

PERFILAGEM GEOFÍSICA EM POÇOS DE ÁGUA

Jean-Pierre Di Schino e Geraldo Girão Nery

10.1 Introdução

O tempo de perfuração e as amostras de calha colhidas durante a perfuração, ainda são, em muitos casos, as únicas informações usadas pela indústria da água, para a reconstrução da coluna litológica e o assentamento dos filtros. Os resultados desses métodos empíricos e sujeitos a importantes erros de avaliação, não são sempre satisfatórios e vêm sendo apoiados, com maior frequência, por métodos de **perfilagem geofísica**, mais confiáveis. Neste capítulo, trataremos dos princípios básicos da perfilagem geofísica e seu uso em poços tubulares de água.

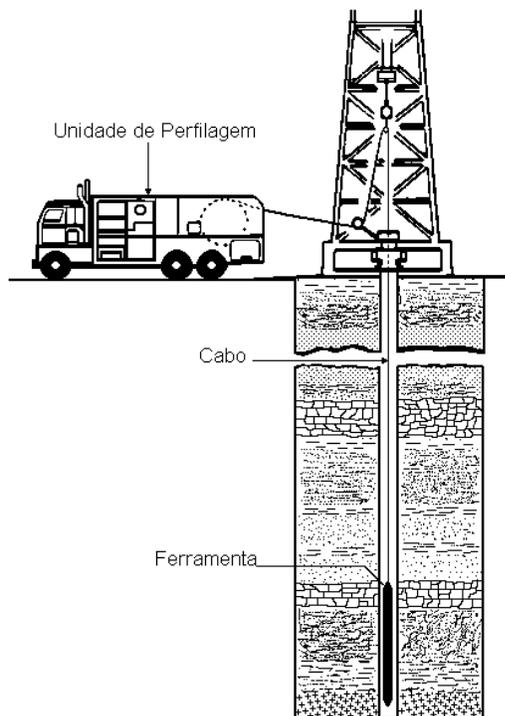


Fig. 10.01: Operação de perfilagem

O termo perfilagem geofísica refere-se a um processo de obtenção, registro e apresentação, analógico ou digital, das diversas propriedades petro-geofísicas, de natureza elétrica, acústica, radioativa, mecânica, térmica, etc., das rochas atravessadas por um poço tubular. O produto final desta operação é um registro de tais propriedades em relação às profundidades, denominado de **perfil**.

Uma operação de perfilagem é realizada, imediatamente após uma interrupção programada da perfuração de um poço, através da descida de um cabo de propriedades eletro-mecânicas precisas, em cuja extremidade se acopla um mandril protetor contendo circuitos de telemetria e um ou mais sensores específicos para cada tipo de perfil. Ao conjunto, telemetria-sensor(es), dá-se o nome genérico de **ferramenta** ou **sonda** de perfilagem (Fig. 10.01). Os sensores captam as informações oriundas das rochas e as entregam à telemetria para enviá-las, através do cabo, à superfície, onde são recolhidas, separadas, processadas e registradas na **Unidade** de Perfilagem (Fig. 10.02).

Existem atualmente 50 ou mais tipos diferentes de perfís, cada um fornecendo informações específicas e úteis para distintos tipos de usuários:

- O geólogo exploracionista usa-os para a realização dos seus mapas e seções;
- O petrofísico, para avaliar potenciais produtivos;
- O geofísico, como uma fonte complementar e de calibração, de seus levantamentos de superfície;
- O geólogo projetista, para a obtenção de parâmetros para seus modelamentos;
- O geotécnico, para a obtenção das constantes elásticas das rochas;
- O geólogo de petróleo, para quantificar o teor de hidrocarbonetos presentes nas camadas permoporosas;
- **O hidrogeólogo, para melhor posicionar seus filtros, avaliar o potencial produtivo do poço e determinar a qualidade das águas dos aquíferos em termos de quantidade de sais totais (TDS).**

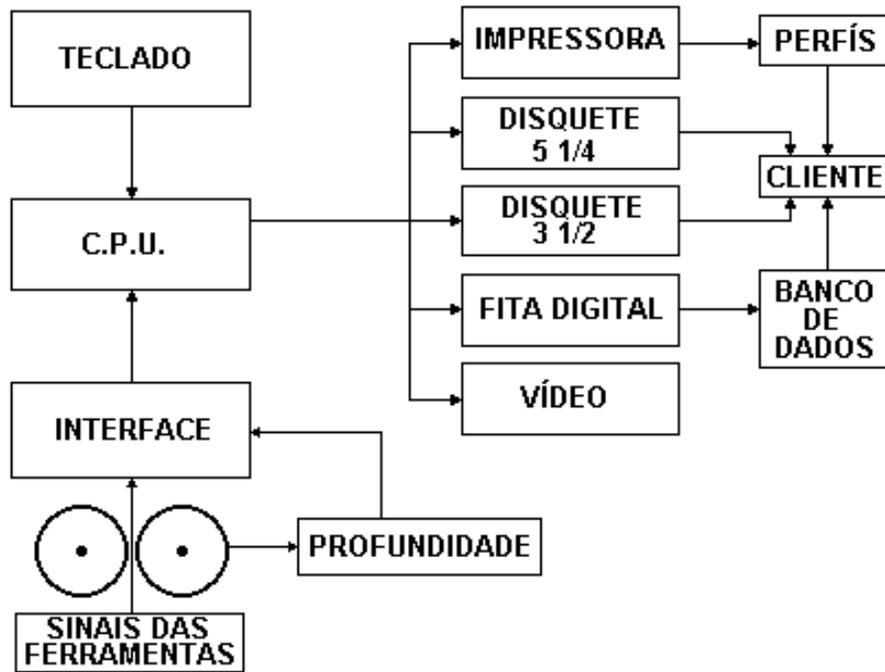


Fig.10.02: Diagrama do sistema de registro de uma unidade de perfilagem moderna

Tabela 10.01: Uso dos principais Perfís Geofísicos na Hidrogeologia

	Potencial Espontâneo	Resistividade Profunda	Normal Curta	Raios Gama	Sônico	Caliper	Temperatura	Inclinômetro
Litologia	X	X	X	X	X			
Espessura das camadas	X	X	X	X	X			
Argilosidade	X	X	X	X				
Porosidade					X			
Propriedades Químicas	X	X			X			
Entradas de água no poço							X	
Cimentação					X		X	
Construção do poço						X		X

Existem basicamente dois tipos de ferramentas de perfilagem utilizadas na indústria da água: as que foram desenhadas para mineração e as ferramentas tipo petróleo. As mais adequadas para poços de água são as do petróleo, já que utilizam uma tecnologia mais avançada, possuem sensores mais sensíveis e são menos afetadas por efeitos de poço (o seu diâmetro é o dobro das ferramentas tipo mineração). Além disso, os perfís tipo petróleo são estandarizados pelos padrões internacionais API (American Petroleum Institute) e são calibrados, dando resultados tanto qualitativos como quantitativos, permitindo assim efetuar a interpretação computadorizada do poço.

Por essas razões, discutiremos mais em detalhe, neste capítulo, a perfilagem geofísica com tecnologia tipo petróleo.

10.2 Princípios básicos

Perfil de Resistividade: Apesar da resistividade elétrica de uma rocha ser praticamente infinita, os perfís medem resistividades da ordem de alguns ohm-m. Isto se deve ao fato que a rocha contém água que a torna condutiva. A água pura (água destilada) não é condutiva e só deixa passar a corrente elétrica quando contém sais dissolvidos: quanto mais salgada a água, mais condutiva (ou menos resistiva) ela se torna. Pode se dizer então, que um perfil de resistividade nada mais é que uma medição da quantidade de sais dissolvidos na água contida nos poros da rocha.

Perfil de Porosidade: Constata-se que uma mesma resistividade de rocha poderia corresponder a uma rocha pouco porosa contendo água bastante salgada ou, ao contrário, a uma rocha mais porosa e com água mais doce. Para poder resolver essa indefinição, é necessário saber o volume de água contida na rocha, ou seja a sua porosidade. Daí a necessidade de correr também um perfil de porosidade, junto com o perfil de resistividade.

Com esses dois perfís, Resistividade e Porosidade, é possível determinar a quantidade de água contida na rocha e a sua salinidade.

Perfil de Raios Gama: Infelizmente, existe, em quase todas as rochas sedimentares, um fator complicador que atrapalha tanto a perfuração quanto a perfilagem: a argilosidade. No caso da perfilagem, as argilas falsificam as leituras dos perfís de resistividade e de porosidade, tornando necessária a medição do volume de argila presente nas rochas para se poder compensar seus efeitos negativos. O perfil de Raios Gama permite efetuar essa correção.

Outros Perfís: Existem vários outros perfís e serviços que podem ser úteis em poços de água, tais como:

- Perfil de Caliper: Registra o diâmetro do poço, permite corrigir os perfís pelo chamado efeito de poço, e calcula os volumes de pré-filtro ou cimento;
- Perfil de Temperatura: Registra em forma contínua a temperatura do poço;
- Perfil de Pega da Cimentação - CBL: Avalia a qualidade da cimentação;
- Perfil de Inclinação do poço;
- Indicador de Ponto Livre: determina a profundidade onde uma coluna de perfuração está presa;
- Perfil de Flowmeter: mede o movimento vertical do fluido dentro do poço. Útil para determinar fluxos entre aquíferos ou a produção seletiva de cada zona, num poço que atravessa vários aquíferos.

10.3 Ambiente de uma Perfilagem

Um poço altera as rochas. Antes dele, havia equilíbrio natural. Depois dele, vários fenômenos hidro e eletroquímicos aparecem, devido à presença da lama. A lama tem dois componentes: um líquido (filtrado) que é, geralmente, a água usada na sua confecção, e um sólido, que são as argilas e produtos para aumentar a tixotropia e o peso.

Sob a ação da broca e do diferencial de pressão exercido pela lama, as rochas passam a se comportar de acordo com as suas propriedades físicas e/ou mecânicas, ora aumentando (desmoraamentos), ora diminuindo (estrangulamentos), as seções transversais dos poços. Nos calcários ou nas rochas cristalinas, duras e compactas, as paredes dos poços tendem a manter o mesmo diâmetro nominal da broca. Os folhelhos, tornam-se físseis e quebradiços, desmoronando e/ou incorporando-se à própria lama, tornando-a mais viscosa. Nos arenitos permoporosos, o peso da lama força o filtrado a penetrar radialmente nas camadas, enquanto que nas suas paredes ocorre uma deposição do material sólido, rebocando-as e reduzindo o diâmetro nominal

do poço. A tendência deste reboco é de parar de crescer com o tempo e impermeabilizar a parede. Entretanto, o processo de invasão é tanto estático como dinâmico, tendo continuidade durante toda a perfuração, devido ao desgaste natural do reboco pelo atrito resultante da movimentação dos tubos e da broca.

As medições dos perfis são grandemente dependentes dos parâmetros petrofísicos, tais como composição química, textura, estrutura sedimentar, porosidade, qualidade e quantidade do fluido intersticial: são os **efeitos das camadas**. A figura 10.03 mostra como a espessura da camada afeta a resposta de um perfil de resistividade:

- No caso - **a** -, a espessura da camada é bem superior ao tamanho do sensor (espaçamento dos eletrodos) e a resistividade aparente R_a lida pelo perfil, é igual à resistividade verdadeira R_o ;
- No caso - **b** -, a espessura da camada é igual ao espaçamento dos eletrodos, e R_a , é inferior à R_o ;
- No caso - **c** - de uma camada muito fina com espessura inferior ao espaçamento dos eletrodos, a resistividade lida pelo perfil é completamente errônea.

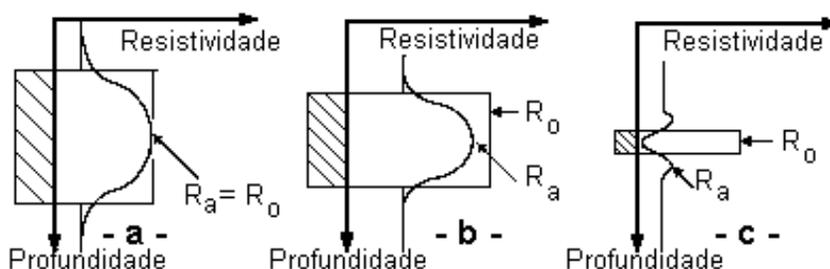


Fig. 10.03: Resposta de um perfil de resistividade em frente à camadas de várias espessuras

O diâmetro do poço e as características da lama, influenciam também os perfis: são os **efeitos do poço**. A figura 10.04 ilustra as distorções sofridas pelas linhas de corrente emitidas por um mesmo eletrodo em poços com lama de diferentes salinidades.

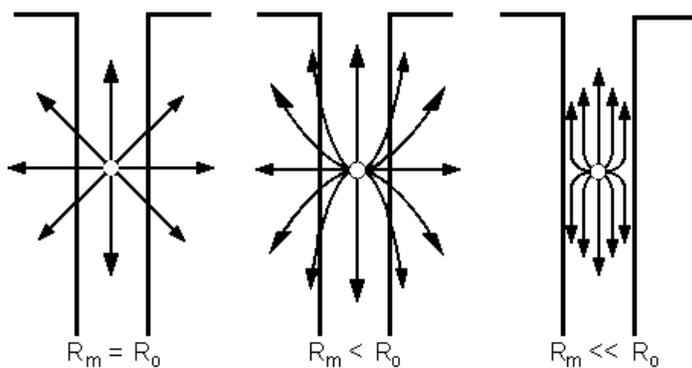


Fig. 10.04: Distorção das linhas de corrente com diferentes resistividades de lama (R_m)

As ferramentas tipo petróleo foram especialmente desenhadas para minimizar esses efeitos negativos e dar as respostas mais próximas possíveis dos valores reais das formações virgens (sem efeito de camada ou de poço).

O **efeito da invasão** das zonas permeáveis pelo filtrado da lama, resulta numa distribuição radial dos fluidos, em relação ao eixo do poço. O filtrado invade uma zona nas proximidades das paredes do poço (zona lavada), expulsando o fluido original da camada (água intersticial) que se desloca para as partes mais internas da rocha (zona virgem).

Na realidade, não existe um plano separando o filtrado invasor da água intersticial virgem, mas sim uma zona de difusão ou intermediária, de largura variável e temporária. As salinidades diferentes do filtrado e da água de formação, ocasionam uma distribuição radial de resistividades ao redor do poço (Fig. 10.05).

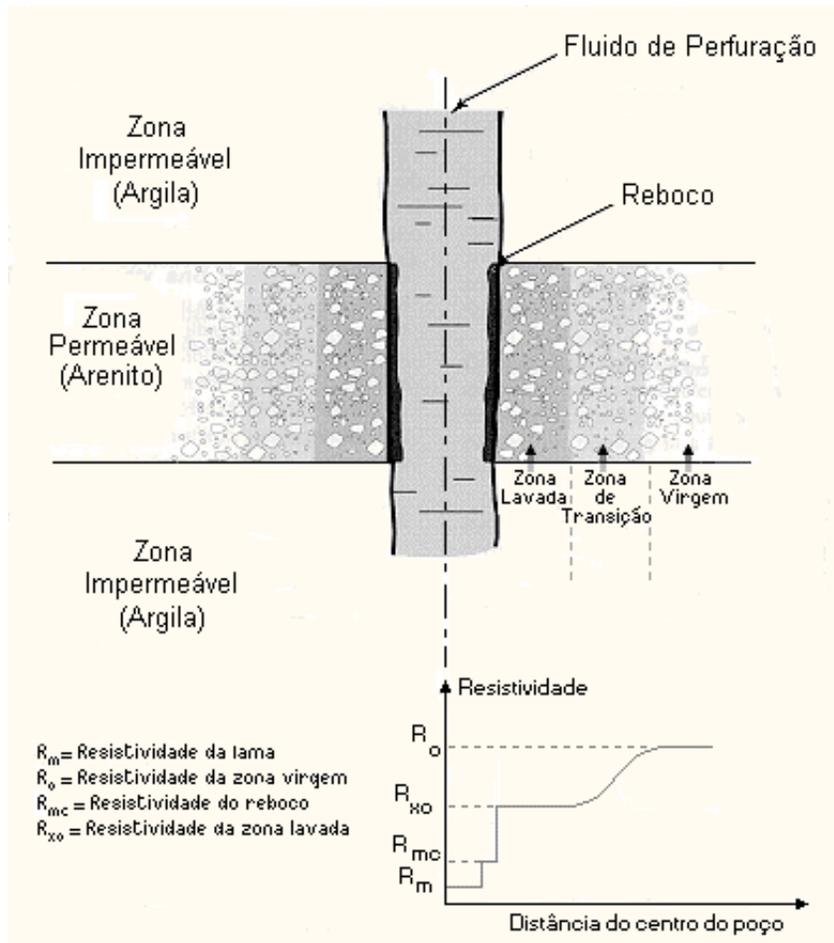


Fig. 10.05: Distribuição radial de resistividade por efeito de invasão

10.4 Formato e Apresentação dos Perfís

Os perfís modernos, obedecem aos padrões estabelecidos pelo API.

- A parte superior do perfil, é o **cabeçalho** (Fig. 10.06), onde estão registrados todos os dados da lama, da perfuração e da localização do poço, assim como observações sobre a operação de perfilagem;
- Abaixo do cabeçalho, vem o **perfil principal**, (Fig. 10.07), composto de 3 faixas. A faixa da esquerda, sempre em escala linear, está dividida verticalmente em 10 divisões equidistantes. Separando a primeira faixa das demais, existe uma estreita faixa onde estão registradas as profundidades. As faixas 2 e 3 são contíguas e podem ser apresentadas, independentemente uma da outra, com escalas lineares ou logarítmicas. Linhas horizontais equidistantes representam as profundidades. A escala de profundidade mais usada é a de 1/200 (um metro de perfil representa 200 metros de poço). Para ter uma visão mais global do poço em interpretações qualitativas, uma escala menor de 1/500 é recomendada.
- Em baixo do perfil principal, vem uma **seção repetida** de mais ou menos 30 m, onde o perfil é corrido novamente para efeito de comparação com o perfil principal e controle de qualidade;
- No final do perfil estão apresentadas as **calibrações** das ferramentas;

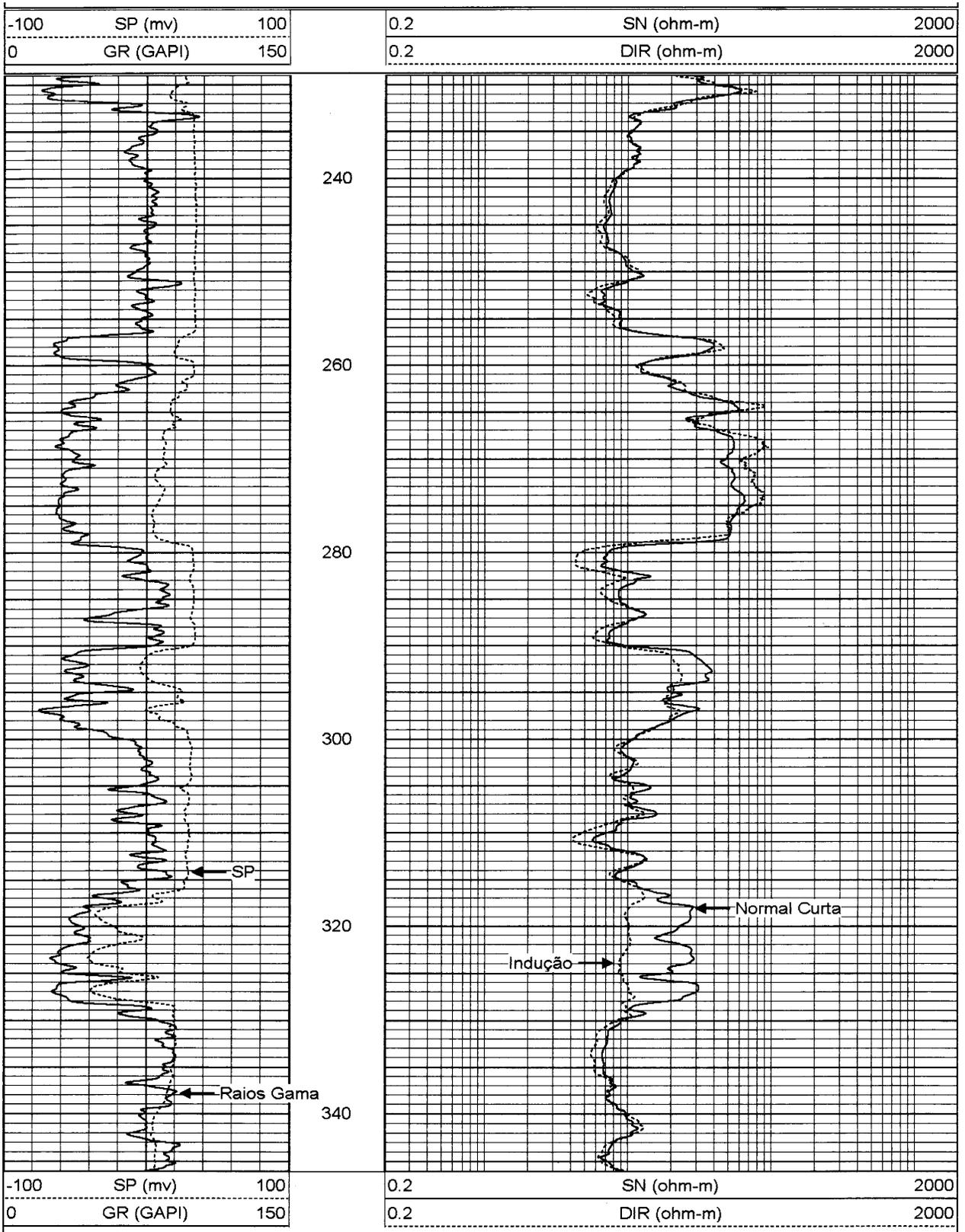


Fig. 10.07: Exemplo de perfil de Indução com Raios Gama

10.5 Perfil de Raios Gama

A curva de traçado contínuo na faixa de esquerda (Track I) do perfil na figura 10.07 mostra um exemplo de curva de Raios Gama.

10.5.1 Radioatividade natural

Existem 3 famílias de elementos radioativos naturais: a do Urânio que se inicia com o U^{238} , a do Tório que se inicia com o Th^{232} e a do Actínio que se inicia com o U^{235} (Urânio físsil). Todas elas terminam em chumbo após sucessivas desintegrações. O Potássio K^{40} não forma uma família, mas existe em grande abundância na crosta terrestre: os isótopos K^{39} , K^{40} e K^{41} , representam cerca de 23.500 ppm, o U^{238} 12 ppm e o Th^{232} 3 ppm. Por sua vez o K^{40} corresponde a um teor médio de 2,7%, em peso, dos folhelhos. Por essas razões, Urânio, Tório e Potássio, são os 3 elementos detectados pelos sensores de radioatividade usados nos perfis de poço.

As desintegrações são realizadas através de dois processos distintos:

- por liberação de partículas alfa e beta, que não podem ser detectadas pelos sensores das ferramentas de perfilagem, por terem um pequeno poder de penetração nos materiais densos;
- ou por liberação de energia eletromagnética de curtíssimo comprimento de onda (Raios Gama) que podem ser detectados, mesmo através dos revestimentos.

Os Raios Gama não têm massa ou carga elétrica, porém transportam energia medida em milhões de elétron-volts (MeV). Assim, o Potássio é detectado pelos sensores através de seu pico monoenergético de 1,46 MeV, o Tório, pelo pico de 2,62 MeV correspondente ao elemento-filho Ta^{208} e o Urânio, pelo pico de 1,76 MeV do elemento-filho Bi^{214} .

10.5.2 Deposição dos Elementos Radioativos

Considerando os processos geológicos de formação e/ou deposição das rochas sedimentares, em geral, podemos estabelecer a seguinte escala lógica de radioatividade:

- Em primeiro lugar, as rochas ígneas ou magmáticas com ocorrência de minerais radioativos, juntamente com os evaporitos potássicos (Silvita, Carnalita, Langbeinita, etc.);
- Em segundo lugar, as argilas/folhelhos, por se originarem, geralmente, da decomposição de feldspatos e micas, que contêm Potássio. Além do mais, os argilo-minerais retêm, por sua vez, Urânio.
- A seguir, estão os arenitos, os dolomitos (carbonatos diagenetizados por águas mineralizantes) e os calcários.
- Esta escala de radioatividade se encerra com os evaporitos não potássicos (Halita, Anidrita, Gipsita, etc.).
- De uma maneira geral, a depender do ambiente deposicional sedimentar, os depósitos eólicos apresentam menor radioatividade do que os fluviais.

10.5.3 Detecção da Radioatividade

Nos equipamentos modernos de perfilagem, os Raios Gama naturais são detectados através de sensores de cintilação. Este tipo de sensor tem uma eficiência de 50-60%, cerca de dez vezes maior do que os Geiger-Muellers dos equipamentos tipo mineração. Os detectores de cintilação permitiram ao API padronizar os perfis de Raios Gama através da unidade ou grau API (GAPI).

10.5.4 Interpretação do Perfil de Raios Gama

Em uma seção de arenitos e folhelhos, os folhelhos geralmente apresentarão uma maior radioatividade que os arenitos. Experiências de laboratório têm demonstrado que a argilosidade, V_{SH} ou volume de folhelho, pode ser representado pela seguinte equação não linear:

$$V_{SH} = \frac{V_{SHGR}}{A_{GR} - (A_{GR} - 1) \times V_{SHGR}} \quad (\text{Eq. 10.01})$$

onde:

- V_{SH} é a porcentagem de folhelho a ser calculada;
- A_{GR} é uma constante igual a 3 nas rochas terciárias e a 2 nas rochas mais antigas;
- e V_{SHGR} é a porcentagem de argila calculada linearmente a partir do perfil de Raios Gama, usando a equação:

$$V_{SHGR} = \frac{GR_{\text{Perfil}} - GR_{\text{Mínimo}}}{GR_{\text{Máximo}} - GR_{\text{Mínimo}}} \quad (\text{Eq. 10.02})$$

onde os valores $GR_{\text{Mínimo}}$ e $GR_{\text{Máximo}}$, no caso de uma sequência de arenitos e folhelhos (ou de carbonatos e folhelhos), deverão ser lidos no perfil defronte a essas respectivas litologias. Jamais escolher o $GR_{\text{Mínimo}}$ e o $GR_{\text{Máximo}}$ em camadas pertencentes a formações ou ambientes distintos. Bastante cuidado deve ser tomado para que o $GR_{\text{Máximo}}$ seja realmente lido em folhelhos e não em camadas com mineralizações localizadas, e que o $GR_{\text{Mínimo}}$ seja realmente lido em uma litologia limpa. A prática indica que arenitos limpos (isentos de argilominerais) têm uma radioatividade residual de cerca de 10 a 15 unidades API, chamada de "background".

10.5.5 Usos do Perfil de Raios Gama

O perfil de Raios Gama é um dos melhores indicadores litológicos das rochas sedimentares. Os argilominerais reduzem as porosidades e as permeabilidades dos aquíferos, daí a importância de suas identificações e quantificações. A aplicação hidrogeológica mais importante do perfil de Raios Gama, está na identificação e quantificação de intervalos argilosos para escolha dos intervalos apropriados para a colocação de filtros. Os perfís modernos que usam cintilômetros, podem calcular quantitativamente a porcentagem de argila presente nos aquíferos, enquanto que os perfís tipo mineração que usam Geiger-Müller podem ser utilizados apenas para identificação qualitativa.

10.6 Perfís de Resistividade

10.6.1 Ferramentas para perfís de resistividade

Existem vários tipos de ferramentas disponíveis para cada tipo de perfil e algumas delas são mais indicadas que outras para perfilar poços de água.

A primeira geração de ferramentas de resistividade foram as de tipo **Elétrico**. Nessas ferramentas, uma corrente elétrica circula entre dois eletrodos para dentro do poço e das rochas, enquanto uma diferença de potencial é medida entre outros dois eletrodos. Pela lei de Ohm, pode-se calcular a resistividade do volume global poço-rocha atravessado pela corrente. Esse tipo de medição, ainda utilizado por algumas companhias em poços de água, tem graves limitações e foi abandonado pela indústria petrolífera em favor da ferramenta de **Indução** para poços perfurados com lama doce, ou da ferramenta de **Laterolog** para poços perfurados com lama salgada.

Em poços de água, a ferramenta mais recomendável, é a ferramenta de Indução que utiliza, não correntes elétricas, mas ondas eletromagnéticas que penetram profundamente dentro das rochas e minimizam o efeito do poço sobre a medição. A resistividade medida por tal ferramenta é mais próxima da realidade que no caso de ferramentas elétricas. Junto com os perfis de resistividade, se registra também uma curva de **Potencial Espontâneo (SP)**.

10.6.2 Perfil de Potencial Espontâneo

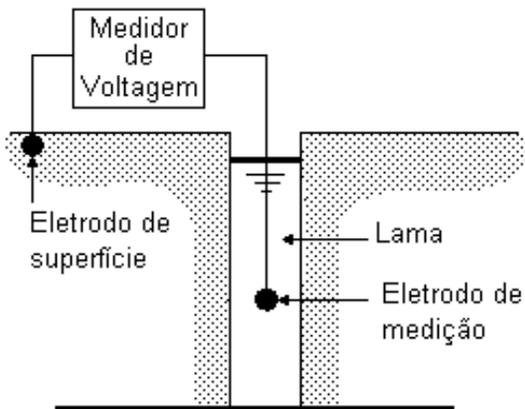


Fig. 10.08: Circuito simplificado do SP

Um poço perfurado com lama condutiva, atravessando uma zona permeável (arenito) intercalada entre argilas impermeáveis, cria um potencial chamado de Potencial Espontâneo ou SP, e uma voltagem pode ser medida em milivolts, entre um eletrodo dentro do poço e um outro na superfície (Fig. 10.08).

Estudos de laboratório demonstraram que o SP é composto de dois potenciais distintos (Fig. 10.09):

1. E_m ou potencial de membrana, que se forma nas interfaces das argilas com o poço e com as zonas permeáveis adjacentes;
2. E_j ou potencial de junção líquida, formado pelo contato entre o filtrado e a água intersticial de salinidades diferentes.

intersticial de salinidades diferentes.

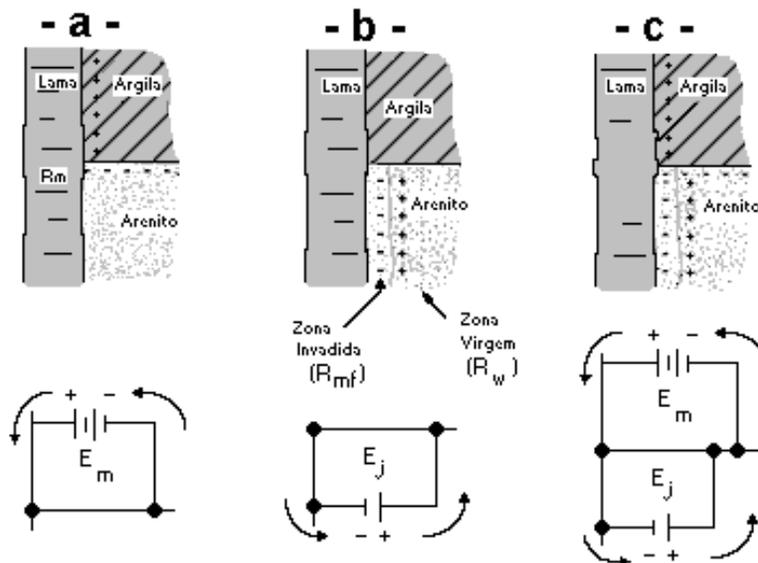


Fig. 10.09: O Potencial Espontâneo é a soma dos Potenciais de Membrana e de Junção, como demonstram os circuitos elétricos equivalentes na parte de baixo da figura

Potencial de membrana: Devido a sua própria composição geoquímica, todo folhelho tende a acumular cátions positivos no contato lama-folhelho e ânions negativos no contato arenito-

folhelho, gerando um efeito de bateria (Fig. 10.09.-a-). O potencial de membrana assim criado pode ser calculado a partir da equação 10.03:

$$E_m = -59,2 \times \log_{10} \left(\frac{R_{mf}}{R_w} \right) \quad \text{a } 25^0 \text{ C} \quad (\text{Eq. 10.03})$$

onde R_{mf} é a resistividade do filtrado (medido pela companhia de perfilagem), e R_w é a resistividade da água de formação (a ser calculada).

Potencial de junção: A figura 10.09.-b- ilustra os efeitos da difusão iônica que se desenvolve no contato entre o filtrado e a água intersticial de salinidades diferentes: os sais tendem a equilibrar-se e migram da solução mais salina para a mais doce. Devido às diferenças entre as mobilidades relativas dos diferentes íons, cargas negativas de um lado e positivas do outro, se acumulam na interface da zona invadida e da zona virgem, criando um potencial de junção que pode ser calculado através da equação 10.04:

$$E_j = -11,5 \times \log_{10} \left(\frac{R_{mf}}{R_w} \right) \quad \text{a } 25^0 \text{ C} \quad (\text{Eq. 10.04})$$

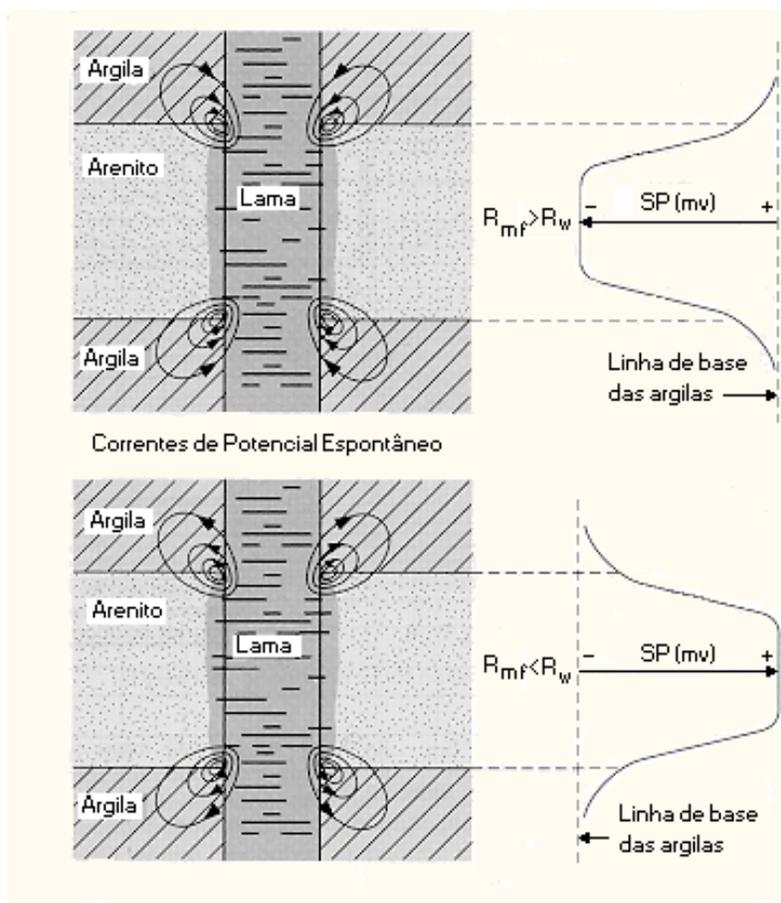


Fig. 10.10: Correntes que geram o SP e deflexões correspondentes da curva em função do contraste entre R_{mf} e R_w

no sentido poço-formação, criando uma força eletromotriz e um potencial de eletro-filtração que afeta negativamente a leitura do SP. Nesses casos, o perfil de SP não pode ser usado quantitativamente.

Potencial Espontâneo: A figura 10.09.-c-, demonstra como a soma dos potenciais de membrana E_m e de junção E_j gera o SP. A equação do SP é a soma das Eq. 10.03 e 10.04:

$$SP = E_m + E_j = -70,7 \times \log_{10} \left(\frac{R_{mf}}{R_w} \right) \quad \text{a } 25^0 \text{ C} \quad (\text{Eq. 10.05})$$

A direção das correntes ilustrada na figura 10.09, supõe que a água da formação seja mais salina que o filtrado ($R_{mf} > R_w$). No caso contrário, que normalmente ocorre em poços de água doce, as correntes estão invertidas e a curva de SP deflete na direção oposta (Fig. 10.10).

Cabe ressaltar que essas correntes são geradas pelos movimentos dos íons dentro de líquidos em equilíbrio hidrostático, e não pelo movimento dos próprios fluidos. Em poços perfurados com lama de propriedades tixotrópicas deficientes, pode existir, na hora da perfilagem, um fluxo de fluido

Usos do perfil do SP

Os principais usos do perfil do SP são:

- Delineação das zonas permeáveis e impermeáveis;
- Correlação litológica;
- Cálculo da resistividade da água intersticial R_w através da equação 10.05 que pode ser modificada pelo efeito da temperatura de formação T (em graus Centígrados):

$$SP = -K \times \log_{10} \left(\frac{R_{mf}}{R_w} \right) \quad (\text{Eq. 10.06})$$

sendo $K = 65 + 0,24 \times T$

As equações 10.04, 10.05 e 10.06 foram estabelecidas para soluções de cloreto de sódio NaCl. Para águas contendo predominantemente este sal, a resistividade da água R_w pode ser calculada diretamente a partir da equação 10.06.

No caso de aquíferos de água doce contendo outros tipos de sais (sulfatos, carbonatos, etc.), R_w não pode ser calculado diretamente. Nestas situações, pode-se calcular a partir da equação 10.06, uma resistividade equivalente de NaCl, R_{we} :

$$R_{we(SP)} = \frac{R_{mf}}{10^{\left(\frac{SP}{K}\right)}} \quad (\text{Eq. 10.07})$$

Para obter R_w a partir de R_{we} , uma correção pelos diversos tipos de sais dissolvidos deve ser aplicada. Desconhecendo-se a composição química da água, essa correção pelo efeito do sal não pode ser aplicada com precisão e a equação do SP não é 100% confiável. Nesses casos, é preferível calcular R_w por outros métodos e dar um peso menor à equação do SP (ver eq. 10.20).

Fatores que afetam o perfil do SP

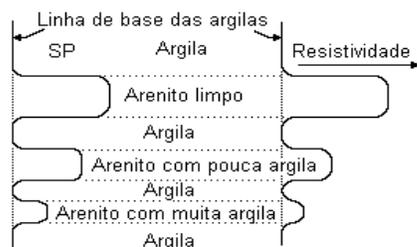


Fig. 10.11: A argilosidade reduz as deflexões das curvas de SP e de Resistividade ($R_{mf} < R_w$)

Os principais fatores que afetam negativamente o perfil do SP e que requerem correções para uma interpretação quantitativa, são os efeitos do poço e das camadas:

1. A espessura das camadas afeta a curva do SP da mesma maneira que as curvas de resistividades: Camadas finas reduzem as deflexões das curvas (Fig. 10.03);
2. Um diâmetro de poço maior ou uma invasão do filtrado mais profunda reduzem também a deflexão do SP;
3. Da mesma maneira, a argilosidade da formação, reduz a deflexão da curva (Fig. 10.11).

10.6.3 Perfil de Indução

Como foi mencionado no parágrafo 10.6.1, a ferramenta de indução é a mais recomendada para medir resistividades em poços de água. Além da curva de SP discutida anteriormente, essa ferramenta registra também uma curva de **Normal Curta de 16"** (Short Normal), obtida a partir de

um método elétrico convencional, e uma curva de indução ou **Resistividade Profunda** (Deep Induction Resistivity Curve - DIR), derivada de uma medição da condutividade das formações obtida por um método elétrico-magnético.

A figura 10.07 mostra um exemplo de perfil Elétrico-Indução. A apresentação das diferentes curvas, de acordo com os padrões API, mostra, na faixa da esquerda em escala linear, uma curva de Raios Gama (curva cheia) e uma curva de SP (curva pontilhada) e, nas duas faixas da direita, em escala logarítmica, a curva de Normal Curta (curva cheia) e a curva de Resistividade Profunda (curva pontilhada).

Curva Normal Curta 16"

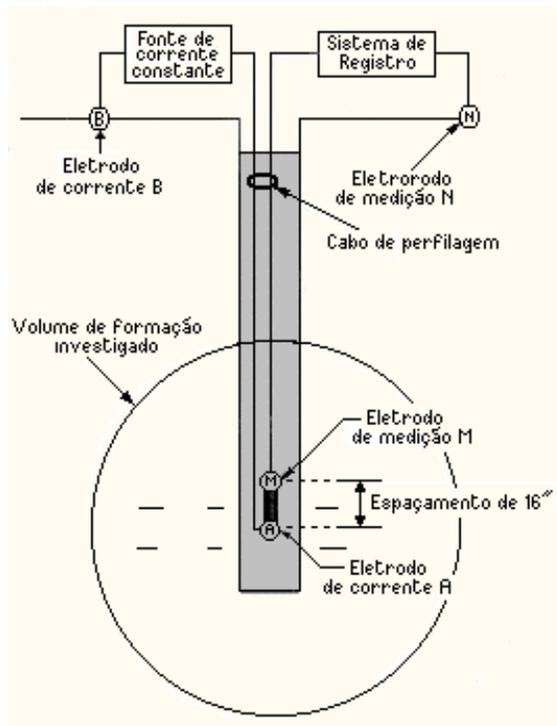


Fig. 10.12: Circuito da Normal Curta

A figura 10.12, mostra o diagrama do sistema de medição da curva de Normal Curta. Uma corrente de valor constante, enviada entre um eletrodo emissor A e um eletrodo de retorno B, cria linhas de corrente que atravessam um certo volume de lama e de rocha. Uma diferença de potencial entre os eletrodos de medição M e N, pode ser calculada através da equação 10.08:

$$V_M = \frac{RI}{4p AM} \quad (\text{Eq. 10.08})$$

onde:

- V_M é o potencial do eletrodo M;
- R é a resistividade do meio ambiente (poço e formação) em ohm-m;
- I é a corrente em ampères;
- e AM é o espaçamento entre os eletrodos A e M.

Como a corrente é mantida constante e a distância AM é fixa (16"), a resistividade R é proporcional à voltagem medida V_M .

A profundidade de investigação da ferramenta (volume de formação investigado) é proporcional à distância AM : 75% da voltagem medida provém de uma esfera de diâmetro igual a 4 vezes a distância AM . Conseqüentemente, a resolução vertical da ferramenta é inversamente proporcional a essa mesma distância, ou seja o efeito das camadas adjacentes aumenta com o espaçamento dos eletrodos A e M. O espaçamento de 16" foi escolhido como um meio termo entre profundidade de investigação e efeito de camada.

Os fatores que afetam negativamente a curva Normal Curta são basicamente os mesmos da curva do SP:

- Efeitos de camada (Fig. 10.03): camadas finas reduzem a amplitude da leitura;
- Efeitos de poço (Fig. 10.04): Um diâmetro do poço maior, uma lama mais salgada ou uma profundidade da invasão maior, também diminuem a leitura;
- A argilosidade da formação (Fig. 10.11): maior a argilosidade, menor a leitura.

Curva de Indução

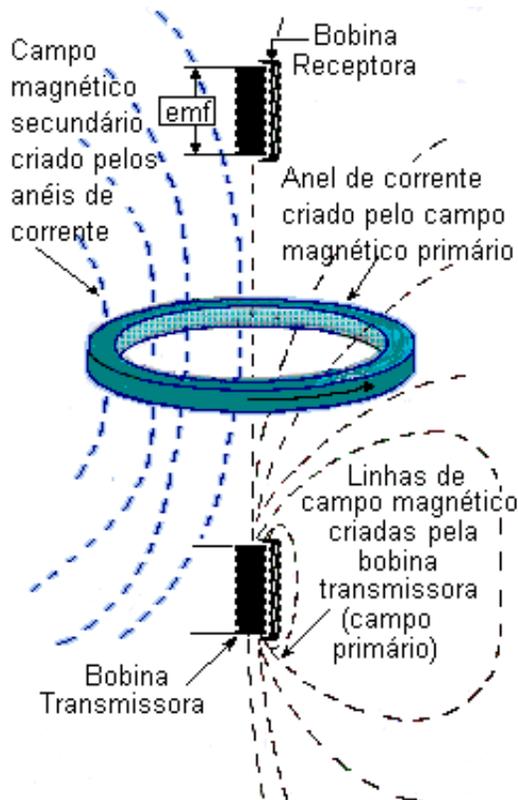


Fig. 10.13: Princípio da ferramenta de indução

A figura 10.13 descreve o princípio de funcionamento da ferramenta de Indução. Uma bobina transmissora é excitada por uma corrente de alta frequência que cria um campo magnético primário. Este campo se propaga tri-dimensionalmente para dentro das camadas e cria, nas rochas condutivas, anéis de corrente coaxiais ao poço. Por sua vez, esses anéis (que atuam como fios condutores), criam os seus próprios campos magnéticos secundários. Uma bobina receptora, posicionada a 40 polegadas (1,02 m) da transmissora, capta estes campos secundários e gera uma corrente elétrica proporcional à condutividade integrada dos anéis de formação. Através da voltagem assim criada, o perfil de indução mede a condutividade das formações e registra a resistividade, que é o seu inverso.

Na realidade, a ferramenta de indução é composta, não por duas, mas por seis bobinas. As duas principais, de maior tamanho são as bobinas transmissora e receptora discutidas acima. Duas outras

bobinas menores, enroladas em sentido contrário das principais, minimizam o efeito do acoplamento direto do campo primário com a bobina receptora. E, finalmente, duas outras bobinas focalizam o sinal para reduzir o efeito das camadas adjacentes.

Com essa configuração, a ferramenta de indução, conhecida como **6FF40** (6 bobinas focalizadas com espaçamento de 40"), está apta a medir, praticamente sem distorção, a resistividade de camadas com espessuras de aproximadamente um metro ou mais. O ambiente mais favorável para essa ferramenta, é uma lama pouco condutiva e formações de resistividade de menos de 100 ohms-m. Nestas condições, que é justamente o caso dos poços de água perfurados com água doce, o efeito do poço é praticamente nulo. Daí a superioridade do perfil de indução sobre os perfis elétricos convencionais em poços de água.

O perfil de indução não é recomendado em poços perfurados com lama altamente salgada (e o perfil elétrico menos ainda). A ferramenta a usar nesses casos (raríssimos em poços de água), seria a ferramenta de Laterolog, utilizada principalmente em poços de petróleo.

10.7 Perfil de Porosidade

Existem vários métodos para medir a porosidade das formações. Dois deles, apesar de darem excelentes resultados e de serem muito usados na indústria do petróleo, não são recomendáveis em poços de água, por utilizarem fontes radioativas de alta potência, o que traria perigo de contaminação para os aquíferos em caso de prisão da ferramenta e perda da fonte no poço. O perfil Sônico, que mede a velocidade do som nos vários materiais (rocha + água) que compõem as camadas do subsolo, é o método mais utilizado pela indústria da água.

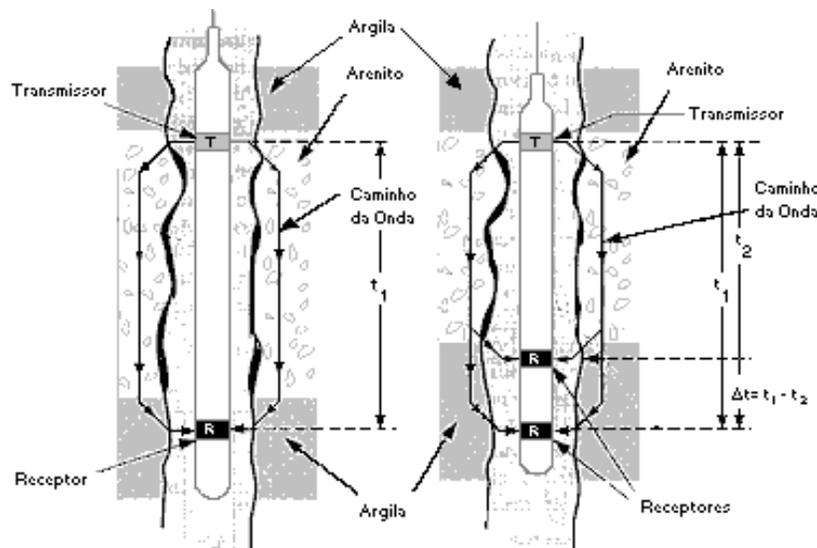


Fig 10.14: Princípio do perfil Sônico

A figura 10.14 ilustra o sistema simplificado do perfil Sônico. Um transmissor T emite trens de ondas ultra-sonoras de alta frequência (20 kilohertz) a intervalos regulares (15 ou 20 vezes por segundo). Essas ondas se propagam em forma tri-dimensional dentro do poço e das formações, e são captadas por um receptor R situado a uma distância fixa do transmissor.

A primeira geração de ferramenta de Sônico, contava com um só transmissor e um só receptor (diagrama da esquerda). Neste caso, o tempo de propagação da onda entre o transmissor e o receptor era igual ao tempo do transmissor até a parede do poço, mais o tempo dentro da formação, mais o tempo da parede do poço até o receptor. A leitura de uma ferramenta desse tipo era muito afetada pela descentralização da ferramenta ou as irregularidades da parede do poço.

Para eliminar este inconveniente, a segunda geração (diagrama da direita) utilizou um transmissor e dois receptores e permitia medir dois tempos: t_1 entre o transmissor e o primeiro receptor, e t_2 entre o transmissor e o segundo receptor. A diferença entre t_1 e t_2 elimina o tempo de propagação dentro do poço e calcula o tempo dentro da formação numa distância igual ao espaçamento entre os dois receptores.

As ferramentas modernas chamadas de “BoreHole Compensated” (compensadas pelo efeito de poço), constam de dois transmissores, um na parte superior da sonda e outro na inferior, e de dois receptores intermediários. A distância entre um transmissor e o receptor mais próximo é geralmente de 3 pés, com um espaçamento de dois pés entre os receptores. Este sistema registra uma média dos quatro tempos de deslocamento das ondas acústicas entre os transmissores e os receptores, eliminando os efeitos do poço e da descentralização ou inclinação da sonda.

A unidade padrão API adotada para o tempo de propagação do perfil Sônico é o microsegundo por pé ($\mu\text{s}/\text{pé}$). Os tempos de propagação das formações comumente encontradas variam de 50 a 200 $\mu\text{s}/\text{pé}$. A tabela 10.02 mostra os tempos de propagação em $\mu\text{s}/\text{pé}$ e as velocidades em pés/s de alguns materiais.

Tabela 10.02: Características acústicas de alguns materiais

Material	Velocidade (pé/s)	Tempo de propagação (µs/pé)
Aço	17.500	57,0
Água doce	5.000	200
Arenito	17.850	56
Argila	7.000 - 17.000	142,8 - 58,8
Calcário	21.000	47,6
Cimento	12.000	83,3
Dolomita	23.000	43,5
Granito	19.700	50,7

10.7.1 - Interpretação do Perfil Sônico

Os trabalhos de Wyllie (1956), mostraram que o tempo de propagação registrado pelo Sônico, é uma função linear da porosidade, conforme a equação 10.09:

$$\Delta t = \Phi_t \Delta t_f + (1 - \Phi_t) \Delta t_m \quad (\text{Eq. 10.09})$$

onde:

- Δt é o tempo de propagação da onda lido no perfil na profundidade desejada;
- Δt_f é o tempo no fluido contido na rocha (filtrado e água intersticial);
- Δt_m é o tempo no material sólido da rocha;
- e Φ_t é a porosidade total da formação.

A equação 10.09 representa um tempo médio ponderado, de volumes e tempos, dos materiais atravessados por uma onda compressional que viaja entre o transmissor e o receptor. Conhecendo os valores de Δt_f (em torno de 200 $\mu\text{s/pé}$ para a água doce) e de Δt_m (ver diferentes valores na tabela 10.02), a porosidade Φ_t pode ser calculada a partir da equação 10.09, modificada em equação 10.10:

$$\Phi_t = \frac{\Delta t - \Delta t_m}{\Delta t_f - \Delta t_m} \quad (\text{Eq. 10.10})$$

Foi verificado posteriormente que essa equação de Wyllie era válida somente nas rochas com porosidade menores que 30%. Em rochas inconsolidadas (o que é frequentemente o caso em poços rasos para pesquisa de água), a equação calculava porosidades mais altas que as verdadeiras e precisava ser corrigida. Nesses casos, é preferível utilizar a equação 10.11 de Raymer-Hunt (1980):

$$\Phi_t = 0,625 \frac{\Delta t - \Delta t_m}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 10.11})$$

Um arenito que apresente um tempo de propagação Δt de 120 $\mu\text{s/pé}$, corresponde a uma porosidade de 33,3% de acordo com a equação de Raymer-Hunt, enquanto que a equação de Willie, sem correção, calcularia uma porosidade demasiadamente otimista de 44,4%.

A Argilosidade e a Porosidade Sônica

Dentro dos aquíferos siliciclásticos, ou carbonáticos, coexistem proporções variáveis de argilominerais depositados, quer a partir das águas intersticiais (argilas autigênicas), quer trazidos

pelo meio fluido (argilas alogênicas). A tendência destas últimas, é a de depositarem-se em lâminas sujeitas aos efeitos da compactação, podendo adquirir valores de porosidade distintos da litologia hospedeira. As autigênicas, formadas entre grãos e portanto dispersamente localizadas, sofrem menos influência da compactação, permanecendo com sua porosidade original, aproximada à da litologia hospedeira. Os principais argilominerais são as esmectitas, ílitas e cloritas que capeam ou interligam os grãos, e as caulinitas que preenchem a parte central dos poros.

A porosidade efetiva (Φ_e), isto é, a diferença entre a porosidade total (Φ_t) da rocha e a fração volumétrica ocupada pela argila (V_{SH}), denominada de retenção específica na hidrogeologia, pode ser calculada pela equação 10.12:

$$\Phi_e = \Phi_t - (V_{SH} \times \Phi_{SH}) \quad (\text{Eq. 10.12})$$

onde, Φ_{SH} é a porosidade estimada do folhelho, calculada como se ele tivesse os mesmos parâmetros petrofísicos da rocha hospedeira. O termo ($V_{SH} \times \Phi_{SH}$) da equação 10.12 representa o efeito da argilosidade sobre a porosidade. Admitindo-se que Φ_{SH} tenha valores aproximados de Φ_t , as porosidades efetivas das areias e carbonatos com argilas dispersas podem ser calculadas pela equação 10.13:

$$\Phi_e = \Phi_t (1 - V_{SH}) \quad (\text{Eq. 10.13})$$

10.7.2 Equação de Archie

Archie, em 1942, realizou uma série de experimentos, saturando amostras de rochas permoporosas com águas de várias salinidades (de 20 a 100.000 ppm de NaCl). Ele verificou uma proporcionalidade direta entre a resistividade R_w da água saturante e a resistividade R_o da amostra. O fator de proporcionalidade (F) foi denominado de Fator de Formação:

$$R_o = F \times R_w \quad (\text{Eq. 10.14})$$

Prossequindo suas experiências, verificou em papel log-log que o Fator de Formação tinha um comportamento linear com a porosidade efetiva (Φ_e), de tal modo que:

$$\text{Log } F = m \times \text{Log } \Phi_e \quad (\text{Eq. 10.15})$$

O parâmetro "m", denominado de coeficiente de cimentação, depende da geometria porosa das rochas, e varia entre 1,3 e 2,2 nas rochas intergranulares. A equação 10.15 pode ser modificada:

$$F = \frac{1}{\Phi_e^m} \quad (\text{Eq. 10.16})$$

Das equações 10.14 e 10.16, tira-se a **Lei de Archie**, que define, nas rochas com porosidade intergranular, a relação entre a resistividade R_w da água intersticial, a resistividade R_o da rocha saturada de água, e a porosidade efetiva Φ_e dessa rocha:

$$R_o = \frac{R_w}{\Phi_e^m} \quad (\text{Eq. 10.17})$$

A resistividade R_w da água intersticial pode então ser calculada pela equação 10.18, tirando o valor de R_o do perfil de indução e o valor de Φ_e da equação 10.12 ou 10.13, dependendo do valor de Φ_{SH} :

$$R_{w(Archie)} = R_o \times \Phi_e^m \quad (\text{Eq. 10.18})$$

Com a equação do SP (Eq. 10.7), temos agora um segundo método para calcular R_w .

10.7.3 Fatores que afetam o perfil Sônico

Fatores que causam atenuações ou distúrbios na propagação das ondas acústicas, afetam o perfil Sônico: gás na lama, fraturas abertas, rochas altamente inconsolidadas e intervalos grandemente desmoronados. Os ruídos resultantes, ou a atenuação das ondas, dão origem a saltos bruscos dos tempos de propagação medidos (Δt). Por essas razões, é sempre recomendável correr, junto com o perfil Sônico, um perfil de Calibre do poço ou **Caliper**, para ajudar a reconhecer os eventos de perturbação.

10.8 Perfil de Calibre do Poço (Caliper)

A figura 10.15 mostra um exemplo de um perfil de Caliper de quatro braços: são as duas curvas em pontilhado e sombreadas na última faixa a direita do perfil.

Existem vários tipos de ferramentas de Caliper: de dois, três, quatro ou mais braços. A ferramenta é descida fechada dentro do poço, os braços são abertos no fundo e o perfil é registrado na subida. Os braços seguem as irregularidades da parede do poço, registrando assim o diâmetro médio do poço. As ferramentas de quatro braços medem dois diâmetros ortogonais independentemente um do outro e têm uma resolução vertical extremamente fina. Por essa razão, são mais precisas que ferramentas de dois ou de três braços que medem um só eixo.

Os principais usos do perfil de Caliper são os seguintes:

- Cálculo do volume integrado do poço e, principalmente, do espaço anular entre o filtro e a parede do poço, a ser preenchido pelo pré-filtro;
- Identificação da litologia perfurada: os intervalos permeáveis tendem a diminuir o diâmetro do poço pela ocorrência de reboco; os folhelhos tendem a desmoronar e as rochas duras permanecem inalteradas quando não são fraturadas e ovalizam quando fraturadas. Estudos mostram que a direção da ovalização do poço coincide com o alinhamento regional das fraturas;
- Correção de outros perfís por efeito de poço.

10.9 Interpretação dos Perfís Geofísicos de Poço

A figura 10.15 mostra um perfil composto (Raios Gama, Indução com SP e Sônico com Caliper), que permite a realização de dois tipos distintos de interpretação:

- Uma **interpretação qualitativa**, feita logo após o controle da calibração e da qualidade do conjunto de perfís. Ela deve abranger a definição litológica, entre o que seja ou não aquífero, e a possibilidade de identificação do ambiente deposicional das camadas. Nesta interpretação, realiza-se a melhor escolha para o posicionamento dos filtros, levando-se em conta as características ambientais, gradações granulométricas, diminuições de permeabilidade, etc.
- Uma **interpretação quantitativa**, responsável pelos cálculos da argilosidade (V_{SH}), das porosidades total (Φ_t) e efetiva (Φ_e), da resistividade da água intersticial (R_w) e da qualidade da água, em ppm de sais totais dissolvidos (TDS).

10.9.1 Interpretação Qualitativa

O primeiro trabalho do intérprete é montar a coluna litológica atravessada pelo poço. Para isto ele deve usar a primeira faixa (da esquerda) do perfil, onde estão registradas as curvas litológicas (Raios Gama e SP), devidamente identificadas. As respectivas escalas de cada curva, estão indicadas nas partes superior e inferior de cada faixa.

Nos Raios Gama, a radioatividade (argilosidade) aumenta para a direita. Areias, arenitos, calcários, dolomitos têm baixa radioatividade. Folhelhos, ou mineralizações, alta radioatividade.

O que interessa na curva do SP, é a sua deflexão relativa à linha de base dos folhelhos e não o valor quantitativo lido na escala. Deflexão para a direita, o sinal da leitura é positivo. Para esquerda, negativo. Havendo deflexão, positiva ou negativa, é evidência certa de permoporosidade. Um arenito permoporoso se caracteriza por uma baixa radioatividade e uma deflexão no SP (positiva ou negativa a depender do contraste entre R_{we} e R_{mf}). Os casos de ausência de deflexão podem ser explicados de duas maneiras: ou o filtrado da lama tem uma concentração de sal igual à da água intersticial ou, então, a rocha não é permeável.

Com base nestes argumentos, no conhecimento da geologia da área e na descrição das amostras, o intérprete deve desenhar a litologia atravessada, na faixa reservada às profundidades, para orientar a sua interpretação quantitativa. Um simples exame visual do comportamento das curvas de SP e de GR do perfil exemplo da fig. 10.15, proporciona excelentes informações geológicas:

- As linhas de base (LBF), tanto do SP como do GR, mostram que os folhelhos acima de 316 m são mineralogicamente distintos dos abaixo dessa profundidade: o SP têm uma LBF da ordem de +30 mV acima de 316 m e de +20mV abaixo, enquanto que o GR apresenta um LBF de valor médio 80 API acima, e de 90 API abaixo de 316 m.
- O arenito superior (263-279m) e o inferior (315-330m), mostram um aumento gradacional da radioatividade, da base para o topo, indicando que a sua argilosidade está diminuindo e a sua granulosidade aumentando com a profundidade. Este aspecto textural de granodecrescência ascendente, é típico de depósitos fluviais ou de leques.
- O arenito intermediário (290-300m), mostra idêntico comportamento, mais acentuadamente na base, indicando uma granodecrescência descendente, típica de barras fluviais.

Ao programar os filtros, deve-se evitar colocá-los nos intervalos gradacionais ou de maior argilosidade, por duas razões principais: primeiro, porque eles indicam uma diminuição da permeabilidade e segundo, porque a argila poderá, com o tempo, vir a colmatar os filtros.

Na segunda faixa do perfil (faixa do meio), estão registradas as resistividades. O valor da resistividade da formação R_o , a ser usado na equação de Archie (Eq. 10.18), está identificada pela sigla DIR (Deep Induction Resistivity). A Normal Curta, identificada pela sigla SN, está sujeita às limitações dos perfis elétricos e não deve ser usada nos cálculos. Ela continua presente no perfil por tradição e auxílio nos trabalhos de correlação entre poços vizinhos. Como se pode observar, existe uma excelente correlação entre o SP, Raios Gama e as Resistividades. Os folhelhos têm resistividades menores que os arenitos, devido às suas cargas periféricas e à sua quantidade de água adsorvida.

Na terceira faixa do perfil (faixa da direita), estão registrados os Calipers X e Y (poço perfurado com broca de 12 1/4), mostrando os locais de estrangulamento (arenitos) e desabamentos (folhelhos). Entre 264 e 266m, o braço do Caliper X, colapsou momentaneamente, normalizando-se em seguida. Nesta faixa, está registrada, também, a curva Δt do Sônico, com escala crescente da direita para a esquerda. Quanto mais para a esquerda, maior a porosidade total. Defronte aos folhelhos, o Δt registra uma porosidade aparente maior do que defronte aos arenitos.

Concluindo-se:

- Os folhelhos podem ser identificados com base no alto valor do GR, na ausência de deflexão do SP a partir da LBF, nas baixas resistividades, nos altos Δt 's e nos desmoronamentos.
- Os arenitos, por sua vez, nos baixos GR, SP com deflexão, resistividades altas indicando águas pouco salinizadas, Δt 's mais baixos e caliper com reboco, ou próximo ao diâmetro nominal da broca.

Podem ocorrer anomalias ou divergências desse quadro geral, que devem ser analisadas caso a caso. Por isso, o analista de perfis deve ter, não só conhecimentos dos princípios de perfilagem, como também da geologia. Interpretar, é aproximar-se da realidade.

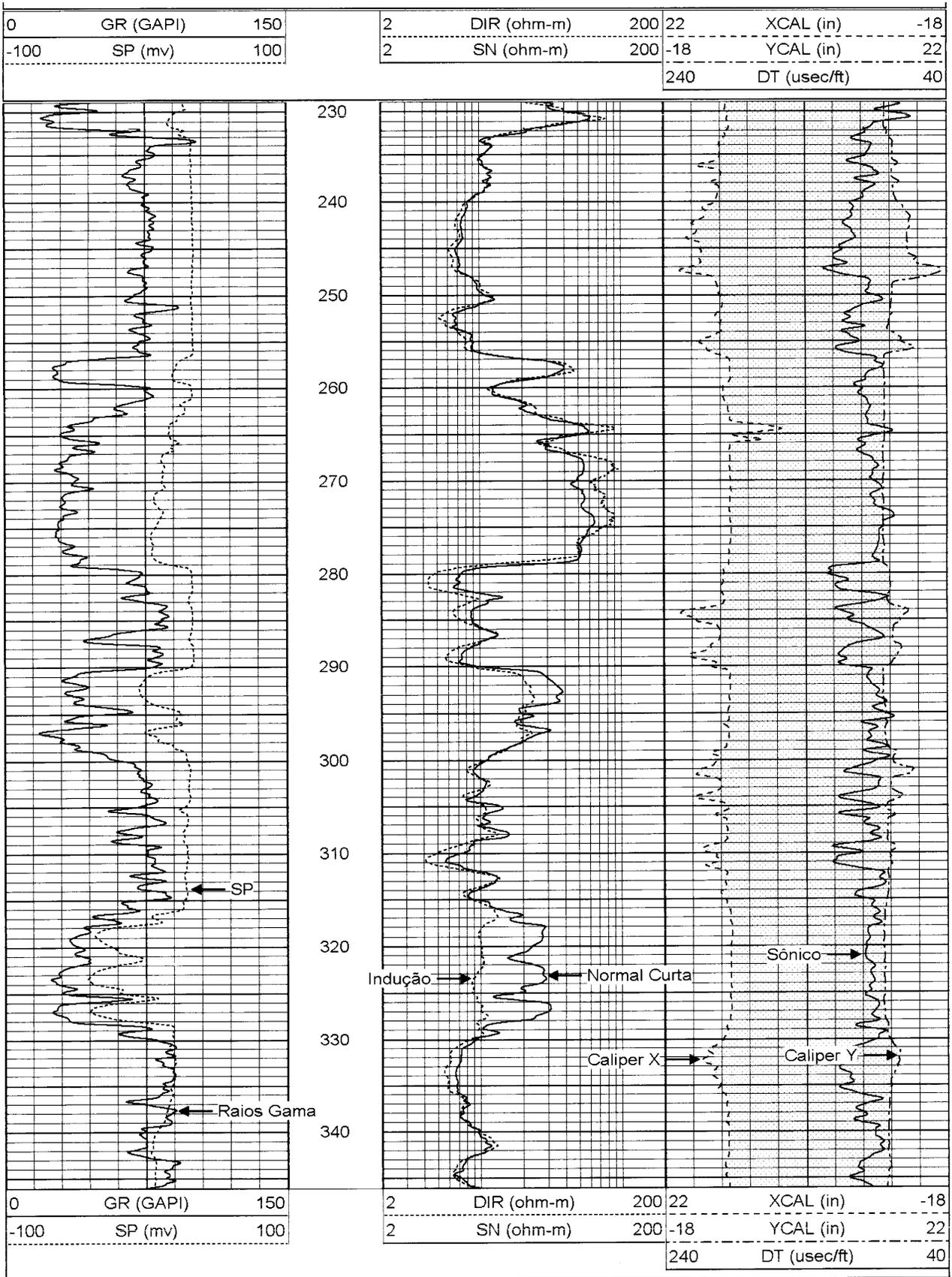


Fig. 10.15: Exemplo de Perfil Composto após o processo de "merge"

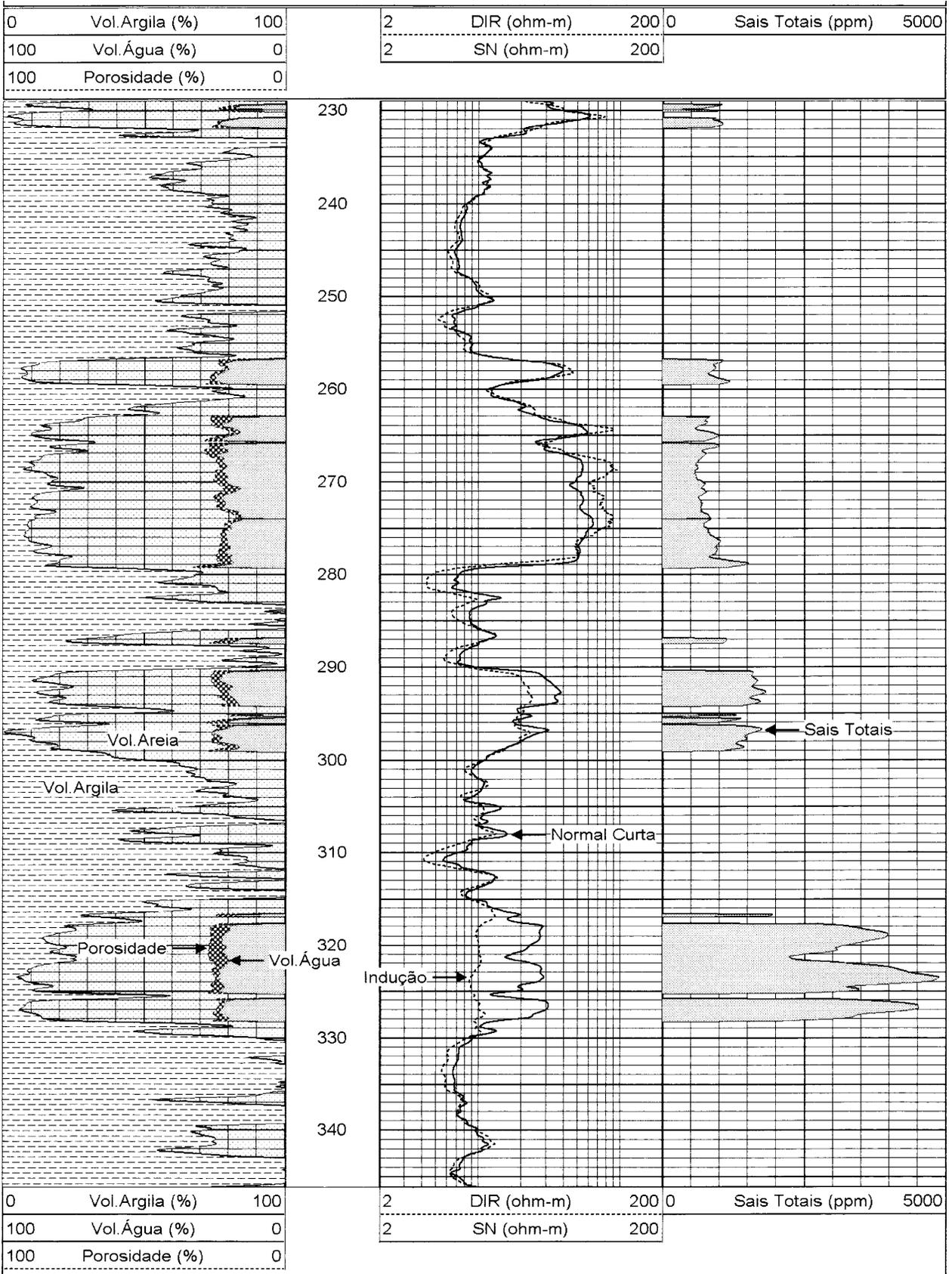


Fig. 10.16: Exemplo de interpretação computadorizada

10.9.2 Interpretação Quantitativa

Uma interpretação preliminar pode ser realizada logo após a operação de perfilagem, com a precisão de campo. A interpretação quantitativa final, realizada por computador usando os dados digitalizados de todas as curvas, apresenta os resultados em forma de curvas contínuas, como mostra o exemplo da figura 10.16.

O **primeiro passo** de toda e qualquer interpretação quantitativa é a escolha das constantes ou **parâmetros** das equações. A escolha de cada um deles é realizada da seguinte maneira:

- R_{mf} = Resistividade do filtrado: leitura direta do cabeçalho. O operador da companhia de perfilagem coleta, durante a circulação antes da perfilagem, uma amostra de lama e de filtrado, para medir suas resistividades e registrá-las em lugar próprio no cabeçalho (Fig. 10.06).
- $GR_{Máximo}$ = leitura de um valor médio máximo defronte a intervalos de folhelhos do mesmo ambiente que os intervalos em estudo. Descartar anomalias.
- $GR_{Mínimo}$ = leitura de um valor mínimo (e não o médio) defronte a intervalos litológicos de um mesmo ambiente que os folhelhos sobre e sotopostos
- A_{GR} = fator que leva em consideração a idade das rochas. Usar 2 para rochas velhas e 3 para rochas terciárias, ou mais novas.
- LBF_{SP} = valor numérico da linha base do SP nos folhelhos. O valor do SP a ser usado na equação 10.07, é a separação entre o valor da LBF_{SP} e o valor da curva na profundidade considerada. Deflexão para direita da LBF_{SP} , o SP é positivo (+). Para esquerda, o SP é negativo.
- K = constante da equação 10.07 do SP. Na água doce, é da ordem de 73 a 74.
- Δt_m = tempo de propagação do som no material da rocha pura (matriz). A tabela 10.02 lista o Δt_m de alguns materiais.
- m = coeficiente de cimentação da equação de Archie, depende da geometria porosa das rochas, e varia entre 1,3 e 2,2 nas rochas intergranulares. Para o caso de grãos arredondados é aconselhável usar 1,5.
- a_{TDS} e b_{TDS} = coeficientes da equação hiperbólica que, segundo Girão Nery (1996), correlaciona a resistividade R_w das águas intersticiais com o teor TDS de sólidos totais dissolvidos:

$$TDS = \frac{a_{TDS}}{R_w^{b_{TDS}}} \quad (\text{Eq. 10.19})$$

O **segundo passo** da interpretação quantitativa é a própria realização dos cálculos. A título de exemplo, a tabela 10.03 mostra os resultados dos cálculos para as profundidades de 276 m, 297 m e 327 m, dentro, portanto, de cada um dos três arenitos principais do perfil.

Para os cálculos da tabela 10.03, foram utilizados os seguintes parâmetros:

R_{mf}	$GR_{Máximo}$	$GR_{Mínimo}$	A_{GR}	LBF_{SP}	K	Δt_m	m	a_{TDS}	b_{TDS}
10	85	18	2	30	73	56	1,5	4.287	0,982

e as seguintes equações:

$$V_{SHGR} = \frac{GR_{Perfil} - GR_{Mínimo}}{GR_{Máximo} - GR_{Mínimo}} \quad (\text{Eq. 10.02})$$

$$V_{SH} = \frac{V_{SHGR}}{A_{GR} - (A_{GR} - 1) \times V_{SHGR}} \quad (\text{Eq. 10.01})$$

$$R_{we(SP)} = \frac{R_{mf}}{10^{\left(\frac{SP}{K}\right)}} \quad (\text{Eq. 10.07})$$

$$\Phi_t = 0,625 \frac{\Delta t - \Delta t_m}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 10.11})$$

$$\Phi_e = \Phi_t - (V_{SH} \times \Phi_{SH}) \quad (\text{Eq. 10.12})$$

$$R_{w(Archie)} = R_o \times \Phi_e^m \quad (\text{Eq. 10.18})$$

$$R_w = 0,4R_{we(SP)} + 0,6R_{w(Archie)} \quad (\text{Eq. 10.20})$$

$$TDS = \frac{a_{TDS}}{R_w^{b_{TDS}}} \quad (\text{Eq. 10.19})$$

Os valores de a_{TDS} e b_{TDS} usados nos cálculos e correspondentes à formação em estudo, foram extraídos de Girão Nery (1996).

A equação 10.20 é a média ponderada entre os valores de R_w calculados pelas equações da SP e de Archie, com um peso maior para a equação de Archie, já que as águas intersticiais não são predominantemente de NaCl.

Tabela 10.03: Exemplo de resultado de uma interpretação quantitativa do perfil da fig. 10.15

Prof. (m)	GR (API)	V _{SHGR}	V _{SH}	SP	R _{we} (SP)	R _o	Δt	Φ _t	Φ _e	R _w (Archie)	R _w	TDS
276	29	0,164	0,089	0,28	3,232	50	87	0,223	0,203	4,566	4,032	1.090
297	18	0,000	0,000	0,30	2,982	24	97	0,264	0,264	3,259	3,148	1.390
327	25	0,104	0,055	0,70	0,594	10	91	0,240	0,227	1,082	0,887	4.822

A comparação entre os resultados dessa tabela e o perfil computadorizado da figura 10.16 confirma a qualidade de ambas computações.

10.10 Referências Bibliográficas

1. ARCHIE, G. E., (1942), "The Electrical Resistivity Log as an Aid In Determining Some Reservoir Characteristics": American Mining and Metallurgical Engineers Trans., v. 146, pp. 54-62.
2. RAYMER, L. L., HUNT, E. R. e GARDNER, J. S., (1980), "An Improved Sonic Transit Time-to-Porosity Transform": Transaction 1980, Society of Professional Well Log Analysts (SPWLA) Annual Logging Symposium, paper GG.
3. VIYLLIE, M. R. J., (1956), The Fundamentals of Well Log Interpretation: New York, Academic Press, 238 pp.
4. GIRÃO NERY, G., (1994), Geofísica em Poço Tubular para Água, apostila, 71 pp.

5. GIRÃO NERY, G., (1996), Equações Hiperbólicas relacionando R_w com TDS : a apresentar no 9^o Congresso de Águas Subterrâneas em Salvador.

Os autores

Geraldo Girão Nery, é Eng. Agrônomo (UFCE - 1960), Geólogo (UFBA/PETROBRAS-1962) e Mestre em Geologia (UFBA - 1989). Trabalhou na PETROBRÁS até 1991, tendo exercido funções de campo e chefia em Geologia de Superfície, de Poço, Perfuração Estrutural Rasa e Perfilagem Geofísica. Nos últimos 11 anos de empresa, atuou como professor de Perfilagem e Geologia de Petróleo, nos cursos de formação e especialização, no Centro de Desenvolvimento e Recursos Humanos do Norte-Nordeste (CEN NOR), em Salvador. Lecionou, ainda, Perfilagem nos cursos de Pós-Graduação de Geologia da UFOP e Geofísica da UFBA e UFPA, tendo, nestas duas últimas, feito parte de bancas em teses de mestrado. É detentor de Patente de um método de determinação de propriedades petrofísicas das rochas areno-argilosas, nos Estados Unidos, França e Brasil. Atualmente, é sócio diretor de Marketing da **HYDROLOG** Serviços de Perfilagens Ltda. Nesta função, tem atuado como palestrante/professor em várias empresas perfuradoras de poços e nos eventos da ABAS nacional e núcleos regionais.

Jean-Pierre Di Schino, francês, engenheiro graduado da “École Nationale d'Ingénieur de Constructions Aéronautiques” de Paris em 1963. Depois de dois anos de carreira na indústria aerospacial da França, ingressou na indústria petrolífera em 1965, onde operou, até 1992, na área de prestação de serviços de perfilagens de poços de petróleo para diversas companhias multinacionais. Foi sucessivamente engenheiro de campo, gerente de distrito, gerente regional e vice presidente de divisão de uma das maiores multinacionais do ramo. Atuou na Europa, África, América do Sul e do Norte, e Ásia. Em 1992, desligou-se dessa atividade e fundou, junto com outros ex-profissionais do petróleo, a **HYDROLOG** Serviços de Perfilagens Ltda., uma companhia especializada em perfilagens de poços para água, da qual é diretor presidente.