Dipmeter

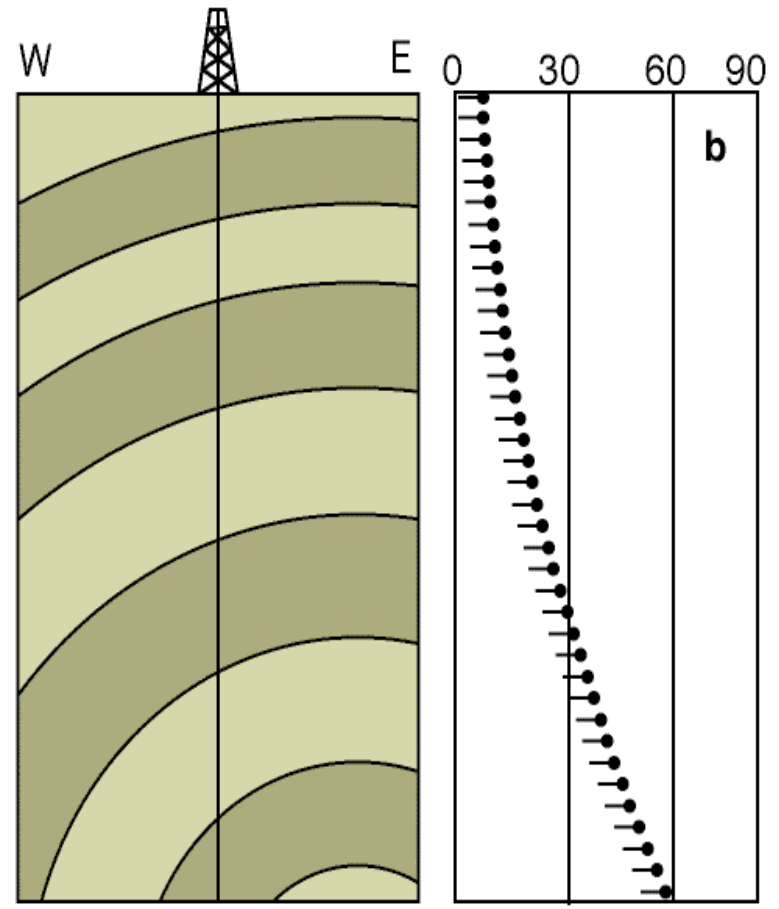
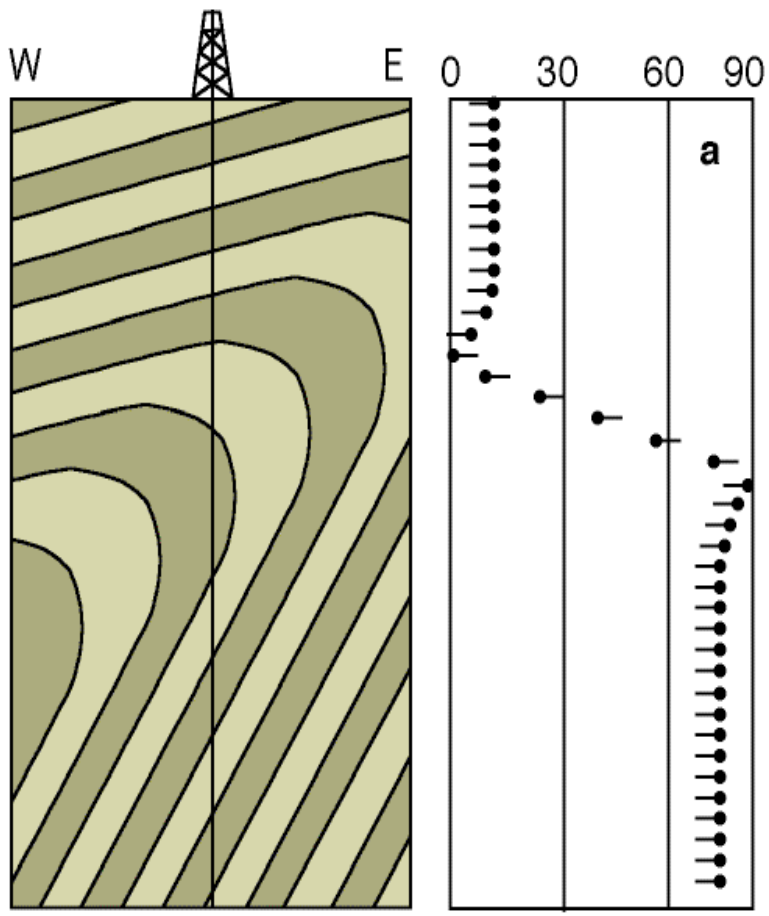
Representação:

- A posição do círculo representa o ângulo de mergulho do plano e, o sentido da reta, a direção (em azimute). O mesmo é feito para a dir/merg do poço.

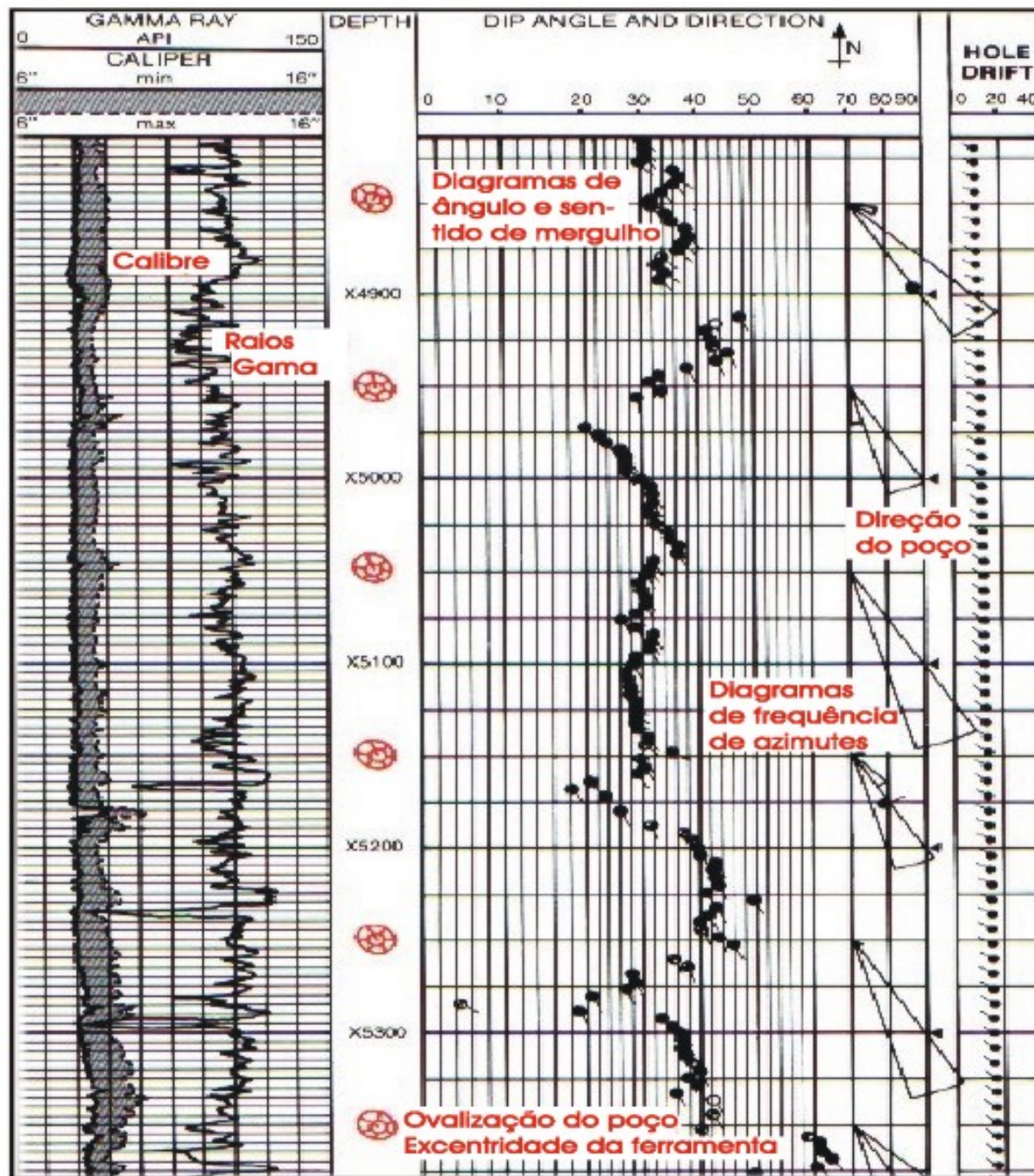


Flores et al. (2006)

Plano cortado por um poço (a 3.000 m de prof) com 20° de mergulho para a direção 140° (azimute). O poço possui mergulho de 20° e direção 45° (azimute).



Carrasquilla (2014)



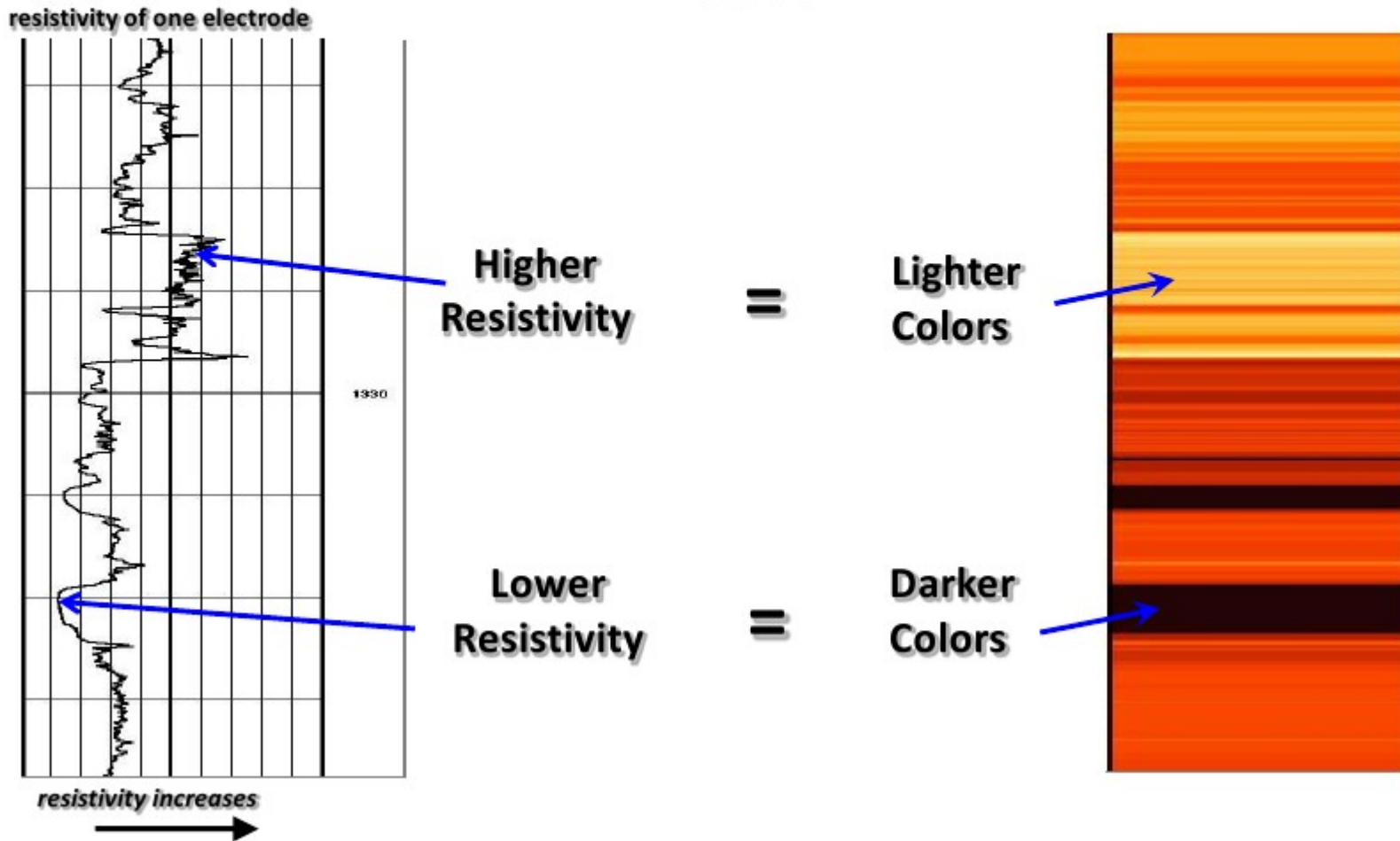
Flores et al. (2006)

Figura 52 – Apresentação padrão do perfil *dipmeter*.

Perfil de Imagens Resistivas

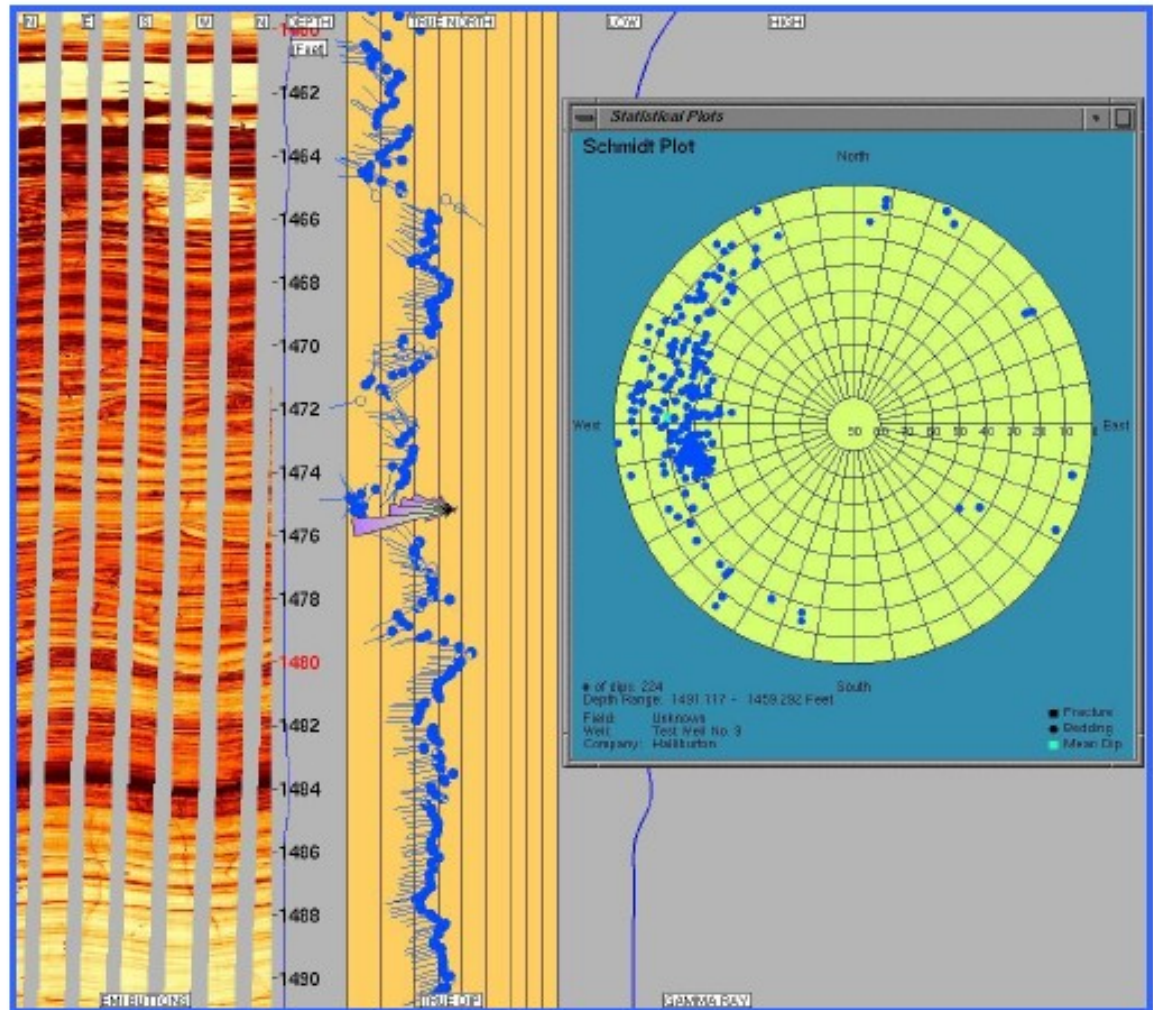
- Estas ferramentas são o resultado do aprimoramento das ferramentas de dipmeter.
- Fornecem imagens das paredes do poço, a partir de variações de micro-resistividade, com resolução de 0,2 polegadas.

A Different Way to Visualize Data



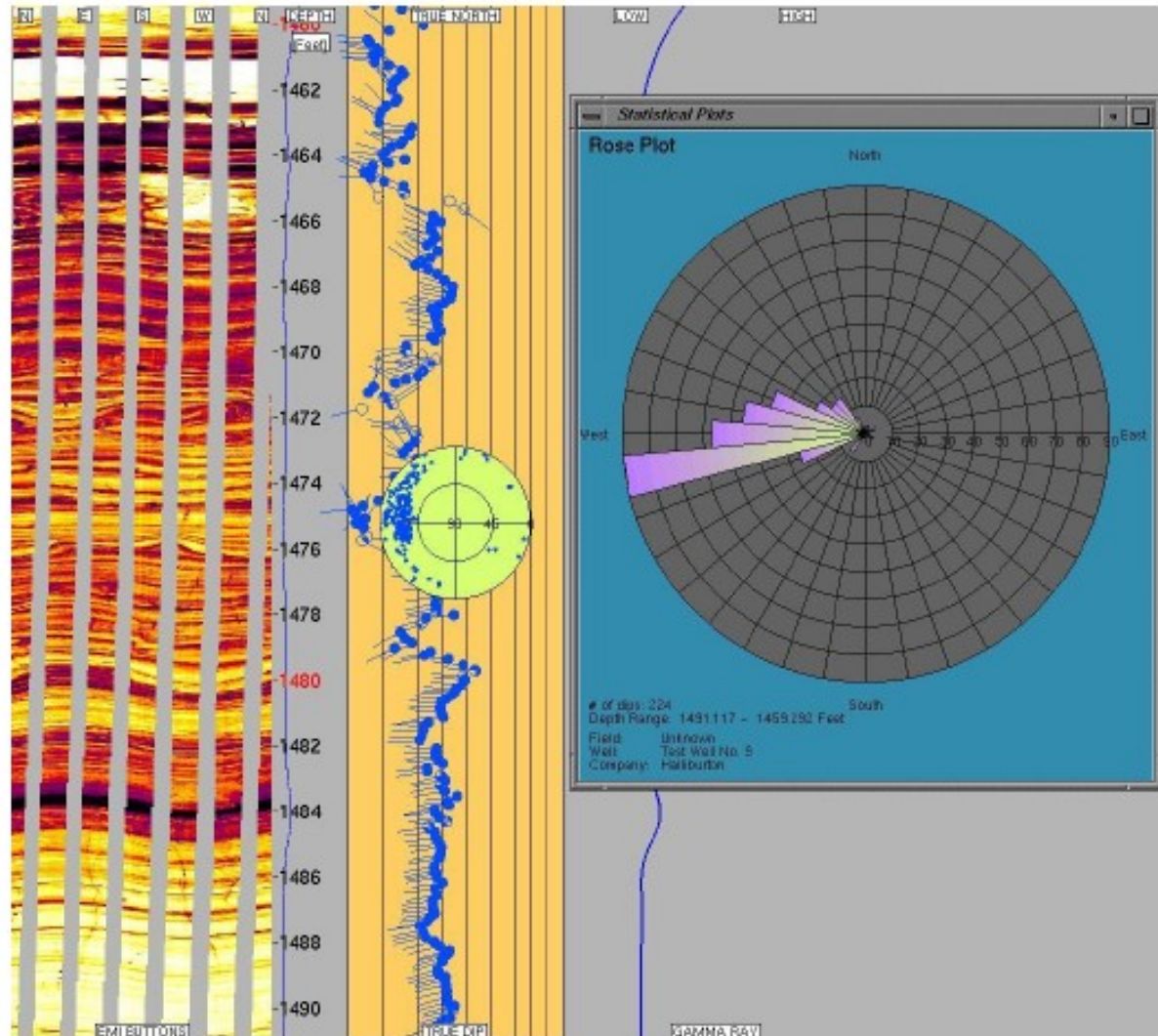
Schmidt Plot

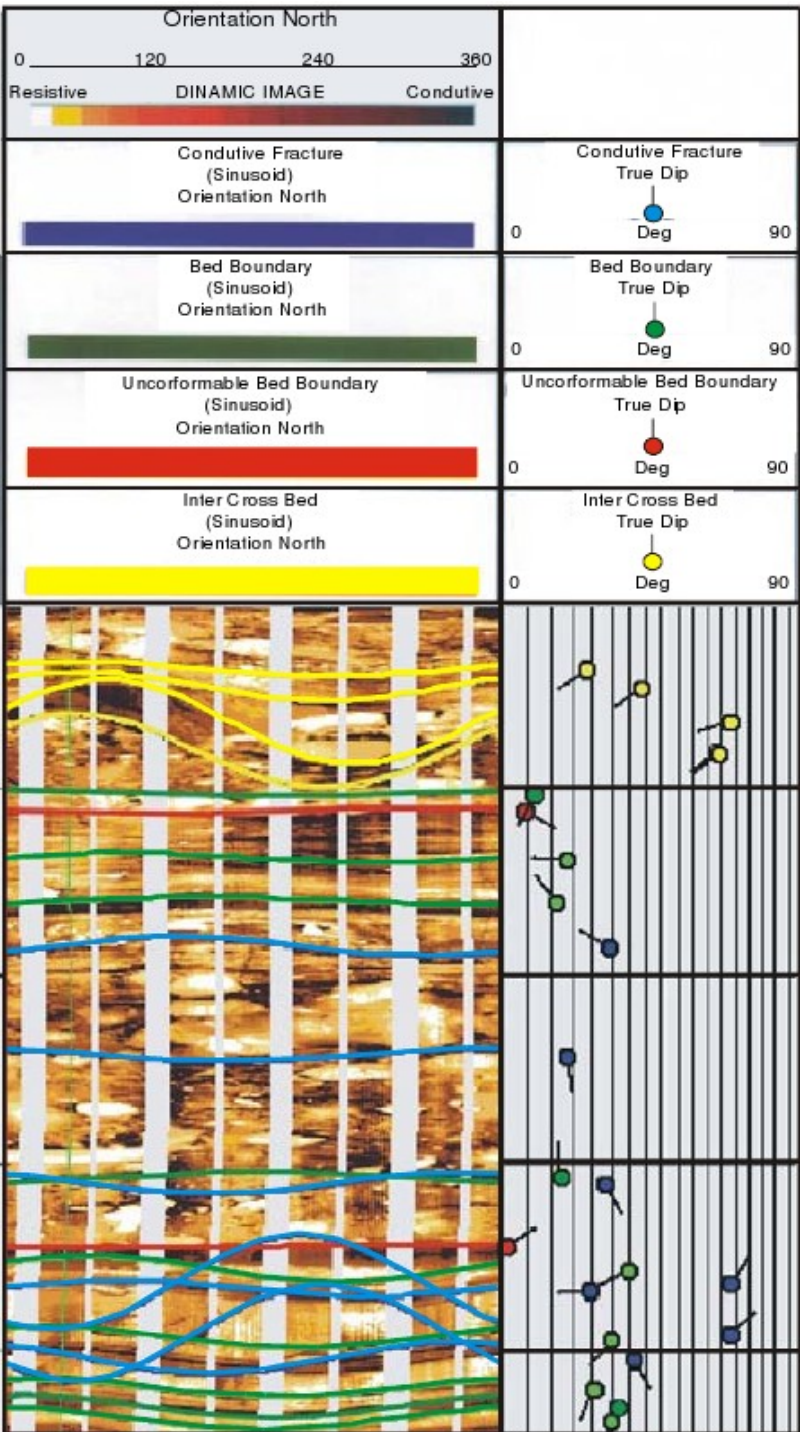
- Displays dipping beds or fractures in polar coordinates.
- Useful method that condenses results into a concise form.
- Good for establishing dip averages.
- Good for determining structural dip



Rose Plot

- Essentially is a “polar histogram”
- Establishes dip directional preference and occurrence arc
- Useful tool to analyze paleocurrent indicators



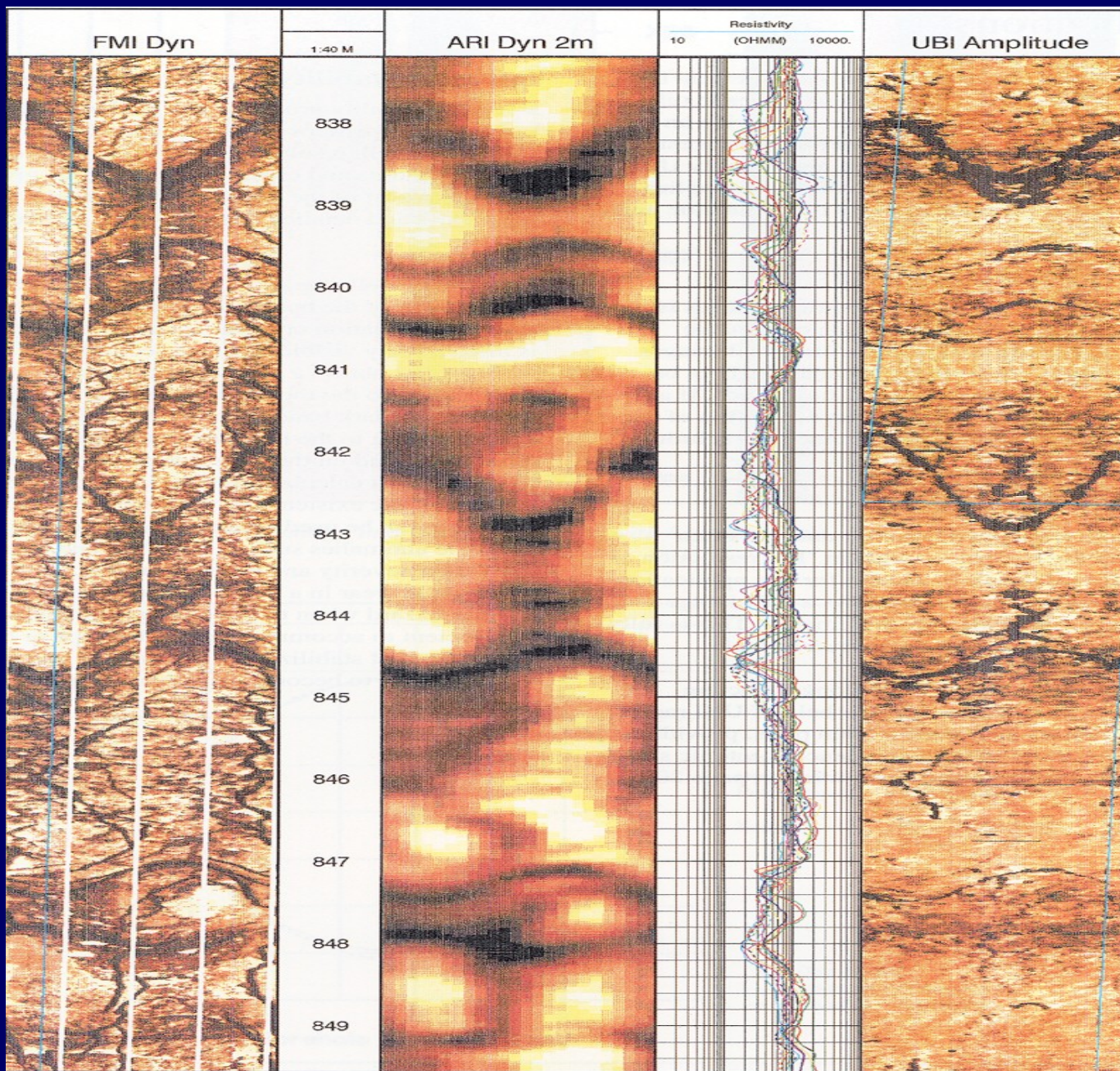


Interpretação de Perfil de Imagem Resistiva em Estação de Trabalho (Workstation)

- As feições geológicas planares aparecem como curvas senoidais.
- A atitude (mergulho/direção) é calculada automaticamente.
- Cada feição (estratigráfica ou estrutural) é classificada, de acordo com o tipo:
 - a) acamamento
 - b) estratificação
 - c) fratura / falhas (fechadas ou abertas)
 - d) discordância
 - e) dobras, domos, etc
- Para cada uma destas feições (ou famílias) é feito um tratamento estatístico próprio.

Perfil de Imagem Acústica

- Emissão e recepção de um pulso ultra-sônico refletido na parede do poço.
- Registram a amplitude e o tempo de trânsito deste pulso, que geram dois distintos perfis de imagem.
- O perfil de tempo de trânsito é transformado em escala de cores, obtendo-se uma imagem do calibre do poço ou do revestimento.

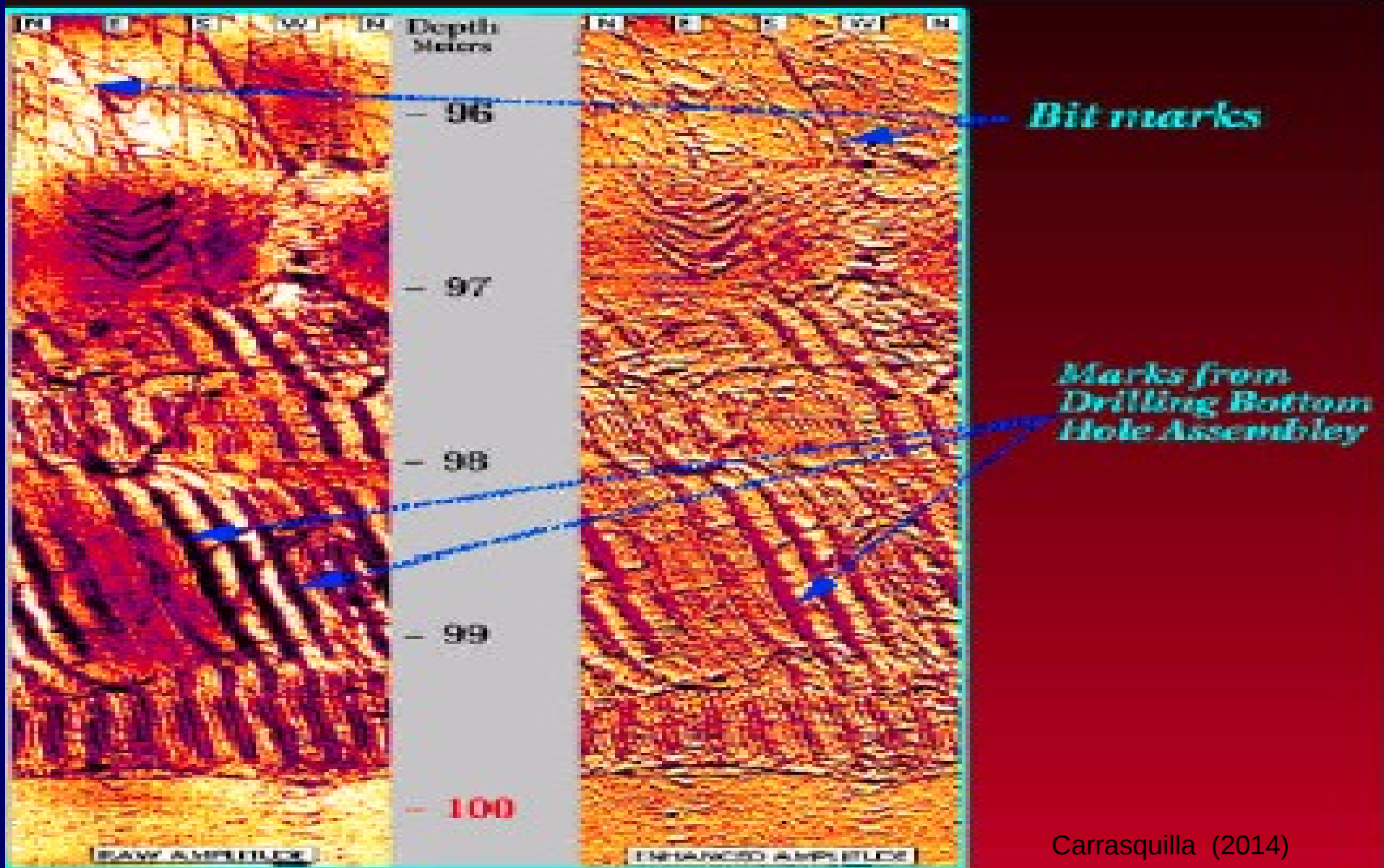


•FMI/ARI/UBI

•Imagens mostrando diferentes respostas das fraturas a diferentes ferramentas.

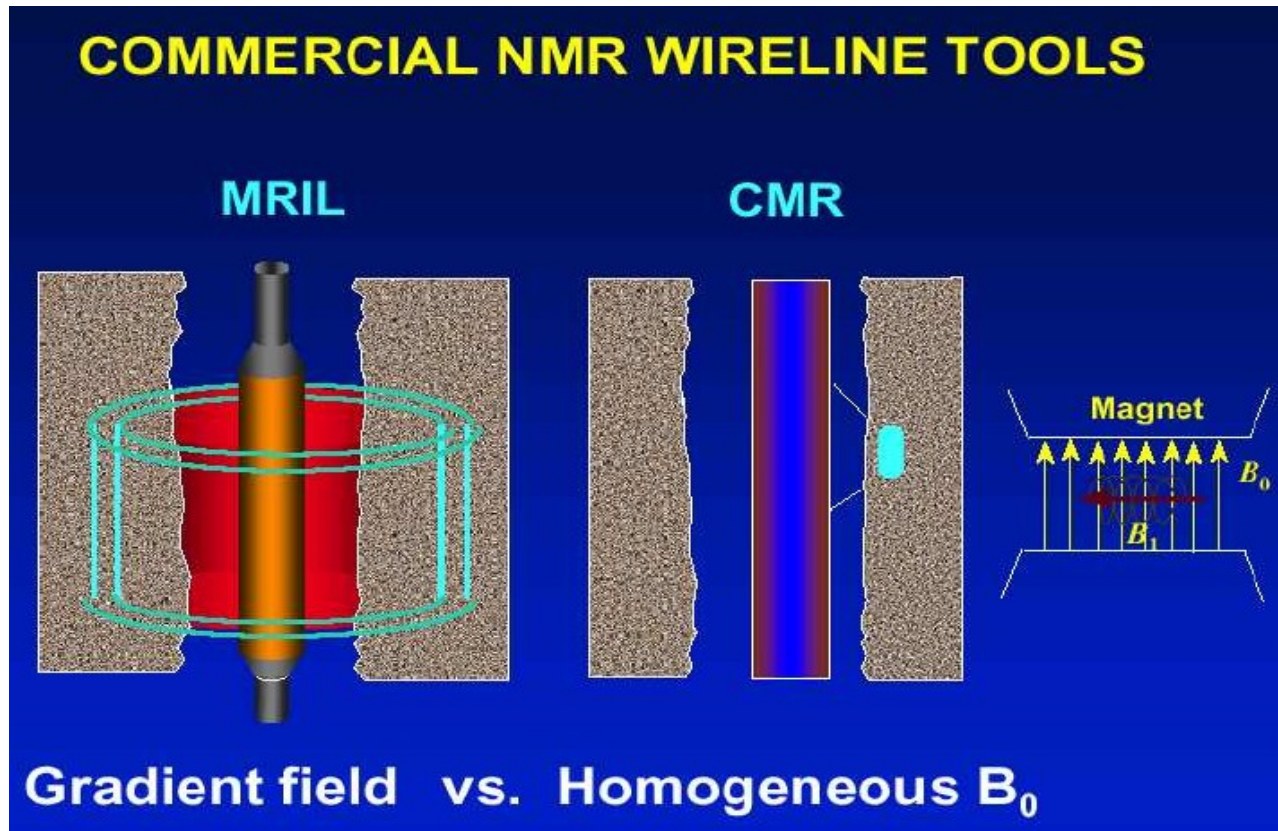
•Em geral, permitem distinguir entre fraturas abertas e fechadas, profundas e rasas, e também entre naturais e induzidas.

Marcas da Broca



Ressonância Magnética Nuclear

- CMR (Schlumberger)
- MRIL (Halliburton)



- Conceito:

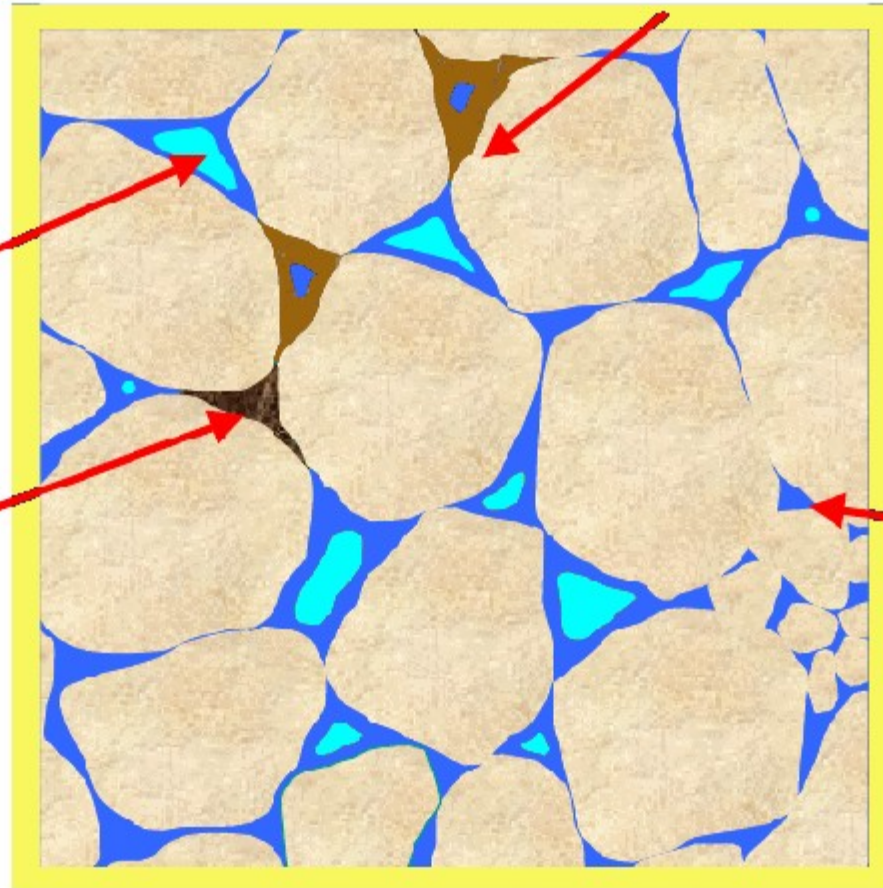
- **T1- tempo de polarização**- tempo necessário para que todos os spins da rocha (H) estejam polarizados
- **TW- tempo de espera**- tempo no qual a ferramenta está efetivamente aguardando a polarização dos spins (parâmetro de aquisição)
- **T2- tempo de relaxamento**- perda de polarização num plano transversal a T1
- **TE- tempo entre ecos** – parâmetro de aquisição
- **NE- número de ecos** – parâmetro de aquisição

**porosidade
NMR**

Água eletroquimicamente ligada a argilomineral (T2 muito curto)

Água livre (T2 longo)

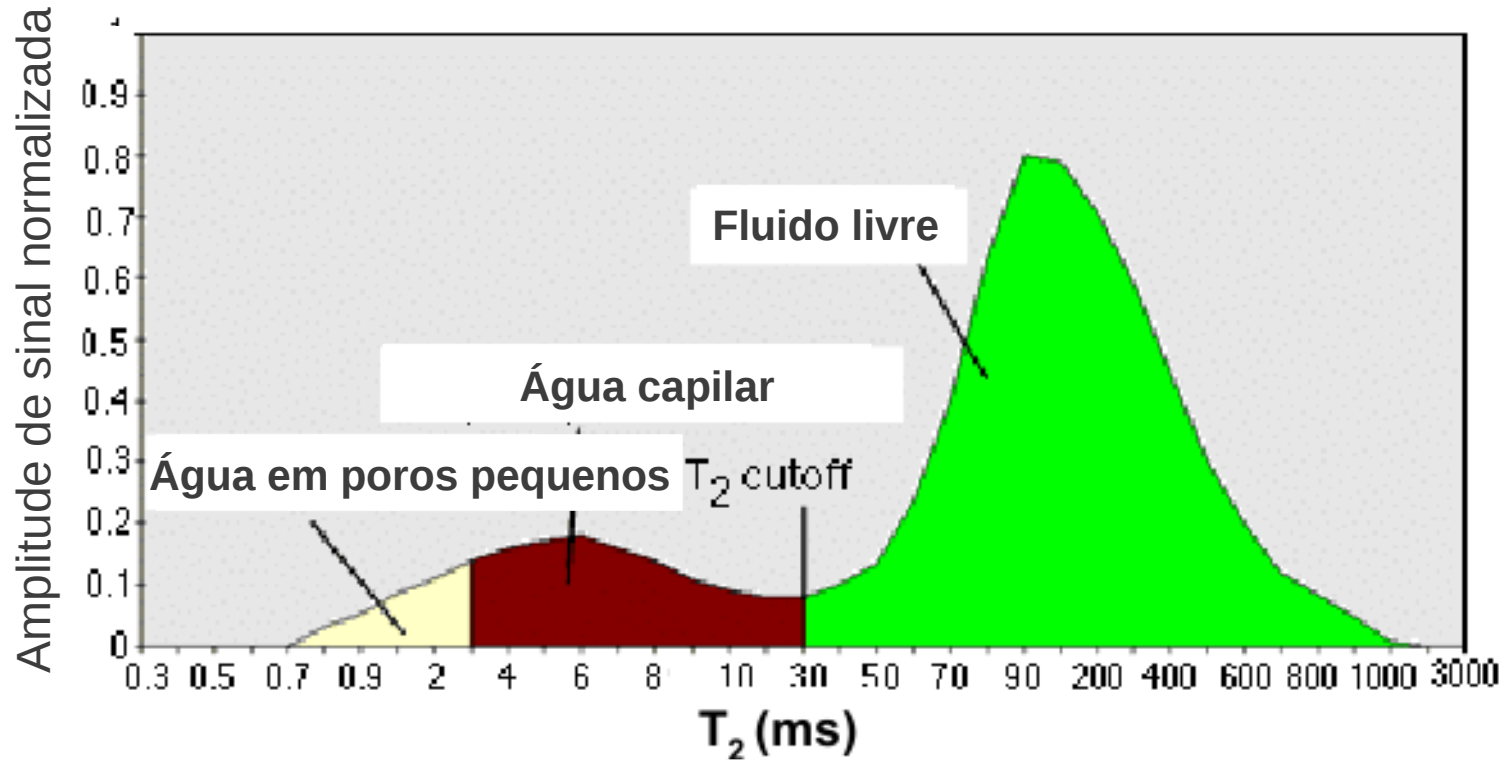
Hidrocarboneto
(T2 longo relacionado
à viscosidade)



Água retida em
pequeno poro com
grande pressão
capilar (T2 curto)

Carrasquilla (2014)

Sumário da distribuição de T₂



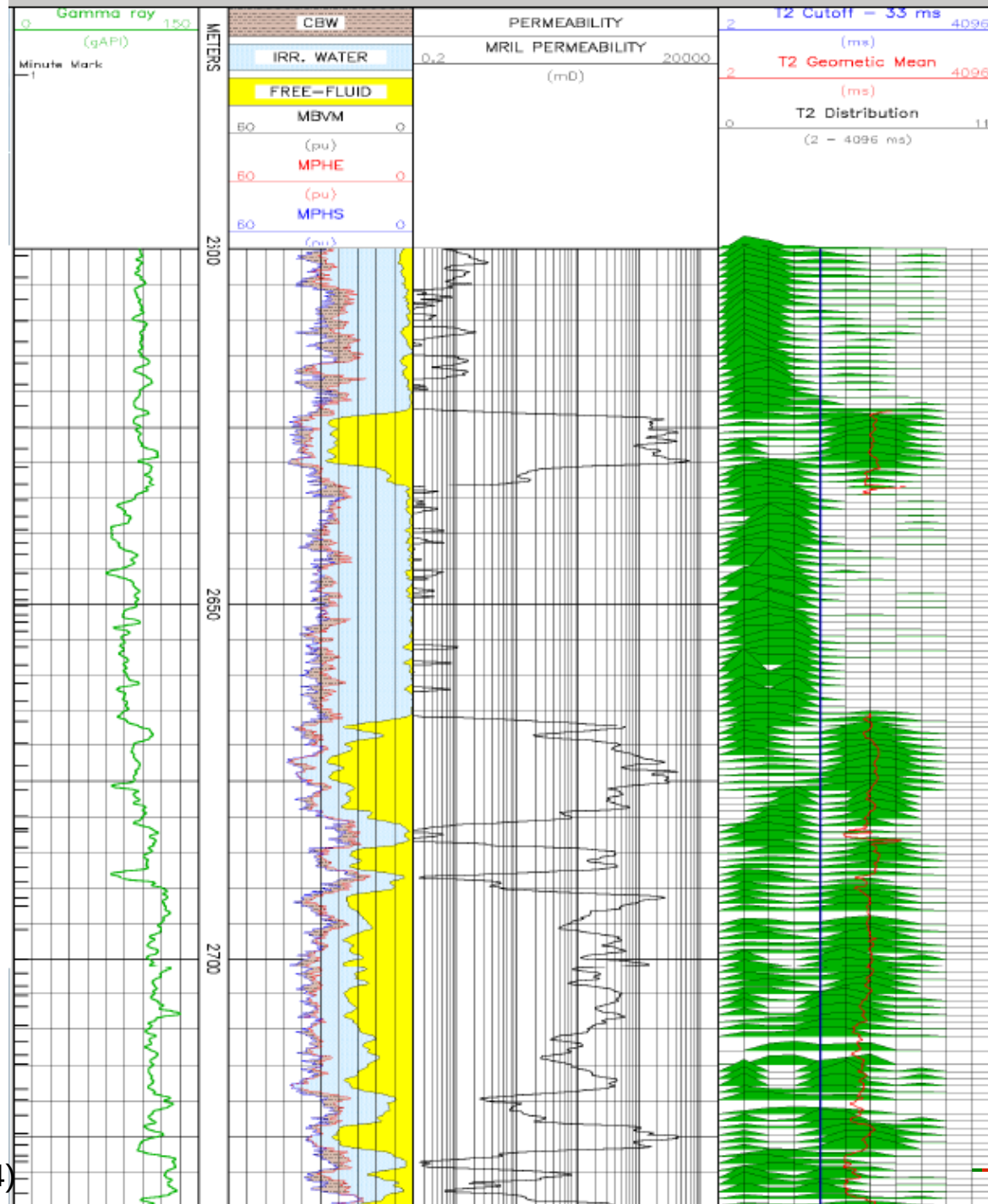
Água em poros pequenos

Água capilar

Fluido livre

Carrasquilla (2014)





Considerações finais

- Grande gama de ferramentas de perfilagem geofísica de poços geram dados complementares.
- Informações sobre litologia, tipo e quantidade de fluidos e parâmetros petrofísicos.
- Avaliação, Cubagem e Planejamento de Produção de Campos Petrolíferos
- Importantes para correlação estratigráfica e correlação poço-sísmica.
- Baixo custo e rapidez na aquisição de dados (em relação ao testemunho), principalmente com LWD.
- Avanço constante no desenvolvimento de ferramentas.

Referências:

- Asquith, G. and Gibson, C. 1982. Basic well log analysis for geologists.
- Bassiouni, Z. 1994. Theory, measurement, and interpretation of Well Logs. 372p.
- Carrasquilla, A. 2014. Perfilagem Geofísica de Poços. 16A Escola de Verão Geofísica na USP. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP. Fevereiro, 2014.
- Feijó, F.J. 2005. Geologia do Petróleo – programa USP 2005.
- Flores A.C.C., Dupuy I.S.S., Forbrig L.C., Silva R.R., Campinho V.S. 2006. Apostila Perfilagem: Conceitos e Aplicações. Compilação feita em março/2006.
- Halliburton 2001. Basic Petroleum Geology and Log Analysis.
- Soeiro, P.A.S. 2005. Perfilagem de poços – programa USP 2005.
- Tittman J., 1986 – Geophysical Well Logging. Excerpted from Methods in Experimental Physics, Geophysics. Vol. 24.