

Perfil de Densidade

Baseado nas notas de aula do professor Geraldo Girao Nery

Introdução

- Registra continuamente as variações das densidades das camadas com a profundidade.
 - A exemplo do discutido no Sônico, existe uma relação entre a participação volumétrica de cada elemento constituinte e a densidade total da rocha ("bulk density" = ρ_B).
- A medida da densidade é realizada pelo “bombardeio” das camadas por um feixe monoenergético de raios gama. Para que isso seja possível, a ferramenta dispõe de um patim metálico com uma fonte radioativa (Cs^{137}), direcionada, com nível energético da ordem de 0,667 MeV, pressionada contra a parede do poço.

Introdução

- A probabilidade de ocorrência de um choque entre os raios gama e a matéria depende das propriedades nucleares do material envolvido e da energia do fóton.
- Esta probabilidade é denominada de seção eficaz (cross section) e tem por unidade o Barn = 10^{-24} cm.
 - Quanto maior a seção eficaz maior a probabilidade de uma interação se realizar.
 - Assim, a seção eficaz pode ser considerada como sendo um diâmetro aparente de um núcleo a ser atingido.

Introdução

Quando os raios gama atravessam um meio qualquer, eles interagem com os elétrons orbitais de seus constituintes de três modos distintos:

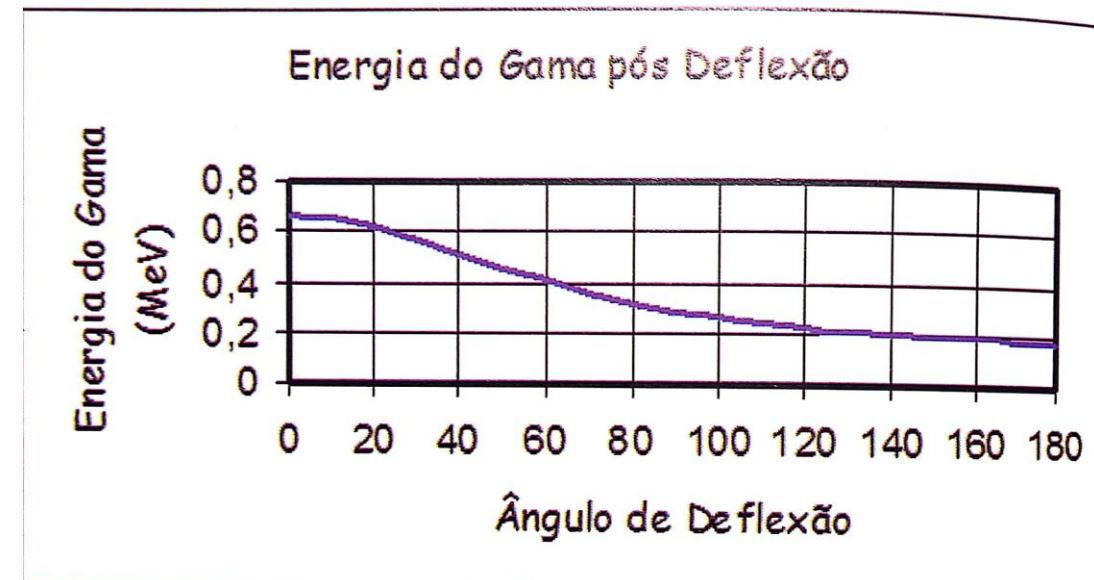
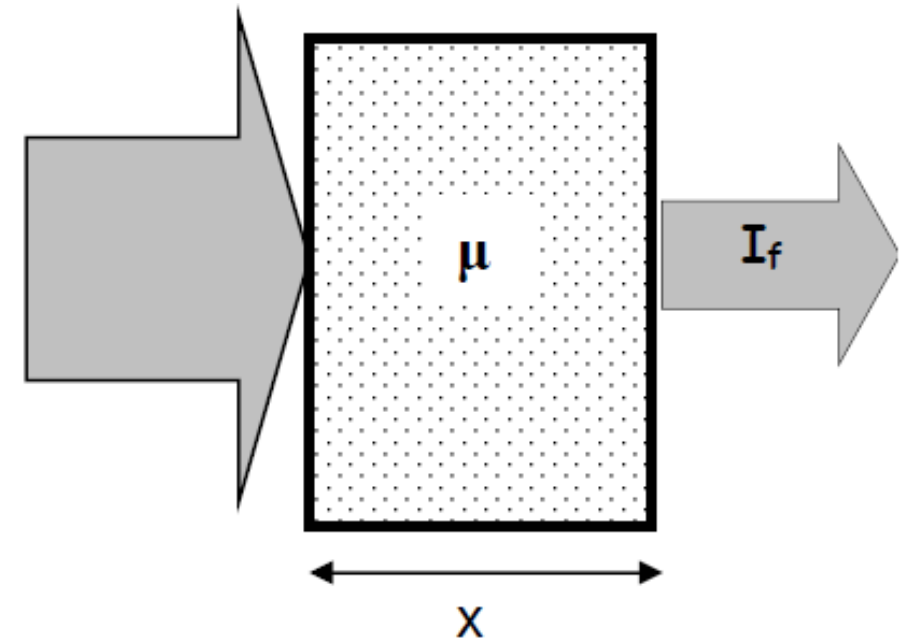
- (a) podem ser absorvido e um par elétron-pósitron é produzido em contrapartida - é o efeito de Produção de Par, e requer uma radiação gama de alto nível energético;
- (b) podem ser absorvidos por um elétron, deslocando-o de sua órbita normal - é o efeito Fotoelétrico. Ocorre primariamente com raios gama de energia menor que 0,5 MeV e,
- (c) Os raios gama podem ser defletidos pelos elétrons, ao quais cede parte da energia cinética. Este processo é denominado de Efeito Compton e é a interação preferencial entre os raios gama e as rochas, pelo fato de se usar a fonte de Cs^{137} dentro de um nível energético compatível.

Introdução

Tais interações são expressas por

$$I_f = I_i \cdot e^{-\mu \cdot x \cdot \rho_e}$$

na qual ΔI é a mudança na intensidade do feixe radioativo, I_i o fluxo inicial dos fótons, I_f o fluxo final; μ o coeficiente de absorção de massa do material alvo; x a espessura e ρ_e a densidade eletrônica do material (número de elétrons /cm³).



Princípio do Perfil de Densidade

- Um feixe monoenergético de raios gama, de intensidade fixa, ao sair da fonte, choca-se sucessivamente com os elétrons da formação, de acordo com o efeito Compton. A proporção que os raios gama vão se dispersando, ou sendo absorvidos, a intensidade do feixe inicial diminui. Esta diminuição de intensidade, que é função da mudança na densidade eletrônica do meio, é então medida pelo detector. Assim, quanto mais densa for a rocha menor a intensidade da radiação no detector, e vice-versa.
- Como o efeito Compton é diretamente proporcional ao número de elétrons por unidade de volume de material (portanto densidade eletrônica) e como o número de elétrons por unidade de volume é proporcional à densidade (massa/volume) das formações, deduz-se que este perfil responde **diretamente à densidade** da formação e **inversamente à sua porosidade**.

Princípio do Perfil de Densidade

- Para que a relação densidade x porosidade seja realidade, algumas providências operacionais devem ser tomadas.
 - A fonte radioativa deve ter energia suficientemente alta para favorecer o efeito Compton e energia suficientemente baixa para reduzir o efeito de produção de par.
 - Além disto, o detector deve ser blindado para evitar o efeito fotoelétrico.
 - O resultado final é uma função inversa da densidade eletrônica média do material existente dentro do volume investigado, no espaço fonte-detector.

Definição de Densidade Eletrônica

- Por definição, densidade eletrônica ρ_e é a quantidade de elétrons por volume.
- Partindo-se de noções da química, na qual entram a constante de Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ átomos/átomo-grama), o número atômico Z (no. de prótons ou elétrons/átomo-grama), a massa atômica A (no. de grama/átomo-grama) e a densidade ρ_B (g/cm³), chega-se a seguinte relação:

$$\rho_e = 2 \left(\frac{Z}{A} \right) \rho_B = C \cdot \rho_B$$

Definição de Densidade Eletrônica

- A tabela abaixo mostra que C é próximo da unidade para vários elementos e componentes litológicos mais comuns das rochas.

ELEMENTO	A	Z	$C = 2\left(\frac{Z}{A}\right)$
H	1,008	1	1,9841
C	12,001	6	0,9991
O	16,000	8	1,0000
Na	22,990	11	0,9569
Mg	24,320	12	0,9868
Al	26,980	13	0,9637
Si	28,090	14	0,9968
S	32,070	16	0,9978
Cl	35,460	17	0,9585
K	39,100	19	0,9719
Ca	40,080	20	0,9980

Tabela 8.1 – Valores da constante C (equação 8.2) para os elementos mais comuns das rochas sedimentares.

Definição de Densidade Eletrônica

- A tabela abaixo mostra uma comparação entre os valores das densidades total (ou obtida em laboratório), a eletrônica e aquela registrada pela ferramenta de densidade.

COMPONENTE	FÓRMULA	ρ_B	$C = \frac{2 \sum Z}{P.Mol.}$	ρ_e	$\rho_{Densidade}$
Quartzo	SiO ₂	2,654	0,9985	2,650	2,648
Calcita	CaCO ₃	2,710	0,9991	2,708	2,710
Dolomita	CaCO ₃ MgCO ₃	2,870	0,9977	2,863	2,876
Anidrita	CaSO ₄	2,960	0,9990	2,957	2,977
Silvita	KCl	1,984	0,9160	1,916	1,863
Halita	NaCl	2,165	2,0740	2,074	2,032
Gipsita	CaSO ₄ .2H ₂ O	2,320	1,0222	2,372	2,351
Água Doce	H ₂ O	1,000	1,1101	1,110	1,000
Água Salgada	200.000ppm	1,146	1,0797	1,237	1,135
Óleo	n<CH ₄ >	0,850	1,1407	0,970	0,850
Gás	C _{1,1} H _{4,2}	$\rho_{qás}$	1,238	1,238	$1,325 \cdot \rho_{qás} - 0,189$

Tabela 8.2 – Valores comparativos entre as densidades de laboratório (ρ_B), eletrônica (ρ_e) e a registrada pelo perfil de densidade em função do algoritmo (8.3), para as rochas sedimentares mais comuns.

Definição de Densidade Eletrônica

- Nas litologias homogêneas, com água (arenitos, calcários e dolomitos), o fato de $C \cong 1$ faz com que $\rho_{\text{Densidade}} = \rho_b$. Ocorrendo outros materiais nos poros (hidrocarbonetos), $\rho_{\text{Densidade}}$ difere de ρ_b , exigindo correções das leituras.
- Para eliminar tais diferenças (efeito Z/A), usa-se calibrar a ferramenta em uma rocha de matriz conhecida para a obtenção da equação de calibração. Para um calcário (CaCO_3) de densidade de matriz conhecida ρ_{mLS} , saturado com água doce, a equação será :

$$\begin{aligned}\rho_B &= \rho_{mLS}(1 - \Phi) + \Phi \cdot \rho_w \quad (8.3) \\ \rho_{eLS} &= \rho_{mLS} \cdot C_{LS}(1 - \Phi) + \Phi \cdot \rho_w \cdot C_w\end{aligned}$$

Definição de Densidade Eletrônica

- Eliminando-se Φ em ambas as equações e resolvendo-se para ρ_B , tem-se:

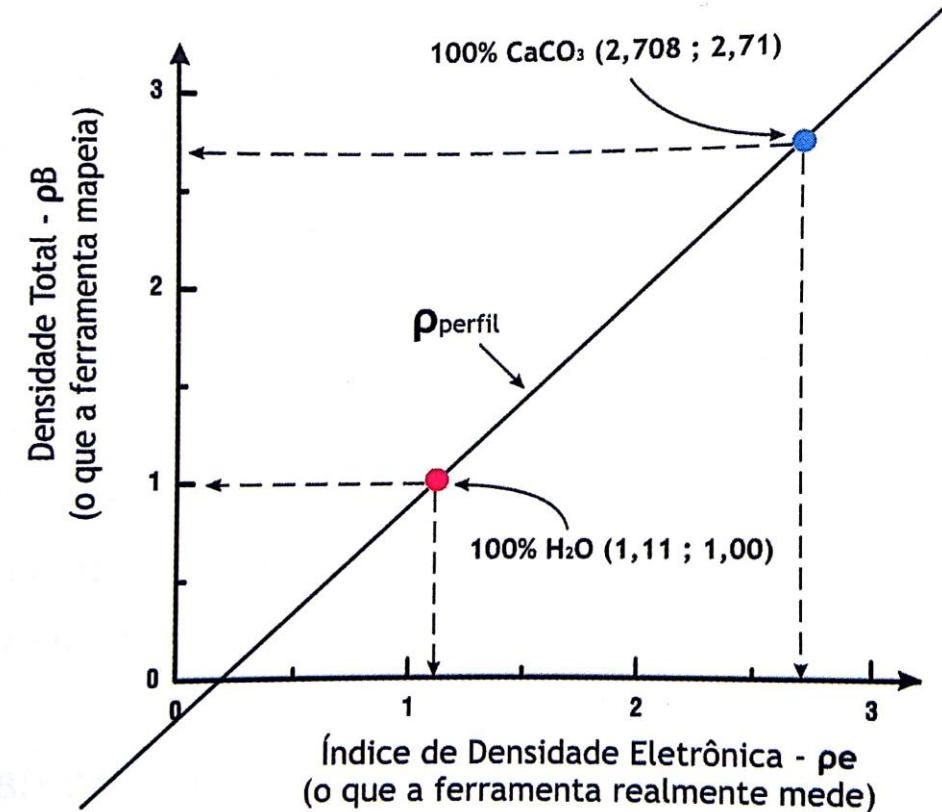
$$\rho_B = \rho_{eLS} \frac{\rho_{mLS} - \rho_w}{\rho_{mLS} - \rho_w \cdot C_w} - \frac{\rho_{mLS}(C_{LS} - C_w)}{\rho_{mLS}C_{LS} - \rho_w \cdot C_w}$$

- Substituindo ρ_{mLS} , ρ_w , C_w e C_{LS} pelos respectivos valores das tabelas, tem-se que

$$\rho_B = 1,0704\rho_{eLS} - 0,1883$$

na qual ρ_{eLS} é a densidade do calcário usado na calibração.

- Assim sendo, o algoritmo acima passa a ser registrado no perfil, para as condições estabelecidas (calcário com água doce). Correções compatíveis devem ser realizadas para usos em outras litologias.



Definição de Densidade Eletrônica

Qual seria a fórmula de calibração em um arenito com água doce?

- Considerando-se que uma ferramenta esteja calibrada para calcário, qual será o erro caso se perfilasse um arenito com porosidade nula ($\Phi = 0\%$), i.é., somente matriz ?
- $\rho_B = 1,0704 \times 2,650 - 0,1883 = 2,64826 \text{ g/cm}^3$
- O registro de $\rho_B = 2,64826 \text{ g/cm}^3$ defronte ao arenito em questão, quando deveria ter sido $2,654 \text{ g/cm}^3$ (valor de ρ_B para um arenito puro) origina um erro de apenas $0,0057 \text{ g/cm}^3$ ou $0,2148\%$.
- Em outras palavras, $\rho_{LAB} \cong \rho_B$, daí dizer-se que este perfil fornece diretamente ρ_B , ou seja, a densidade do meio onde a ferramenta está inserida.

Definição de Densidade Eletrônica

- Para eliminar pequenas diferenças que existem entre ρ_{LAB} e ρ_B -> cartas de correção denominadas de efeito Z/A.
- Entretanto, como a ordem de grandeza das correções é pequena, a desprezamos nos cálculos manuais.
- Verifica-se que para as três litologias mais importantes (arenito, calcário e dolomito), mesmo que tenham porosidades variando entre 0 e 40%, a correção se torna desprezível, a não ser que tenham gás em seus poros.

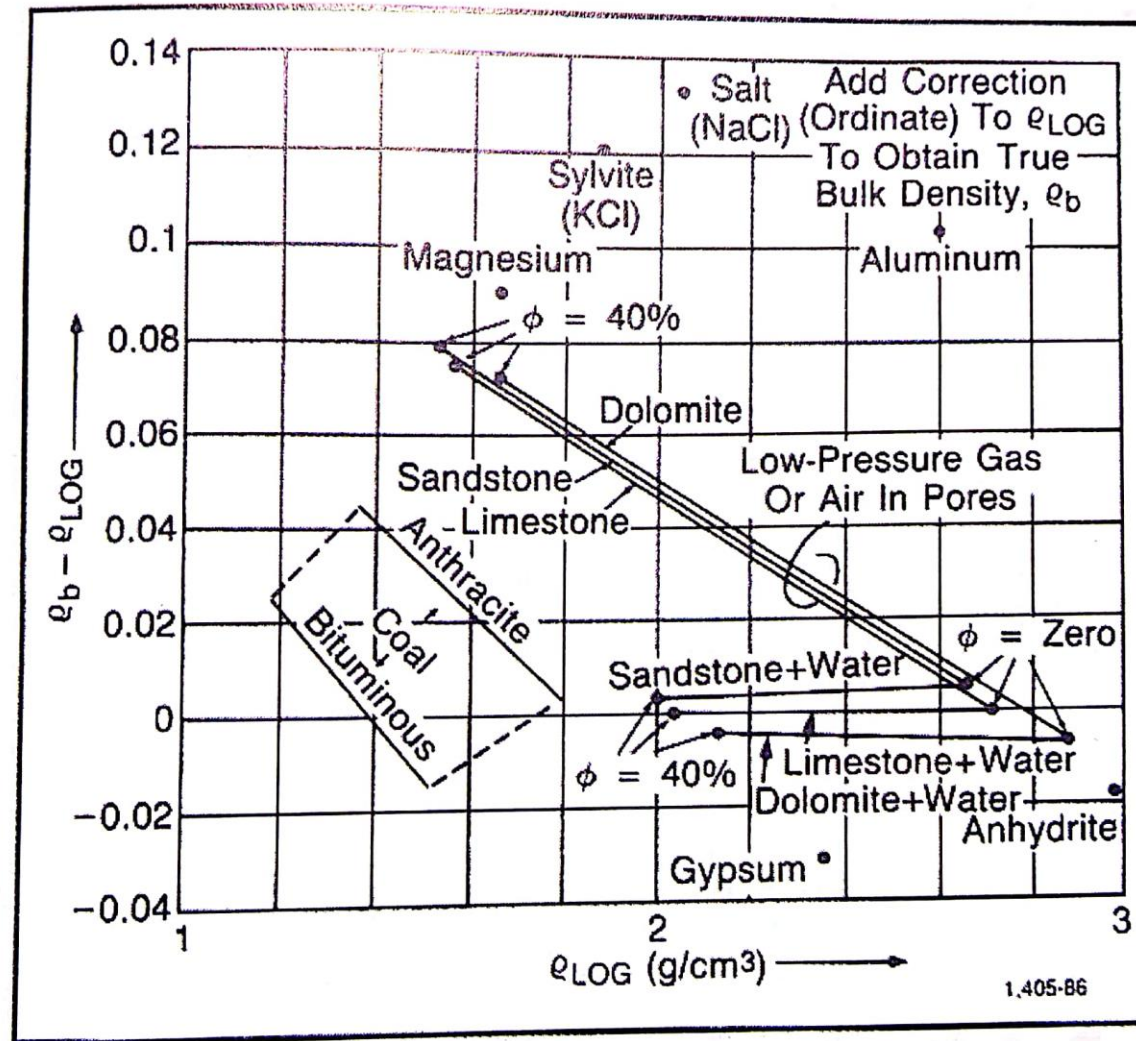


Figura 8.3: Carta para correção do Efeito Z/A (Schlumberger, 1985).

Princípio da Ferramenta Compensada

- Esquema da ferramenta compensada, com uma fonte (F) e dois detectores, um perto (SP) e outro longe (SL), pressionada contra as paredes dos poços. O fóton atinge os elétrons do meio, deflete-se gradualmente e perde energia até ser detectado. O fluxo final no SP é maior que no SL, em função da distância.
- A contagem dos pulsos (cps) nas rochas densas é menor que nas porosas, isto é, guarda uma relação inversa com ρ_B e direta com Φ .
- O reboco entre a fonte e os detectores influencia na leitura, daí a necessidade de 2 detectores afastados, para possibilitar correções.

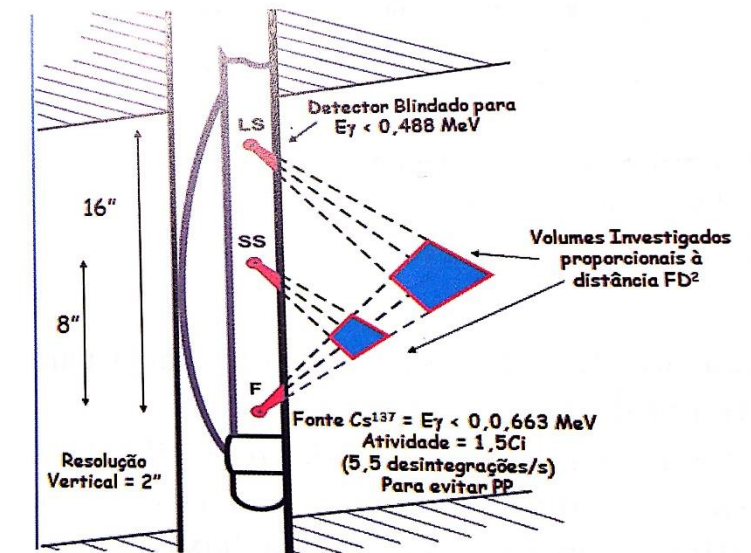
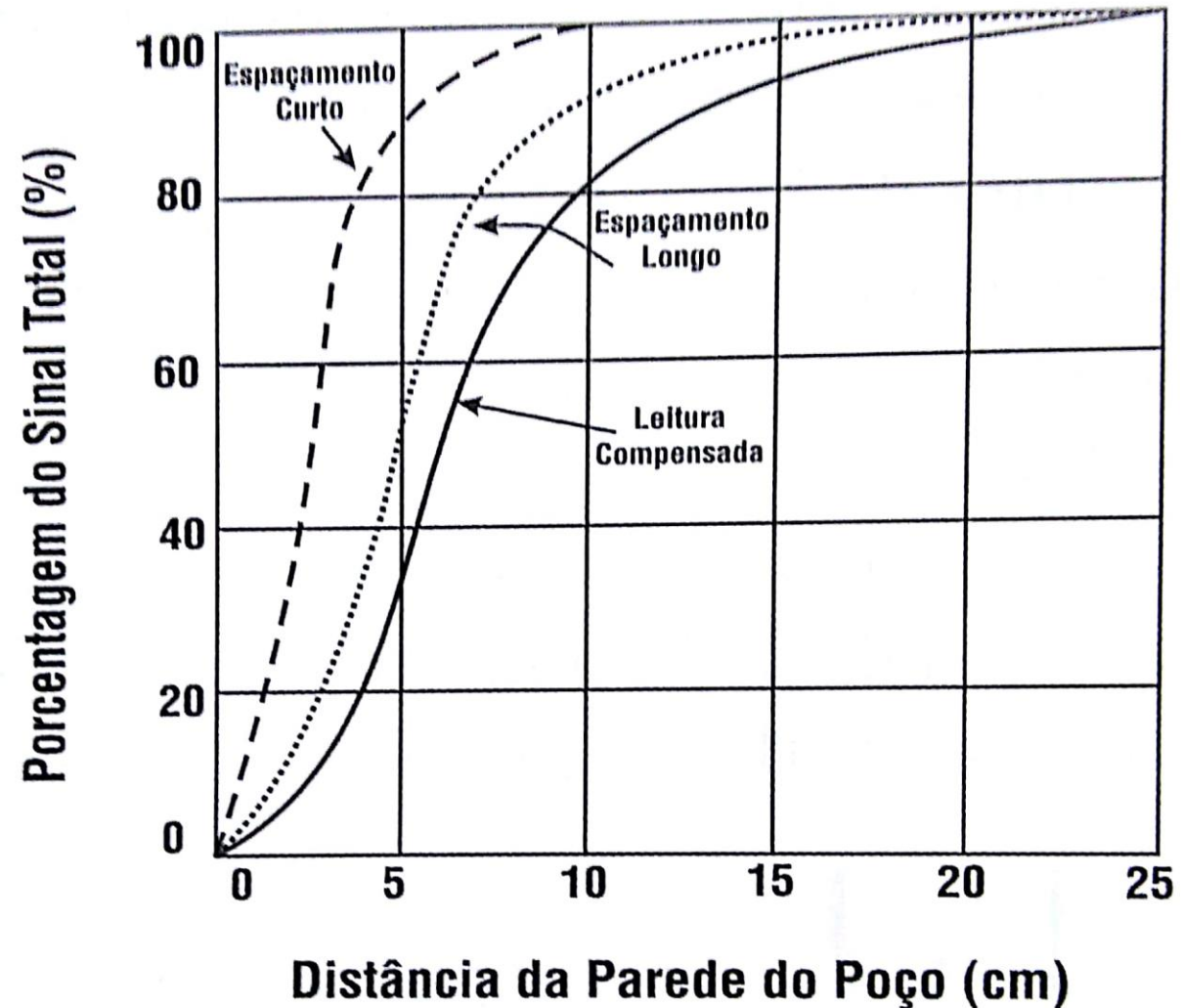


Figura 8.4: Ferramenta de Densidade Compensada pelo efeito do poço. Adaptada de Schlumberger, 1985.

Princípio da Ferramenta Compensada

Figura mostra que:

- 100% de SS → até 10 cm
- 100% de SL → até 25 cm



Interpretação do Perfil de Densidade

- De modo análogo ao sônico, a equação da densidade pode ser expressa como:

$$\rho_B = (1 - \phi)\rho_m + \phi \cdot \rho_f$$

ou

$$\phi_D = \frac{\rho_B - \rho_m}{\rho_m - \rho_f}$$

Entre 1661 – 1673

$$\rho_B \cong 2.4 \text{ g/cm}^3$$

$$\phi_D \approx 15 \%$$

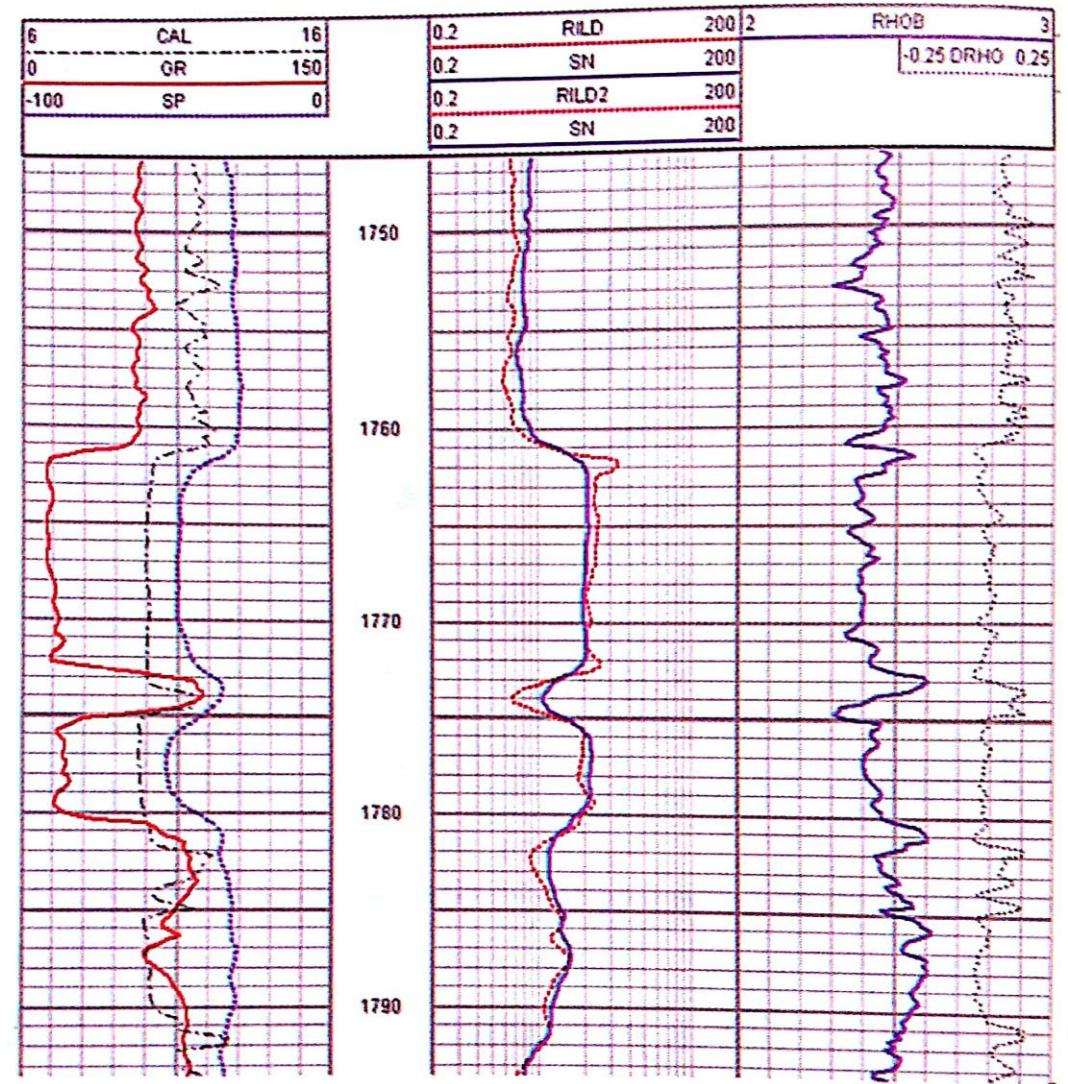


Figura 8.6: Exemplo de perfil de Densidade Compensada.

Interpretação do Perfil de Densidade

- A densidade da matriz da rocha (ρ_m) é da ordem de 2,65 (se for arenito); 2,71 (se calcário) e 2,87 g/cm³ (se dolomito).
- ρ_f corresponde a densidade do fluido da zona de investigação, filtrado ($\rho_{mf} = 1,00$ g/cm³, doce ou $\rho_{mf} = 1,10$ g/cm³, salgado).
- A razão de se usar o fluido da zona lavada reside na pequena investigação da ferramenta.
- É bom saber de antemão que tanto ρ_f , como Δt_f , dependem de S_{xo} e não de S_w .
- A saturação de hidrocarboneto que influencia as leituras de ρ_B é, por consequência, $SOR = 1 - S_{xo}$. Este perfil não depende da compactação das rochas.

Efeito da Lama/Reboco sobre ρ_B

- O problema mais significativo a ser considerado nas leituras deste perfil é o provocado pela presença da lama e/ou reboco, defronte às camadas permeáveis.
- Os fótons, na saída da fonte, interagem com os elétrons da lama (e/ou reboco).
 - dispersam e não retornam ao poço onde estão os detectores, diminuindo a intensidade do feixe inicial, mesmo antes de penetrar nas camadas.
- Para eliminar este problema: uso de diferentes espaçamentos entre sensores para a obtenção de diferentes profundidades de investigação.

Efeito da Lama/Reboco sobre ρ_B

- O Perfil de Densidade Compensada tem dois detectores localizados a distâncias fixas da fonte.
- O SS é o mais influenciado pela densidade do reboco (ρ_{mc}) do que o SL, mais influenciado pelas rochas.
- Com duas leituras em diferentes profundidades, acrescida da medida da espessura do reboco com a curva do calíper, a ferramenta pode internamente realizar correções de ρ_B .

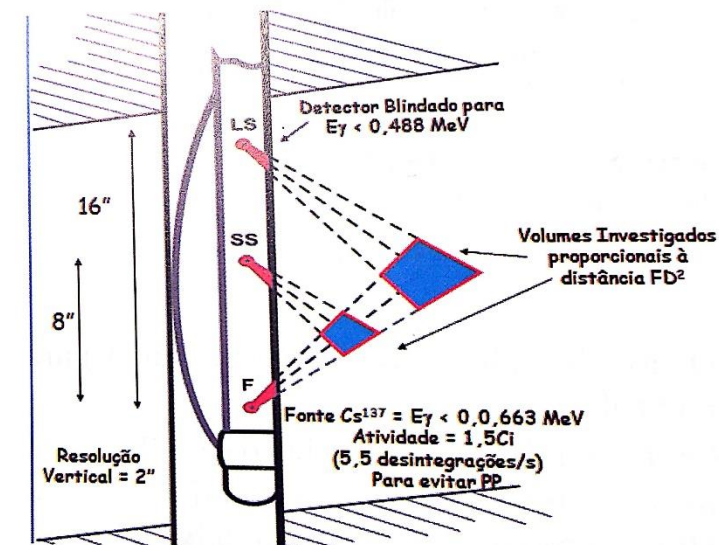


Figura 8.4: Ferramenta de Densidade Compensada pelo efeito do poço. Adaptada de Schlumberger, 1985.

Efeito da Lama/Reboco sobre ρ_B

- As rochas estão caracterizadas por sua ρ_B e Z_B (média do número atômico de seus constituintes).
- O reboco interposto entre a fonte-rocha-detector, introduz os parâmetros ρ_{mc} , Z_{mc} e t_{mc} (espessura do reboco).
- O problema maior reside no Z_{mc} , uma vez que alguns fluidos de perfuração usam bário ($Z = 56$, de alto coeficiente de absorção de massa), principalmente nos poços muito profundos.
- Nestes casos, o reboco se comporta como um absorvedor para os fluxos iniciais e finais do sistema.

Efeito da Lama/Reboco sobre ρ_B

- Quando o reboco for mais leve que a formação (lamas normais), a curva $\Delta\rho_B$ (na terceira faixa do perfil) deverá mostrará valores positivos de leitura.
- Quando o reboco for mais pesado do que a formação, $\Delta\rho_B$ será negativa (lamas à base de baritina causam um problema à parte por causa da grande capacidade de absorção do Bário).
- Anomalias de tais comportamentos devem ser analisadas, inclusive, falha ferramental ou intensos desmoronamentos.

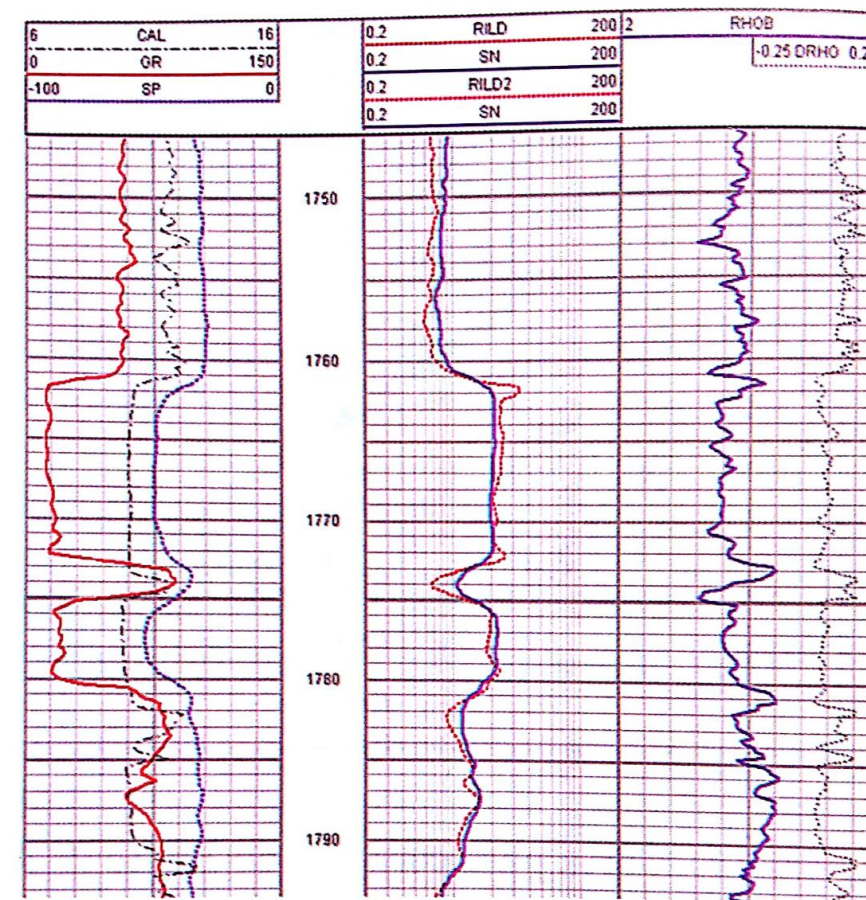


Figura 8.6: Exemplo de perfil de Densidade Compensada.

Efeito dos Hidrocarbonetos sobre ρ_B

- Adotar-se em $\phi_D = \frac{\rho_B - \rho_m}{\rho_m - \rho_f}$ pf sempre igual a 1,0 g/cm³ (poço perfurado com lama doce) ou 1,1 g/cm³ (poço com lama salgada).
- Este erro proposital ocorre por não se saber qual a proporção dos fluidos (água e/ou hidrocarbonetos) nas camadas.
- Para se calcular Sxo ou Sw, precisamos conhecer Φ e,
- Para se calcular Φ , precisamos saber qual a proporção dos fluidos presente na camada.
- A interpretação final de Φ e Sxo (ou Sw) é, portanto, um processo iterativo que deve ser iniciada com este erro.

Efeito dos Hidrocarbonetos sobre ρ_B

- Esquema mostrando a mistura de fluidos existentes na zona investigada pela ferramenta de Densidade e a ponderação volumétrica para a sua determinação.

$$\rho_f = (1 - S_{xo}).\rho_{hc} + S_{xo}. \rho_{mf}$$

ρ_m $(1-\Phi)$	S_{xo} ρ_{mf}
	$(1-S_{xo})$ ρ_{hc}

Efeito dos Hidrocarbonetos sobre ρ_B

Para se ter uma idéia do efeito dos hidrocarbonetos sobre ρ_B , basta atentar para os seguintes exemplos hipotéticos:

- 1º caso: arenito portador de óleo: $\rho_{hc} = 0,8 \text{ g/cm}^3$, $\rho_m = 2,65 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{mf} = 1,0 \text{ g/cm}^3$, $S_{xo} = 50 \%$ e $\Phi = 10 \%$.
 - Primeiro passo, calcular ρ_f : $\rho_f = 0,5 (0,8) + 0,5 (1,0) = 0,9 \text{ g/cm}^3$
 - Segundo passo, calcular ρ_B com o fluido verdadeiro, pois este é o que influencia: $\rho_B = 0,9 (2,65) + 0,1 (0,9) = 2,475 \text{ g/cm}^3$ (a ser lido no perfil)
 - Caso o intérprete use $\rho_f = 1,0 \text{ g/cm}^3$, ele obterá o seguinte resultado:
$$\phi_D = \frac{2,65 - 2,475}{2,65 - 1,0} = 0,106 \text{ ou } 10,6\% \text{ (erro de 6\%)}$$
 - Sabendo-se, todavia, que $\rho_f = 0,9 \text{ g/cm}^3$, calcula-se $\Phi = 10\%$, conforme a hipótese.

Efeito dos Hidrocarbonetos sobre ρ_B

- 2º caso: arenito portador de gás: $\rho_{hc} = 0,3 \text{ g/cm}^3$, $\rho_m = 2,65 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{mf} = 1,0 \text{ g/cm}^3$, $S_{xo} = 50 \%$ e $\Phi = 10 \%$.
 - Primeiro passo, calcular ρ_f : $\rho_f = 0,5 (0,3) + 0,5 (1,0) = 0,65 \text{ g/cm}^3$
 - Segundo passo, calcular $\rho_B = 0,9 (2,65) + 0,1 (0,65) = 2,45 \text{ g/cm}^3$ (a ser lido no perfil)
 - Caso o intérprete use $\rho_f = 1,0 \text{ g/cm}^3$, ele obterá o seguinte resultado:
$$\phi_D = \frac{2,65 - 2,445}{2,65 - 1,0} = 0,1212 \text{ ou } 12,12\% \text{ (erro de } 21,2\%)$$
 - Sabendo-se, todavia, que $\rho_f = 0,65 \text{ g/cm}^3$, calcula-se $\Phi = 10\%$, conforme a hipótese.

Efeito dos Hidrocarbonetos sobre ρ_B

- Por não saber qual a proporção dos fluidos presente na camada sob análise, o intérprete deve lançar a mão de um valor de ρ_B maior que o real, acarretando, com tal procedimento, erros para maior nas porosidades calculadas.
- O que houve na realidade, nos dois casos, foi uma diminuição na densidade total da rocha por unidade de volume, causada pela presença de um fluido mais leve que a água.
- Daí se dizer que diminuições na densidade “aumentam” a porosidade.
- Em outras palavras, o gás “aumenta” a porosidade do densidade, tornando-a otimista.

Efeito dos Hidrocarbonetos sobre ρ_B

- De acordo com o que já expressamos, quando discutiu-se os efeitos dos fluidos sobre o Δt , jamais haverá "aumentos" ou "diminuições" de porosidades das rochas por ocasião de uma perfilagem, mas sim, efeitos causados pela presença de gás, da argila, da lama, do reboco, etc.
- Erros tendem a ser gerados a partir da escolha errada de parâmetros pelo intérprete.

Efeito da Argilosidade sobre ρ_B

- A exemplo do sônico, a argila também afeta as leituras do perfil de Densidade, porquanto mais leve, ou menos densa, por unidade de volume (dado o excesso de água), tenderá também a diminuir o valor de ρ_B .
- A exemplo do Sônico, deduz-se igualmente para o Densidade

$$\Phi_{DC} = \Phi_D - V_{SH} \cdot \Phi_{DSH}$$

sendo, Φ_{DSH} a porosidade aparente dos folhelhos adjacentes, calculada nos mesmos moldes da Φ_{SSH} .

- Efeitos da presença de argila e de hidrocarbonetos sobre as leituras dos perfis serão corrigidos na interpretação quantitativa final, com o uso de 2 ou 3 perfis de porosidade.

Apresentação do Perfil de Densidade

- A apresentação do perfil de Densidade Compensada deve vir sempre acompanhada do calíper.
- A densidade (ρ_B) das camadas é mostrada nas segunda e terceira faixas, com valores crescentes da esquerda para a direita, de 2,00 até 3,00 g/cm³.
- Na terceira faixa, e no mesmo sentido, de -0,25 a +0,25 g/cm³, imprime-se $\Delta\rho_B$.
 - Esta indica o valor que foi adicionado a leitura de ρ_B de modo a eliminar todos os efeitos do poço (reboco e lama).
 - Convencionou-se dizer que correções maiores de $\pm 0,15$ g/cm³ indicam leituras falhas (equipamento realizou compensação exagerada).
 - Atentar para todos os casos desta natureza, porque eles ocorrem principalmente defronte a zonas desmoronadas ou rugosas.

Profundidade de Investigação

- A profundidade de investigação da Densidade é relativamente pequena devido, principalmente, aos efeitos do reboco e contactos parciais do patim com a parede do poço.
- Para sondas com espaçamento de 14 e 16 pol. (35-45 cm) entre detectores, 90% da resposta do perfil vem de uma zona entre 2-3 polegadas (5-7 cm).