

# AVALIAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS ARGILOSOS COM BAIXAS RESISTIVIDADES DA FORMAÇÃO ALAGAMAR NO CAMPO DE UBARANA – RN

## EVALUATION OF LOW-RESISTIVITY ARGILLACEOUS RESERVOIRS OF THE ALAGAMAR FORMATION, UBARANA FIELD – RN

Eduardo Moreira Ramos<sup>1</sup>

**RESUMO** – Desenvolveu-se, aqui, um novo modelo de avaliação quantitativa para arenitos argilosos, com base na bibliografia e no estudo da disposição dos argilominerais dentro dos poros das rochas-reservatório. Este modelo considera a contribuição de duas condutividades extras, além da condutividade eletrolítica das rochas: uma, resultante da contribuição efetiva da condutância superficial dos argilominerais, aumentada ou diminuída em função da capacidade de troca catiônica dos mesmos, e outra, independente e em paralelo, devido à condutância que se desenvolve em uma rede microporosa contínua, formada por argilominerais sobre o arcabouço das rochas. Foi feita uma comparação do modelo proposto com as principais equações e/ou modelos existentes na bibliografia especializada, resultando em boas correlações, principalmente com a tradicional equação de Waxman & Smits. O modelo apresenta consistência teórica e prática e, para o caso particular dos arenitos da Formação Alagamar do Campo de Ubarana, mostrou-se mais coerente com o histórico de produção dos poços estudados do que as demais equações testadas.

(Originais recebidos em 03.10.91).

**ABSTRACT** – Based on the technical bibliography and on the study of the arrangement of clay minerals within reservoir rock pores, a new model was devised for quantitative evaluation of argillaceous sandstones. This model takes into account not only the electrolytic conductivity of the rock but also two other conductivities – one is the result of the effective contribution of the surficial conductance of the clay minerals, which increases or decreases as a function of the cation-exchange capacity of these clay minerals, while the other, independent and parallel, derives from the conductance that develops in a continuous microporous network which the clay minerals form over the framework of the rock. A comparison of the proposed model with the principal equations and models found in the specialized bibliography yielded good correlations, especially with the traditional Waxman & Smits equation. The proposed model displays theoretical and practical consistency, and in the particular case of the sandstones of the Alagamar formation, Ubarana field, it has proved more coherent with the production history of studied wells than have the other equations tested.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

### 1 – INTRODUÇÃO

O Campo de Ubarana localiza-se na parte submersa da Bacia Potiguar, na Plataforma Continental do Nordeste Brasileiro, entre as latitudes 4° 30' S e 5° S e as longitudes 36° 30' W e 36° 15' W (fig. 1). Ocupa uma área de 46 km<sup>2</sup> sob uma lâmina d'água que varia de 13 a 17 m, e está situado a uma distância de 13 km da linha de costa, aproximadamente a 160 km de Natal, RN.

Seus principais reservatórios são os arenitos flúvio-deltaicos da Formação Alagamar, de razoável continuidade lateral, interdigitados com folhelhos interdelticos e inter-distributários, e com permoporosidade original sensivelmente alterada por processos diagenéticos. Foram estudadas as zonas F e G/H da Formação Alagamar.

A análise dos perfis utilizando-se os métodos convencionais de interpretação para a avaliação quantitativa dos reservatórios das zonas F e G/H mostra-se

<sup>1</sup> - Divisão Regional de Geologia (DIRGEO), Distrito de Exploração da Bacia Potiguar (DEBAR), Departamento de Exploração (DEPEX), Av. Interventor Mário Câmara, 2783, Nazaré, CEP 59070, Natal, RN, Brasil.

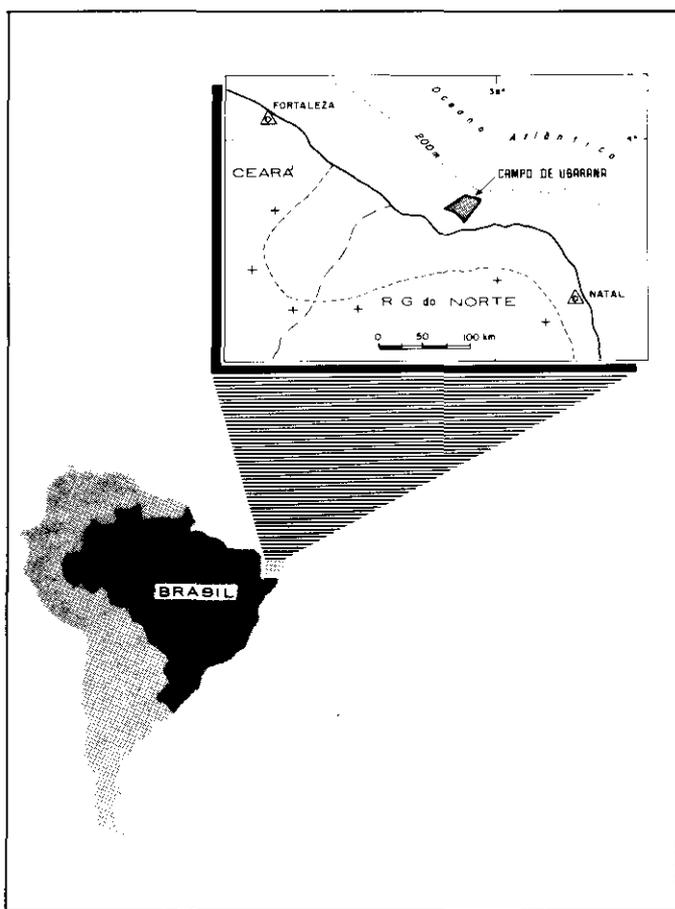


Fig. 1 - Mapa de localização do Campo de Ubarana.  
Fig. 1 - Location map, Ubarana field.

bastante ineficaz visto não serem calculados elevados valores de saturação de água. Isto se deve ao baixo contraste de resistividade entre os intervalos efetivamente portadores de água e aqueles potencialmente produtores de hidrocarbonetos. Vários fatores têm sido apontados como possíveis causadores destas baixas resistividades: presença de argilominerais, elevada saturação de água irreduzível, invasão profunda e pirita finamente disseminada.

Inúmeras tentativas foram feitas para solucionar o problema. Desde o modelo pioneiro de Archie (1942), passando pelas equações de Waxman & Smits (1968) e Juhász (1981), até mais recentemente o desenvolvimento do modelo de Givens & Schmidt (1988), os resultados obtidos não foram totalmente satisfatórios. Na verdade, o que se observa na bibliografia é a apresentação de equações e/ou métodos qualitativos que apenas auxiliam na identificação de intervalos com baixo contraste de resistividade, aparentemente portadores de hidrocarbonetos.

Este trabalho baseia-se na análise de perfis geofísicos de poços, onde foram identificados reservatórios como sendo prováveis produtores de hidrocarbonetos, que apresentam baixo contraste de resistividade, e a correlação com dados de testemunhos. Foram também utilizados resultados de teste de formação a

poço aberto e/ou revestido, e o histórico de produção dos poços analisados.

## 2 – RESERVATÓRIOS

Foram identificados, no Campo de Ubarana, reservatórios com baixas resistividades, aparentemente portadores de hidrocarbonetos, nas zonas F, G/H e J, no Membro Upanema da Formação Alagamar. Neste estudo faz-se referência apenas às zonas F e G/H, pois só nestas há maior disponibilidade de testemunhos e histórico de produção dos poços estudados.

### 2.1 – Zona F

Os principais reservatórios da seção superior da Zona F são depósitos de tração e suspensão de origem deltaica, constituídos por uma seqüência de arenitos, siltitos e folhelhos, com predominância de arenitos finos a médios, geralmente bem selecionados. O cimento mais freqüente é constituído por argilominerais, principalmente caulinita. Nesta seção, os reservatórios produtores de hidrocarbonetos apresentam valores de resistividade da ordem de 10 ohm-m.

Na seção inferior predominam depósitos de tração e tração-bioturbação relacionados a canais estuários. Os principais tipos litológicos são conglomerados e arenitos com raras intercalações de folhelhos. Geralmente, os conglomerados são pobremente selecionados e praticamente sem matriz, contendo aproximadamente 20% de fragmentos de rochas ígneas e metamórficas, além de fragmentos de folhelhos e concreções de pirita. A cimentação compreende minerais de argila, principalmente illita-smectita. Neste intervalo, ocorrem reservatórios com baixas resistividades, supostamente com potencial para a produção de hidrocarbonetos.

### 2.2 – Zona G/H

Esta zona compreende o sistema de plataforma carbonática, constituída por coquinas de pelecípodes, folhelhos esverdeados com nódulos de calcita e intercalações de arenitos muito finos a médios. A cimentação é formada principalmente por argilominerais, ocorrendo também raras concreções de calcita e/ou dolomita. Nesta seção, também foram identificados arenitos com baixas resistividades, menores ou iguais a 2,5 ohm-m e, supostamente, portadores de hidrocarbonetos, bem caracterizados no poço C.

### 2.3 – Distribuição das Argilas

Os reservatórios da seção inferior das zonas F e G/H, onde ocorrem resistividades anormalmente baixas, compõem-se de arenitos diageneticamente alterados pela precipitação, principalmente, de minerais de argilas dentro do sistema poroso. Estes argilominerais desenvolveram-se revestindo e/ou preenchendo os poros, controlando as propriedades físicas e eletro-

químicas da rocha, em virtude de suas altas áreas específicas. O desenvolvimento desta área superficial específica é a principal dificuldade na avaliação destes reservatórios, utilizando-se medidas de perfis.

Os resultados da análise de microfotografias obtidos por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) e de difratometria de raios X de 47 amostras dos poços A, B e C no Campo de Ubarana, realizada pelo Centro de Pesquisas da PETROBRÁS – CENPES, mostram a presença de caulinita, interestratificados de illita-esmectita, illita e clorita (tabela 1).

A caulinita está presente preenchendo total ou parcialmente os poros (foto 1), formando microporosidades espacialmente isoladas, e sob a forma de lamelas associadas a outros argilominerais. Tem origem na alteração total ou parcial de feldspatos, e sua presença é mais marcante nos reservatórios da porção superior da Zona F (em média 56,75% dos argilominerais presentes), diminuindo para 30% nos reservatórios da

seção inferior e para 20,5% na Zona G/H. Os interestratificados de illita-esmectita contêm de 30 a 40% de esmectita, e apresentam-se como filmes relativamente contínuos sobre a superfície livre dos grãos (foto 2), formando abundante microporosidade. Ocorrem com maior frequência (52,5% dos argilominerais presentes) nos reservatórios inferiores da Zona F. A clorita ocorre recobrendo os grãos e também como alteração de fragmentos detríticos. Sua maior frequência é observada nos reservatórios da Zona G, onde têm um valor médio de 51%. A illita ocorre associada à illita-esmectita, e às vezes com a clorita. Sua presença é mais comum nos reservatórios da Zona G/H, onde têm, em média, 15%.

### 3 – MODELO PROPOSTO

De acordo com os resultados da análise de lâminas delgadas, das microfotografias e da difratometria de raios X, pode-se admitir que nos arenitos argilosos com baixas resistividades ( $R_t$ ), nas zonas F e G/H, a condução da corrente elétrica no espaço poroso

TABELA I/ TABLE I

SUMÁRIO DA MINERALOGIA DAS ARGILAS.  
OS VALORES CORRESPONDEM À PERCENTAGEM DOS  
ARGILOMINERAIS DEFINIDOS POR DIFRAÇÃO DE  
RAIOS X

SUMMARY OF CLAY MINERALOGY. VALUES  
CORRESPOND TO PERCENTAGE OF CLAY MINERALS  
AS DEFINED BY X-RAY DIFFRACTION

VALORES MÉDIOS (%)

ZONA		POÇOS			Média dos Poços
		A	B	C	
F (SUP)	CAU	57,5	56,0		56,75
	CLO	TRAÇOS	TRAÇOS		TRAÇOS
	ILI	10,0	7,5		8,75
	ILI/ES	32,5	36,5		34,5
F (INF)	CAU	28,0	32,0		30,0
	CLO	15,0	TRAÇOS		7,5
	ILI	10,0	10,0		10,0
	ILI/ES	47,0	58,0		52,5
G/H	CAU			20,5	20,5
	CLO			51,0	51,0
	ILI			15,0	15,0
	ILI/ES			13,5	13,5

#### LEGENDA

CAU = Caulinita      ILI = Illita  
CLO = Clorita      ILI/ES = Illita / Esmectita

FONTE: PETROBRÁS / CENPES

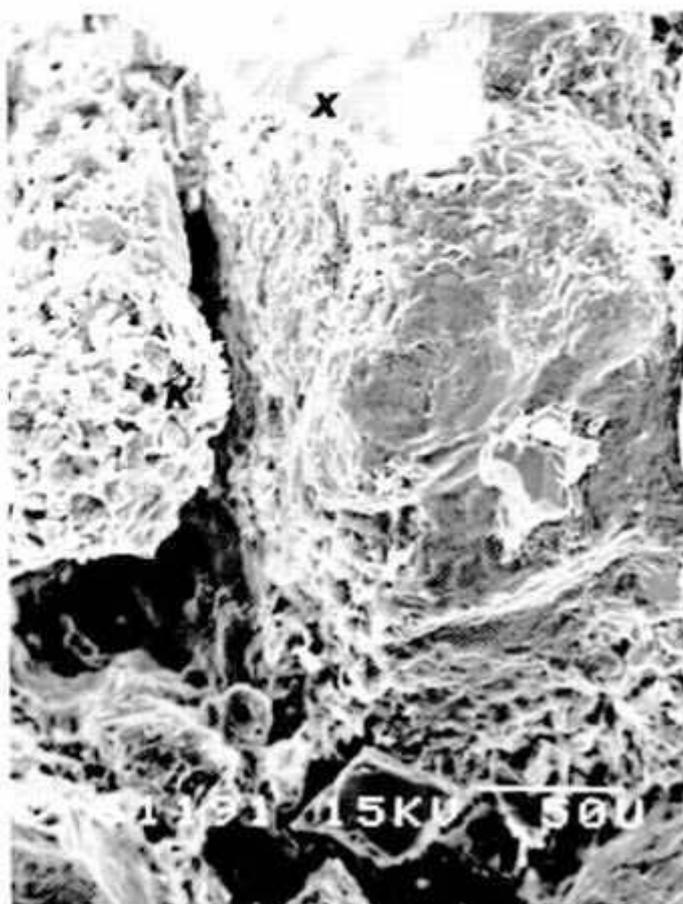


Foto 1 - Detalhe dos poros e da caulinita na superfície dos grãos como provável alteração de feldspato (K), e clorita capeando grão fragmentado (X) na Zona F (Castro et al. 1981).

Photo 1 - Detailed view of pores and of kaolinite on grain surface, the latter a probable alteration from feldspar (K). Also shows chlorite coating fragmented grain (X) in Zone F (Castro et al. 1981).

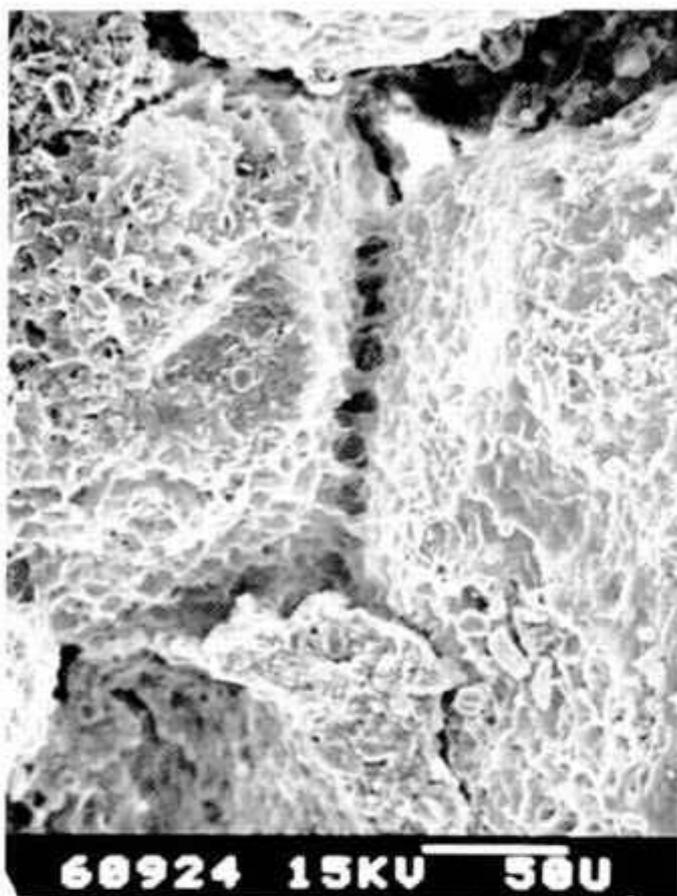


Foto 2 - Grãos recobertos com argila do tipo illita-smectita formando "pontes". Nota-se a presença de lamelas de caulinita associada na Zona G/H (Pimentel e Cordeiro, 1984).

Photo 2 - Grains covered with illite-smectite clay, forming bridges. Observe the presence of associated kaolinite lamellae in Zona G/H (Pimentel and Cordeiro, 1984).

intergranular pode-se dar pelo mecanismo proposto por Archie (1942), através do mecanismo de troca catiônica de Waxman & Smits (1968), e através da estrutura microporosa das argilas existentes sobre os grãos da matriz, isto é, pelo mecanismo de condução de Givens (1987).

O modelo proposto é aqui desenvolvido a partir de uma combinação dos modelos mencionados (fig. 2), e que pode ser usado para descrever o comportamento elétrico destes reservatórios.

O modelo de Waxman & Smits (1968) para argilas dispersas é expresso por:

$$\frac{1}{R_t} = S_{wt}^n \cdot PHIT^m \cdot \left( \frac{1}{R_w} + \frac{B \cdot Q_v}{S_{wt}} \right) \quad (1)$$

onde:

- $S_{wt}$  = saturação de água na rocha;
- PHIT = porosidade total da rocha;
- $R_w$  = resistividade da água da formação;
- $n$  = coeficiente de saturação;
- $m$  = expoente de cimentação;

$Q_v$  = capacidade de troca catiônica por unidade volume total de poros, em meq/cm<sup>3</sup> (determinado em laboratório); e

$B$  = condutância equivalente dos cátions trocáveis (Na<sup>+</sup>), em mho.m<sup>-1</sup>/meq.cm<sup>3</sup>.

Uma suposição básica feita por Waxman & Smits (1968) no desenvolvimento do seu modelo afirma que a condutância resultante dos íons adsorvidos percorre a mesma trajetória atribuída aos íons da água livre ou intersticial dos poros. Portanto, os íons adsorvidos são compelidos para serem adicionados aos íons em solução no sistema poroso intergranular, pelo processo de troca catiônica e/ou por ionização. Deste modo, o modelo descreve um sistema constituído por um capacitor (íons resultantes da troca catiônica ou adsorvidos às argilas) em série com os íons do fluido contido no espaço poroso intergranular.

O termo  $B \cdot Q_v$  quantifica a condutância (em mmhos) por unidade de volume poroso (C/PHIT), ao qual se deve a troca catiônica. O termo  $B \cdot Q_v / S_{wt}$  quantifica a condutância por unidade de volume de água. O primeiro é simplesmente a equação de Archie, que representa a componente da condutividade resultante do fluido do espaço poroso intergranular (independente, portanto, da troca catiônica), ao passo que o segundo descreve a condutância dos cátions trocáveis.

Givens (1987) descreveu um modelo cuja matriz da rocha conduz a corrente elétrica, através de uma rede contínua de microcorpos, formada pelos argilo-minerais autigênicos dispostos sobre a superfície dos grãos da matriz. Este fato ocasiona uma condução adicional àquela devido ao fluido livre do espaço poroso interconectado (PHI), cujas trajetórias estariam em paralelo. O seu modelo é dado por:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{S_w^n \cdot PHIM^m}{R_w} + \frac{1}{R_r} \quad (2)$$

onde:

$R_r$  = resistividade da matriz, incluindo a água adsorvida às argilas por capilaridade, e/ou eventualmente a minerais condutivos.

Considerando que Givens não faz referência à correção para o volume do espaço microporoso associado às argilas, e que nos reservatórios em estudo não existem outros minerais condutivos na matriz em proporções capazes de afetar suas propriedades elétricas, substituiu-se, na equação 2, o parâmetro  $R_r$  pelo termo  $R_{sh}/V_{sh}$ , objetivando efetuar a referida correção. Deste modo, tem-se:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{S_w^n \cdot PHIM^m}{R_w} + \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \quad (3)$$

onde:

$R_{sh}$  = resistividade da argila;

$V_{sh}$  = volume da argila.

Combinando a equação 1 com a 3, obtém-se:

$$\frac{1}{R_t} = S_w^n \cdot PHIT^m \cdot \left( \frac{1}{R_w} + \frac{B \cdot Q_v}{S_{wt}} \right) + \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \quad (4)$$

O conceito de  $Q_v$  normalizado ( $Q_{vn}$ ) foi introduzido por Juhász (1981), para substituir o termo  $BQ_v$  da equação de Waxman & Smits por valores obtidos a partir de perfis geofísicos de poços.

Segundo Juhász (1981),  $B \cdot Q_{vsh}$  é a diferença entre a condutividade aparente da água da argila ( $C_{wash}$  a  $S_{wt} = 100\%$ ) e a da água da formação ( $C_w$ ). Deste modo,  $BQ_v$  para um arenito argiloso pode ser expresso por:

$$B \cdot Q_v = Q_{vn} \cdot B \cdot Q_{vsh} = Q_{vn} \cdot (C_{wash} - C_w) \quad (5)$$

Substituindo o termo  $B \cdot Q_v$  da equação 5 na 4, e reorganizando em termos de resistividade, obtém-se:

$$\frac{1}{R_t} = S_{wt}^n \cdot PHIT^m \cdot \left[ \frac{1}{R_w} + \frac{Q_{vn}}{S_{wt}} \cdot \left( \frac{1}{R_{wash}} - \frac{1}{R_w} \right) \right] +$$

$$+ \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \quad (6)$$

ou ainda, na forma familiar da equação de saturação de Archie:

$$S_{wt}^n = \frac{R_{we}}{PHIT^m \cdot R_t} \quad (7)$$

onde:

$$R_{we} = \left[ \frac{(R_{sh} - R_t \cdot V_{sh}) \cdot S_{wt} \cdot R_{wash} \cdot R_w}{R_{sh} \cdot R_{wash} \cdot (S_{wt} - Q_{vn}) + R_{sh} \cdot Q_{vn} \cdot R_w} \right]$$

## 4 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 – Análise da Validade da Equação Proposta

Está sendo proposta para o cálculo da saturação de água em reservatórios argilosos do Campo de Ubarana, zonas F e G/H da Formação Alagamar, a equação 6, cujo uso em reservatórios argilosos, comprovadamente produtores de água, produziu valores de saturação de água ( $S_w$ ) plenamente satisfatórios, isto é, em torno de 100%.

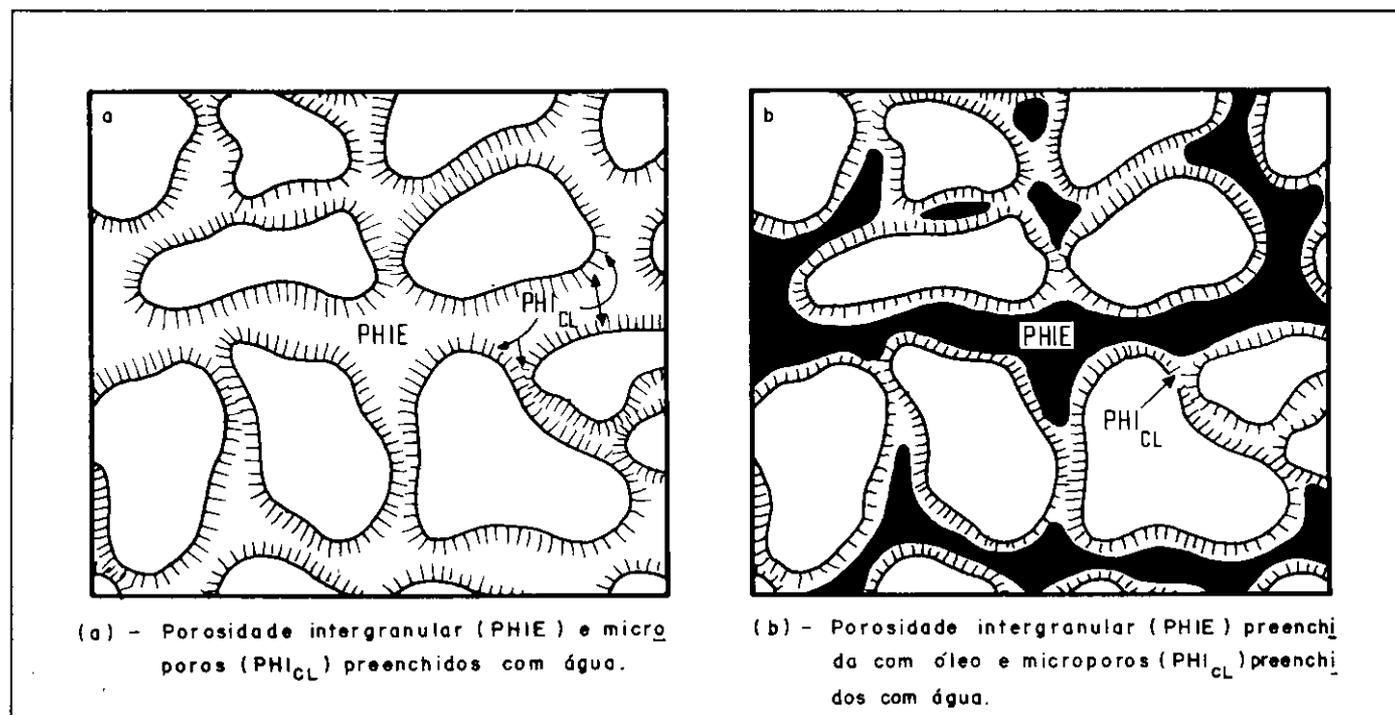


Fig. 2 - Modelo esquemático de um reservatório com dois tipos de espaço poroso, que podem ter diferentes propriedades elétricas, e estão eletricamente em paralelo (adaptado de Givens e Schmidt, 1988).

Fig. 2 - Schematic model of reservoir displaying two types of pore space, which may have different electrical properties and are in parallel electrically (adapted from Givens and Schmidt, 1988).

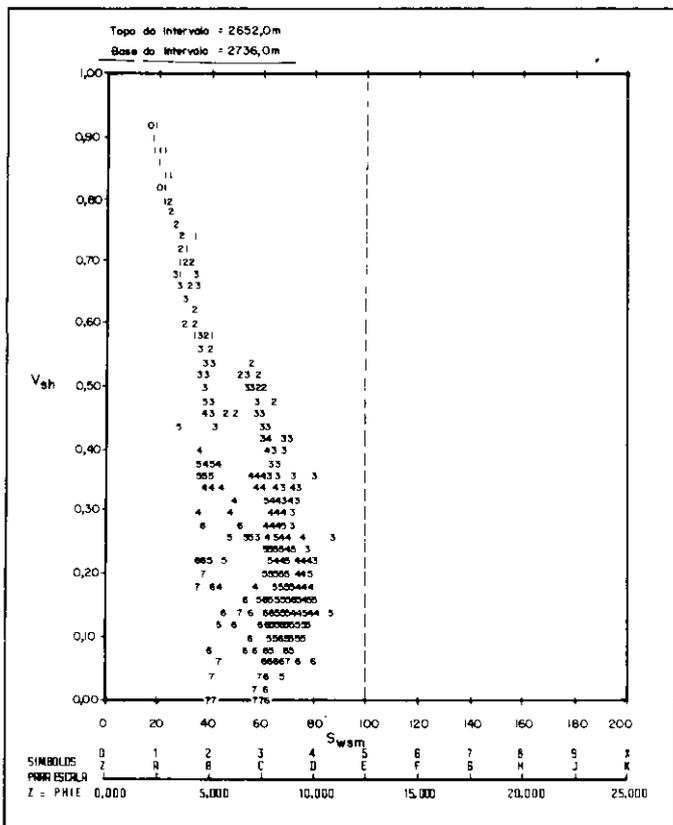


Fig. 3 - Resposta do modelo de Simandoux modificado ( $S_{WSM}$ ) frente a um intervalo portador de água e com argilosidade variando de 0 a 100%.

Fig. 3 - Application of modified Simandoux model ( $S_{WSM}$ ) to a water-bearing interval displaying 0% to 100% clay content.

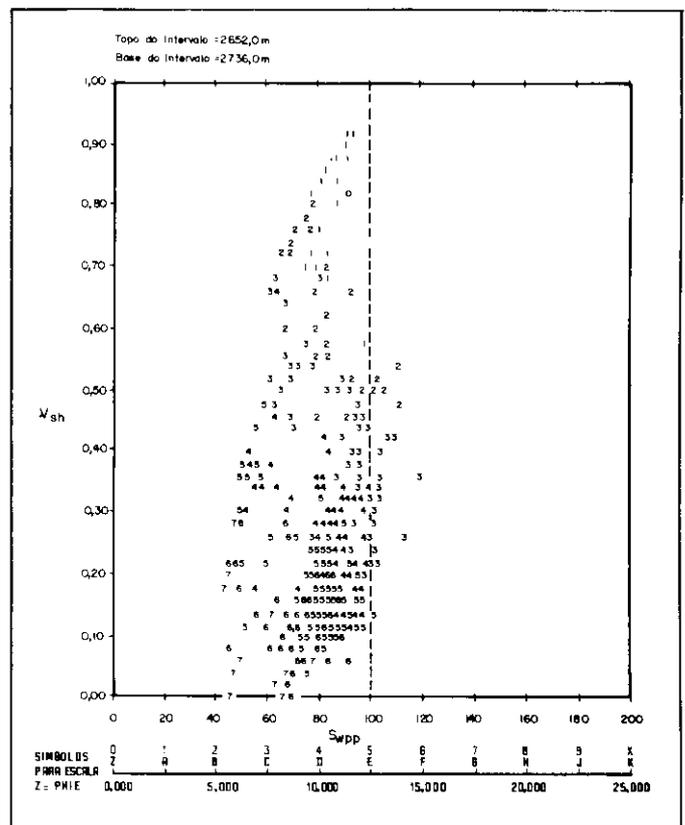


Fig. 4 - Resposta do modelo proposto ( $S_{WPP}$ ) frente a um intervalo portador de água e com argilosidade variando de 0 a 100%.

Fig. 4 - Application of proposed model ( $S_{WPP}$ ) to a water-bearing interval displaying 0% to 100% clay content.

As figuras 3 e 4 apresentam gráficos de  $V_{sh}$  versus  $S_w$  versus PHIE, que representam a maneira mais adequada para a comparação do comportamento entre as várias equações existentes e a proposta.

Na figura 3, apresentam-se os valores de saturação de água calculados utilizando-se a equação de Simandoux Modificada ( $S_{WSM}$ ). Observa-se que os valores de  $S_{WSM}$  são extremamente otimistas e apresentam uma nítida tendência de diminuição com o aumento da argilosidade. Esta mesma tendência também pode ser observada quando se calculam saturações com as equações de Simandoux (1963), Simandoux Modificada e da Indonésia.

Por outro lado, observou-se que saturações de água calculadas com as equações das "argilas dispersas", "duas águas" e Waxman & Smits apresentam muitos valores que excedem à 100%, indicando uma superestimativa dos mesmos. Espalhamento menos significativo pode ser observado na figura 4, onde foi usada a equação proposta ( $S_{WPP}$ ). Deste modo, pode-se dizer que a resposta da equação proposta, para intervalos argilosos, é mais compatível com os resultados práticos, sendo, portanto, de aplicação confiável.

#### 4.1.1 - Intervalos Portadores de Hidrocarbonetos

A seção superior da Zona F, produtora de óleo, apresenta-se com resistividades da ordem de 10 ohm-m, e com os mesmos argilominerais da seção inferior com baixas resistividades (tabela I). Neste intervalo, observa-se que os valores de saturação calculados a partir da equação proposta estão dentro da mesma amplitude de variação de valores definidos para as demais equações.

Na figura 5 apresenta-se a comparação entre as saturações de água calculadas com a equação proposta ( $S_{WPP}$ ) versus a de Waxman & Smits ( $S_{WWS}$ ). Observa-se claramente que os valores de saturação calculados a partir da equação de Waxman & Smits mostram-se superestimados, principalmente para altas saturações de água e argilosidade, o mesmo ocorrendo para equações similares. Já os valores de saturação de água calculados com as equações de "duas águas" e "argilas dispersas" mostram-se subestimados.

#### 4.1.2 - Intervalos com Baixas Resistividades

A resposta da equação proposta para intervalos argilosos com baixos valores de resistividade, suposta-

mente produtores de hidrocarbonetos, está dentro de uma amplitude de valores calculados para as demais equações. Observa-se que os valores de saturações de água são sempre superiores a 50%, onde as saturações mais baixas correspondem às porosidades mais elevadas.

A comparação entre a resposta do modelo proposto e a do modelo de Waxman & Smits é mostrada na figura 6. Os valores de saturação de água calculados com a equação de Waxman & Smits ( $S_{WWS}$ ) são ligeiramente superestimados em relação à equação proposta ( $S_{WPP}$ ), ao passo que os valores calculados por meio das equações para "argila dispersa" e "duas águas" são subestimados. A melhor correlação entre os valores de saturação de água verifica-se para aqueles calculados com a equação proposta e a de Waxman & Smits, cujo coeficiente de correlação é igual a 0,98.

A comparação do comportamento quantitativo das saturações de água calculadas com a equação proposta (figs. de 7 a 9) mostra que as baixas resistividades observadas nas bases das zonas F e G/H sugerem intervalos subsaturados de hidrocarbonetos, elimi-

nando-se, desta forma, a hipótese de serem resultantes de elementos matriciais condutivos.

#### 4.2 – Análise da Ocorrência de Invasão Profunda

Para que se pudesse analisar a ocorrência de invasão profunda nos intervalos de baixas resistividades, estudou-se, além dos dados de produção diária de cada poço, a mobilidade dos fluidos dentro das rochas-reservatório, de acordo com Fertl (1981).

A mobilidade de fluidos na zona lavada pode ser caracterizada por uma relação denominada equação da mobilidade, do tipo:

$$\left(\frac{S_w}{S_{XO}}\right)^n = \frac{R_{XO}}{R_t} \cdot \frac{R_w}{R_{mf}} \quad (8)$$

que pode ser simplificada em  $S_{XO} = b \cdot S_w^X$ ,

onde:

$S_{XO}$  = saturação de filtrado na zona lavada;

$R_{XO}$  = resistividade na zona lavada;

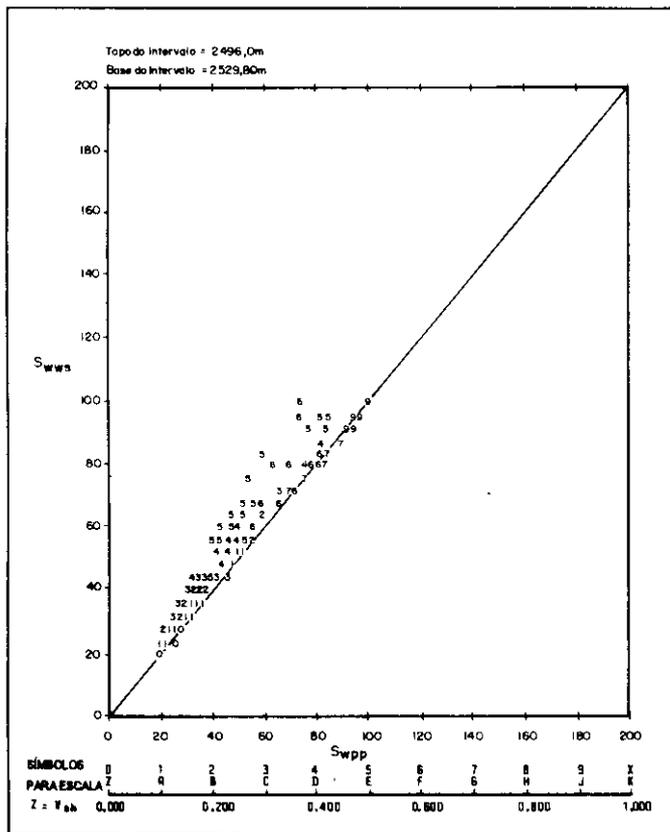


Fig. 5 - Comparação entre os valores de saturação de água calculados com a equação proposta ( $S_{WPP}$ ) e a de Waxman & Smits ( $S_{WWS}$ ).

Fig. 5 - Comparison of water-saturation values calculated according to proposed equation ( $S_{WPP}$ ) and to Waxman-Smits equation ( $S_{WWS}$ ).

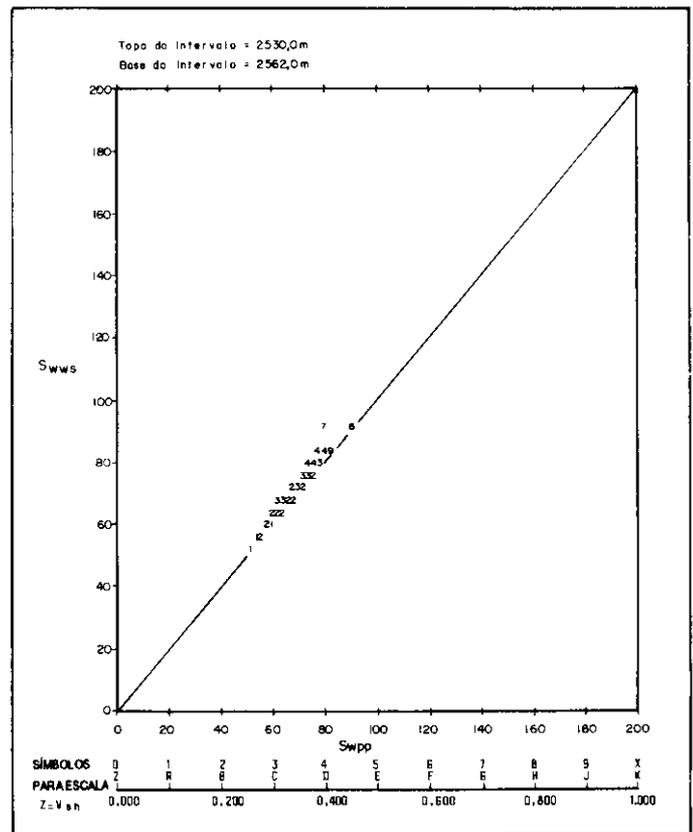


Fig. 6 - Comparação entre os valores de saturação de água calculados com a equação proposta ( $S_{WPP}$ ) e a de Waxman & Smits ( $S_{WWS}$ ). Base da Zona F em intervalo argiloso com baixos valores de resistividade.

Fig. 6 - Comparison of water-saturation values calculated according to proposed equation ( $S_{WPP}$ ) and to Waxman-Smits equation ( $S_{WWS}$ ). Base of Zone F, argillaceous interval displaying low resistivity.

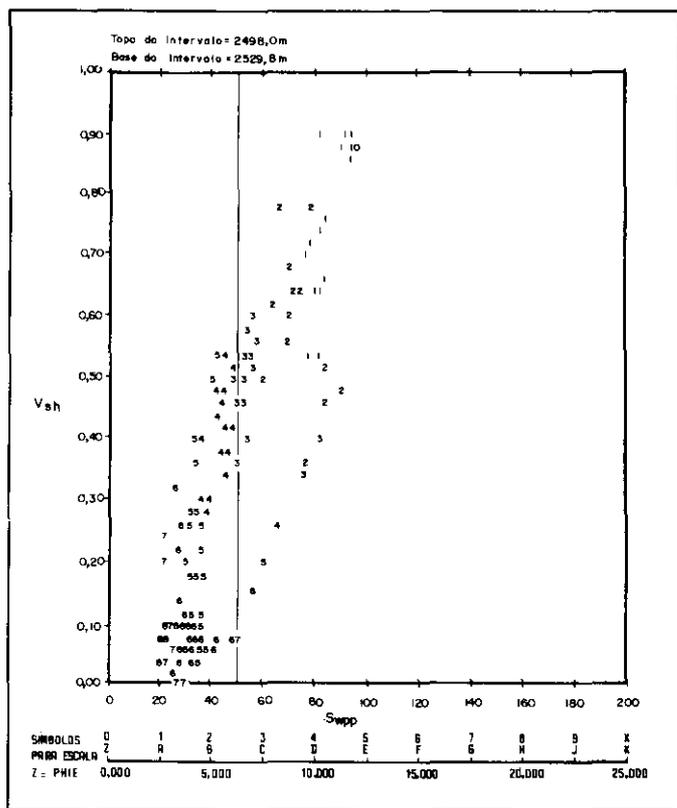


Fig. 7 - Resposta do modelo proposto na seção superior da Zona F, em intervalo argiloso com resistividades normais, produtor de óleo.

Fig. 7 - Application of proposed model in upper section of Zone F. Argillaceous, oil-producing interval displaying normal resistivity.

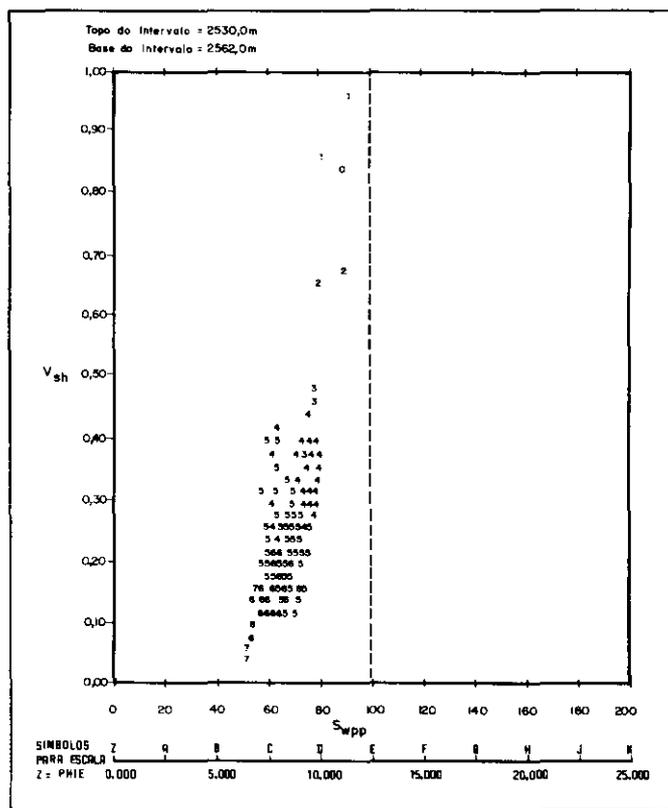


Fig. 8 - Resposta do modelo proposto na seção inferior da Zona F, em intervalo argiloso com baixos valores de resistividade.

Fig. 8 - Application of proposed model in lower section of Zone F. Argillaceous interval displaying low resistivity.

$R_{mf}$  = resistividade do filtrado do fluido de perfuração, que preenche a zona lavada; e,  
b e x = parâmetros que relacionam  $R_{XO}$ ,  $R_t$ ,  $R_{mf}$ ,  $R_w$  e litologia.

#### 4.2.1 - Zona F

Na figura 10 é apresentada a relação entre  $\log R_t$  e  $\log R_{XO}$ , e na figura 11, a relação entre  $\log S_w$  e  $\log S_{XO}$ , para a zona F. Observa-se, na figura 10, que os valores de  $R_t$  são aproximadamente iguais aos de  $R_{XO}$ . Este fato indica a possibilidade da ocorrência de duas situações distintas: 1 - invasão profunda, onde as medidas de resistividade ( $R_t$ ) estão fortemente influenciadas pela resistividade da zona lavada ( $R_{XO}$ ); ou, 2 - invasão rasa ou nula; com as ferramentas de investigação rasa e profunda registrando os valores de resistividade verdadeira da formação ( $R_t$ ). Na figura 11, apresenta-se uma baixa eficiência de fluxo neste intervalo, caracterizando pouco deslocamento fluido ou ocorrência de invasão nula. Deste modo, prevalece a segunda hipótese, onde as ferramentas de investigação rasa e profunda estão lendo  $R_t$  e não  $R_{XO}$ .

Deste modo, a análise das figuras 10 e 11 sugere

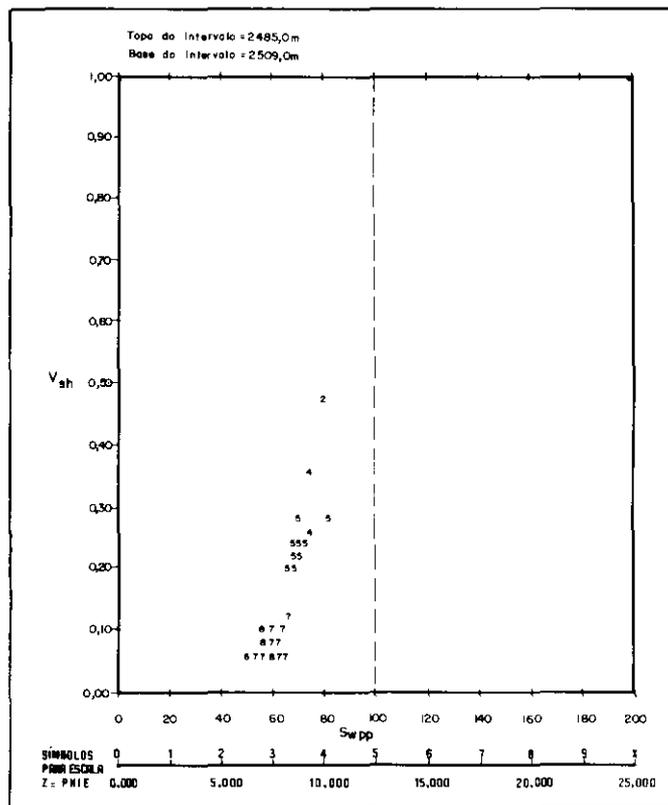


Fig. 9 - Resposta do modelo proposto na seção inferior da Zona G/F, em intervalo argiloso com baixos valores de resistividade.

Fig. 9 - Application of proposed model in lower section of Zone G/F. Argillaceous interval displaying low resistivity.

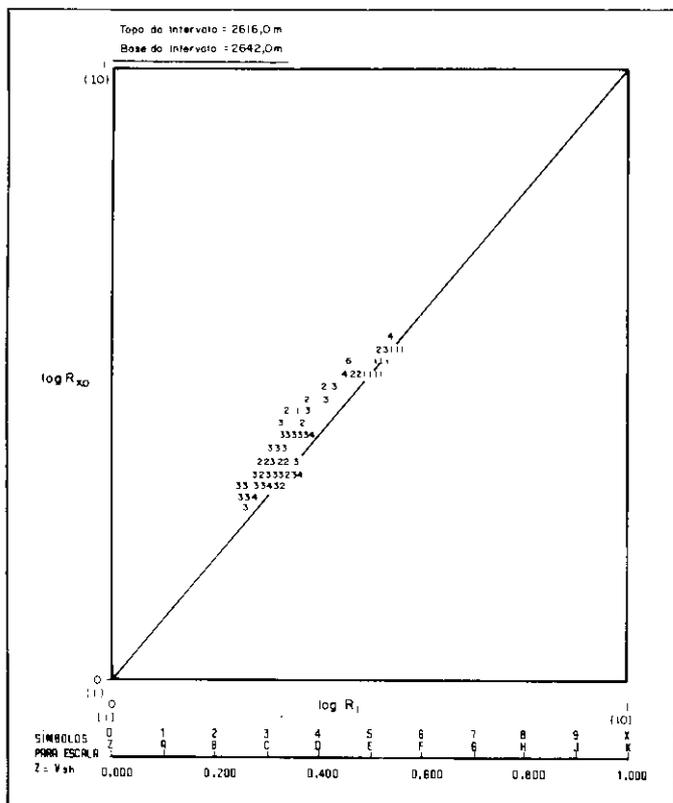


Fig. 10 Gráfico de  $\log R_t$  versus  $\log R_{XO}$  para auxiliar na caracterização de fluidos do reservatório. Intervalo argiloso com baixos valores de resistividade, aparentemente subsaturado por hidrocarbonetos, na base da Zona F.

Fig. 10 -  $\log R_t \times \log R_{XO}$  cross-plot to aid in characterization of reservoir fluids. Argillaceous interval displaying low resistivity, apparently undersaturated with hydrocarbons, at base of Zone F.

que as baixas resistividades registradas na seção inferior da Zona F, aparentemente portadoras de hidrocarbonetos, devem-se principalmente ao fato de o intervalo ser subsaturado de óleo ( $S_w$  maior que 55%), uma vez que a água intersticial constitui a fase contínua para o desenvolvimento da corrente elétrica.

#### 4.2.2 - Zona G/H

A análise dos fluidos recuperados na Zona G/H, em diferentes amostragens realizadas no intervalo 2 481,0 a 2 502,0 m do poço C, mostrou que o mesmo produziu inicialmente óleo, e, logo após, sucessivamente, uma mistura de água da formação e fluido de completação; uma mistura de água da formação e filtrado da lama de perfuração; e, finalmente, água da formação.

O gráfico  $\log R_t$  versus  $\log R_{XO}$ , para este intervalo (fig. 12), define claramente uma linha de água ( $S_w = 100\%$ ). Observa-se, também, que a maioria dos pontos está situada entre as retas definidas pelas relações  $S_{XO} = b.S_w^x$  e  $R_t = R_{XO}$ , sendo que a última caracteriza a presença de hidrocarbonetos para os pontos situados à sua direita. Já o gráfico  $\log S_w$  ver-

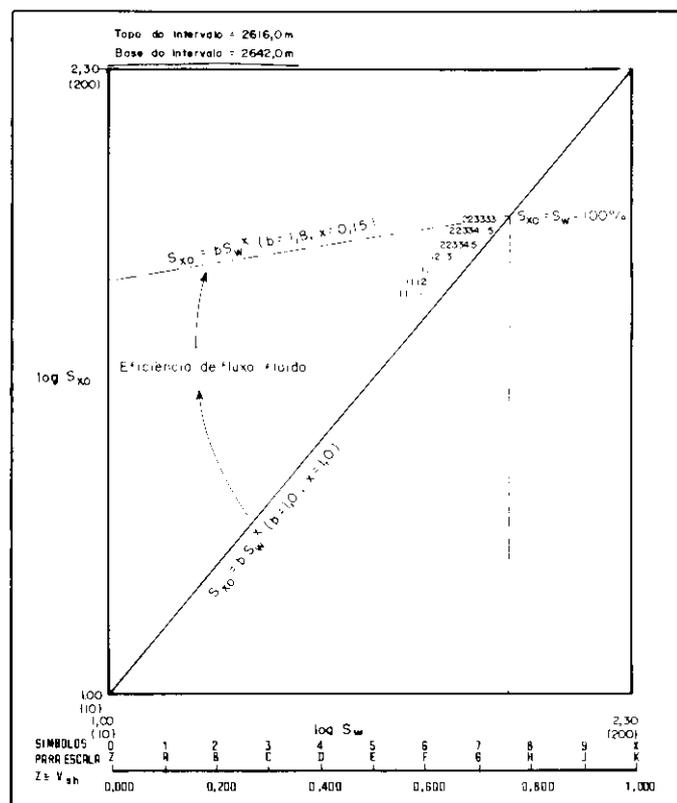


Fig. 11 - Gráfico de  $\log S_w$  versus  $\log S_{XO}$  para auxiliar na caracterização da eficiência de fluxo fluido na rocha. Intervalo argiloso com baixos valores de resistividade, aparentemente subsaturado por hidrocarbonetos, na base da Zona F.

Fig. 11 -  $\log S_w \times \log S_{XO}$  cross-plot to aid in characterization of fluid-flow efficiency in the reservoir rock. Argillaceous interval displaying low resistivity, apparently undersaturated with hydrocarbons, at base of Zone F.

sus  $\log S_{XO}$  (fig. 13) define em sua bissetriz um ponto de água ( $S_w = S_{XO} = 100\%$ ), e na reta  $S_{XO} = b.S_w^x$ , o limite máxima da invasão do filtrado e, conseqüentemente, da eficiência da invasão ou de fluxo fluido no reservatório.

O comportamento de produção do poço, com percentagem de água crescente em relação ao tempo (de 4% até 100% de água), e a análise das figuras 12 e 13 sugerem também que o intervalo se caracteriza muito mais por apresentar uma subsaturação de óleo do que por uma possível ocorrência de invasão profunda. Esta subsaturação poderá ser uma das causas das baixas resistividades desta zona, sendo a água a fase contínua.

## 5 - CONCLUSÕES

Desenvolveu-se um modelo de avaliação quantitativa para arenitos argilosos, com base na bibliografia e na forma de ocorrência dos argilominerais dentro dos poros das rochas-reservatório.

Na Zona F, tanto nos reservatórios superiores, quanto nos inferiores, onde ocorrem as baixas resistividades, foram constatados os mesmos tipos de argi-

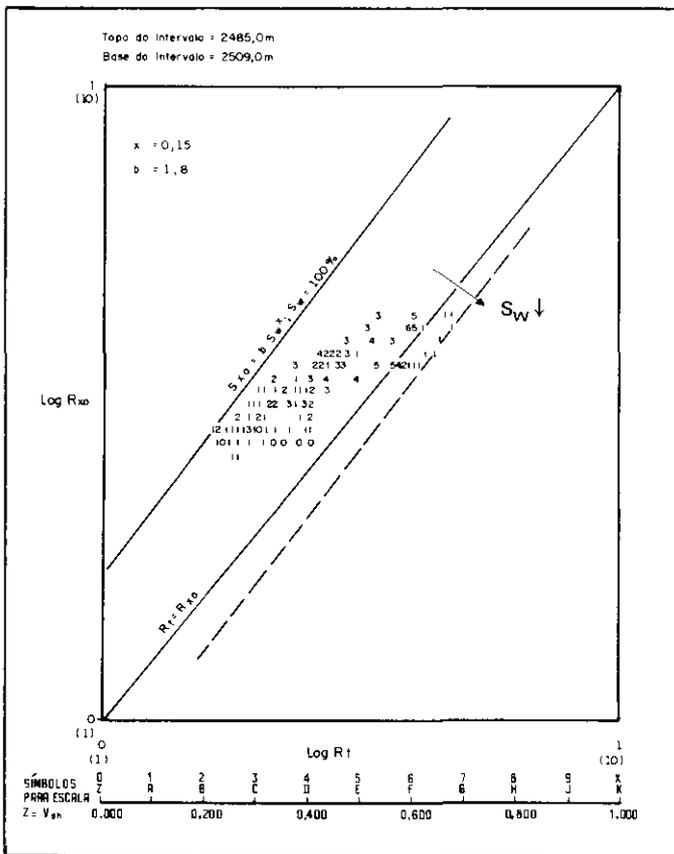


Fig. 12 - Gráfico de  $\log R_t$  versus  $\log R_{xo}$  para auxiliar na caracterização de fluidos do reservatório. Intervalo argiloso com baixos valores de resistividade. A saturação de água ( $S_w$ ) diminui no sentido da seta, na base da Zona G/F.

Fig. 12 -  $\log R_t \times \log R_{xo}$  cross-plot to aid in characterization of reservoir fluids. Argillaceous interval displaying low resistivity. Water saturation ( $S_w$ ) decreases in direction of arrow, at base of Zone G/F.

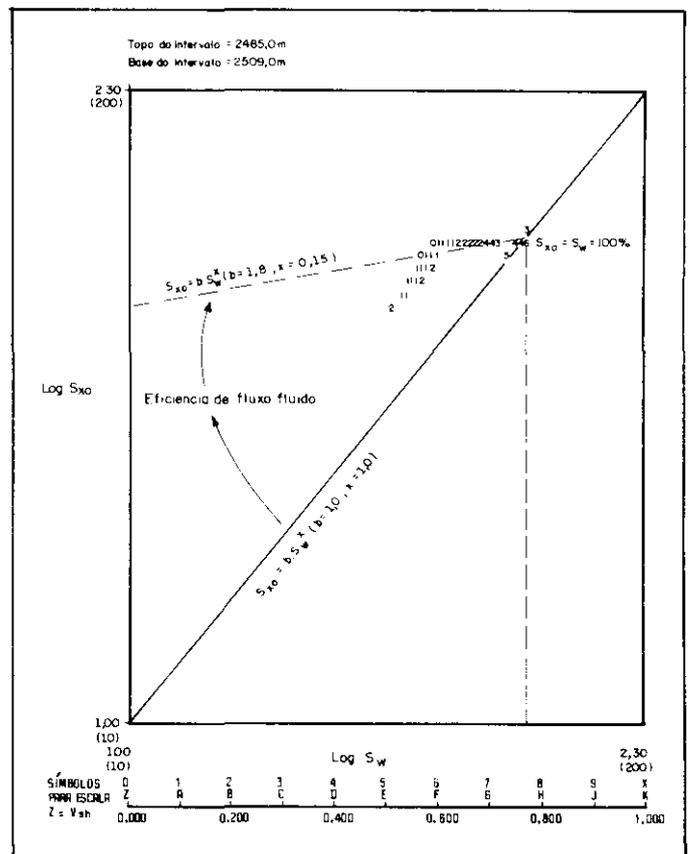


Fig. 13 - Gráfico de  $\log S_w$  versus  $\log S_{xo}$  para auxiliar na caracterização da eficiência de fluxo fluido na rocha. Intervalo argiloso com baixos valores de resistividade, na base da Zona G/H.

Fig. 13 -  $\log S_w \times \log S_{xo}$  cross-plot to aid in characterization of fluid-flow efficiency in the reservoir rock. Argillaceous interval displaying low resistivity, at base of Zone G/H.

lominerais, diferenciando-se apenas nas proporções volumétricas relativas de cada um. Os mesmos argilo-minerais ocorrem, ainda, na seção inferior na Zona G/H, também com baixas resistividades.

Os valores de saturação de água calculados com as equações de Simandoux modificado e similares, são bastante otimistas, e apresentam nítida tendência de diminuição com o aumento da argilosidade. Este fato justifica a não utilização destas equações, no Campo de Ubarana, em qualquer tipo de análise quantitativa de hidrocarbonetos mais criteriosa.

A correlação entre as saturações de água calculadas com o modelo proposto, e outros que utilizam o conceito de capacidade de troca catiônica, mostrou menor dispersão em valores absolutos, em intervalos portadores de água. Para os intervalos produtores de óleo, a equação proposta apresenta-se mais otimista. Idêntico comportamento pode ser observado naqueles intervalos com baixas resistividades.

A melhor correlação de valores ocorre entre a equação proposta e a de Waxman & Smits, sendo o coeficiente de correlação da ordem de 0,98.

Afasta-se a possibilidade da ocorrência de inva-

são profunda nos reservatórios da base da Zona F, pois não foi identificado filtrado (do fluido de completação e/ou perfuração), em testes realizados em poço aberto e/ou revestido.

A análise dos gráficos  $\log R_{xo}$  versus  $\log R_t$  e  $\log S_{xo}$  versus  $\log S_w$ , dos diagramas de Stiff (1951), além do histórico de produção dos poços estudados, sugere que as baixas resistividades registradas nas bases das zonas F e G/H, aparentemente portadoras de hidrocarbonetos, são devidas, principalmente, ao fato de aqueles intervalos serem subsaturados de óleo, sendo a água a fase contínua. Este fato vem corroborar os valores de saturação de água calculados, bem como as demais equações que utilizam o conceito de que as argilas contribuem com uma parcela extra na condutividade final da rocha.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCHIE, G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristic. *Transactions of the American Institute of Mining Engineers*, London, v. 146,

- p. 54-62, 1942.
- CASTRO, J. C. de, BARROCAS, S. L. S., CRUZ, W. M. *Fácies, diagênese e reservatórios do Campo de Ubarana*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS / CENPES / LABOR, 1981, Relatório técnico.
- FERTL, W. H. Openhole crosspot concepts: a powerful technique in wels log analysis. *Journal of Petroleum Technology*, Dallas, mar. 1981.
- GIVENS, W. W. A conductivity rock matrix model for the analysis of low-contrast resistivity formation. *The Log Analyst*, v. 28, n. 2, p. 138-151, 1987.
- GIVENS, W. W., SCHMIDT, F. J. A generic electrical conduction model for low-contrast resistivity sandstones. In: ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 29, 1988. London. *Transactions...* London: Society of Professional Well Log Analysts, 1988.
- JUHÁSZ, I. Normalize Qv the key to sholy sand evolution using the Waxman-Smits equation in alsence of core data. In: ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 22, 1981. Mexico City. *Transactions...* London: Society of Professional Well Log Analysts. 1981.
- OKADA, A. H. *Facies, petrographic, and engineering analysis of lower cretaceous Upanema reservoir, Ubarana field, Potiguar Basin, Brazil*. Austin: University of Texas, 1982. M. Sc. Thesis.
- PIMENTEL, A. M., CORDEIRO, C. R. *Análise ao microscópio eletrônico de varredura e ao difratômetro de raios X de amostras do poço 7-UB-47-RNS*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 1984. Relatório técnico.
- PREDA, W. N. *Campo de Ubarana. Histórico e estágio atual de desenvolvimento*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 1987. Relatório técnico.
- SIMANDOUX, P. Measures dielectriques em milieu poreux, application a mesure des saturations em eau, etude du comportement des massifs argileux. *Revue de l'Institut Francais du Petrole*, Paris, 1963. Supplementary Issue.
- STIFF, H. A. The interpretation of chemical analysis by means of patterns. *Journal of Petroleum Technology*, Dallas, v. 3, p. 15-17, 1951.
- WAXMAN, M. H., SMITS, L. T. M., Electrical conductivities in oil bearing sholy sands. *SPE Journal*, Brockfield Center, p. 107-122, june 1968.

#### EXPANDED ABSTRACT

*Based on the technical bibliography and on the study of the arrangement of clay minerals within reservoir rock pores, a new model was devised for quantitative evaluation of argillaceous sandstones. This model takes into account not only the electrolytic conductivity of the rock but also two other conductivities — one is the result of the effective contribution of the surficial conductance of the clay minerals, which increases or decreases as a function of the cation-exchange capacity of these clay minerals, whereas the other, independent and parallel, derives from the conductance that develops in a continuous microporous network which the clay minerals form over the framework of the rock. In order to test the proposed equation, a number of graphs were made for comparison with the equations and models found in the related bibliography. Correlations were found to be excellent, especially with the traditional Waxman-Smits equation. Comparing the results of the new model in three*

*different stratigraphic sections of the Alagamar formation (Ubarana field, state of Rio Grande do Norte), two of the sections display low-resistivity and are believed to contain hydrocarbons, while the other — an effective producer — displays normal resistivity. It was found that this low resistivity is a consequence of the undersaturation of the sections studied, which display less than 50% oil and relatively salty water (85 000 ppm of NaCl equivalent). This water undoubtedly contributes greatly to the low resistivity since it forms the electrically conductive phase of these sections. Considering that the Waxman-Smits equation is internationally recognized, it can be affirmed that the equation proposed herein is theoretically and practically consistent. Furthermore, in the particular case of the Ubarana field, it proved more coherent with the production history of the studied wells than did the other equations.*