

ORLANDO M. CARDOSO

E  
JORGE BARRETO DE FARIA

# ESTUDO DE SONDAZENS PELO PROCESSO SCHLUMBERGER

*Separata dos fascs. 3-4 do vol. XII de «Estudos, Notas e Trabalhos» do Serviço de Fomento Mineiro.*

POR TO — 1957



3)  
50.8(04)  
AR



ESTUDO DE SONDAGENS PELO PROCESSO  
SCHLUMBERGER (1)

COMPOSTO E IMPRESSO NA  
EMPRESA INDUSTRIAL GRÁFICA DO PORTO, LIMITADA  
EDIÇÕES MARANUS  
174, R. MÁRTIRES DA LIBERDADE, 178 • TELEF. 20504

ORLANDO M. CARDOSO

E

JORGE BARRETO DE FARIA

# ESTUDO DE SONDAGENS PELO PROCESSO SCHLUMBERGER

*Separata dos fascs. 3-4 do vol. XII de «Estudos, Notas e Trabalhos» do Serviço de Fomento Mineiro.*

POR TO — 1957

MUNICIPIO DE BARCELOS

BIBLIOTECA MUNICIPAL

Nº 53101

Barcelos



C. D. 550.837.4

## ESTUDO DE SONDAgens PELO PROCESSO SCHLUMBERGER (¹)

### 1 — INTRODUÇÃO

Data apenas de 1927 a primeira aplicação de geofísica em furos de sonda, pelos irmãos Schlumberger, em França. Anteriormente, os métodos de geofísica aplicada, embora abrangessem já diversas modalidades, apenas se circunscreviam a estudos no terreno, à superfície. É atribuída, com efeito, àqueles esta ideia luminar: um furo de sonda proporciona, em geral, condições excelentes para estudo de variadas propriedades físicas das formações, *in situ*.

Nesta trintena de anos o caminho andado nesse campo foi, na realidade, impressionante, mercê sobretudo de aplicações com o objectivo petróleo. Para o concretizar refere-se uma pas-

---

(¹) Os autores frequentaram, em Abril de 1957, um curso realizado pela Société de Prospection Électrique — Procédés Schlumberger, em Paris. Afigura-se-lhes de interesse divulgar a contribuição que se pode esperar do estudo geofísico das sondagens para o aproveitamento de recursos do subsolo e daí a publicação do presente artigo que é, em grande parte, transcrição do relatório oportunamente apresentado.

sagem (²) de uma comunicação (1) apresentada ao *Congrès du Centenaire de l'Industrie Minérale*, em Junho de 1955, que, por certo, pecará já hoje por defeito: *Aujourd'hui, les équipes Schlumberger réparties dans les chantiers pétroliers du monde entier travaillent au rythme de 14 000 descentes d'appareils par mois équivalent à un parcours mensuel dans les sondages de 36 000 kilomètres!*

Embora fosse a primeira e ainda hoje seja a mais importante, não é, porém, o petróleo a única finalidade do processo Schlumberger pelo estudo duma soma de elementos de interesse e, em última análise, da produtividade. Também outras substâncias, como lignito, hulha, sais de potássio e outras substâncias radioactivas, água, têm vindo a constituir novos ramos da sua aplicação.

Pode dizer-se sem exagero que, por todo o mundo, se não fazem hoje sondagens para petróleo sem o estudo complementar pelos processos de que os irmãos Schlumberger foram os pioneiros. Em Portugal metropolitano, nestes últimos anos, tem também a Companhia que possui o monopólio das pesquisas seguido tal política, embora seja obrigada a immobilizar um camião entre nós para esse efeito. Como, em geral, tem havido uma sondagem única em curso, exigindo umas duas vezes tal estudo, é fácil concluir que a verba correspondente seja pesada. O exemplo é citado por ilustrar bem a afirmação feita no início deste parágrafo.

Devido às grandes profundidades que geralmente é necessário atingir, quanto ao petróleo, o estudo das formações atra- vessadas pelo exame de testemunhos obtidos de modo contínuo não é desiderato a considerar praticamente. Ao primitivo método de sondagem à corda, por percussão, sucedeu a perfuração rotativa tipo *rotary*. Com ela conseguem-se velocidades de avanço elevadas e, portanto, preços relativamente reduzidos.

---

(²) As notas referentes a bibliografia encontram-se no fim do texto.

A amostragem das formações atravessadas fica restringida habitualmente aos detritos de perfuração (*cuttings*) arrastados pelo fluido de circulação (*mud*); reserva-se a tomada de testemunho contínuo para alguns metros de zonas de mais interesse. Deve dizer-se, todavia, que nem sempre se consegue obter os *cuttings*, que nem sempre é fácil atribuir as profundidades correspondentes aos obtidos, e que o seu estudo, embora cada vez mais haja melhores meios, é sempre incompleto. Mesmo com todos os elementos de que se dispõe referentes a velocidade de perfuração, detritos, testemunhos, etc., pode ficar-se sem um juízo adequado do furo em causa.

O *well logging* <sup>(3)</sup> pelo processo Schlumberger é um complemento por excelência para o estudo dos furos de sonda para petróleo por nos poder proporcionar um registo contínuo das variações de diversas propriedades das formações atravessadas com a profundidade, não se limitando mesmo ao furo, mas dando antes, também, indicações do que se passa na vizinhança das paredes do mesmo. Além disso, no que se refere a correlação entre sondagens, as suas indicações são mais numerosas e quiçá mais valiosas que as de ordem litológica, paleontológica, etc. E ainda por cima fornecem elementos sobre as propriedades e teores dos fluidos existentes nas formações.

O que se passa com outras substâncias, que não o petróleo?

Pode dizer-se que, em geral, as profundidades em jogo são menores. Por isso, é frequente a utilização de processos de sondagens por rotação com amostragem contínua. Por vezes, no entanto, especialmente em campanhas intensas de sondagens, só em algumas assim se procede e na maioria delas reserva-se a tomada de amostras apenas às zonas de mais interesse, cujas profundidades se supõem grosseiramente conhecidas.

---

<sup>(3)</sup> A adopção do termo inglês parece justificada pelo seu conhecimento por todos os interessados e, em contrapartida, porque a designação que poderíamos adoptar como tradução nos não parecer adequada para dar uma ideia justa aos não embrenhados no assunto. Por razões idênticas outros termos estrangeiros aparecerão no decorrer deste trabalho.

Contudo, há duas observações importantes a fazer. A primeira é chamar a atenção para o termo enganador «amostragem contínua»; na prática, só excepcionalmente se consegue obter uma recuperação de testemunhos de 100 % nalgumas zonas, mesmo lançando mão dos meios mais aperfeiçoados, como seja o emprego de coroas de diamantes e dum bom tubo duplo de testemunhos. A segunda consiste em dizer que é precisamente nas zonas de mais interesse, por exemplo uma camada de carvão, onde por vezes há mais dificuldade em obter testemunho.

Cita-se na literatura (2) o caso de uma sondagem para carvão com amostragem contínua que fora levada até 1238 m sem encontrar vestígios de carvão; posteriormente, o estudo do furo pelo processo Schlumberger permitiu encontrar uma camada de carvão com 3 m de possança. Num outro caso citado no mesmo artigo em que a recuperação de testemunhos atingira 96 % veio a verificar-se que uma zona de 2 pés de espessura, onde se não obtivera testemunho, correspondia precisamente a uma camada de carvão.

Desde aquele mesmo ano de 1927, já citado, a Société de Prospection Électrique, que os Schlumberger tinham fundado em França e se dedicava a pesquisas mineiras, começou a utilizar intensamente o novo processo por todo o mundo.

Uns anos mais tarde, em 1934, estabeleceram também nos Estados Unidos da América do Norte a Schlumberger Well Surveying Corporation.

Ainda hoje estas duas empresas, se não mantêm já o monopólio desses estudos especializados — na América, pelo menos, há já outras grandes companhias em actuação — conservam-se, no entanto, na primeira linha do progresso e dominam por completo nalguns países.

É interessante notar uma faceta que não é comum no campo da geofísica aplicada, pelo menos na Europa: a Société de Prospection Électrique tem organizado, desde há alguns anos, cursos da especialidade, com distribuição de publicações que dão conta de progressos de investigação científica da ma-

téria, anúncio de novas variantes dos métodos utilizados e mesmo divulgação de técnicas de interpretação. Ora nos outros campos de geofísica aplicada, se se encontram diversas casas europeias que fabricam aparelhagem, se aparecem publicações variadas descrevendo exemplos de aplicação em casos concretos, a verdade é que, no que se refere à técnica de interpretação pelas casas especializadas existentes, há uma cortina bastante espessa, em geral mesmo intransponível.

Depois desta *Introdução* trataremos no 2.º capítulo das diversas modalidades de *well logging* executadas habitualmente pela Schlumberger; embora resumidamente, para não estender o artigo e porque o assunto vem tratado em abundante bibliografia da especialidade, apresentaremos os princípios gerais dos diferentes tipos de medições. O 3.º capítulo reservou-se especialmente ao petróleo, cobrindo o assunto das prelecções do Curso e tratando objectivamente dos diversos parâmetros obtidos dos diagramas (*logs*) e necessários para os cálculos. Para se poder tratar com certo pormenor parte dos assuntos e simultâneamente restringir a extensão deste artigo vimo-nos forçados a remeter os leitores para a bibliografia citada, embora reconhecendo que, para os que dela não dispuserem, fica a leitura, nalguns pontos, um tanto árida. Finalmente, o último capítulo é intitulado 4 — *Conclusões*.

Resta dizer, no que se refere à Société de Prospection Électrique, que do seu pessoal — leccionadores e outros com quem contactámos — só recebemos provas de consideração e amabilidades que é justo aqui referir.

Dela conseguimos também diversa bibliografia da matéria, mesmo já após o nosso regresso a Portugal, a qual, com a que nos fora enviada anteriormente e aquela que por outras vias conseguimos, constitui uma quota parte apreciável da vastíssima bibliografia existente. No entanto, as referências bibliográficas citadas pelo trabalho adiante e catalogadas no fim do mesmo constituem apenas uma reduzida parte do que possuimos, tendo-se citado especialmente aquelas de que nos socorremos para a elaboração do texto ou apresentação dos desenhos. Estes provêm em larga medida do resumo das conferências a que assistimos e que nos foi fornecido também.

## 2 — PROCESSO SCHLUMBERGER

### 2.1 — GENERALIDADES

Já se referiu na *Introdução* que o estudo de furos de sonda por meio de geofísica se iniciou com os Schlumberger há uns 30 anos. As companhias que mantêm esse nome ilustre continuam a utilizar o processo, não diremos em regime de monopólio, mas intensamente.

Deve dizer-se que a gama das determinações geofísicas feitas em sondagens se tem alargado com o tempo e muitas das actuais estão longe já das primitivas que se resumiam a duas ou três para estudo eléctrico dos furos de sonda (*carottage électrique*).

Algumas das medições hoje possíveis em sondagens não estão incluídas nas efectuadas correntemente pelas empresas Schlumberger (3). Entre as que citam os tratados de geofísica notámos várias nessas condições, como sejam: medidas magnéticas, acústicas, sísmicas, etc. Com o objectivo de não estender este capítulo para além de limites que nos parecem adequados não consideraremos tais medições.

Também, por idêntica razão, faremos apenas breve referência aos métodos ditos auxiliares, cuja aplicação generalizada resulta, sobretudo, da facilidade de obter alguns elementos de interesse sem demasiado dispêndio ou trabalho, aproveitando a oportunidade das medições fundamentais.

Estas começaram por ser e ainda o são hoje de parâmetros eléctricos, nomeadamente de resistividade e de polarização espontânea (4). Posteriormente, passaram a fazer-se medições de radioactividade, além de, naquelas, se introduzirem diversas variantes para cobrir campos de aplicação cada vez mais vastos ou para se adaptarem melhor a condições reinantes.

Faremos uma análise forçosamente breve e isoladamente de cada um dos tipos de medições que actualmente se fazem por sistema. Contudo, não se esqueça que, para reduzir ao mínimo o tempo do estudo, em cada descida do cabo faz-se mais do que um género de determinação, sempre que possível, e uti-

liza-se mesmo, por vezes, mais do que uma escala de medida. E na interpretação nunca se considera um diagrama isoladamente, mas antes se faz correlação das indicações fornecidas por vários.

Praticamente em todas as determinações efectuadas obtém-se uma ou mais curvas que exprimem a variação do parâmetro medido com a profundidade.

## 2.2 — POLARIZAÇÃO ESPONTÂNEA

Num furo de sonda contendo lama condutora registam-se as diferenças de potencial natural entre um eléctrodo móvel na sondagem e um eléctrodo fixo, à superfície.

A Fig. 1 representa um esquema do dispositivo de medida.

As «correntes de *PS*» são devidas à existência de forças electromotrizes quer de origem electroquímica (nos contactos entre a lama e as formações e nos limites de separação destas) quer de origem electrocinética (resultado de filtração da lama nas formações permeáveis).

Em frente de formações impermeáveis obtém-se em geral na curva de *PS* (*Potentiel Spontané*) um valor praticamente constante e perante formações permeáveis notam-se deflexões habitualmente para o lado negativo da escala. Deste modo, tal registo, de que a Fig. 2 é um exemplo, permitirá distinguir as zonas permeáveis, indicadas a tracejado na figura, de muito interesse por exemplo no caso dos petróleos.

A forma da curva de *PS* e a grandeza das deflexões dependem de variados factores: espessura das camadas  $e$ ; resistividades das camadas  $R_t$ , da zona invadida  $R_i$ , das formações adjacentes  $R_s$ , e da lama  $R_m$ ; diâmetro do furo  $d$  e da zona invadida  $D_i$ .

Da curva de *PS* pode deduzir-se a resistividade da água retida numa camada (água de formação)  $R_w$ , como no 3.º capítulo se verá em pormenor.

No caso de lamas não condutoras (à base de petróleo, por exemplo), em furos de sonda sem lama ou entubados não há

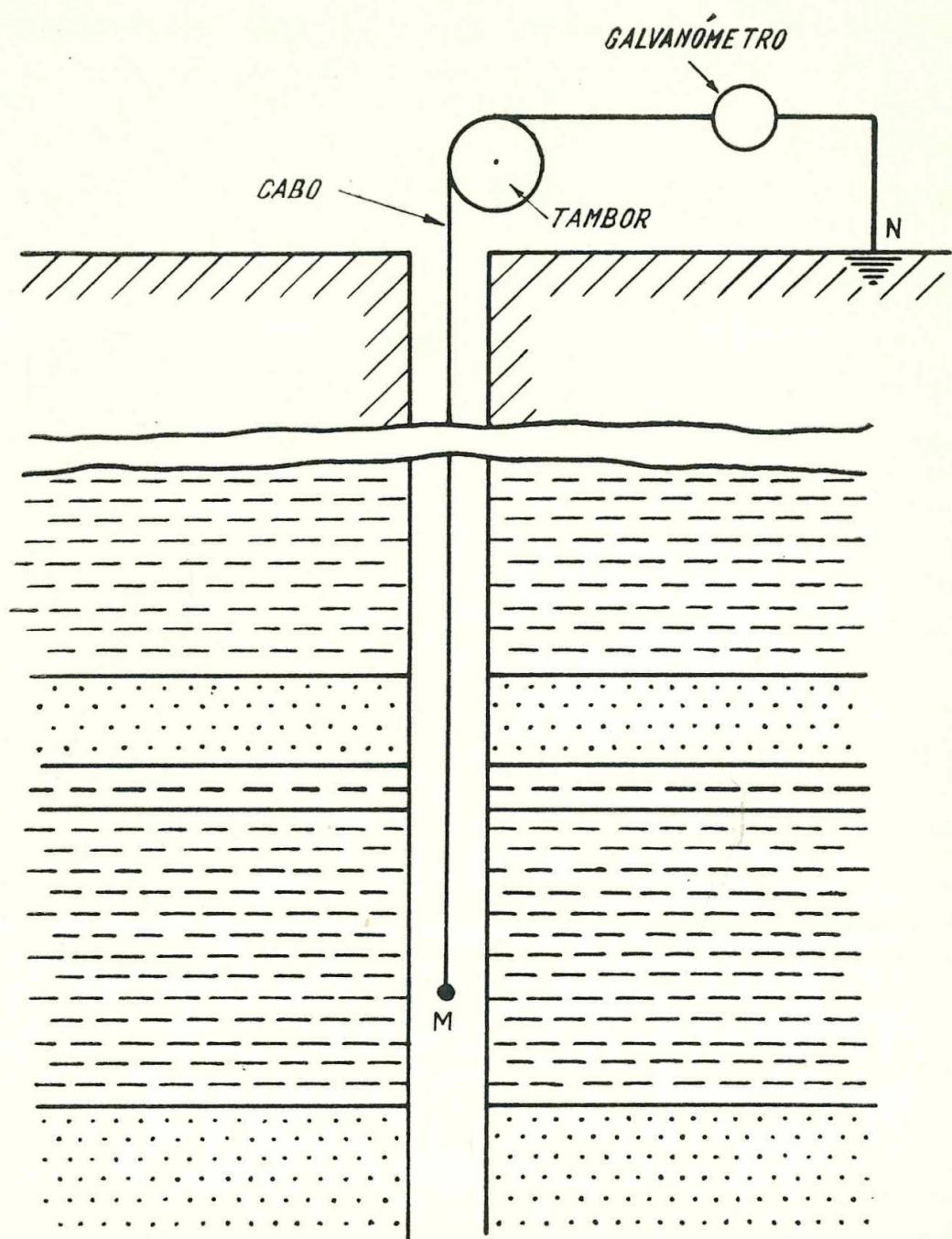


Fig. 1

possibilidade de registo da *PS*; substituem-se as suas indicações pelas das curvas de radioactividade, de que trataremos em 2.8.

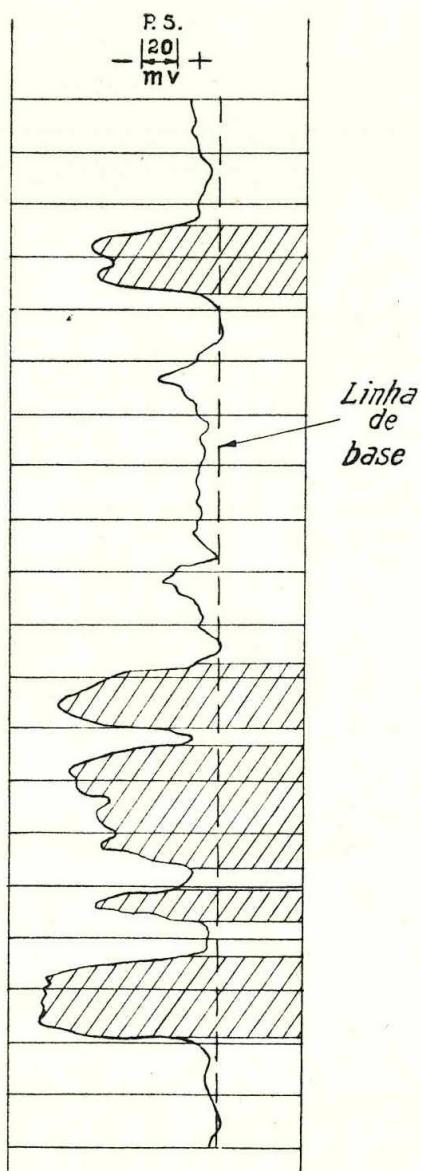


Fig. 2

### 2.3 — RESISTIVIDADE

Na essência o método consiste em lançar na sondagem, por meio de dois eléctrodos *A* e *B*, uma corrente conhecida e medir a diferença de potencial existente entre dois outros eléc-

trodos  $M$  e  $N$ . Consoante a posição relativa dos eléctrodos obtêm-se diversas modalidades, cada uma com o seu campo de aplicação.

Na «sonda normal» (Fig. 3), com  $B$  muito afastado de  $A$ , a resistividade aparente é dada pela expressão  $R = 4 \pi AM V/I$ .

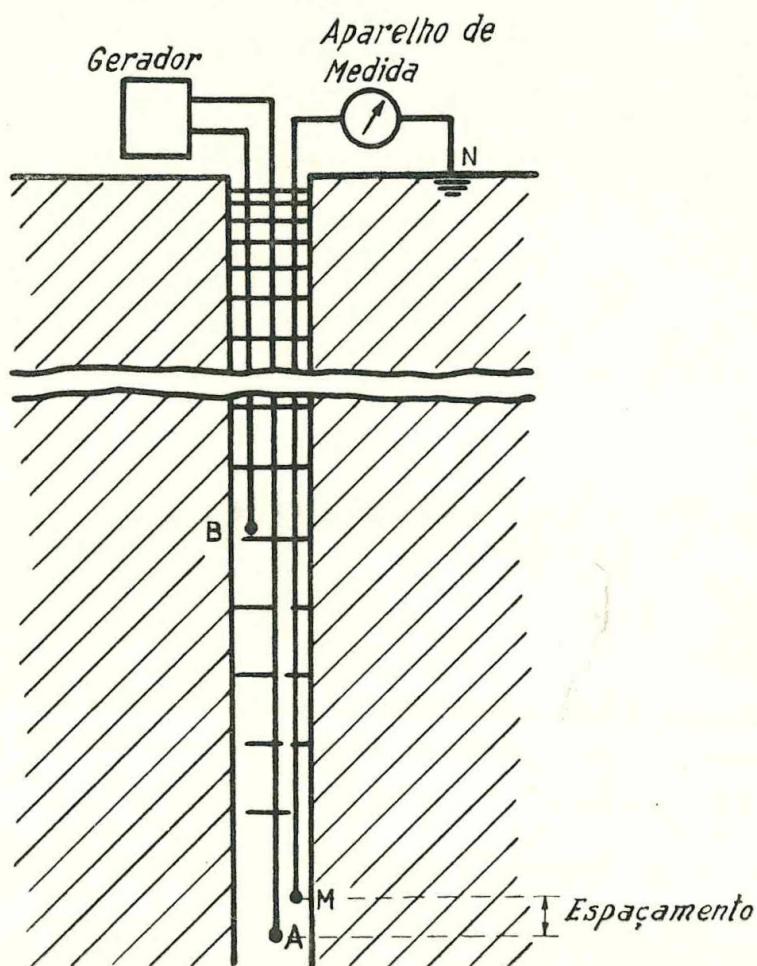


Fig. 3

Na «sonda inversa», também chamada «sonda lateral» (Figs. 4-a e 4-b), a resistividade aparente é dada por  $R = 4 \pi (AM \times AN/MN) \Delta V/I$ .

Estas modalidades clássicas de resistividade compreendem hoje duas normais com espaçamentos  $AM$  de 16 e 64" e uma inversa com espaçamento  $AO$  ( $O$  ponto médio de  $MN$ ) de 18' 8".

A forma das curvas obtidas neste *logs* eléctricos e as suas deflexões (5), mesmo no caso simples de uma camada permeável, homogénea e muito espessa, dependem de variados factores, a saber: resistividades da camada  $R_t$ , da zona invadida

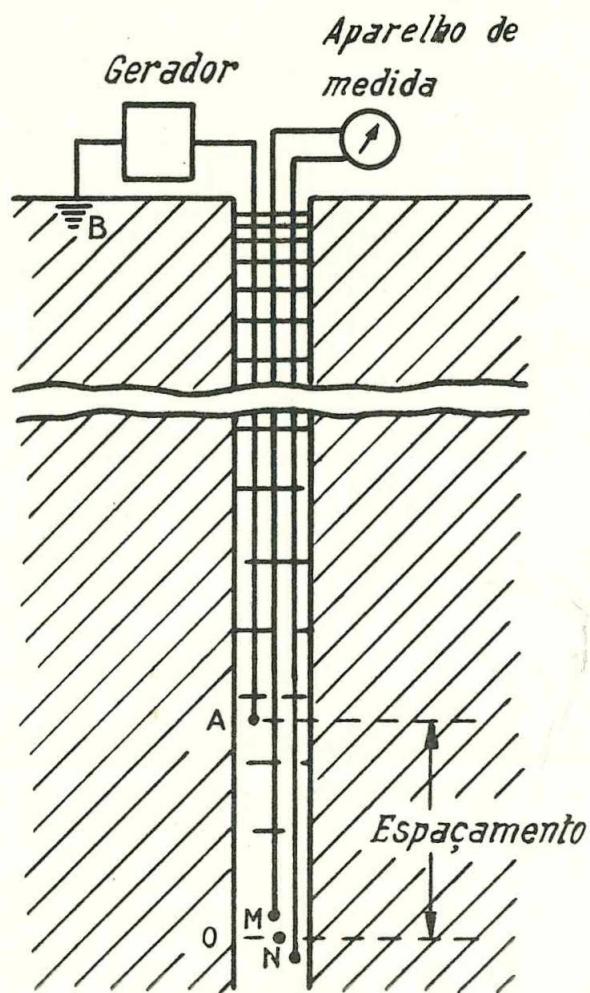


Fig. 4-a

dida  $R_i$  e da lama  $R_m$ ; diâmetros da zona invadida  $D_i$  e do furo  $d$  e do espaçamento da sonda utilizada ( $AM$  ou  $AO$ ).

O aspecto dos diagramas pode permitir nalguns casos marcar limites de separação de camadas e caracterizá-las.

O valor da resistividade obtida ( $R_a$ ) por qualquer das «sondas» pode diferir muito da resistividade verdadeira da

formação estudada ( $R^t$ ), valor que nos interessa, em última análise.

As empresas Schlumberger, após delicados trabalhos de investigação científica e laboriosos cálculos, publicaram séries de «curvas de desvio» que mostram a influência sobre as resis-

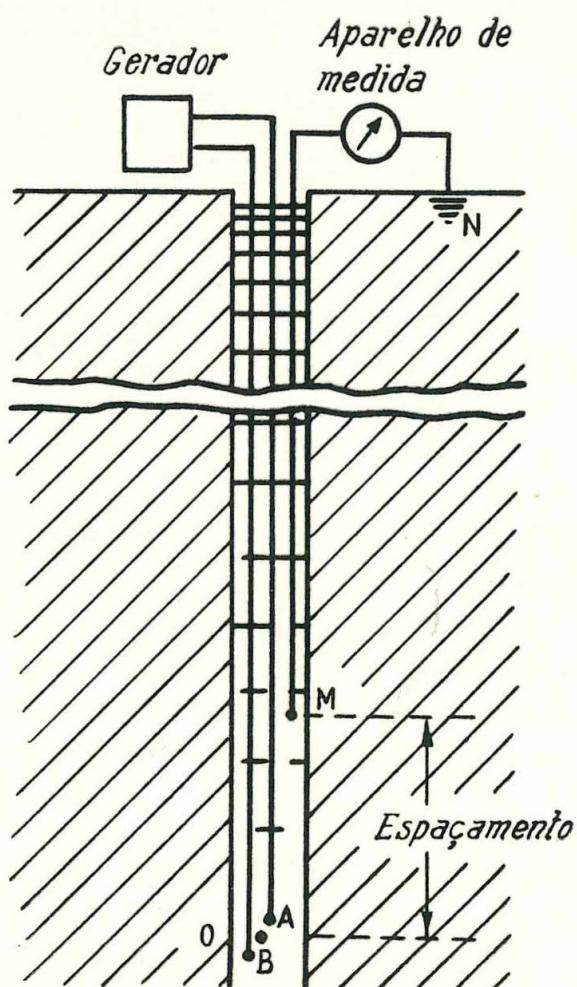


Fig. 4-b

tividades aparentes medidas dos diversos factores a considerar e como passar daqueles para os valores verdadeiros das resistividades (5,6 e 7). Apesar de haver já hoje várias colecções de curvas desta natureza, elas só cobrem alguns dos casos da prática e assentam em hipóteses simplificadoras que podem não

se verificar: admite-se que a zona invadida pela lama da sondagem é homogénea ( $R_i$  constante) e tem um limite cilíndrico  $D_i$  constante).

No caso de formações muito resistentes, como sejam calcários, com os dispositivos de resistividade clássicos não se obtêm curvas simples e claras e por tal razão foi criada a *sonde à calcaire*. Todavia, como hoje esta modalidade, afora nos Estados Unidos, caiu já em desuso, nada diremos sobre ela.

#### 2.4—INDUÇÃO

Nas medições de resistividade pelas modalidades clássicas consideradas em 2.3 ou outras, a tratar a seguir, utilizam-se eléctrodos e os contactos são assegurados habitualmente pela lama condutora ou então por contacto directo entre os eléctrodos e as paredes do furo. Porém, há casos em que esta última variante não é prática, por difícil, ou em que a lama não é condutora, o furo não tem lama ou está entubado.

Foi especialmente para vencer algumas destas dificuldades que foi introduzida a modalidade por indução (*IL—induction log*). Nela, lança-se uma corrente de alta frequência num solenóide transmissor (Fig. 5); o campo alternativo assim criado induz correntes de Foucault nas formações circundantes e estas, por sua vez, induzem num solenóide receptor, coaxial com o emissor, um sinal que varia proporcionalmente com a condutividade das formações. Regista-se, portanto, o inverso da resistividade.

Na prática, as «sondas de indução» têm mais de dois solenóides com o objectivo de obter dispositivos focalizantes.

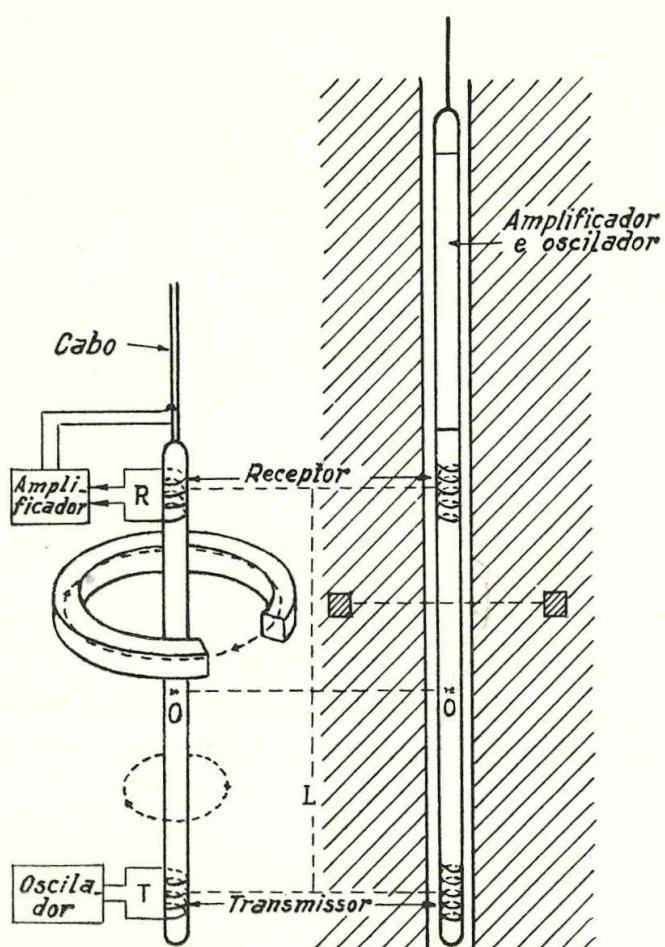
#### 2.5—LATEROLOG

Ao tratar das medições de resistividade convencionais, em 2.3, assinalaram-se diversos factores que têm influência no valor da resistividade medido.

No caso de camadas espessas com resistividades não muito superiores às da lama é possível, em geral, determinar o valor

de  $R_t$  directamente ou lançando mão das curvas de desvio. Mas, se as camadas são delgadas e sobretudo de resistividades maiores que a da lama, já assim não acontece. Surgem também dificuldades se o quociente  $R_t / R_s$  é grande.

Por estas razões apareceu o dispositivo designado por



Eig. 5

*laterolog (LL)* que utiliza um feixe de corrente de intensidade constante e de espessura bem definida, focada por meio dum sistema de *contrôle* automático.

Consegue-se assim (8) que o efeito da coluna de lama seja desprezável e o das formações adjacentes praticamente elimi-

nado para camadas de espessura superior à do feixe de corrente, que vai de alguns centímetros a decímetros.

Com o *laterolog* obtém-se uma delimitação pormenorizada das formações e valores da resistividade próximos dos verdadeiros ( $R_t$ ) desde que a profundidade de invasão do filtrado da lama não seja exagerada.

## 2.6 — MICROLOG

Como se disse em 2.2, a curva de polarização espontânea utiliza-se para delimitar camadas permeáveis. No entanto, no caso de formações muito mais resistentes que a lama, como em regiões calcárias acontece, a curva de *PS* (ou *SP* — *spontaneous potential*) não apresenta variações nítidas; não se poderá então utilizá-la para limitar cada camada permeável (9).

Para vencer esta dificuldade apareceram uma nova modalidade de *SP* (*selective SP logging*) e o *microlog* (*ML*). Neste, os eléctrodos estão muito pouco espaçados e apoiam-se, por meio de um patim de borracha, por um sistema de braços articulados e molas, contra as paredes do furo (Fig. 6).

Deste modo, mede-se a resistividade média dum pequeno volume de formação na vizinhança imediata do furo de sonda. Utilizam-se, em geral, simultâneamente, dois sistemas de eléctrodos diferentes com diferente profundidade de investigação (*short spacing* — sonda inversa de  $1'' \times 1''$  e *long spacing* — sonda normal de  $2''$ ).

Designa-se por «separação» a diferença entre as «microresistividades» registadas usando duas profundidades de investigação diferente e diz-se positiva se ao maior espaçamento corresponder a maior resistividade.

A interpretação do *microlog* baseia-se no conhecimento da grandeza das resistividades medidas, da separação e do comportamento da curva de *PS*.

Pode-se, em muitos casos, fazer uma delimitação rigorosa dos intervalos permeáveis e avaliar a resistividade  $R_{ro}$  da zona invadida na vizinhança imediata do furo e deste valor deduzir um valor aproximado da porosidade.

## 2.7 — MICROLATEROLOG

O rigor da determinação do valor de  $R_{xo}$  a partir do *microlaterog* torna-se pequeno se  $R_{xo}/R_{mc}$  é maior que 15 a 20. Intro-

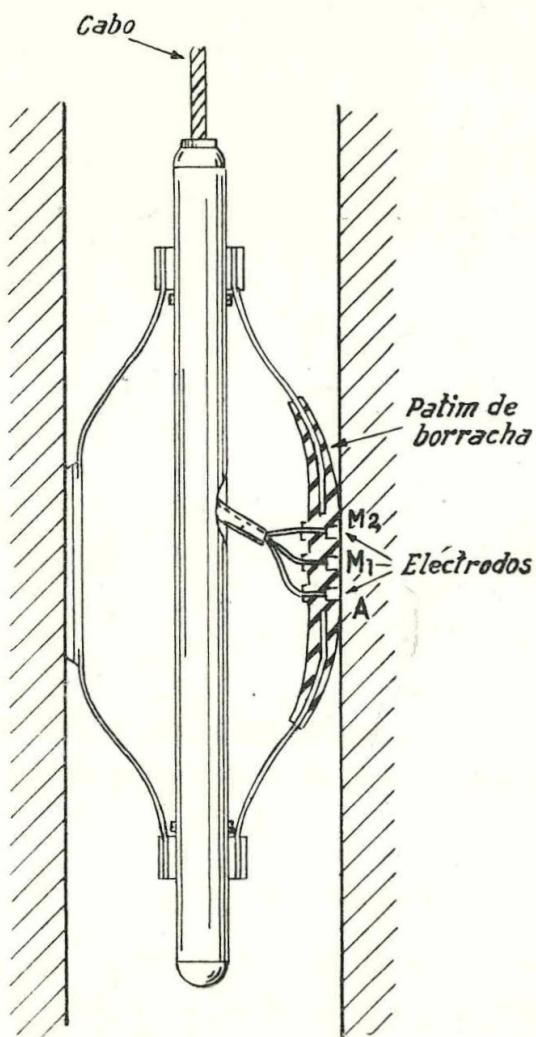


Fig. 6

duziu-se, por isso, o *microlaterolog* (*MLL*) que permite, então, uma boa determinação enquanto que a espessura do *mud cake* (lama de revestimento das paredes do furo) não exceda cerca de  $\frac{1}{2}''$ .

Este novo dispositivo dispõe também dum patim de bor-

racha com 4 eléctrodos circulares concéntricos que se aplica contra as paredes do furo (Fig. 7). Pelo eléctrodo central envia-se uma corrente de intensidade constante  $i_o$  e pelo exterior uma outra variável cuja intensidade se regula automaticamente de maneira a que a diferença de potencial entre os outros dois seja nula. A corrente  $i_o$  não pode atingir, por isso, o 3.º eléctrodo.

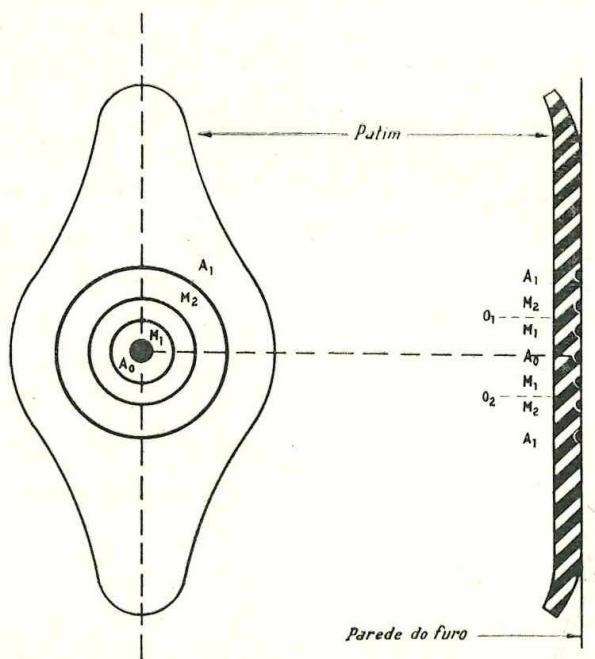


Fig. 7

trodo e penetra na formação sob a forma dum delgado feixe. Mede-se a diferença de potencial entre um dos eléctrodos de *contrôle* e a massa da «sonda», a qual depende sobretudo da resistividade da zona invadida na vizinhança imediata do furo.

O *microlaterolog* permite o estudo de formações permeáveis muito delgadas.

Obtém-se dele um bom valor de  $R_{xo}$ . Se a profundidade de invasão é superior a 3 ou 4" e se a saturação em petróleo residual é fraca, é possível obter um valor aproximado da porosidade.

## 2.8 — RADIOACTIVIDADE

### 2.81 — Raios Gama

Nesta modalidade detectam-se e faz-se contagem das radiações gama devidas aos elementos radioactivos naturais existentes nas formações vizinhas do furo de sonda. Utilizam-se quer contadores Geiger-Muller quer de cintilação.

Em geral, os calcários, grés, areias e dolomias têm pequena percentagem de elementos radioactivos enquanto as argilas e margas de formação marinha, argilas e xistas carbonosos ou betuminosos, bem como cinzas vulcânicas e a bentonite, são mais radioactivos. Por isso, a diagrafia por raios gama reflecte o teor em argila das formações e pode mesmo chegar a utilizar-se para determinações quantitativas.

O método é particularmente útil quando se não pode usar a curva de *PS* ou a mesma é pouco rigorosa (10). Tem a vantagem de se poder usar em sondagens entubadas, vazias (sem lama de perfuração) ou com lama de qualquer natureza. Permite fazer uma referenciação rigorosa das profundidades para perfuração do entubamento com vista à exploração.

Além do petróleo, tem como campos de aplicação os sais de potássio (permite mesmo determinar percentagens de potássio), outras substâncias radioactivas e o carvão, nalguns casos.

### 2.82 — Neutrões

Nesta segunda modalidade faz-se a detecção e medida de radiações secundárias «provocadas», emitidas pelas formações submetidas à acção duma fonte de neutrões.

Uma fonte de rádio-berílio emite neutrões rápidos. Estes ao chocarem com átomos da formação vão perdendo velocidade e acabam por ser absorvidos, em geral por átomos de hidrogénio, com emissão de raios  $\gamma$  de captura. No método neutrão-gama mede-se a intensidade destes raios de captura; no método neutrão-neutrão é a intensidade de neutrões lentos que é medida.

A partir duma diagrafia de neutrões pode determinar-se a concentração em hidrogénio e também a porosidade, quando haja apenas água ou petróleo na formação.

## 2.9—MÉTODOS AUXILIARES

Incluiremos nesta designação os métodos assim considerados «oficialmente» pela Schlumberger na publicação já citada (3). Porém, não trataremos dos que já entram no campo da exploração do petróleo, para perfuração do entubamento, e que em inglês são designados por *Precision gun perforating* e *Shaped charges*.

Por nos parecer bem esquematizada e clara, queremos ainda indicar uma outra classificação dos métodos Schlumberger (11) que inclui numa primeira divisão os que estudam parâmetros físicos ligados ao terreno (todos os que tratámos de 2.2 a 2.8 e ainda os seguintes 2.91 e 2.92) e numa segunda os restantes, referidos, acima, por nome e a tratar por último, de 2.93 a 2.95.

### 2.91 — Temperatura

As medições fazem-se aproveitando o princípio da variação da resistência dum condutor com a temperatura. Na prática a grandeza medida é, na realidade, uma tensão.

As indicações obtidas são utilizadas para localizar as perdas de circulação da lama, os horizontes onde haja gás ou petróleo com gás e, principalmente, a cota a que subiu a calda utilizada na cimentação do entubamento (ao ganhar presa o cimento desenvolve uma quantidade de calor apreciável); tal operação é frequente e o cálculo prévio do volume de calda a injectar não basta, pela existência de cavidades e irregularidades das paredes do furo. Têm-se usado também para localizar camadas de carvão.

### 2.92 — Inclinação dos estratos

No estratâmetro hoje utilizado mede-se a polarização espontânea em 3 eléctrodos situados num plano normal ao eixo

da sondagem e espaçados de  $120^\circ$ . A variação registada em cada uma das curvas indica a passagem do eléctrodo respectivo na superfície de separação entre duas camadas (Fig. 8).

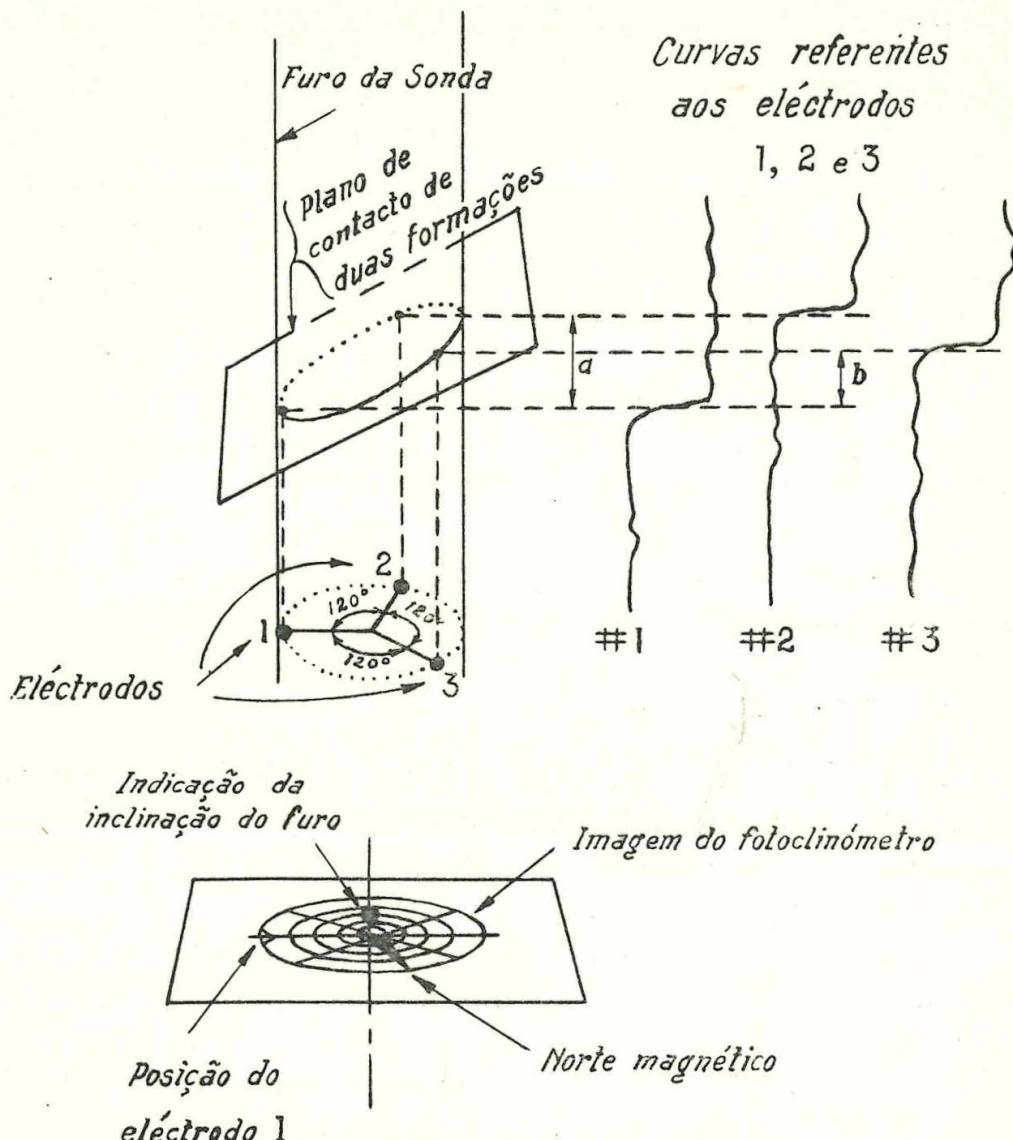


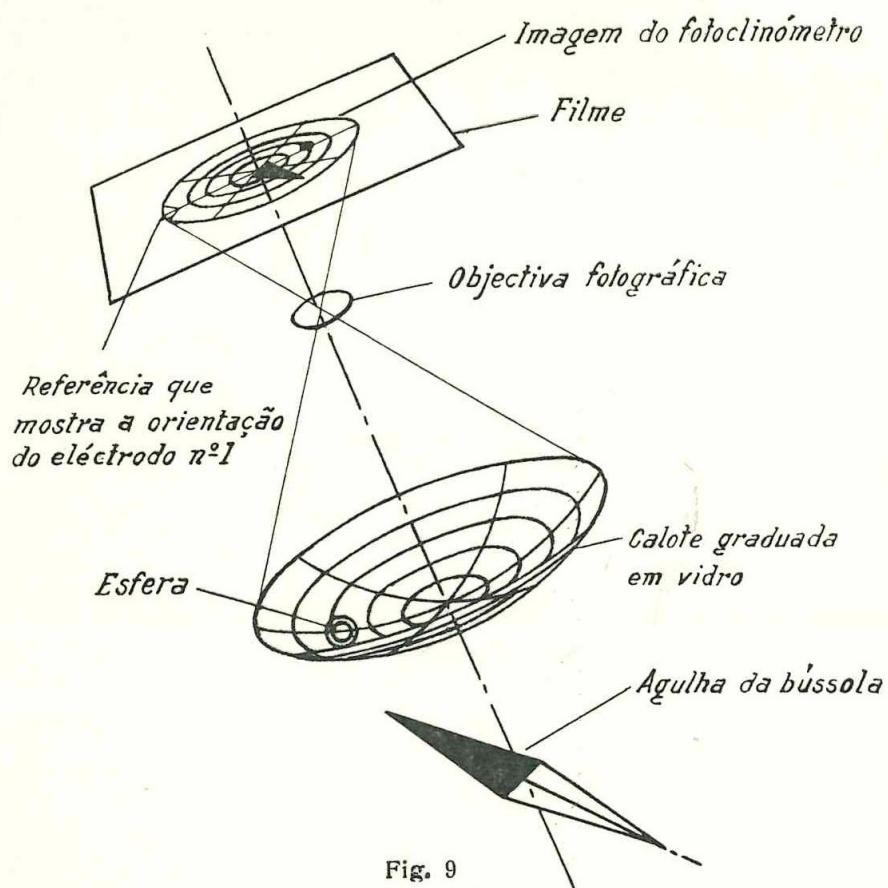
Fig. 8

É fácil de perceber como, com tais indicações, se pode obter directamente para sondagens verticais o ângulo de inclinação e o azimute dos estratos. Mas como, geralmente, o furo de sonda não se mantém vertical há necessidade de conhecer

o seu desvio no local onde se obtém a medida e a orientação do estratâmetro. Tais elementos obtêm-se por meio dum fotoclinômetro que faz parte integrante da aparelhagem do estratâmetro.

### 2.93 — Inclinação da sondagem

Já se referiu em 2.92 qual o aparelho para a sua determinação e que o mesmo está associado no equipamento que



serves para obter a grandeza e respectiva direcção da inclinação dos estratos.

O exame das Figs. 8 e 9 permite perceber como as coisas se passam sem mais explicações.

### 2.94 — Diâmetro

Embora possa parecer estranho aos leigos na matéria,

a verdade é que a secção transversal duma sondagem de petróleo nunca é regular, antes apresenta irregularidades e com variações importantes, segundo a profundidade. Mas há necessidade de conhecer o «diâmetro» respectivo em determinadas zonas,

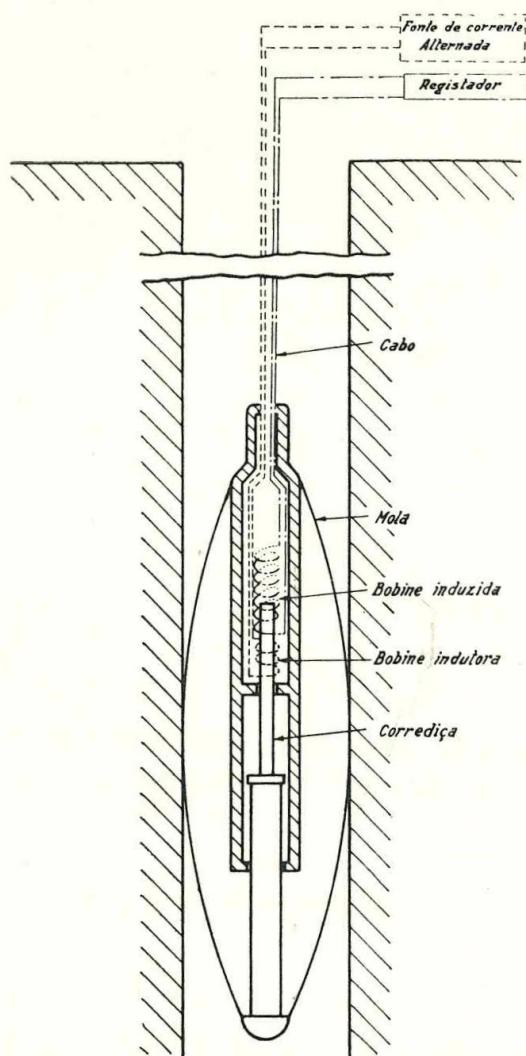


Fig. 10

por exemplo para calcular a quantidade de cimento a utilizar numa cimentação e para interpretação de algumas curvas de *well logging*.

A Fig. 10 representa um esquema do aparelho (designado *diametreur* em francês e *section gauge* em inglês). A dis-

posição das bobinas e da haste que desliza no corpo do instrumento são tais que a tensão induzida é proporcional à secção transversal do furo.

### 2.95 — Amostragem lateral

Como se sabe e se referiu já, em muitas sondagens não se faz uma colheita contínua de testemunhos dos terrenos atra- vessados. Consegue-se hoje, porém, colher amostras nas paredes dos furos e cujo exame poderá fornecer elementos preciosos. Há duas maneiras de proceder.

#### 2.951 — *Com explosivo*

Aplica-se sobretudo em formações brandas; podem-se obter numa só operação 30 amostras de uns 50 mm de comprimento e 20 de diâmetro.

A Fig. 11 é um esquema que representa uma «bala» antes e depois da explosão.

#### 2.952 — *Com sonda*

Aplica-se sobretudo em formações duras. Em vez de se operar por percussão, como no caso anterior, há agora uma verdadeira sonda mecânica, com coroa de diamantes, comandada por motor eléctrico, a qual à profundidade desejada é impelida contra as paredes do furo. Obtém-se amostras com dimensões análogas às citadas em 2.951.

## 3 — O PROCESSO SCHLUMBERGER APLICADO AO PETRÓLEO

### 3.1 — GENERALIDADES

As primeiras aplicações práticas da geofísica aos furos de sonda, feitas pelos irmãos Schlumberger, surgiram no mo-

mento em que a indústria do petróleo iniciava um grande período de expansão industrial. Com efeito, findara a época do *boom and doom* e iniciava-se uma nova era caracterizada pelo decidido estudo dos reservatórios e princípios de conservação, com recurso a todos os ramos da ciência aplicáveis, o

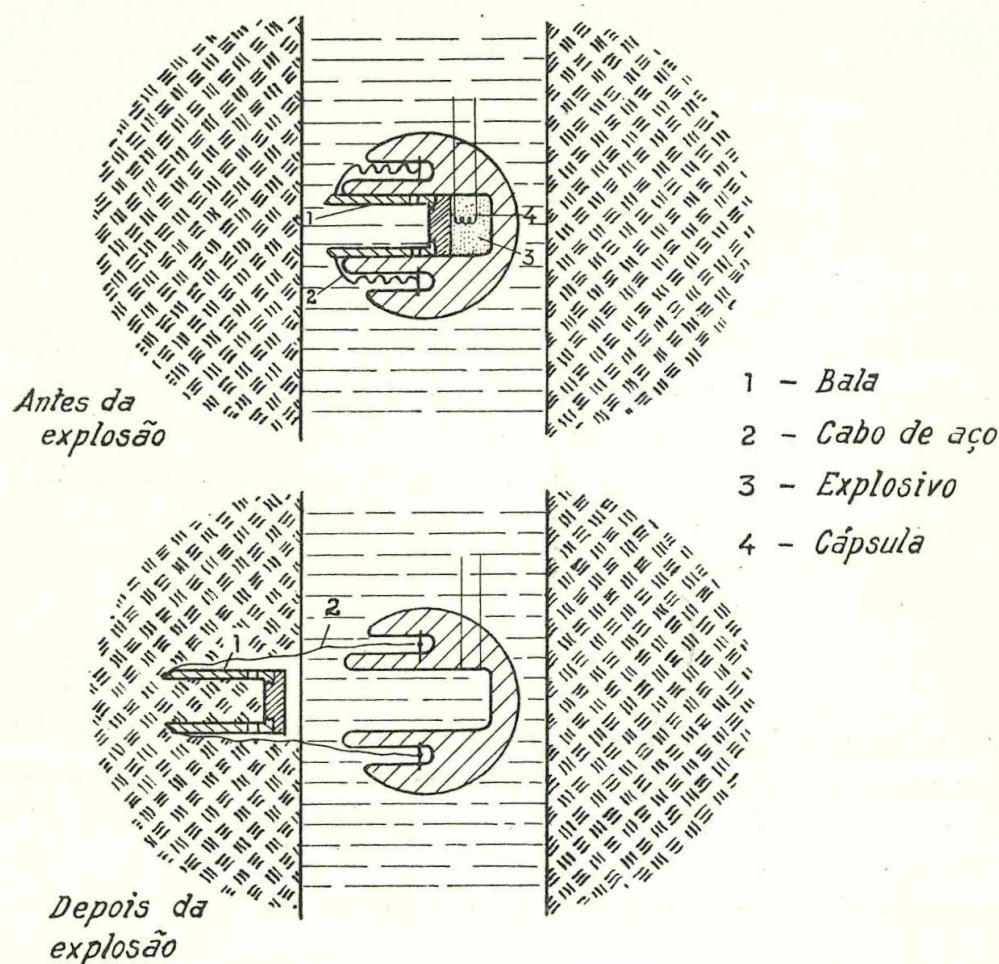


Fig. 11

que lhe permitiu, em pouco tempo, transformar-se na indústria altamente especializada que hoje é.

Com o advento da perfuração *rotary* por volta de 1900, ao grande progresso verificado na técnica da perfuração correspondeu uma maior dificuldade na detecção do petróleo. A presença de lama no furo, indispensável no sistema *rotary* de então, criava uma pressão em face das formações atravessadas

que, muitas vezes, não permitia descobrir o petróleo. Desde esse período até que técnicas adequadas ao estudo das formações permitiram localizar os horizontes produtores, milhões de barris de petróleo foram ultrapassados sem que os sondadores disso se tivessem apercebido (12).

O *well logging* surgiu, assim, numa altura em que o técnico do petróleo, absorvido pelo problema fundamental de saber se existe ou não petróleo em quantidades comerciais, mais necessidade tinha de informes sobre as formações atravessadas em cada furo.

Como e de que forma pode o estudo das sondagens pelo processo Schlumberger contribuir para auxiliar o técnico do petróleo a resolver os seus problemas é assunto de que a seguir nos ocuparemos. Todavia — convém desde já esclarecer — limitar-nos-emos ao âmbito do curso realizado pela Société de Prospection Électrique especialmente orientado no sentido da interpretação dos diagramas obtidos com vista à determinação da porosidade dos reservatórios e do seu teor em fluidos. Desta forma, os chamados métodos auxiliares não serão tratados neste capítulo.

Dum modo geral, as diagrafias eléctricas ou nucleares são utilizadas para distinguir formações de natureza diferente e sua delimitação exacta; estabelecer correlações; avaliar ou calcular determinadas características dos reservatórios, dum modo especial a porosidade e o teor em fluidos.

Não consideramos o problema da determinação da permeabilidade (importante característica das rochas reservatório), visto que, no estado actual dos conhecimentos, apenas é possível obter ordens de grandeza em condições especialmente favoráveis. O método seguido neste caso é apenas aproximado e vem apresentado em (13) nas pp. E-1 a E-4.

Nos casos em que os diagramas nos permitem fazer, de forma suficientemente precisa, determinações quantitativas da porosidade dos reservatórios e do teor em fluidos, embora fiquemos a dispor da informação basilar para o cálculo das reservas, ainda nos faltam vários elementos, como a permeabilidade

da camada, pressões, estrutura da rocha, viscosidade dos fluidos, etc., necessários para formular previsões acerca da futura produção do reservatório.

A contribuição que, na prática, se pode esperar dos gráficos Schlumberger para avaliar a provável produção dum reservatório depende principalmente do tipo deste, aumentando a dificuldade quando se trata de rochas fissuradas, de características morfológicas sujeitas a grandes variações, onde o mecanismo de produção é mais complexo e menos conhecido (14).

No capítulo anterior, de 2.2 a 2.8, já tivemos oportunidade de fazer referência aos parâmetros obtidos com os *logs* eléctricos ou nucleares; por isso, limitamo-nos, agora, a recordá-los: *PS*, resistividades, radioactividade natural e radioactividade provocada.

Os parâmetros essenciais do reservatório — porosidade, saturação em fluidos, limites da formação e permeabilidade — acabam também de ser referidos.

Nestas condições, afigura-se-nos conveniente, para maior objectividade da interpretação quantitativa (a tratar em 3.4), fazer preceder esse assunto de algumas considerações acerca da importância do fenómeno da invasão e sua influência nos diagramas, do conceito de *formation factor* e do estabelecimento das equações fundamentais da interpretação quantitativa.

### 3.2—O FENÔMENO DA INVASÃO

Quando a lama de circulação actua em face de uma formação permeável verifica-se a deposição nas paredes do furo de uma parte sólida, designada por *mud-cake*, e a penetração na formação, em maior ou menor profundidade, de uma parte líquida conhecida por filtrado e que dá origem à «zona invadida».

Como as medidas eléctricas englobam um volume que comprehende o furo, a zona invadida, a zona virgem e formações adjacentes à camada (se esta for pouco espessa), comprehende-se que, no caso de uma invasão profunda, as medidas sejam altamente afectadas e se afastem de forma considerável da resis-

tividade da zona virgem. Assim, a determinação de um  $R_t$  com suficiente rigor implicará que a perfuração seja conduzida de forma a poder limitar a profundidade da invasão.

Por outro lado, a interpretação correcta de um diagrama Schlumberger obriga ao conhecimento exacto da repartição das resistividades nos terrenos da zona invadida, o que pressupõe o conhecimento da distribuição dos fluidos.

A interpretação mais recente do fenómeno da invasão, embora de certo modo hipotética, pode ser observada na Fig. 12

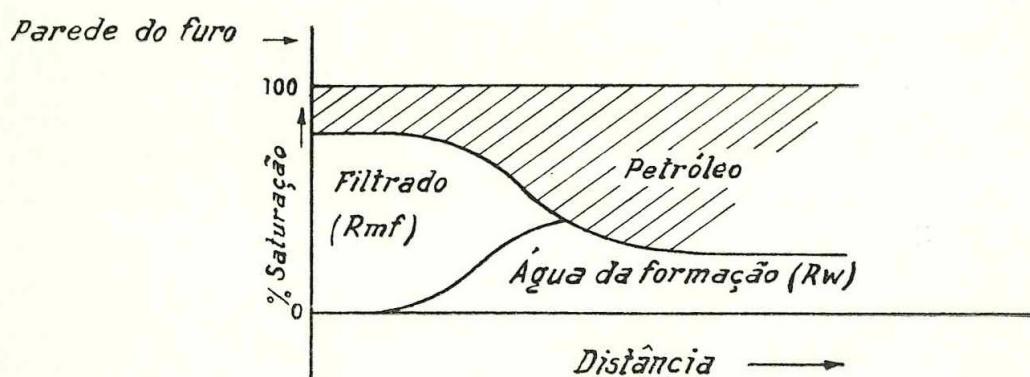


Fig. 12

onde está representada a distribuição radial após o início da invasão.

O aparecimento de um «anel de água» da formação entre a zona invadida pelo filtrado e a zona não contaminada, devido à diferença das permeabilidades relativas da água e do petróleo, foi confirmado por cálculos e experiências recentemente levadas a efeito (14). Todavia, a espessura deste «anel de água» da formação deve ser muito pequena e não deve exceder 10 % do diâmetro da zona invadida pelo filtrado. A sua influência nas respostas das «sondas normais» ou *laterolog* é praticamente inexistente e, na «lateral», é no máximo de 20 %. Quanto ao *log* de indução, embora os primeiros resultados façam supor que a sua influência seja pequena, admite-se a possibilidade da sua existência.

Quando há invasão, nas proximidades das paredes da sondagem, a água da formação é uma parte importante de

petróleo são deslocadas pelo filtrado. A resistividade é, pois, praticamente constante numa distância de 3 a 4" e é designada por  $R_{ro}$ . Para lá desta zona, se a formação não contém petróleo e é aquífera, a resistividade varia, provavelmente de forma suave, do valor  $R_{ro}$  para o valor  $R_o$  (resistividade da zona não contaminada). Se a formação é petrolífera, a distribuição das resistividades é complexa, difícil de definir e será função das proporções relativas de petróleo, filtrado e água de formação.

Para a interpretação dos diagramas considera-se a zona invadida como tendo uma resistividade constante  $R_{ro}$  e limitada por uma superfície cilíndrica coaxial com o furo e de diâmetro  $D_i$

### 3.3— O CONCEITO DE FORMATION FACTOR E AS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DE INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA

#### 3.31 — Formation factor $F$

G. E. Archie (15) estudou a resistividade de formações com os seus poros completamente saturados de água. A investigação laboratorial de formações arenosas sem argila (em francês, *formations propres*; em inglês, *clean formations*) mostrou que, variando a salinidade da água que preenche os poros entre 20 000 e 100 000 mg de  $ClNa$  por litro, para formações com porosidades compreendidas entre 10 e 40 %, existe uma relação constante entre a resistividade da formação, quando todos os seus poros estão completamente saturados com água salina, e a resistividade desta água salina.

A esta relação constante chamou *formation resistivity factor* ou, abreviadamente, *formation factor*.

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad (a)$$

### 3.32 — Porosidade $\phi$

Em consequência de investigação laboratorial de Archie e outros foram apresentadas várias fórmulas relacionando o *formation factor* com a porosidade. Tais relações apresentam-se, dum modo geral, com a forma

$$F = \frac{a}{\phi^m} \quad (b)$$

em que  $a$  é uma constante do valor próximo de 1 e o expoente  $m$  tem valor próximo de 2.

As fórmulas mais correntemente utilizadas são

$$F = \frac{0,75}{\phi^2} \quad (b')$$

$$F = \frac{1}{\phi^2} \quad (b'')$$

$$F = \frac{0,62}{\phi^{2,15}} \quad (b''')$$

A primeira destas aplica-se especialmente nas areias e (b'') preferencialmente nas formações duras (calcários). A última, fórmula de Humble, é mesmo utilizado no *Recueil d'Abiques* (13) para determinar a saturação, na p. D-2.

Verifica-se, na prática, que as diferenças entre elas são pouco importantes, podendo dar erros da ordem dos 20 %.

### 3.33 — Saturação $S_w$

As primeiras interpretações dos *logs* feitas a partir apenas da resistividade basearam-se na fórmula estabelecida por Archie

$$R_t = \frac{FR_w}{S_w^n} \quad (c)$$

Com efeito, o estudo da variação da resistividade das areias devida à percentagem de água contida nos seus poros, para saturações que descem até 15 ou 20 %, mostrou a validade desta equação.

No caso de areias não argilosas (*sables propres*), não consolidadas ou de areias consolidadas, o expoente  $n$  é muito próximo de 2 e, portanto, vem

$$S_w = \sqrt{\frac{F R_w}{R_t}} \quad (c')$$

No caso de camadas petrolíferas e para a zona invadida, sendo  $S_{xo}$  a saturação em água nesta zona, a equação tem a forma

$$S_{xo} = \sqrt{\frac{F R_{mf}}{R_{xo}}} \quad (c'')$$

### 3.34 — Polarização espontânea

R. M. J. Wyllie (16), estudando o fenómeno da *PS* estática, verificou que era função das actividades da água de formação e da lama

$$SSP = -k \log (a_w/a_{mf}) \quad (d)$$

em que  $k$  é uma constante para cada valor da temperatura;  $a_w$  a actividade da água intersticial (*connate water*) e  $a_{mf}$  a actividade do filtrado da lama.

Supondo que praticamente em solução só há *ClNa* e considerando as resistividades das duas soluções inversamente proporcionais às actividades ou concentrações, a equação tomará a forma

$$SSP = -k \log (R_{mf}/R_w) \quad (d')$$

Embora esta equação tenha sido aplicada com resultados satisfatórios a grande números de casos, adiante veremos, em

3.422, que casos há em que não é aplicável e qual a solução recentemente sugerida.

### 3.35 — Limitações à validade do *formation factor*

Como tivemos oportunidade de referir, a constância da relação entre  $R_o$  e  $R_w$  verificava-se quando a rocha porosa era limpa, isto é, não continha argila.

Vejamos agora o que se passa quando a formação contém argila, quer esta se encontre revestindo os poros quer se encontre distribuída entre os grãos da matriz.

A argila, ou mais propriamente a água intersticial que contém, comporta-se como um condutor adicional à passagem da corrente, facto que pode alterar substancialmente  $F$  que passará a ter valores diferentes conforme a salinidade da água que satura os poros. Com efeito, a condutividade total da formação, no caso especial de formações argilosas (*dirty sands*), passa a ser a soma das condutividades correspondentes aos dois caminhos de passagem da corrente; se a água que preenche os poros é altamente salina, a parcela de condutividade correspondente à parte argilosa desempenha um papel secundário e o valor do *formation factor* pouco difere do seu valor máximo; todavia, na medida em que diminuir a condutividade da solução que preenche os poros, cada vez mais importante se torna o valor da condutividade relativa à parte argilosa e, consequentemente, o valor obtido para  $F$  afastar-se-á cada vez mais do seu valor máximo, diminuindo.

Haverá, pois, que ter em atenção especial a presença de argila porque, nesse caso, o valor obtido para  $F$  pode ser substancialmente diferente do seu verdadeiro valor, deixando de ser válidas as fórmulas (bb).

## 3.4—INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA DOS DIAGRAMAS

Do exposto em 3.3 verifica-se que a determinação quantitativa da saturação e porosidade se apoia no conhecimento dos parâmetros fundamentais:  $R_{mf}$ ,  $R_w$ ,  $R_{xo}$  e  $R_t$ .

Por outro lado há ainda a considerar o factor  $S_{xo}$  e as relações que ligam  $F$  com  $\phi$ . De 3.31, para o caso da zona invadida, vem  $F = R_{xo}/R_{mf}$  e de 3.33, atendendo a (c') e (c''), obtém-se

$$S_w = S_{xo} \sqrt{\frac{R_{xo}}{R_{mf}} - \frac{R_w}{R_t}}$$

### 3.41 — Determinação de $R_{mf}$

O processo mais aconselhável é fazer a medição directa sobre uma amostra do filtrado. Pode também determinar-se a partir de  $R_m$ , utilizando valores estatísticos médios.

Em qualquer dos casos não deverá esquecer-se que haverá que converter o valor  $R_{mf}$  à temperatura da formação sempre que o seu valor é obtido a temperatura diferente, conversão que pode fazer-se pelo ábaco A-6 de (13).

Normalmente, no cabeçalho dos *logs* vem mencionada a temperatura no fundo do furo (*BHT*) que é lida por meio dum termómetro descido com o aparelho de medida. Por intermédio dos ábacos A-2 ou A-2 bis (conforme as unidades de medida de profundidades e temperaturas) obtém-se directamente o valor da temperatura à profundidade da formação em estudo. Em qualquer destes dois ábacos há duas escalas de temperaturas; a escolha da mais conveniente é ditada pela experiência se outra indicação mais segura não houver.

Conhecida  $R_m$  à temperatura da formação e o valor desta, o valor de  $R_{mf}$  bem como o de  $R_{mc}$  é directamente lido utilizando o ábaco A-4.

Partindo do valor de  $R_m$  os valores obtidos para  $R_{mf}$  e  $R_{mc}$  são apenas valores médios; daí, a preferência pela medição directa de  $R_{mf}$ .

### 3.42 — Determinação de $R_w$

Dum modo quase geral a determinação de  $R_w$  faz-se a partir da curva de *PS*. Casos há, todavia, em que não é possível lê-la, como em séries calcárias sem bancos de argila suficiente-

mente espessos que permitam obter uma boa linha de base ou séries de areias argilosas.

Por isso, é aconselhável fazer, sempre que possível, medições directas de  $R_w$  quando haja fluido disponível, como sucede quando se fazem *Drill stem tests (DST)* ou há produção. Os valores assim determinados deverão ser convenientemente catalogados.

Por vezes, apenas há disponível uma análise química da solução. Ter-se-á que obter, primeiro, a concentração equivalente da solução em  $ClNa$  (ver p. A-5 do *Recueil d'Abaques*). A seguir, a determinação da resistividade faz-se, de forma prática, recorrendo ao ábaco A-6 da mesma publicação.

Convém desde já esclarecer que as determinações de  $R_w$  dizem respeito apenas a formações isentas de argila intersticial. A extensão ao caso de areias argilosas, a tratar em 3.46, está ainda em estudo.

### 3.421 — Caso em que as lamas e as águas de formação só contêm praticamente $ClNa$

Vimos já que a determinação de  $R_w$  se fundamenta na fórmula de Wyllie:  $SSP = -k \log (R_{mf}/R_w)$ .

O valor de  $k$  depende apenas da temperatura. Obtida a temperatura da formação, como se indicou em 3.41, determina-se  $k$  utilizando o ábaco A-10 de (13).

Já se indicou também em 3.41 o processo de determinação de  $R_{mf}$ .

Quanto ao valor de  $SSP$  é lido directamente na curva de  $PS$ . Para isso é necessário escolher uma boa linha de base (ver Fig. 2) que se obtém, normalmente, ensaiando com uma régua uma linha que une as deflexões da curva nas secções correspondentes a formações argilosas. Nem sempre isto é possível e daí a necessidade de recorrer à determinação directa de  $R_w$ .

Quando se dispõe duma boa linha de base mede-se o valor de  $SSP$  graças à escala existente no topo do  $\log$  (em milivolts) e tirando uma normal à linha de base, de comprimento igual à amplitude da curva de  $PS$  em face das formações permeáveis.

Na delimitação destas últimas atende-se à existência de pontos de inflexão dado que a densidade de corrente é máxima nos limites superior ou inferior.

Além da *PS* natural e de causas perturbadoras mais ou menos corrigíveis, a forma da curva e amplitude das deflexões (17) dependem de outros factores: espessura das camadas, resistividades das formações e da lama, diâmetro do furo, invasão pelo filtrado.

No *Recueil d'Abaques*, p. A-8, há um ábaco empírico que permite corrigir a *PS* da influência da espessura das camadas, tendo também em consideração a influência da invasão. Para os casos de não invasão e de  $R_t = R_s$  há os ábacos das figuras 7 e 8 do trabalho de Doll citado (17).

As considerações feitas referem-se a camadas permeáveis; em face de formações impermeáveis, dum modo geral muito resistentes como nos campos calcários, a *PS* apresenta-se como uma linha oblíqua em virtude da corrente de *PS* se manter sensivelmente constante ao longo do furo, na parte correspondente à secção impermeável.

### 3.422 — Caso em que as águas contêm sais diferentes do ClNa

É o caso dos chamados *SP* anómalos.

Gondouin, Tixier e Simard (18) estudaram os seguintes casos: a) águas de formação doces ( $R_w > 0,3 \Omega m$  a  $75^\circ F$ ); b) lamas contendo proporções apreciáveis de sais de *Ca* solúveis, tais como gesso,  $Cl_2Ca$ , etc.; c) águas de formação muito salinas ( $R_w > 0,08 \Omega m$  a  $75^\circ F$ ). O estudo foi conduzido no sentido de verificar a validade da equação simplificada de Wyllie — equação (d') de 3.34.

Investigando a influência dos iões bivalentes  $Ca^{++}$  e  $Mg^{++}$  nas soluções de baixa salinidade verificaram que, nos casos em estudo, o valor do *SP* podia ser obtido, com uma aproximação de 5 milivolts, pela seguinte equação:

$$SSP = -k \log \frac{(a_{Na} + \sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}})_w}{(a_{Na} + \sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}})_{mf}}$$

Com ábacos especialmente preparados — ver os ábacos das Figs. 1, 2 e 3 de (18) — em que estão relacionadas as concentrações iónicas, actividades e resistividades, facilitaram a verificação prática da equação proposta. Todavia, como na prática o problema surge de maneira inversa, isto é, não se pretende verificar o valor do  $SP$  mas sim, partindo do seu valor, determinar  $R_w$ , em vez de exprimirem o valor de  $SP$  em função das actividades, introduziram o conceito de resistividade equivalente, sob a forma  $(R_{mf})_e / (R_w)_e = a_w / a_{mf}$ . Desta maneira, a equação do  $SP$  toma a forma

$$SSP = - k \log [(R_{mf})_e / (R_w)_e]$$

e, no caso do filtrado ser uma solução pura de  $ClNa$ ,

$$SSP = - k \log [R_{mf} / (R_w)_e].$$

Assim, com a nova forma dada à equação de Wyllie obtíramos não um valor de  $R_w$  mas sim um  $(R_w)_e$ .

Com o objectivo de dar forma prática ao estudo, preparam um novo ábaco em que relacionam os valores obtidos  $(R_w)_e$  com o pretendido valor de  $R_w$ . Não se lhes afigura, contudo, que esta última relação empírica, no caso de lamas contendo proporções apreciáveis de sais solúveis de  $Ca$  e  $Mg$  e da água da formação ser essencialmente uma solução de  $ClNa$ , possa existir. No entanto, os ábacos das Figs. 1 e 2 do trabalho referido, derivados para as águas de formação, são ainda aplicáveis em muitos casos e permitem um cálculo simples da actividade se se conhecer a análise química do filtrado.

Introduzidos os valores obtidos na equação do  $SP$  em função das actividades, esta é resolvida em ordem a  $(a_{Na})_w$  e o valor de  $R_w$  é lido directamente da Fig. 3.

Neste caso, a equação inicial do  $SP$ , em função das actividades, tomaria a forma simplificada:

$$SSP = - k \log \frac{(a_{Na})_w}{(a_{Na} + \sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}})_{mf}}$$

Se a água da formação não puder ser considerada uma solução pura de  $ClNa$  e se se conhece a sua composição, utiliza-se a equação inicial do  $SP$  em função das actividades e, utilizando o ábaco da Fig. 3, obtém-se  $(R_w)_e$  o qual, por meio da carta empírica da Fig. 8, dá o pretendido valor da  $R_w$

### 3.43 — Determinação de $R_{ro}$

Faz-se por intermédio de dispositivos próprios para medir pequenos volumes de terreno muito próximos das paredes do furo: *microlog* e *microlaterolog*.

#### 3.431 — Partindo do microlog

Este diagrama apresenta duas curvas: uma a traço cheio correspondente à micro inversa  $1'' \times 1''$  e outra a pontuado correspondente à micronormal  $2''$ . Com ele obtém-se uma informação pormenorizada das formações, especialmente das permeáveis e, nos casos favoráveis, uma determinação da porosidade com rigor satisfatório.

Regras de interpretação:

a) Formações permeáveis: as microresistividades são, em geral, inferiores a  $20 R_m$  e as separações são, em geral, positivas ( $R_2'' > R_1'' \times 1''$ ).

b) Formações impermeáveis de grande resistividade: as microresistividades são geralmente elevadas e as separações negativas, podendo, contudo, ser positivas.

c) Formações impermeáveis de fraca resistividade: as microresistividades são muito próximas de  $R_t$ . As separações ou são positivas ou, o que é mais frequente, são negativas, como é o caso das formações de elevado coeficiente de anisotropia.

Particularmente importante para o uso do *microlog* é saber-se que o diâmetro máximo da «sonda» *microlog* é de  $16''$  e que a existência de cavernas pode permitir obter um valor directo de  $R_m$  se a almofada não apoiar contra as paredes do furo.

Há dois tipos de dispositivos *microlog* em uso: almofada tipo *D* (em via de desaparição) e almofada hidráulica ou *H*.

Para a determinação do  $R_{xo}$  torna-se necessário conhecer  $R_{mc}$  (obtém-se partindo do valor de  $R_m$  como se referiu em 3.41),  $R_1'' \times 1''$  e  $R_2''$  (lidos directamente do *microlog*). Entra-se em (13) nos ábacos C-4 ou C-8, conforme o tipo de dispositivo de medida usado, com os valores de  $R_1'' \times 1''/R_{mc}$  e  $R_2''/R_{mc}$  e obtém-se o valor de  $R_{xo}/R_{mc}$ . Sabido  $R_{mc}$  deduz-se então  $R_{xo}$ .

No *Recueil d'Abaques*, p. C-12, vem um processo nomográfico que permite passar directamente do valor de  $R_{xo}/R_m$  para os valores de  $R_{xo}$ ,  $F$  e  $\phi$ .

Como se verifica pelo ábaco C-4, o valor de  $R_{xo}$  é pouco preciso quando  $R_{xo}/R_{mc}$  é maior que 15 ou 20.

### 3.432 — Partindo do microlaterolog

Quando se verificam as condições basilares de aplicabilidade deste dispositivo, isto é, a espessura do *mud cake* inferior a  $1/2''$ , a profundidade de invasão superior a 3 ou 4'' e a saturação em petróleo residual na zona invadida suficientemente pequena, obtém-se com satisfatória precisão o valor de  $R_{xo}$ .

Para isso entra-se com os valores de  $R_{MLL}/R_{mc}$  e com a espessura do *mud cake* no ábaco C-14 de (13).

O valor de  $R_{MLL}$  é lido directamente do *log*,  $R_{mc}$  ou é determinado directamente ou seguindo o processo já indicado e a espessura do *mud cake* ou é determinada com o auxílio do *microdiametreur* ou deduzida das curvas do *microlog*.

### 3.44 — Determinação de $R_t$

Trata-se, sem dúvida, do problema que maiores dificuldades apresenta. A existência duma zona invadida é provavelmente a maior de todas e, por isso, se recomenda o maior cuidado em evitar o mais possível a sua influência perniciosa. É considerada boa prática utilizar lamas de fraca *water-loss*, obter diagramas eléctricos com certa frequência (de forma a poder pôr em evidência a existência da zona invadida) e, tanto quanto possível, manter constante o  $R_m$  durante o curso da sondagem.

O conhecimento exacto das possibilidades de cada método

assume aqui particular importância pois dele depende, principalmente, a possibilidade de uma interpretação mais ou menos segura. Podemos servir-nos da diagrafia eléctrica convencional, do *laterolog* ou do diagrama de indução.

### 3.441 — *Partindo dos dispositivos convencionais: normais e inversas*

Em 2.3 já tivemos oportunidade de referir que os valores registados são de resistividades aparentes  $R_a$  e que para destes se passar aos das resistividades verdadeiras  $R_t$  haverá que lançar mão de «curvas de desvio».

A Société de Prospection Électrique editou, até agora, curvas de desvio para os casos de camadas de «espessura infinita» (7) e «finita» (6). As condições de aplicabilidade vêm mencionadas nos documentos respectivos sendo de notar que, no caso dos dispositivos inversos, só há curvas de desvio para camadas de espessura infinita (superior a 50 vezes o diâmetro do furo), as quais só podem ser utilizadas quando a espessura da camada for superior a 4 vezes o maior espaçamento. No caso de camada de espessura finita recomenda-se a não utilização das curvas quando a espessura da camada for inferior a 5 vezes o diâmetro do furo, para formações não invadidas, ou inferior a 10 vezes para o caso de uma invasão considerável.

Vejamos como, partindo de  $R_a$ , se obtém  $R_t$ .

Do diagrama (onde se lê  $R_a$ ) consta o valor de  $R_m$  e a temperatura a que foi determinado, bem como o espaçamento ( $AM$  ou  $AO$ ).

Como operação preliminar há que determinar a temperatura da formação e, conhecida esta, determinar  $R_m$  a tal temperatura. Estas operações já foram anteriormente descritas; para simplicidade de trabalho há um ábaco que permite a determinação da resistividade da lama à temperatura da formação quando se conhece a sua resistividade a outra temperatura.

Calculam-se depois as razões  $R_a/R_m$  e  $AM/d$  ou  $AO/d$ . Para saber a página em que devemos marcar os pontos correspondentes a estes valores há que obter  $R_i$  — normalmente com

auxílio do *microlog* ou *microlaterolog* ou ainda calculado a partir da porosidade derivada do neutrão ou medido sobre uma amostra. Divide-se  $R_i$  por  $R_m$  (à temperatura da formação) para obter uma ordem de grandeza que permita escolher a página mais conveniente.

Com os valores das razões acima indicadas obtém-se o valor aproximado da  $R_t$  por interpolação.

Em resumo, poder-se-á dizer que, nos casos de camadas espessas, a lateral dá muitas vezes um valor aproximado de  $R_t$  com excepção dos casos em que  $D^i/d$  é grande e  $F$  também.

Nas camadas delgadas a lateral dá uma excelente indicação qualitativa e é pouco aproveitável quando há indicações de bancos duros (19).

Para espessuras fracas, 1,5 a 6 m, é de utilizar a grande normal de 64".

Quando  $R_i < R_t$  a normal de 16", com as curvas de desvio, pode dar indicações razoáveis sobre o valor de  $R_t$ .

Nos casos de espessura finita não há curvas para os dispositivos laterais e as normais não podem ser utilizadas em muitos casos.

### 3.442 — Partindo do laterolog

A definição vertical das formações com o tipo correntemente utilizado (espessura do feixe de corrente de 32") é da ordem de grandeza de 1 m quando  $R_t > R_s$  e de 2 m se  $R_t < R_s$ . Além deste tipo, composto de 7 eléctrodos e consequentemente designado por *Laterolog 7*, há outro conhecido por *Laterolog 3* que, utilizando o mesmo princípio, apenas dispõe de 3 eléctrodos. Neste caso o feixe de corrente focalizada é muito mais delgado (6"), o que permite mais pormenor na definição vertical.

A influência do furo de sonda para diâmetros até 12" é praticamente inexistente mesmo que  $R_t / R_m$  seja muito elevado.

O valor de  $R_t$  dado por este dispositivo é influenciado pela invasão. Se esta não existir, o valor obtido é praticamente

o valor de  $R_t$ . Todavia, se existe invasão, há que considerar a influência de  $R_{xo}$  e  $D_i$ ; utilizam-se as seguintes fórmulas:

$$\begin{array}{ll} D_i = 20'' & R_a \approx 0,2 R_{xo} + 0,8 R_t \\ D_i = 40'' & R_a \approx 0,4 R_{xo} + 0,6 R_t \\ D_i = 80'' & R_a \approx 0,6 R_{xo} + 0,4 R_t \end{array}$$

Podem resumir-se as condições de aplicabilidade do *laterolog* dizendo que é de aconselhar o seu uso na determinação de  $R_t$  quando  $R_{mf}/R_w < 3$ . Pode ainda ter interesse para a desigualdade de sentido contrário nas formações muito resistentes com contrastes de resistividade  $R_t / R_s$  ou  $R_s / R_t$  grandes. Em qualquer caso o *laterolog* dá boa definição das camadas delgadas.

### 3.443 — Partindo do induction log

Presentemente há dois tipos em uso: 5 FF 27'' e 5 FF 40''.

O *induction log* revela-se um excelente método para a determinação de  $R_t$  no caso de formações de baixa resistividade ou de resistividade moderada perfuradas com lamas doces ( $R_{mf}/R_w \leq 5$ ). Nas formações duras perfuradas com lama doce, no caso da invasão não ser excessiva e principalmente se a água intersticial tem salinidade elevada, deve poder distinguir as formações inteiramente saturadas com água das que contêm petróleo.

Juntamente com registo da indução faz-se normalmente o de uma normal 16'', o que permite determinar  $R_t$  e a profundidade média de invasão nas formações de baixa e média resistividade, quando  $R_{xo} > R_t$ .

Qualquer dos tipos de dispositivo citados de início dá uma boa definição vertical e, se a espessura das formações é superior a 5 ou 6', as correções para as formações adjacentes podem-se desprezar.

A influência do furo, para os diâmetros habituais e se  $R_a/R_m < 50$ , é praticamente nula. Para valores superiores a 50, graças ao registo simultâneo da normal 16'' é, por vezes, possível determinar com precisão o valor desta influência.

A interpretação dos dados de indução e da normal de 16", registada simultaneamente, faz-se por ábacos simples. As correcções do furo de sonda, formações adjacentes e invasão podem fazer-se sucessivamente por ábacos simples; as duas primeiras, como se disse, podem desprezar-se em muitos casos.

Para o caso do registo de 5 FF 27" e normal 16", conhecido  $R_{xo}$ ,  $R_{tnd}$  e  $R_{16}''$ , entrando no ábaco B-6 de (13) com  $R_{16}'' / R_{xo}$  e  $R_{tnd} / R_{xo}$ , obtém-se os valores de  $D_t$  e o de  $R_t / R_{xo}$  e deste passa-se para  $R_t$  por simples multiplicação por  $R_{xo}$ .

### 3.45 — Determinação de $S_{xo}$

A saturação em água da zona invadida não pode ser medida directamente no próprio local sendo o seu valor puramente conjectural.

Como ordem de grandeza pode fixar-se em 80 % para formações de porosidade granular, permeabilidade superior a 10-20 md e no caso de existir petróleo a sua viscosidade ser pequena. Nestas condições o *ROS* (*residual oil saturation*) será igual a 20 % ( $S_{xo} = 1 - ROS$ ).

Se se tratar de formações fracturadas com matriz de fraca permeabilidade e se, por outro lado, o petróleo for muito viscoso, o *ROS* pode atingir valores de 50 %.

A experiência ditará o melhor critério na selecção do valor a tomar.

### 3.46 — Areias argilosas

A presença de argila, quer laminada quer disseminada, criando um caminho adicional à corrente eléctrica, torna dependente da salinidade da água de formação o valor da relação  $R_o / R_w$ . O valor desta relação decresce na medida em que  $R_w$  aumenta, pois isso corresponde a uma maior participação na condução da corrente da parte argilosa da formação.

No que respeita à curva de *PS*, a presença de argila também contribui para a redução da sua amplitude, pelo que se obterá uma determinação defeituosa de  $R_w$  e, consequentemente, um valor errado de  $S_w$ .

Definindo *pseudo-static* *PS* de uma areia como sendo a *PS* que seria obtida se essa areia não contivesse argila, demonstra-se (20), a partir das fórmulas estabelecidas por Doll (21), que

$$PSP = \alpha SSP = -k \log \frac{R_{xo}}{R_t} - 2 \alpha k \log \frac{S_{xo}}{S}$$

em que  $R_{xo}$  é a resistividade da zona invadida imediatamente adjacente ao furo (como os valores dados pelo *ML* e *MLL* se relacionam com volumes de formação muito mais pequenos do que os registados pela normal, lateral, *laterolog* ou indução, os valores de *ML* ou *MLL* devem ser médias harmónicas nos mesmos intervalos em que se tomam os valores de  $R_t$ );  $S_{xo}$  é a saturação em filtrado no espaço poroso efectivo para a parte da zona invadida imediatamente adjacente ao furo;  $S$  é a saturação em *connate water* no espaço poroso efectivo;  $k$  é o coeficiente habitual da componente electroquímica;  $R_t$  é a resistividade verdadeira da formação e  $\alpha$  é o factor de redução do *SP*.

É evidente, pela fórmula acima, que no caso da formação ser aquífera  $2\alpha k \log(S_{xo}/S) = 0$  e então

$$PSP = -k \log(R_{xo}/R_t).$$

Se marcarmos em papel semilogarítmico os valores de  $R_{xo}/R_t$  em ordenadas, em escala logarítmica, e os da *PSP* em abcissas, podemos obter uma interpretação qualitativa. A presença de petróleo ou gás corresponderá a pontos situados no espaço por baixo desta recta.

Na prática, a última equação tem-se verificado válida nos casos de ausência de petróleo ou gás, para areias contendo argila disseminada.

No *Recueil d'Abaques* apresentam-se ábacos para determinar a saturação e porosidade destas formações. Na p. D-4, para determinação da saturação, o ábaco corresponde à solução gráfica da equação do *PSP* reproduzida no início deste assunto.

Na p. D-6 há um ábaco para determinação da porosidade que é associado com o ábaco D-4 e utiliza dados semelhantes.

### 3.47 — Outros processos de determinar $F$ e $\phi$

#### 3.471 — *Método de analogia*

Embora possa conduzir a valores pouco aproximados, por vezes, pode determinar-se  $F$  quando se conhece nas proximidades uma camada aquífera que, com fortes razões, se supõe geologicamente semelhante.

Neste caso o quociente  $R_t / R_w$  da formação aquífera dá directamente o valor de  $F$  que, por analogia, será considerado o da formação em estudo.

Mais prático ainda será o caso em que é possível distinguir o contacto petróleo-água numa formação suficientemente espessa e com fundadas razões para crer que há semelhança geológica. O valor obtido na secção aquífera pode, por analogia, ser considerado o mesmo da secção petrolífera.

#### 3.472 — *Partindo do diagrama de neutrões*

Com excepção das margas e algumas substâncias, como por exemplo o gesso, só os fluidos intersticiais contêm hidrogénio. No caso desses fluidos serem líquidos, o número de átomos num dado volume de formação é essencialmente função da porosidade total da formação; o caso correspondente ao fluido gasoso não será aqui considerado.

Dada a possibilidade de relacionar as deflexões do diagrama de neutrões com a porosidade, como se depreende do acima dito, tem sido prática frequente, para uma determinada formação, relacionar aquelas deflexões com os valores da porosidade obtidos por análise laboratorial. Essa relação confirma-se e, se se representar em escala logarítmica os valores da porosidade determinados laboratorialmente e as respectivas deflexões do diagrama em escala linear, verifica-se ainda mais que a curva de calibragem obtida se aproxima duma linha recta. Isto sugeriu um processo de calibragem relativamente simples

que assenta na determinação de dois pontos referentes a duas formações de que se conhece a porosidade e para as quais se lê a deflexão correspondente.

Deste modo, informações muito valiosas têm sido conseguidas, principalmente nos casos dos furos não revestidos e com formações «limpas». Sabe-se, contudo, que diversas condições do furo têm considerável influência na resposta do diagrama de neutrões, especialmente o diâmetro, a presença de *casing* e cimento, presença ou ausência de lama, suas características e a posição do aparelho de medida em relação às paredes do furo.

Como resultado de aturada investigação em que apreciou todas estas influências, Dewan (22) apresentou uma série de cartas de correção aplicáveis à aparelhagem de medida usada pela Schlumberger (com diâmetro de  $3\frac{5}{8}$ "). Do exame dos ábacos apresentados conclui-se que: quanto mais reduzido for o diâmetro do furo mais precisas são as determinações de porosidade; o rigor obtido é maior para furos sem revestimento do que nos entubados; é necessário conhecer bem o diâmetro do furo em estudo; em sondagens «vazias» não é possível a utilização quantitativa do diagrama de neutrões.

### 3.48 — Neutron double spacing

Trata-se dum técnica relativamente recente e que consiste em fazer um segundo diagrama de neutrões com um espaçamento diferente.

Do confronto dos dois diagramas pode resultar a detecção de gás pelas seguintes razões: se a formação contém água ou petróleo, tanto na zona virgem como na zona invadida, o índice de hidrogénio deve ser o mesmo e daí os dois *logs* darem o mesmo resultado; se a formação contém gás, a zona invadida terá um índice de hidrogénio maior do que a zona virgem e, portanto, os dois diagramas darão resultados diferentes; a experiência diz que o de maior *spacing* tem maior profundidade de investigação e, portanto, será proporcionalmente mais influenciado pelo baixo índice de hidrogénio correspondente à zona de gás.

De certo modo, a resposta deste dispositivo é comparável à do *microlog*. Nas formações com gás, o *spacing* maior dá uma maior leitura (mais baixo índice de hidrogénio) do que o mais pequeno. Anàlogamente ao caso do *microlog*, pode dizer-se que há uma separação positiva.

Esta técnica de diagrafia de neutrões constitui um progresso sensível, mas exige condições especiais: gás seco; furos relativamente pouco profundos; invasão relativamente pequena e grés «limpos» de porosidade constante e elevada.

Nestas condições, como foi praticamente confirmado (23), a separação positiva é uma indicação de gás desde que a profundidade de invasão esteja dentro dos limites convenientes e que tenha sido feita uma calibragem correcta dos dois *logs*.

### 3.49 — Utilização prática da diagrafia de raios gama

Como se sabe, o diagrama de raios gama dá, em primeira aproximação, uma deflexão proporcional à razão do peso dos elementos radioactivos contido num dado volume de formação e do peso desse volume e isto porque, embora o número de radiações gama detectadas seja proporcional ao peso dos elementos radioactivos por volume de formação, o facto de aumentar a densidade da formação significa maior absorção de raios gama. A unidade utilizada, na prática, é o micrograma de rádio equivalente por tonelada de formação.

A fim de permitir cotejar *logs* de radiações gama registados em condições diferentes e com diferentes tipos de contadores, há que proceder à calibragem prévia do equipamento. Esta operação consiste em, imediatamente antes de fazer o registo, colocar uma fonte radioactiva estalão a uma distância *D* do detector e ajustar a deflexão do galvanómetro numa divisão determinada. A fonte e a distância são escolhidas de forma que a resposta do detector seja a que seria obtida em face duma formação contendo 10 microgramas de rádio equivalente por tonelada nas seguintes condições padrão: detector de  $3\frac{5}{8}''$  de diâmetro, excentrado, isto é, deitado sobre a parede num furo de  $10''$  de diâmetro contendo uma lama de 10 libras por galão.

Como na prática as condições não coincidem com estas condições *standard* foram preparadas curvas de desvio (ver Figs. 1 e 2 de 24), que permitem obter as verdadeiras radioactividades tendo em consideração a influência dos diversos parâmetros a considerar.

#### 4 — CONCLUSÕES

Desnecessário se torna encarecer a importância do estudo das sondagens pelo processo Schlumberger. Basta que se repita o que já foi dito no 1.º capítulo: não se fazem hoje, em todo o mundo, sondagens para petróleo sem esse estudo geofísico complementar. E o número de sondagens com tal objectivo constitui esmagadora maioria.

Mas também se disse já que o processo se aplica a outras substâncias. São de citar entre elas a água, sais de potássio e outras substâncias radioactivas e carvões.

É de acreditar que o seu campo de aplicação se vá estendendo cada vez mais e, para cada caso, as possibilidades de êxito sejam cada vez maiores.

Além da sua utilização para fornecer elementos de muito interesse relacionados directamente com cada uma das substâncias referidas, chegando mesmo, nalguns casos, a detectar a sua presença, são de considerar também indicações de outro género, indirectas, susceptíveis de serem colhidas em qualquer sondagem qualquer que seja a sua finalidade.

Entre nós, como já se assinalou, tem trabalhado nos últimos anos, para petróleo, a Société de Prospection Électrique. E com a generalidade toda de estudo geofísico de furos de sonda, para referir toda a actividade no país, citaremos também no petróleo as determinações *well shooting* em que aquela empresa tem colaborado com outras; as medições de radioactividade efectuadas para as substâncias radioactivas pela Companhia Portuguesa de Radium e agora pela Junta de Ener-

gia Nuclear; finalmente aplicações dos métodos ditos auxiliares — determinações com estratâmetros feitas por várias empresas de sondagem nacionais e estrangeiras e de desvio dos furos também realizados por empresas particulares e pelo Serviço de Fomento Mineiro. Julgamos ser tudo e pouco é.

Bom seria que para o futuro se intensificassem as aplicações relativas às diversas substâncias para as quais esta modalidade de estudo geofísico pode prestar serviços valiosos.

No que se refere aos trabalhos de prospecção e pesquisa a cargo do Serviço de Fomento Mineiro, está a ser considerado presentemente o caso das antracites, que requer cuidadosa ponderação dada a complicada tectónica dos respectivos jazigos.

#### S U M M A R Y

The writers have assisted to a series of lectures, in Paris, carried out by the *Société de Prospection Électrique* in April 1957.

This article is, in a great extent, the transcription of the report about the matter presented in due time.

It deals with the procedures of well logging ordinarily carried out by that Schlumberger society specialy as far as oil is concerned.

## B I B L I O G R A F I A

- 1 — C. ROSOFF — *Étude géophysique des sondages de recherche d'eau et d'exploration minière* — Congrès du Centenaire de l'Industrie Minérale, Paris, 1955.
- 2 — *Le carottage électrique* — Revue de l'Industrie Minérale, Nov., 1949.
- 3 — *Review of Schlumberger well logging and auxiliary methods* — Schlumberger Document Number 2.
- 4 — R. MAILLET et L. MIGAUD — *Conrad Schlumberger et la prospection électrique* — Dunod, Paris, 1942.
- 5 — *Interpretation hand-book for resistivity logs* — Schlumberger Document Number 4.
- 6 — *Resistivity departure curves (beds of finite thickness)* — Schlumberger Document Number 3.
- 7 — *Resistivity departure curves (beds of infinite thickness)* — Schlumberger Document Number 7.
- 8 — H. G. DOLL — *The laterolog: a new resistivity logging method with electrodes using an automatic focusing system* — Journal of Petroleum Technology, 1951.
- 9 — H. G. DOLL — *The microlog: a new electrical logging method for detailed determination of permeable beds* — Petroleum Transactions, A.I.M.E., 1950.
- 10 — F. P. KOKETH — *Gama-ray logging* — The Oil and Gas Journal, July, 1951.
- 11 — J. L. MATHIEU — *Quelques applications nouvelles des méthodes Schlumberger* — Atti del VII Convegno Nazionale del Metano e del Petrolio, Aprile, 1952.
- 12 — NORMAN J. CLARK and H. M. SHEARIN — *Formation evaluation of oil and gas reservoirs* — A symposium on formation evaluation, 1955.
- 13 — *Recueil d'Abaques* — Schlumberger.
- 14 — M. MARTIN — *Possibilités actuelles des méthodes de diagraphies électriques et nucléaires* — Revue de l'Institut Français du Pétrole, n.º 12, 1956.
- 15 — G. E. ARCHIE — *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoirs characteristics* — Dallas Meeting, Oct., 1941.
- 16 — M. R. J. WYLLIE — *A quantitative analysis of the electrochemical*

*component of the self potential curve* — Petroleum Transactions, A.I.M.E., Jan., 1949.

17 — H. G. DOLL — *The SP log: theoretical analysis and principles of interpretation* — A.I.M.E., Tech. Pub. No. 2463, Sep., 1948.

18 — M. GONDOUNIN, M. P. TIXIER and G. SIMARD — *An experimental study on the influence of the chemical composition of electrolytes on the SP curve* — A.I.M.E., Paper No. 657-G.

19 — *Lateral curves for thin non-invaded beds* — Schlumberger Well Surveying Corporation.

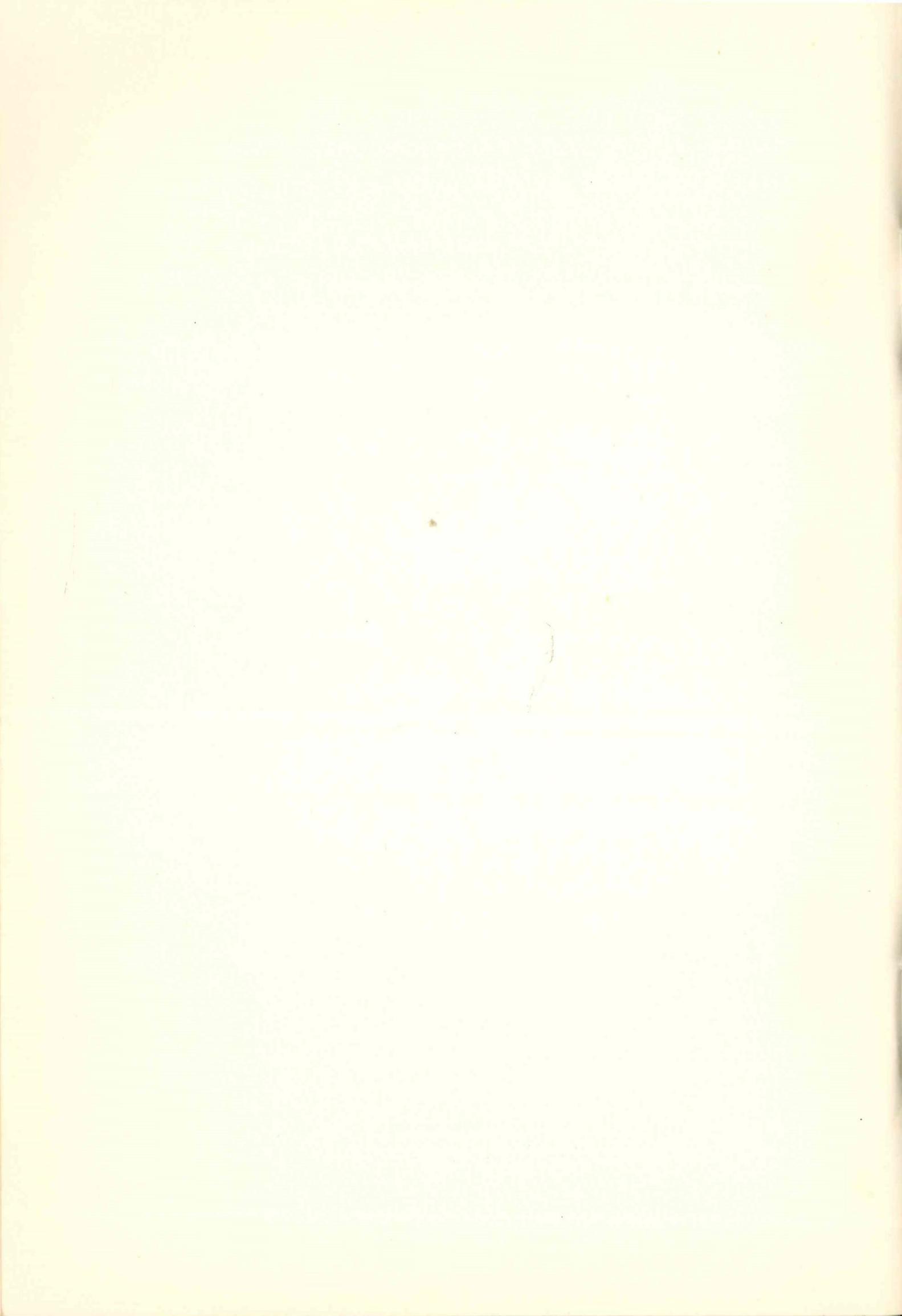
20 — A. POUPEON, M. E. LOY and M. P. TIXIER — *A contribution to electrical log interpretation in shaly sands* — Journal of Petroleum Technology, June, 1954.

21 — H. G. DOLL — *The SP log in shaly sands*.

22 — J. T. DEWAN — *Neutron log correction charts for bore hole conditions and bed thickness* — A.I.M.E., Paper No. 503-G.

23 — M. GROSMANGIN and E. B. WALKER — *Gas detection by dual-spacing neutron logs in Greater Oficina area (Venezuela)* — A.I.M.E., Paper No. 725-G.

24 — A. BLANCHARD and J. T. DEWAN — *The calibration of gamma ray logs* — The Petroleum Engineer, Aug-Sep., 1953.



I M P R E S S O  
NAS OFICINAS DA «EMPRESA INDUSTRIAL  
GRÁFICA DO PORTO, LDA.» • ED. MARÂNUS  
174, RUA DOS MÁRTIRES DA LIBERDADE, 178





biblioteca  
municipal  
barcelos

MARÃ



53101

Estudo de sondagens pelo  
processo Schlumberger