

# **AVALIAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DO CAMPO DE UBARANA—RN, COM BAIXAS RESISTIVIDADES**

por

**EDUARDO MOREIRA RAMOS**

Engenheiro Geológico (Universidade Federal de Ouro Preto – 1973)

Tese submetida como requisito parcial ao grau de

**MESTRE EM CIÊNCIAS**

em

**GEOFÍSICA**

ao

Colegiado do Curso de Pós-Graduação em.

Geofísica

da

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**

Banca Examinadora :

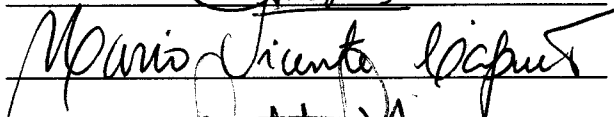
Dr. Hilton Bernard Evans (Orientador)



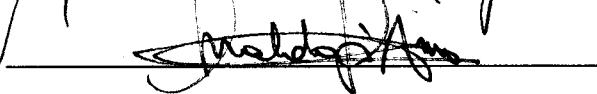
Dr. Om Prakash Verma



Dr. Mário Vicente Caputo



MC. Geraldo Girão Nery



Aprovado : 12/10/1990

**RAMOS, Eduardo Moreira. Avaliação dos Reservatórios do Campo de Ubarana – RN, com baixas resistividades.** Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1990. 75 p. il.  
**Tese (Mestrado em Geofísica) – Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa., 1990.**

**1. PERFILAGEM ELÉTRICA DE POÇOS. 2. RESERVATÓRIOS DO CAMPO DE UBARANA – RN – Avaliação. 3. GEOFÍSICA APLICADA – Prospecção de Hidrocarbonetos.**

## ÍNDICE

|                                                               |      |
|---------------------------------------------------------------|------|
| TABELAS .....                                                 | iv   |
| FIGURAS .....                                                 | iv   |
| RESUMO .....                                                  | viii |
| ABSTRACT .....                                                | x    |
| CAPÍTULO 1                                                    |      |
| INTRODUÇÃO .....                                              | 1    |
| 1.1. Localização .....                                        | 1    |
| 1.2. Aspectos Geológicos .....                                | 1    |
| 1.3. Objetivos deste Trabalho .....                           | 1    |
| 1.4. Trabalhos Anteriores .....                               | 2    |
| 1.5. Método de Trabalho .....                                 | 3    |
| CAPÍTULO 2                                                    |      |
| AVALIAÇÃO DE RESERVATÓRIOS ARGILOSOS .....                    | 4    |
| 2.1. Modelos Interpretativos que Utilizam Vsh .....           | 5    |
| 2.2. Modelos Interpretativos que Utilizam Qv .....            | 8    |
| 2.2.1. Modelo de Waxman & Smits .....                         | 9    |
| 2.2.2. Modelo das Duas Águas .....                            | 11   |
| 2.2.3. Adaptação do Modelo de Waxman & Smits por Juhasz ..... | 12   |
| a) $Q_v$ Normalizado .....                                    | 14   |
| b) Equação de Waxman & Smits Normalizada .....                | 14   |
| 2.2.4. Modelo Condutivo de Patchett & Herrick .....           | 16   |

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| a) Equação de Patchett & Herrick Normalizada .....                                            | 17 |
| 2.2.5. Modelo de Rocha com Matriz Condutiva .....                                             | 17 |
| CAPÍTULO 3                                                                                    |    |
| RESERVATÓRIOS DO CAMPO DE UBARANA .....                                                       | 19 |
| 3.1. Mineralogia .....                                                                        | 19 |
| 3.1.1. Zona F .....                                                                           | 19 |
| 3.1.2. Zona G .....                                                                           | 20 |
| 3.2. Distribuição das Argilas .....                                                           | 20 |
| CAPÍTULO 4                                                                                    |    |
| UM MODELO INTERPRETATIVO PARA UBARANA .....                                                   | 22 |
| 4.1. Equação de Saturação de Água .....                                                       | 22 |
| 4.1.1. Normalização da Equação Proposta .....                                                 | 23 |
| 4.2. Investigação da Ocorrência de Invasão Profunda .....                                     | 23 |
| 4.2.1. Determinação da Resistividade na Zona Lavada .....                                     | 24 |
| a) Utilizando as Saturações de Óleo Residual (SOR) e de Água Irredutível ( $S_{wirr}$ ) ..... | 24 |
| b) Utilizando um Perfil de Investigação Média .....                                           | 25 |
| CAPÍTULO 5                                                                                    |    |
| ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....                                                      | 27 |
| 5.1. Análise da Validade da Equação Proposta .....                                            | 27 |
| 5.1.1. Intervalos Portadores de Hidrocarbonetos .....                                         | 28 |
| 5.1.2. Intervalos com Baixas Resistividades .....                                             | 29 |
| 5.2. Análise da Possibilidade de Ocorrência de Invasão Profunda .....                         | 30 |
| 5.2.1. Zona G .....                                                                           | 31 |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 5.2.2. Zona F .....              | 32 |
| CAPÍTULO 6                       |    |
| CONCLUSÕES .....                 | 33 |
| AGRADECIMENTOS .....             | 35 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... | 36 |

## TABELAS

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Sumário da Mineralogia das Argilas .....                                     | 39 |
| 2. Saturações de Água Irredutível e Óleo Residual a Partir de Testemunhos ..... | 39 |
| 3. Dados Utilizados para a Confeção dos Diagramas de Stiff .....                | 40 |

## FIGURAS

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Mapa de localização do campo .....                                                                   | 41 |
| 2. Esquema de uma seção estrutural transversal do campo de Ubarana .....                                | 42 |
| 3. Representação gráfica da equação de Waxman—Smits normalizada .....                                   | 43 |
| 4. Representação esquemática de um arenito argiloso com baixo contraste de resistividade .....          | 44 |
| 5. Detalhe dos poros e da caulinita na superfície dos grãos .....                                       | 45 |
| 6. Grãos recobertos com argila do tipo ilita—esmectita formando pontes .....                            | 46 |
| 7. Clorita autigênica tamponando os poros da rocha .....                                                | 47 |
| 8. Resposta do modelo de Simandoux Laminar em frente a um intervalo argiloso portador de água .....     | 48 |
| 9. Resposta do modelo de Simandoux em frente a um intervalo argiloso portador de água .....             | 49 |
| 10. Resposta do modelo de Simandoux Modificado em frente a um intervalo argiloso portador de água ..... | 50 |
| 11. Resposta do modelo da Indonésia em frente a um intervalo argiloso portador de água .....            | 51 |
| 12. Resposta do modelo para Argila Dispersa em frente a um intervalo argiloso portador                  |    |

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| de água .....                                                                            | 52 |
| 13. Resposta do modelo de Duas Águas em frente a um intervalo argiloso portador          |    |
| de água .....                                                                            | 53 |
| 14. Resposta do modelo de Waxman–Smits em frente a um intervalo argiloso portador        |    |
| de água .....                                                                            | 54 |
| 15. Resposta do modelo de Patchett–Herrick em frente a um intervalo argiloso portador    |    |
| de água .....                                                                            | 55 |
| 16. Resposta do modelo Proposto em frente a um intervalo argiloso portador de água ..... | 56 |
| 17. Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações          |    |
| Proposta e a de Waxman–Smits .....                                                       | 57 |
| 18. Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações          |    |
| Proposta e a de Patchett–Herrick .....                                                   | 58 |
| 19. Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações          |    |
| Proposta e a das Duas Águas .....                                                        | 59 |
| 20. Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações          |    |
| Proposta e a de Argila Dispersa .....                                                    | 60 |
| 21a. Gráfico mostrando a resposta do modelo Proposto na base da zona F no poço           |    |
| 7–UB–37D–RNS. Intervalo argiloso com baixos valores de resistividade .....               | 61 |
| 21b. Gráfico mostrando a resposta do modelo Proposto na seção inferior da zona           |    |
| G no poço 7–UB–47–RNS. Intervalo argiloso com baixos valores de resistividade .....      | 62 |
| 21c. Gráfico mostrando a resposta do modelo Proposto na seção superior da zona           |    |
| F no poço 7–UB–37D–RNS. Intervalo argiloso com resistividades normais,                   |    |
| produtor de óleo .....                                                                   | 63 |

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 22. Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações<br>Proposta e a de Waxman— Smits. Intervalo argiloso com baixos valores<br>de resistividade .....    | 64 |
| 23. Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações<br>Proposta e a de Patchett—Herrick. Intervalo argiloso com baixos valores<br>de resistividade ..... | 65 |
| 24. Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações<br>Proposta e a de Duas Aguas. Intervalo argiloso com baixos valores<br>de resistividade .....       | 66 |
| 25. Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações<br>Proposta e a de Argila Dispersa. Intervalo argiloso com baixos valores<br>de resistividade .....  | 67 |
| 26. Diagramas de Stiff para 3 amostras do fluido recuperado no intervalo 2481,0 – 2509,0 m,<br>no poço 7—UB—47—RNS .....                                                             | 68 |
| 27. Gráfico de $\log R_t$ vs $\log R_{xo}$ para caracterização de fluidos do reservatório.<br>Poço 7—UB—47—RNS .....                                                                 | 69 |
| 28. Gráfico de $\log S_w$ vs $\log S_{xo}$ para caracterização da eficiência de fluxo fluido no<br>reservatório. Poço 7—UB—47—RNS .....                                              | 70 |
| 29. Diagramas de Stiff para 3 amostra do fluido recuperado nos intervalos<br>2526,0 – 2552,0 m (1o) e 2520,0 – 2536,0 m (2o e 3o), no poço 7—UB—37D—RNS .....                        | 71 |
| 30. Gráfico de $\log R_t$ vs $\log R_{xo}$ para caracterização de fluidos do reservatório.<br>Poço 7—UB—37D—RNS .....                                                                | 72 |
| 31. Gráfico de $\log S_w$ vs $\log S_{xo}$ para caracterização da eficiência de fluxo fluido                                                                                         |    |

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| na rocha. Poço 7-UB-37D-RNS .....                                                               | 73 |
| 32. Gráfico de $\log R_t$ vs $\log R_{xo}$ para caracterização de fluidos do reservatório.      |    |
| Poço 7-UB-43D-RNS .....                                                                         | 74 |
| 33. Gráfico de $\log S_w$ vs $\log S_{xo}$ para caracterização da eficiência de fluxo fluido no |    |
| reservatório 7-UB-43D-RNS .....                                                                 | 75 |

# **AVALIAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DO CAMPO DE UBARANA—RN, COM BAIXAS RESISTIVIDADES**

(TESE DE MESTRADO : setembro/90)

**EDUARDO MOREIRA RAMOS**

Orientador : Dr. Hilton Bernard Evans

*Departamento de Geofísica — Centro de Geociências/UFPa*

*Caixa Postal 309 — Belém, PA, Brasil*

## **RESUMO**

Desenvolveu-se neste trabalho um novo modelo de avaliação quantitativa para arenitos argilosos, baseado na bibliografia e no estudo da disposição dos argilominerais dentro dos poros das rochas reservatório.

Este novo modelo leva em consideração a contribuição de duas condutividades extras, além da condutividade eletrolítica das rochas: uma se deve à 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 a condutância que se desenvolve em uma rede microporosa contínua formada por argilominerais sobre o arcabouço das rochas.

Para o estudo da validade da equação proposta, foram feitos vários gráficos comparativos entre as equações e/ou modelos existentes na bibliografia especializada, deles resultando ótimas correlações, principalmente com a tradicional equação de Waxman & Smits.

Foi feita uma comparação do novo modelo em três seções distintas do Campo de Ubarana, Rio Grande do Norte, duas com baixas resistividades supostamente com hidrocarbonetos e uma outra efetivamente produtora. Verificou-se que as baixas resistividades resultam do fato das seções estudadas serem subsaturadas, com menos de 50% de óleo e aproximadamente igual ou maior proporção de água relativamente salgada (85.000 ppm de NaCl equivalente). Esta mesma água, sem dúvida, muito contribui para as baixas resistividades, por formar a fase eletricamente condutiva das referidas seções.

Sendo a equação de Waxman & Smits mundialmente reconhecida, pode-se afirmar que a equação proposta neste trabalho tem consistência teórica e prática e para o caso particular do campo de Ubarana, mostrou-se mais coerente com o histórico de produção dos poços estudados,

do que as demais equações existentes e testadas.

# EVALUATION OF THE UBARANA FIELD RESERVOIRS—RN WITH LOW RESISTIVITIES

(MASTER THESIS : Sept./90)

EDUARDO MOREIRA RAMOS

Adviser : Dr. Hilton Bernard Evans

*Departamento de Geofísica — Centro de Geociências/UFPa  
Caixa Postal 309 — Belém, PA, Brasil*

## ABSTRACT

A new model for quantitative evaluation of shaly sand is proposed based on bibliography and clay mineral distribution in the pores of reservoir rocks.

This model takes in account for two extra conductivity types besides the normal electrolytic conductivity one present in porous rocks. One conductivity type is due to surface conductance of clay minerals, which increases or decreases as result of their capability of cationic exchange. The second conductivity type behaves independently as a parallel system due to the microporous network formed by the clay minerals lining or bridging the grains of a shaly rock.

The new equation was tested against several other equations and showed the best correlation with the Waxman & Smits equation. Both equations, the proposed one and the Waxman & Smits, have a similar approach to the clay conduction system.

The new model was used in three different zones of the Ubarana oilfield (Potiguar basin, Brazil) It was verified that: (1) in two low resistivity zones (there was the possibility of) oil production was possible because the resistivities were supposedly affected by highly conductive minerals; and (2) one effective oil tested and producing zone of highly resistivity.

The water saturations calculated with the new equation for the two low resistivity zones were above 50%, suggesting subsaturation and a continuous resistivity phase through the salt water (about 85,000 ppm of NaCl) present in the pores.

The practical results shown herein suggest that the proposed equation is theoretically consistent and must be exhaustively used in future evaluation projects of the Ubarana and similar oilfields in Brazilian sedimentary basins.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 Localização

O Campo de Ubarana localiza-se na parte submersa da Bacia Potiguar, na Plataforma Continental do Nordeste Brasileiro, entre as latitudes  $4^{\circ}30'$  S e  $5^{\circ}$  S e as longitudes  $36^{\circ}30'$  W e  $36^{\circ}15'$  W (Fig. 1). O campo ocupa uma área de  $46 \text{ km}^2$  sob uma lâmina d'água variando de 13 a 17 m. Está situado a uma distância de 13 km da linha de costa, aproximadamente a 160 km de Natal.

#### 1.2. Aspectos Geológicos

Estruturalmente, o Campo de Ubarana apresenta-se como um bloco basculado para noroeste e limitado a leste e sudeste pelo falhamento do "canyon" de Ubarana. O campo também apresenta controle do tipo estratigráfico e diagenético. O componente estratigráfico, está ligado a variações faciológicas dentro do contexto fluvial/deltáico/lacustrino de sedimentação, enquanto que o componente diagenético se deve à heterogeneidade lateral do espaço permoporoso, causado pela presença de poros e cimentos secundários.

No campo, os principais reservatórios são os arenitos fluvio-deltáicos da Formação Alagamar, de razoável continuidade lateral, interdigitados com folhelhos inter-deltáicos e inter-distributários, e com permoporosidade original sensivelmente alterada por processos diagenéticos.

A grande maioria dos poços está completada nas zonas E e/ou F da Formação Alagamar, principais produtores do campo, além de outras nove zonas de menor importância. A figura 2 mostra a posição estratigráfica das zonas estudadas F e G, em uma seção estrutural transversal esquemática do campo.

#### 1.3. Objetivos deste Trabalho

A análise dos perfis utilizando-se os métodos convencionais de interpretação, para a avaliação quantitativa dos reservatórios das zonas F e G da Formação Alagamar do Campo de Ubarana, Bacia Potiguar, mostra-se bastante ineficaz, visto que são calculados elevados valores de saturação de água. Isto se deve ao baixo contraste de resistividade entre os intervalos efetivamente

portadores de água e daqueles potencialmente produtores de hidrocarbonetos.

Varios fatores tem sido apontados como possíveis causadores destas baixas resistividades: presença de argilominerais, elevada saturação de água irreduzível, invasão profunda e piritita finamente disseminada.

Foi realizado neste trabalho, um estudo integrado de correlação entre as características petrofísicas e mineralógicas das rochas reservatórios com as medidas de perfis, de modo a permitir a determinação da causa do baixo contraste de resistividade, além do desenvolvimento de um novo modelo de interpretação quantitativa. Isto possibilitará, com base nas medidas de perfis elétricos, estabelecer parâmetros adequados para o cálculo de valores confiáveis de saturação de água e distinção dos horizontes potencialmente produtores de hidrocarbonetos, daqueles efetivamente portadores de água ou subsaturados.

#### 1.4. Trabalhos Anteriores

Inúmeras tentativas foram feitas para solucionar o problema de reservatórios com baixo contraste de resistividade. Desde o modelo pioneiro de Archie (1942), passando pelas equações de Waxman & Smits (1968) e Juhasz (1981), até mais recentemente o desenvolvimento do modelo de Givens & Schmidt (1988), os resultados obtidos não são 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 produtores de hidrocarbonetos.

Murphy & Owens (1972) consideram que os baixos valores de resistividade apresentados por várias rochas reservatório, tem origem na combinação dos seguintes fatores: (1) elevada saturação de água irreduzível, (2) elevada salinidade da água intersticial, (3) altas porosidades, e (4) considerável conteúdo argiloso.

Vajnar, et al. (1978) afirmam que as baixas resistividades nas rochas reservatórios não se devem apenas à presença de argila. Os autores observaram que arenitos limpos com granulometria muito fina (costa do golfo do México) apresentavam também baixas resistividades. Deste modo, além do conteúdo argiloso e da alta saturação de água irreduzível, outros fatores podem também ser responsáveis pelo o aumento da condutividade elétrica nas rochas reservatório.

Clavier et al. (1976) estudando o efeito da pirita nas rochas reservatório, concluíram que a resistividade decresce consideravelmente quando existe continuidade na fase piritosa. Constataram ainda, que cristais de pirita autigênica em algumas rochas arenosas, formam uma rede elétrica contínua, apesar deste mineral se encontrar em uma concentração relativamente baixa (7%).

### 1.5. Método de Trabalho

Este trabalho se baseia na análise de perfis geofísicos de poços, onde foram identificados intervalos como prováveis reservatórios que apresentam baixo contraste de resistividade, e sua 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.

Este trabalho foi desenvolvido sequencialmente nas seguintes etapas:

- a) Seleção e controle da qualidade dos perfis;
- b) Estudo dos testemunhos dos reservatórios, por meio de análise petrográfica de lâminas delgadas;
- c) caracterização da ocorrência e mineralogia das argilas, através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) e de difratometria de raios X (DRX);
- d) identificação de macro e microporosidade, nos testemunhos;
- e) análise e seleção dos parâmetros de argila (ou folhelho) e matriz, com base no registro dos perfis;
- f) determinação de um procedimento para a avaliação dos reservatórios e processamento das medidas de perfis e;
- g) desenvolvimento de um modelo preditivo para a resposta dos perfis, a partir da correlação com dados de testemunhos.

## CAPÍTULO 2

### AVALIAÇÃO DE RESERVATÓRIOS ARGILOSOS

A experiência tem mostrado que a avaliação de formações limpas, ou contendo somente uma quantidade insignificante de minerais condutivos (argilominerais, por exemplo), pode ser feita com base em relações empíricas que relacionem a resistividade verdadeira da rocha ( $R_t$ ), a resistividade da sua água intersticial ( $R_w$ ), a proporção de hidrocarbonetos ( $S_o$ ) existente no interior dos poros e suas características litológicas ( $a$  e  $m$ ). Segundo Archie (1949), a quantidade de água que existe em uma rocha permoporosa e expressa por

$$S_w^n = \frac{a \cdot R_w}{PHI^m \cdot R_t} \quad (1)$$

onde,

$S_w$  = saturação em água,

$PHI$  = porosidade da rocha,

$n$  = coeficiente de saturação,

$m$  = expoente de cimentação, e

$a$  = coeficiente de tortuosidade,

sendo a saturação em hidrocarbonetos  $S_o = 1 - S_w$ .

A presença de argila nas rochas reservatórios, em quantidade significativa, influencia não só as medidas de porosidade e do potencial espontâneo, mas também as de resistividade. Esta influência depende evidentemente da quantidade e do modo de ocorrência da argila dentro dos poros da rocha (dispersa, laminada ou estrutural). Em reservatórios limpos, os grãos componentes do arcabouço da rocha funcionam como isolantes, de modo que a corrente elétrica que se propaga numa rocha é devida somente à condutividade dos eletrólitos no interior dos seus poros. Nos reservatórios argilosos, parte do arcabouço é constituída pelos minerais argilosos, que por serem portadores de cargas elétricas periféricas (superficiais), também conduzem corrente elétrica e influenciam, portanto, na resistividade final da rocha.

A avaliação de reservatórios argilosos teve início com os trabalhos de Doll (1949), que analisou a resposta da curva do potencial espontâneo (SP) em arenitos com laminações de folhelhos, e os de Patnode & Wyllie (1950) que propuseram uma relação que expressava a resistividade elétrica em arenitos argilosos.

De Witte (1950), fazendo estudos petrográficos de testemunhos, concluiu que as argilas se distribuíam aleatoriamente dentro dos poros das rochas em maior proporção do que em forma de laminações. Baseado neste fato, ele desenvolveu um modelo de resistividade para argilas disseminadas nos arenitos.

Em seu modelo, de Witte considerou que a resistividade da argila dispersa no espaço poroso, contribuía para a resistividade da mistura (argila e água da formação), na seguinte proporção volumétrica

$$\frac{Vol. mistura}{R_t} = \frac{Vol. água}{R_w} + \frac{Vol. argila}{R_{sh}} \quad (2)$$

Em termos de saturação de água ( $S_w$ ) e porosidade (PHI), a equação (2) pode ser expressa por

$$\frac{PHI \cdot S_w + V_{sh}}{R_t} = \frac{PHI \cdot S_w}{R_w} + \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \quad (3)$$

onde, além dos termos já definidos tem-se:

$R_{sh}$  = resistividade da argila dispersa na rocha, e

$V_{sh}$  = proporção do volume total ocupado pela argila.

O modelo de condutividade daquele autor, para rochas argilosas é dado pela expressão matemática

$$\frac{1}{R_t} = \frac{S_w^2}{F \cdot R_w} + PHI \cdot V_{sh} \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_{sh}} \right) + \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \quad (4)$$

onde, o fator de formação  $F = \frac{a}{PHI^m}$ .

## 2.1. Modelos Interpretativos que Utilizam $V_{sh}$

Experiências iniciais para a correção do efeito sobre a resistividade da rocha reservatório

causado pela presença das argilas, levaram em consideração o modo de distribuição das mesmas (dispersa, laminada ou estrutural).

Um dos primeiros modelos utilizados na interpretação de arenitos argilosos foi proposto por Poupon et al. (1954). No desenvolvimento do seu modelo, eles consideraram um cubo unitário formado por laminações paralelas e alternadas de arenito limpo e folhelho, admitindo que ambas as condutividades são rigorosamente aditivas formando um circuito elétrico em paralelo.

Deste modo, a resistividade do modelo acima, pode ser expressa pelo efeito combinado das razões volumétricas de folhelho e arenito limpo, da seguinte forma

$$\frac{1}{R_t} = \frac{(1 - V_{sh})}{R_o} + \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \quad (5)$$

onde,

$R_o$  = resistividade da rocha isenta de argila e 100% saturada de água.

Considerando-se que Archie (1949) deduziu sua equação com base na condutividade eletrolítica das rochas e não na condutividade matricial, substituindo-se a equação (5) em (1) e rearranjando-se seus termos, obtém-se

$$\frac{1}{R_t} = \frac{S_w^n \cdot PHI^m}{a \cdot R_w} (1 - V_{sh}) + \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \quad (6)$$

Como se pode observar, as equações (5) e (6) descrevem dois condutores em paralelo, e a aplicação de (6) para o cálculo de saturação de água é extremamente prática pois depende exclusivamente de dados de perfis.

Simandoux (1963), após extensivos estudos utilizando uma grande quantidade de dados de poços, nos quais as argilas estavam distribuídas tanto na forma de lâminas como também de modo disperso e estrutural, sugeriu que a resistividade dos reservatórios poderia ser expressa pela relação

$$\frac{1}{R_t} = \frac{S_w^n \cdot PHI^m}{a \cdot R_w} + \frac{S_w \cdot V_{sh}}{R_{sh}} \quad (7)$$

Para  $n = 2$ , uma equação parabólica é admitida, ou seja

$$y = ax^2 + bx \quad .$$

Deste modo, multiplicando-se a equação de Simandoux (7) por  $R_t$  e reorganizando-a em termos de resistividade, tem-se

$$\frac{PHI^m \cdot R_t}{a \cdot R_w} \cdot S_w^2 + \frac{V_{sh} \cdot R_t}{R_{sh}} \cdot S_w = 1 \quad (8)$$

A equação de Simandoux incorpora, portanto, uma correção da resistividade pelo volume de argila, e deste modo a saturação de água pode ser calculada a partir da mesma sem o efeito da argilosidade.

Posteriormente, Simandoux (1964) reescreveu sua equação incorporando somente as argilas laminadas, ficando a equação (8) com a forma

$$\frac{PHI^m \cdot R_t}{a \cdot R_w(1 - V_{sh})} \cdot S_w^2 + \frac{V_{sh} \cdot R_t}{R_{sh}} \cdot S_w = 1 \quad (9)$$

A equação (9) é referida como equação de Simandoux Laminar.

As equações de Poupon, Simandoux e Simandoux Laminar, utilizadas mundialmente, são conhecidas como modelos de  $V_{sh}$  ou V-shale, e indicam numa primeira aproximação, intervalos potencialmente produtores e que merecem uma análise posterior mais rigorosa. Estas equações sofreram derivações que são conhecidas pelo nome de seus autores ou pelas suas aplicações específicas. O ponto comum destas equações, todavia, está no fato de que elas admitem uma relação proporcional entre o produto da resistividade da rocha reservatório pelo volume de argila ( $R_t \cdot V_{sh}$ ) e a diminuição da resistividade da água da formação provocada pela presença de argilas condutivas.

O documento Schlumberger Log Interpretation (1972), faz referência de modelos de equações simplificadas para argilas laminada e dispersa.

a) O modelo para argila laminada admite que cada uma das lâminas de folhelho e de arenito sejam corpos puros, e que cada lâmina necessita de uma espessura compatível com o espaçamento da ferramenta utilizada. A equação de saturação de água, para este tipo de distribuição de argila, é dada por

$$S_w^n = \frac{F \cdot R_w(1/R_t - V_{lam}/R_{sh})}{(1 - V_{lam})} \quad (10)$$

onde,

$V_{lam}$  é a fração do volume total da rocha ocupado pela argila laminada, e  $F$  e  $R_w$  se referem a uma rocha não argilosa.

Este modelo tem pequena aplicação prática, visto que são poucas as condições reais onde ele pode ser utilizado, ou seja, nas condições em que as espessuras das lâminas de folhelho e arenito sejam compatíveis com o espaçamento da ferramenta utilizada.

b) O modelo para argila dispersa proposto pelo documento da Schlumberger Log Interpretation (1972), cita o trabalho de De Witte (1950) como justificativa. A sua expressão matemática é

$$S_w = \frac{(a \cdot R_w / PHIT^2 \cdot R_t + [(q \cdot R_{dis} - R_w) / 2 \cdot R_{dis}]^2)^{0.5}}{1 - q} - \frac{[q(R_{dis} + R_w) / 2 \cdot R_{dis}]}{(1 - q)} \quad (11)$$

onde,

$PHIT$  = porosidade total, a qual inclui todo espaço ocupado pelos fluidos e pelas argilas dispersas,

$R_{dis}$  = resistividade das argilas dispersas, e

$q$  = fração da porosidade total ocupada pelas referidas argilas, e pode ser definido como

$$q = \left( \frac{PHIS - PHID}{PHIS} \right)$$

onde,

$PHIS$  = porosidade sônica sem correção para argila, e

$PHID$  = porosidade do perfil densidade sem correção para argila.

Este modelo trata a argila dispersa como uma mistura (ou suspensão) na água da formação, e tem mostrado resultados razoáveis para reservatórios portadores de água intersticial de alta salinidade e condutividade das argilas relativamente baixa.

## 2.2. Modelos Interpretativos que Utilizam $Q_v$

As equações de Poupon (6), de Simandoux (8 e 9) e de Argila Dispersa (11), são insuficientes

na quantificação dos processos básicos que contribuem para a condutividade dos reservatórios argilosos, tais como CEC (capacidade de troca catiônica) e  $Q_v$  (capacidade de troca catiônica por unidade de volume total dos poros). Entretanto, quando essas equações foram aplicadas com os pré-requisitos definidos acima, tiveram uma grande aceitação na comunidade da geofísica de poço.

O trabalho teórico experimental de Waxman & Smits (1968) abriu uma nova era na avaliação das formações, pois introduziu uma concepção inédita no entendimento da influência dos argilominerais na condutividade dos reservatórios argilosos. Entretanto, a aplicação do modelo requer uma extensiva amostragem e exaustiva análise de testemunhos. Autores como Clavier et al (1977) e Juhasz (1981) modificaram o modelo original de Waxman & Smits, adaptando-o para aplicações práticas, onde os parâmetros envolvidos no modelo são obtidos através de propriedades correlacionáveis nos perfis elétricos. Seguindo esta mesma linha experimental, surgiram os modelos desenvolvidos por Patchett & Herrick (1985) e Givens & Schmidt (1988).

#### 2.2.1. Modelo de Waxman & Smits

Os argilominerais, pela sua própria estrutura cristalina, apresentam uma superfície de contato bastante elevada em relação ao seu volume. Apresentam também um excesso de cargas negativas nas suas interfaces devido à substituições isomórficas do tipo  $Al^{+3}$  por  $Mg^{+2}$  na rede cristalina, e/ou a quebra de ligações entre as moléculas (Grim, 1953). Deste modo, é gerada uma deficiência de cargas positivas que é balanceada por cátions circundantes disponíveis no eletrólito do meio onde eles se encontram. A capacidade de compensação de cargas, que é denominada de Capacidade de Troca Catiônica (CEC), apresenta como resultado final, um significativo aumento na condutividade da rocha argilosa.

Hill & Milburn (1955) estabeleceram uma relação entre a capacidade de troca catiônica de um arenito argiloso, portador de água, e a diminuição da sua resistividade. Waxman & Smits (1968), por sua vez modificaram a relação acima referida e apresentaram uma equação geral para o cálculo da saturação de água, a qual requer dados de capacidade de troca catiônica determinados a partir de análise de testemunhos. Waxman & Thomas (1974), expandiram o modelo levando em consideração a influência da saturação parcial de hidrocarbonetos bem como a da temperatura sobre a resistividade dos arenitos argilosos.

Tem-se frequentemente afirmado que o modelo de Waxman & Smits descreve dois condutores em paralelo: (1) uma corrente que se deslocaria através da solução salina intersticial contida no espaço poroso, e (2) uma outra que fluiria através da superfície ativa das argilas, rica em cations. Entretanto, uma suposição básica feita pelos próprios autores no desenvolvimento do seu modelo, afirma que a condutância devido aos íons adsorvidos percorre a mesma trajetória atribuída aos íons da água livre ou intersticial dos poros, como um sistema elétrico constituído por uma resistência e um capacitor variável em série. Por outro lado, Herrick (1988) afirma que a condutância devido aos íons adsorvidos é variável, e depende da saturação de água do sistema poroso intergranular. Deste modo, a condutância devido as argilas, seria do tipo capacitivo que é somada à condutância devido à água livre ou intersticial do sistema poroso, o que faz com que o sistema não se comporte como dois condutores independentes e em paralelo. No modelo de Waxman & Smits 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 de Waxman & Smits 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); então, para  $a = 1,0$

$$\frac{1}{R_t} = S_{wt}^n \cdot PHIT^m \left( \frac{1}{R_w} + \frac{B \cdot Q_v}{S_{wt}} \right) . \quad (12)$$

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

A equação de Waxman & Smits (12) é similar à equação de saturação de água de Archie (1), ou seja

$$S_{wt}^n = \frac{a \cdot R_{we}}{PHIT^m \cdot R_t} \quad (13)$$

sendo,

$R_{we}$  = resistividade equivalente da água da formação e da argila, expressa como:

$$\frac{1}{R_{we}} = \frac{1}{R_w} + \frac{B \cdot Q_v}{S_{wt}}$$

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

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

O parâmetro  $B$  foi determinado em laboratório por Waxman & Thomas (1974), como uma função da salinidade e temperatura ( $t$ ) através da seguinte relação:

$$B = \frac{(1,28 + 0,0004059 \cdot t^2)}{[1 + R_w \cdot 1,23(0,045 \cdot t - 0,27)]} \quad (14)$$

onde,  $t$  é expresso em graus centígrados e  $R_w$  em ohm-m.

### 2.2.2. Modelo das Duas Águas

O modelo de Duas Águas foi proposto por Clavier, Coates e Dumanoir (1977), para substituir operacionalmente o modelo de Waxman-Smits, na ausência de dados de testemunhos, utilizando parâmetros obtidos a partir de dados de perfis.

Este modelo admite a existência de uma argila hipotética equilibrada eletricamente em seu estado anidro ("dry clay"), dispondo, portanto, de cátions intimamente adsorvidos à sua superfície. Quando a argila anidra ("dry clay") entra em contato com uma solução eletrolítica (água da formação), existe uma tendência de difusão dos ânions no meio, devido à elevada propriedade dielétrica da água, enquanto que os cátions se posicionam nas proximidades da superfície da argila, formando uma dupla camada elétrica e originando um fenômeno denominado de exclusão de ânion ou "Donnan's effect".

Como ocorre no modelo de Waxman & Smits, o modelo das Duas Águas considera que existe a mesma relação entre os íons do espaço poroso intergranular e aqueles decorrentes da troca catiônica das argilas. O uso de um mesmo fator de formação para descrever o comportamento elétrico tanto dos íons adsorvidos como dos íons da água livre, nos dois modelos, implica em um circuito elétrico análogo.

Patchett (1975), demonstrou que existe uma relação linear entre a área superficial de um determinado mineral de argila e a sua capacidade de troca catiônica (CEC). O produto da área da superfície de contacto do argilomineral pela espessura da camada de água adsorvida é igual ao volume desta mesma água adsorvida. Deste modo, conhecendo-se a espessura da dupla camada (água adsorvida) e o seu volume, pode-se determinar a área superficial da argila. Usando dados de Patchett (1975), Clavier et al. (1977) relacionaram o volume de água adsorvida com a sua condutância, e afirmaram que a espessura da dupla camada e a condutividade desta mesma água dependem da temperatura.

Como ocorre com o modelo de Waxman & Smits, o modelo das Duas Águas também respeita o formalismo da equação de Archie para arenitos limpos, ou seja

$$S_w^n = \frac{a \cdot R_{we}}{PHIT^m \cdot R_t} \quad (15)$$

sendo,

$R_{we}$  = resistividade equivalente da mistura água livre mais a água adsorvida aos argilominerais. Ela é expressa por

$$R_{we} = \frac{R_w \cdot R_{wb}}{R_{wb} + S_{wb}/S_w(R_w - R_{wb})} \quad (16)$$

onde,

$R_{wb}$  = resistividade da água adsorvida aos argilominerais, e

$S_{wb}$  = saturação de água adsorvida aos argilominerais.

### 2.2.3. Adaptação do modelo de Waxman & Smits por Juhász

Para se calcular a saturação de água a partir da equação de Waxman & Smits (12), é necessário a determinação da capacidade de troca catiônica (CEC) e da porosidade a partir de testemunhos. A aplicação daquela equação é, portanto, limitada necessariamente a poços testemunhados, o que encarece o método, predispondo-o a sua não utilização frequente no campo.

Juhász (1981) apresentou uma maneira de determinação do parametro  $Q_v$  de Waxman & Smits, em função de curvas de perfis litológicos (indicativas de argilas), calibradas com testemunhos, através da seguinte relação:

$$Q_v = \frac{V_{cls} \cdot Rho_{cls} \cdot CEC_{cls}}{PHIT} \quad (17)$$

onde,

$V_{cls}$  = fração do volume da rocha ocupado pela argila seca,

$Rho_{cls}$  = média da densidade da mistura dos minerais de argila (aproximadamente igual à média da densidade da rocha limpa), e

$CEC_{cls}$  = capacidade de troca cationica da mistura de argila seca.

Juhász definiu o melhor valor para  $V_{cls}$  como sendo:

$$V_{cls} = \frac{(PHIN - PHID)}{IH_{cls}} \quad (18)$$

onde,

$PHIN$  = porosidade neutrônica sem correção pelo efeito de argila,

$PHID$  = porosidade do perfil densidade sem correção pelo efeito de argila, e

$IH_{cls}$  = índice de hidrogênio (fração volumétrica do  $H^+$  da água doce, equivalente à porosidade neutrônica) da média da mistura de argila seca presente na rocha.

Substituindo-se a equação (18) na equação (17), obtém-se

$$Q_v = \frac{(PHIN - PHID) \cdot Rho_{cls} \cdot CEC_{cls}}{PHIT \cdot IH_{cls}} \quad (19)$$

ou mais simplificadaamente,

$$Q_v = \frac{(PHIN - PHID)}{PHIT} \cdot C \quad (20)$$

sendo

$$C = \frac{Rho_{cls} \cdot CEC_{cls}}{IH_{cls}}$$

onde,

$C$  deve ser constante para uma composição específica de argilominerais.

Substituindo-se  $Q_v$  (20) na equação (12), e reorganizando-a em termos de resistividade e saturação de água, tem-se

$$\frac{PHIT^{-m}}{R_t} = \frac{S_{wt}^n}{R_w} + \frac{C \cdot B \cdot (PHIN - PHID) \cdot S_{wt}^{n-1}}{PHIT} \quad (21)$$

Esta técnica introduz algumas vantagens sobre as demais aproximações para solucionar a equação de Waxman-Smits, pois independe (1) das variações de porosidade devido a outros fatores além da argilidade, (2) do tipo de distribuição das argilas, e (3) do controle da mineralogia das argilas (Juhász, 1981).

#### a) $Q_v$ Normalizado

Para facilitar o uso de indicadores tradicionais de argila, e ainda ter uma única tendência em relação à litologia para uma mesma seção geológica (o que é necessário para facilitar a correlação poço a poço), Juhász (1981) introduziu o conceito de  $Q_v$  normalizado.

O  $Q_v$  normalizado,  $Q_{vn}$ , foi definido como sendo um indicador de argila, expresso como uma função da porosidade total, dividido pelo seu valor ( $V_{sh}/PHIT$ ) no folhelho. Deste modo, a sua variação está limitada de 0 a 1. Assim  $Q_{vn}$  pode ser expresso por

$$Q_{vn} = \frac{V_{sh}/PHIT}{(V_{sh}/PHIT)_{sh}} = \frac{V_{sh}}{PHIT} \cdot \frac{PHIT_{sh}}{1}$$

ou

$$Q_{vn} = \frac{V_{sh} \cdot PHIT_{sh}}{PHIT} \quad (22)$$

onde,

$PHIT_{sh}$  = porosidade total no folhelho.

Deste modo,  $Q_{vn}$  é a saturação de água da argila expressa em termos de fração do volume total da rocha. A argila também contém eletrólitos, os quais estão presos à estrutura da mesma por forças capilares conforme indicado por gráficos de pressão capilar e permeabilidade.

#### b) Equação de Waxman-Smits Normalizada

O conceito de  $Q_v$  normalizado é adequado e altamente conveniente, pois simplifica operacionalmente a equação de Waxman-Smits, na qual o termo  $BQ_v$  é substituído por valores obtidos a partir de perfis geofísicos de poços.

Segundo Juhász (1981), o termo  $BQ_{vsh}$  (Fig. 3) é o coeficiente angular da reta de  $S_{wt} = 1$ , ou então a diferença entre a condutividade aparente da água da argila ( $C_{wash}$  a  $S_{wt} = 1$ ) e a condutividade da água da formação ( $C_w$ ). Deste modo,  $BQ_v$  para um arenito argiloso pode ser expresso por

$$BQ_v = Q_{vn} \cdot BQ_{vsh} = Q_{vn} \cdot (C_{wash} - C_w) \quad (23)$$

ou em termos de resistividade,

$$BQ_v = Q_{vn} \cdot \left( \frac{1}{R_{wash}} - \frac{1}{R_w} \right) \quad (24)$$

sendo,

$R_{wash}$  = resistividade aparente da água da argila, expressa por

$$R_{wash} = PHIT_{sh}^m \cdot R_{sh} \quad (25)$$

Substituindo a equação (24) na equação (12) e rearranjando-se em termos de resistividade, tem-se

$$\frac{1}{R_t} = \frac{S_{wt}^n}{PHIT^{-m}} \left[ \frac{1}{R_w} + \frac{Q_{vn}}{S_{wt}} \cdot \left( \frac{1}{R_{wash}} - \frac{1}{R_w} \right) \right] \quad (26)$$

A equação de saturação de água de Waxman-Smits normalizada geralmente é escrita da seguinte forma, para  $a = 1,0$

$$S_{wt}^n = \frac{PHIT^{-m}}{R_t} \left[ \frac{S_{wt} \cdot R_{wash} \cdot R_w}{Q_{vn} \cdot R_w + (S_{wt} - Q_{vn}) R_{wash}} \right] \quad (27)$$

ou ainda de forma familiar a equação de saturação de Archie (1):

$$S_{wt}^n = \frac{R_{we}}{PHIT^m \cdot R_t} \quad (28)$$

onde,

$$R_{we} = \frac{S_{wt} \cdot R_{wash} \cdot R_w}{Q_{vn} \cdot R_w + (S_{wt} - Q_{vn}) \cdot R_{wash}} \quad (29)$$

#### 2.2.4. Modelo Condutivo de Patchett–Herrick

Patchett & Herrick (1982) desenvolveram um modelo para arenitos argilosos, partindo de dois modelos básicos:

1.) do modelo de Poupon et al. (1954), o qual descreve o comportamento elétrico de arenitos com argila laminada através da seguinte fórmula

$$\frac{1}{R_t} = \frac{S_w^n \cdot PHIT^m}{R_w} (1 - V_{sh}) + \frac{V_{sh}}{R_{sh}}, \quad e \quad (6)$$

2.) do modelo de Waxman & Smits (1968), o qual descreve o comportamento elétrico de arenitos com argila dispersa como

$$\frac{1}{R_t} = S_{wt}^n \cdot PHIT^m \cdot \left( \frac{1}{R_w} + \frac{B \cdot Q_v}{S_{wt}} \right). \quad (12)$$

Combinando as equações (6) e (12), Patchett–Herrick (1982) propuseram a seguinte equação:

$$\frac{1}{R_t} = S_{wt}^n \cdot PHIT^m \cdot \left( \frac{1}{R_w} + \frac{B \cdot Q_v}{S_{wt}} \right) \cdot (1 - V_{sh}) + \frac{V_{sh}}{R_{sh}}. \quad (30)$$

É importante observar que nesta equação o termo  $(S_{wt}^n \cdot PHIT^m)$ , que representa o conteúdo total de água eletricamente efetiva na equação de Archie, inclui o efeito da geometria porosa e é idêntico nas equações de Poupon e Waxman–Smits. Em cada uma destas equações, este termo se refere somente à geometria da parte macroporosa do sistema poroso total, a qual é independente da troca catiônica ou da microporosidade associada aos minerais de argila. Já o segundo e terceiro termos, correspondem a correção para o efeito da argila.

Na verdade, o modelo de Patchett–Herrick (1982) representa um modelo geral que pode ser utilizado para a avaliação de reservatórios que conduzem a corrente elétrica por um dos dois mecanismos (série ou paralelo), ou pela combinação de ambos (série e paralelo).

### a) Equação de Patchett–Herrick Normalizada

O fato do modelo de Patchett–Herrick (1982), utilizar também o conceito de capacidade de troca catiônica, cria dificuldades para a sua aplicação prática, visto que o parâmetro  $Q_v$  somente é acessível através de medidas de testemunhos.

Considerando que o termo  $S_{wt}^n \cdot PHIT^m (1/R_w + BQ_v/S_{wt})$  da equação de Patchett–Herrick (30) representa exatamente a equação de Waxman–Smits (12), o método demonstrado por Juhász (1981) que substitui  $Q_v$  por parâmetros de perfis, pode aqui também ser aplicado e permitir a utilização da equação em discussão na ausência de testemunhos.

Deste modo, substituindo-se a equação (23) na equação de Patchett–Herrick (30) e rearranjando-a em termos de resistividades, obtém-se

$$\frac{1}{R_t} = S_{wt}^n \cdot PHIT^m \left[ \frac{1}{R_w} + Q_{vn} \left( \frac{1}{R_{wash}} - \frac{1}{R_w} \cdot S_{wt} \right) \cdot (1 - V_{sh}) + \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \right] \quad (31)$$

É importante observar que nesta equação, o parâmetro  $V_{sh}$  representa a fração do volume total de argila que tem um comportamento de condução elétrica idêntico ao de uma argila laminada.

### 2.2.5. Modelo de Rocha com Matriz Condutiva

Givens (1987), descreveu um modelo de rocha cuja matriz conduziria a corrente elétrica, através de uma rede contínua de microporos interconectados e dispostos sobre a própria superfície dos grãos da matriz. Tal fato ocasionaria uma condução adicional no espaço poroso interconectado, cujas trajetórias estariam em paralelo (Fig. 4). A rede contínua de microporos formada pelos argilominerais autigênicos sobre a superfície dos grãos, reteria água intersticial em virtude da alta força de capilaridade. Deste modo, a condutividade que se desenvolve na rede contínua de microporos não seria afetada pela variação da saturação de água do espaço poroso intergranular, funcionando como um condutor totalmente independente.

Sendo assim, este modelo pode ser perfeitamente adaptável aos arenitos argilosos com baixas resistividades da área de Ubarana, motivo deste trabalho, já que os mesmos apresentam em microfotografia as características acima referidas, como mostrado nas figuras 5, 6 e 7.

A condutividade de tal sistema constituído por fluido livre e matriz condutiva da rocha (segundo Givens, 1987), pode ser expressa por

$$C_t = C_w + C_r \quad (32)$$

onde,

$$C_t = 1/R_t, \text{ e}$$

$C_r$  = condutividade que se desenvolve nas rochas devido à água adsorvida às argilas por capilaridade, e/ou eventualmente a minerais condutivos.

Combinando a equação (32) com a equação (1) e rearranjando-se em termos de resistividades, obtém-se

$$\frac{1}{R_t} = \frac{S_w^n \cdot PHI^m}{R_w} + \frac{1}{R_r} \quad (33)$$

O modelo de matriz condutiva de Givens descreve, portanto, dois condutores independentes e em paralelo. Uma das condutividades se deve ao espaço poroso intergranular, obedecendo portanto a lei de Archie (primeiro termo da equação), e a outra é uma condutividade matricial devido a água adsorvida às argilas por capilaridade ou adsorção, e eventualmente a presença de minerais condutivos (segundo termo da equação).

Givens & Schmidt (1988) generalizaram o modelo de Givens (1987), incluindo um tratamento quantitativo para a condutância da água presa por capilaridade, independente da matriz. Neste novo modelo foi incluído a condução elétrica por superfície devido à água irreduzível.

## CAPÍTULO 3

### RESERVATÓRIOS DO CAMPO DE UBARANA

Foram identificados no Campo de Ubarana reservatórios com baixas resistividades, aparentemente portadores de hidrocarbonetos, nas zonas F, G e J, no Membro Upanema da Formação Alagamar (Fig. 2). Neste estudo se faz referência apenas às zonas F e G, pois só nestas há uma maior disponibilidade de testemunhos e histórico de produção dos poços estudados.

#### 3.1 Mineralogia

##### 3.1.1. Zona F

De acordo com trabalhos técnicos da Petrobrás esta unidade estratigráfica está subdividida em duas sub-zonas: uma superior (sub-zona  $F_1$ ) e outra inferior (sub-zona  $F_2$ ).

##### Sub-zona $F_1$

Os principais reservatórios desta sub-zona são depósitos de tração e suspensão de origem deltaica, constituídos por uma sequência de arenitos, siltitos e folhelhos contendo finas camadas de coquinas de ostracóides no topo. Predominam arenitos finos a médios, geralmente bem selecionados. Observa-se frequentes grãos líticos nos arenitos grosseiros e biotita-clorita nos arenitos finos. O cimento mais frequente é constituído por argilominerais, principalmente a caulinita. Ocorrem também crescimento de quartzo e dolomita, numa amplitude de raro a abundante e, localmente, barita e anidrita.

Nesta seção, os reservatórios produtores de hidrocarbonetos apresentam valores de resistividade aparentemente normais, em média 10 ohm-m.

##### Sub-zona $F_2$

Nesta sub-zona predominam depósitos de tração e tração-bioturbação relacionados a canais estuarinos. Os principais tipos litológicos são conglomerados e arenitos contendo 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 principalmente minerais de argila.

Nesta sub-zona ocorrem reservatórios com baixas resistividades, supostamente com potencial para a produção de hidrocarbonetos. Este fato, dificulta a avaliação quando se utilizam os métodos convencionais de interpretação de perfis.

### 3.1.2. Zona G

Esta zona compreende o sistema de plataforma carbonática e está bem representada na área do poço 7-UB-47-RNS. Está constituída por coquinas de pelecípodes, folhelhos esverdeados com nódulos de calcita e intercalações de arenitos muito finos a médios da zona H. Localmente ocorrem abundantes seixos de folhelhos, podendo destruir ocasionalmente as porosidades por compactação. A cimentação é formada principalmente por argilominerais, ocorrendo também raras concreções de calcita e/ou dolomita.

Nesta seção também foram identificados arenitos com resistividades anormalmente baixas, menores ou iguais a 2,5 ohm-m e, supostamente portadores de hidrocarbonetos, bem caracterizados no poço 7-UB-47-RNS.

### 3.2. Distribuição das Argilas

Os reservatórios da sub-zona F<sub>2</sub> e da zona G onde ocorrem resistividades anormalmente baixas, são arenitos diageneticamente alterados pela precipitação, principalmente, de minerais de argilas dentro do sistema poroso. Estes argilominerais se desenvolveram 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 de microscópio eletrônico de varredura e de difratometria de raios-X de 47 amostras dos pocos 3-UB-25-RNS, 7-UB-27-RNS e 7-UB-47-RNS, realizada pelo CENPES-PETROBRAS, mostram a presença de caulinita, interestratificado de illita-esmectita, illita e clorita (Tabela 1).

A caulinita está presente preenchendo total ou parcialmente os poros (Fig. 5), formando uma microporosidade espacialmente isolada, e sob a forma de lamelas associada a outros argilominerais. Tem origem na alteração total ou parcial de feldspatos e sua presença é mais marcante nos reservatórios superiores da sub-zona F<sub>1</sub> (em média 56,75%), diminuindo para 30% nos reservatórios

da sub-zona F<sub>2</sub> e para 20,5% na zona G (tabela 1).

Os interestratificados de illita-esmectita contém de 30 a 40% de esmectita e apresentam-se como filmes relativamente contínuos sobre a superfície livre dos grãos (Fig. 6), formando abundante microporosidade. Ocorrem com maior frequência (52,5%) nos reservatórios inferiores da sub-zona F<sub>2</sub>.

A clorita ocorre recobrindo os grãos e também como alteração de fragmentos detríticos (Fig. 7). Sua maior frequência é observada nos reservatórios da zona G, onde tem um valor médio de 51%.

A illita ocorre associada com a illita-esmectita e as vezes com a clorita. Sua presença é mais comum nos reservatórios da zona G, onde tem em média 15%.

## CAPÍTULO 4

### UM MODELO INTERPRETATIVO PARA UBARANA

#### 4.1. Equação da Saturação de Água

De acordo com os resultados da análise de lâminas delgadas, das microfotografias e da difratometria de raios X, pode-se admitir que os arenitos argilosos com baixas resistividades das zonas F e G, da Formação Alagamar no campo de Ubarana, podem conduzir a corrente elétrica no espaço poroso intergranular (1) pelo mecanismo proposto por Archie, (2) através do mecanismo de troca catiônica de Waxman-Smits (1968), (3) 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 neste trabalho, e que pode ser usado para descrever o comportamento elétrico destes reservatórios, é aqui desenvolvido à partir de uma combinação dos modelos supracitados.

Conforme foi visto anteriormente, o modelo de Waxman-Smits (1968) para argilas dispersas, é expresso por

$$\frac{1}{R_t} = S_w^n \cdot PHIT^m \cdot \left( \frac{1}{R_w} + \frac{B \cdot Q_v}{S_{wt}} \right) . \quad (12)$$

O modelo de Givens (1987), que se baseia num mecanismo de condução em paralelo independente, através da rede microporosa contínua que se forma sobre a superfície dos grãos da matriz, é dado por

$$\frac{1}{R_t} = \frac{S_w^n \cdot PHIT^m}{R_w} + \frac{1}{R_r} . \quad (33)$$

Considerando que Givens não faz referência à correção para o volume do espaço microporoso associado às argilas, e que nos reservatórios em estudos não existem outros minerais condutivos na matriz em proporções capaz de afetar as suas propriedades elétricas, substituiu-se na equação (33) o parâmetro  $R_r$  pelo termo  $R_{sh}/V_{sh}$ , objetivando efetuar a referida correção. Deste modo, tem-se

$$\frac{1}{R_t} = \frac{S_w^n \cdot PHIT^m}{R_w} + \frac{V_{sh}}{R_{sh}} . \quad (34)$$

Combinando a equação (34) com a equação (12), obtém-se

$$\frac{1}{R_t} = S_w^n \cdot PHIT^m \cdot \left( \frac{1}{R_w} + \frac{B \cdot Q_v}{S_{wt}} \right) + \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \quad (35)$$

É importante observar, que o termo " $V_{sh}/R_{sh}$ " pode ser aplicado tanto para uma estrutura microporosa contínua envolvendo os grãos da matriz, como para folhelhos laminados.

#### 4.1.1. Normalização da Equação Proposta

Substituindo o termo  $BQ_v$ , equação (24), na equação (35), tem-se que

$$\frac{1}{R_t} = S_w^n \cdot PHIT^m \left[ \frac{1}{R_w} + \frac{Q_{vn}}{S_{wt}} \left( \frac{1}{R_{wash}} - \frac{1}{R_w} \right) \right] + \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \quad (36)$$

O modelo de saturação de água, aqui proposto, é dado pela expressão

$$S_{wt}^n = \frac{PHIT^{-m}}{R_t} \left[ \frac{(R_{sh} - R_t \cdot V_{sh}) S_{wt} \cdot R_{wash} \cdot R_w}{R_{sh} \cdot R_{wash} (S_{wt} - Q_{vn}) + R_{sh} \cdot R_w \cdot Q_{vn}} \right] \quad (37)$$

Escrevendo-se a equação (37) na forma familiar da equação de Archie, tem-se que

$$S_{wt}^n = \frac{R_{we}}{PHIT^{-m} \cdot R_t} \quad (38)$$

onde,

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

Quando a rocha reservatório estiver saturada com 100% de água, tem-se que  $R_t = R_o$ .

Nestas condições, rearranjando a equação (36), obtém-se

$$\frac{1}{R_o} = \frac{V_{sh}}{R_{sh}} + PHIT^m \left[ \frac{R_{wash} + Q_{vn}(R_w - R_{wash})}{R_{wash} \cdot R_w} \right] \quad (39)$$

logo, o valor de  $R_o$  é dado pela expressão

$$R_o = \frac{R_{sh} \cdot R_{wash} \cdot R_w}{V_{sh} \cdot R_{wash} \cdot R_w + PHIT^m \cdot [R_{sh} \cdot R_w \cdot Q_{vn} + R_{sh} \cdot R_{wash} \cdot (1 - Q_{vn})]} \quad (40)$$

#### 4.2. Investigação de Ocorrência de Invasão Profunda

Uma decorrência natural da perfuração de poços de petróleo é a necessidade da utilização de um fluido de perfuração (ou lama), para fins de manutenção das paredes do poço, preservação das litologias inconsolidadas, lubrificação da broca e permitir o retorno à superfície das amostras trituras pela broca.

Denomina-se de invasão, a penetração do filtrado do fluido de perfuração nos reservatórios permoporosos atravessados, em virtude do diferencial de pressão entre o fluido de perfuração e os fluidos contidos no interior dos poros.

Uma das possíveis causas das baixas resistividades registradas nos reservatórios das zonas F e G da formação Alagamar no campo de Ubarana, estaria relacionada à ocorrência de invasão profunda. Desta forma, os perfis de investigação profunda poderiam estar medindo valores de resistividade altamente influenciados pela baixa resistividade do filtrado da lama ( $R_{mf} = 0,11$  a  $0,20$  ohm-m a  $85^\circ$  F). Como não foram feitos perfis de investigação rasa nos poços estudados, que pudessem fornecer valores da resistividade na zona lavada ( $R_{xo}$ ), tornou-se imperativo a necessidade do conhecimento de um método que permitisse a obtenção de valores aproximados de  $R_{xo}$ , para que os mesmos pudessem ser correlacionados com os valores medidos pelas ferramentas de investigação profunda ( $R_t$ ). Estes dados foram então utilizados no cálculo da saturação de água na zona lavada ( $S_{xo}$ ).

#### 4.2.1. Determinação da Resistividade na Zona Lavada

##### a) Utilizando as Saturações de Óleo Residual (SOR) e de Água Irredutível ( $S_{wirr}$ )

É possível a obtenção de valores bastante realistas de  $R_{xo}$  a partir do conhecimento das saturações de óleo residual (SOR) e água irredutível ( $S_{wirr}$ ) na zona lavada, utilizando-se de equações similares ou adaptadas a partir daquelas usadas para o cálculo da saturação de água.

Adaptando-se a equação proposta (36) para a zona lavada, tem-se que

$$R_{xo} = \frac{1}{S_{xo}^n \cdot PHIT^m \left[ \frac{1}{R_{mf}} + \frac{Q_{vn}}{S_{xo}} \left( \frac{1}{R_{wash}} - \frac{1}{R_{mf}} \right) \right] + \frac{V_{sh}}{R_{sh}}} \quad (41)$$

$$R_{xo} = \frac{S_{xo} \cdot R_{wash} \cdot R_{mf} \cdot R_{sh}}{S_{xo}^n \cdot PHIT^m [S_{xo} \cdot R_{wash} \cdot R_{sh} + Q_{vn} \cdot R_{sh} (R_{mf} - R_{wash})]}$$

$$\frac{1}{+V_{sh} \cdot S_{xo} \cdot R_{wash} \cdot R_{mf}} \quad (42)$$

Como na zona lavada  $S_{xo} = (1 - SOR - S_{wirr})$ , obtém-se

$$R_{xo} = \frac{(1 - SOR - S_{wirr}) \cdot R_{wash} \cdot R_{mf} \cdot R_{sh}}{(1 - SOR - S_{wirr})^n \cdot PHIT^m [(1 - SOR - S_{wirr})$$

$$\frac{1}{R_{wash} \cdot R_{sh} + Q_{vn} \cdot R_{sh} (R_{mf} - R_{wash})] +$$

$$\frac{1}{+(1 - SOR - S_{wirr}) R_{wash} \cdot R_{mf} \cdot V_{sh}} \quad (43)$$

A confiabilidade dos valores de  $R_{xo}$  determinados a partir desta relação e/ou similares, é diretamente proporcional à precisão dos valores de saturação de óleo residual (SOR) e da saturação de água irreduzível ( $S_{wirr}$ ), determinados a partir da análise de testemunhos.

Dados de análise de testemunhos referentes à zona F, utilizados neste trabalho, estão relacionados na tabela 2.

#### b) Utilizando um Perfil de Investigação Média

Uma maneira de se obter um valor estimado da resistividade da zona lavada ( $R_{xo}$ ), é a partir de um perfil de investigação média que possa ser utilizado como uma curva de investigação rasa, como por exemplo, as curvas normal curta (RSN) e esférica focalizada (RSFL).

Neste caso, fez-se o seguinte procedimento para a determinação dos valores de resistividade:

- 1.) Admite-se que a curva de investigação média foi registrada através de uma ferramenta centralizada.
- 2.) Corrige-se a curva de investigação média pelos efeitos do poço, isto é, pela resistividade da lama, diâmetro e fator geométrico da ferramenta.

Um terceiro procedimento seria a correção destas leituras pelo efeito da invasão. Lamentavelmente neste trabalho não foi possível realizar tais correções, por se dispor de apenas duas

curvas de resistividade; uma profunda (RILD) e outra média (RSN ou RSFL), o que torna difícil o cálculo do diâmetro de invasão.

O valor obtido através do procedimento acima, é então admitido como sendo o da resistividade na zona lavada ( $R_{xo}$ ).

## CAPÍTULO 5

### APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 5.1. Análise da Validade da Equação Proposta

Está sendo proposto neste trabalho, para o cálculo da saturação de água em reservatórios argilosos do Campo de Ubarana, zonas F e G, da formação Alagamar, a seguinte equação

$$\frac{1}{R_t} = S_{wt}^n \cdot PHIT^m \left[ \frac{1}{R_w} + \frac{Q_{vn}}{S_{wt}} \left( \frac{1}{R_{wash}} - \frac{1}{R_w} \right) \right] + \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \quad (36)$$

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%.

Os valores de porosidade total (PHIT) foram obtidos usando-se a sistemática do programa Logcalc, que utiliza entre outras a seguinte equação:  $PHIT = (PHID + PHIN)/2$ . As argilidades ( $V_{sh}$ ) foram obtidas através da seleção do menor valor numérico dos indicadores Raios Gama e Neutrônico-Densidade. Por outro lado,  $Q_{vn}$  foi determinado através da equação (22).

As figuras 8, 12, 13, 14, 15 e 16, mostram gráficos de  $V_{sh}$  versus  $S_w$  versus PHIE. Estes gráficos estão sendo apresentados neste trabalho por ser a maneira mais representativa e adequada para a comparação do comportamento entre as várias equações existentes e a proposta.

As saturações referidas no parágrafo anterior foram calculadas, respectivamente, a partir das equações de Simandoux Laminar (9), Argila Dispersa (11), Duas Águas (15), Waxman-Smits Normalizada (27), Patchett-Herrick (31) e da equação proposta (36), em uma seção constituída por arenitos argilosos, zona F da Formação Alagamar, no poço 7-UB-114D-RNS. Este poço foi escolhido por ter sua zona F saturada com água e mostrar uma variação de argilidade entre 0 e 100%. Alguns pontos, todavia, em todos os gráficos, mostram baixos valores de saturação de água. Este fato se deve à ocorrência de vários níveis com hidrocarbonetos, os quais não foram isolados, propositalmente, para efeito de melhor comparação com os níveis efetivamente portadores de água.

A figura 8 ilustra os valores de saturação de água calculados utilizando-se a equação de Simandoux Laminar ( $S_{wsl}$ ). Observa-se claramente que os valores de  $S_{wsl}$  são extremamente otimistas e apresentam uma nítida tendência de diminuição com o aumento da argilidade. Esta

mesma tendência também pode ser observada quando se calcula saturações com as equações de Simandoux (Fig. 9), Simandoux Modificada (Fig. 10) e a desenvolvida para campos da Indonésia (Fig. 11). Este fato justifica a não utilização das mesmas no Campo de Ubarana, em quaisquer tipo de análise criteriosa de intervalos potencialmente produtores de hidrocarbonetos. Estas equações não foram incluídas no texto por serem de domínio público e por não terem produzido resultados coerentes com os dados estudados, uma vez que as referidas equações são representativas de modelos para argilas laminadas, o que não é o caso das zonas F e G do campo de Ubarana, conforme demonstrado neste trabalho.

Por outro lado, observa-se nas figuras 12, 13, e 15, cujas saturações de água foram calculadas, respectivamente, com as equações das Argilas Dispersas (11), Duas Águas (15) e Patchett-Herrick (31), que muitos pontos excedem ao valor de 100%, indicando uma superestimativa dos mesmos. Espalhamento menos significativo pode ser observado nas figuras 14 e 16, onde foram usadas as equações de Waxman-Smits (27) e a proposta (36). Esta última equação mostrou um espalhamento pontual bastante similar à aquela primeira, todavia com uma ligeira tendência para menores valores de saturação de água. Deste modo, pode-se dizer que a resposta da equação proposta (36), em frente a intervalos argilosos é compatível com a de Waxman-Smits sendo, portanto, de aplicação confiável, apesar dela ter sido derivada empiricamente.

#### 5.1.1. Intervalos Portadores de Hidrocarbonetos

As figuras 17, 18, 19 e 20 mostram a comparação entre as saturações de água calculadas com a equação proposta ( $S_{wpp}$ ) versus as de Waxman-Smits ( $S_{wms}$ ), Patchett-Herrick ( $S_{wph}$ ), Duas Águas ( $S_{wdw}$ ) e Argila Dispersa ( $S_{wdc}$ ), respectivamente, para a seção superior da zona F da Formação Alagamar, produtora de óleo no poço 7-UB-37D-RNS. Nesta seção as resistividades são aparentemente normais, da ordem de 10 ohm-m, e com os mesmos argilominerais da seção inferior de baixas resistividades (tabela 1).

Analisando-se as referidas figuras, observa-se claramente 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. No entanto, os valores de saturação de água calculados com as equações de Duas Águas (Fig. 19) e Argila Dispersa (Fig. 20) mostram-se subestimados quando comparados com a equação proposta, principalmente para altos valores de argilosidade,

conforme indicação do eixo dos Z. Já as equações de Waxman-Smits (Fig. 17) e Patchett-Herrick (Fig. 18) calculam valores de saturação de água ligeiramente superestimados, principalmente para altas saturações de água e argilosidade. Pelo exposto, as melhores correlação entre valores de saturação de água, se verificaram entre as equações proposta e as de Waxman-Smits (Fig. 17) e Patchett-Herrick (Fig. 18), principalmente esta última.

#### 5.1.2. Intervalos com baixas Resistividades

A resposta da equação proposta em frente a um intervalo argiloso com baixos valores de resistividade ( base da zona F do poço 7-UB-37D-RNS), supostamente produtor de hidrocarbonetos, é mostrada na figura 21a, e está dentro de uma amplitude de valores calculados para as demais equações. Observa-se nesta figura que a base da zona F tem saturações de água sempre superiores a 50%, onde as saturações mais baixas correspondem às porosidades mais elevadas (aproximadamente 17%).

A resposta da equação proposta para a base da zona G, no poço 7-UB-47-RNS, também argilosa e com baixa resistividade, pode ser observada na figura 21b. Muito embora o intervalo analisado seja de menor espessura que aquele da figura 21a, nota-se que as saturações de água estão, também, sempre acima de 50% e com os valores mais baixos de saturação correspondendo a porosidades superiores as da figura em comparação.

A resposta da equação proposta em frente a um intervalo efetiva e comercialmente produtor de hidrocarbonetos, pode ser observada na figura 21c. Numa primeira vista, nota-se que as saturações de água tem um comportamento mais realista, porquanto predominam níveis com valores de  $S_w$  entre 20 e 50%. Os menores valores de saturação desta zona são coerentes para os valores de saturação irreduzível determinado para a maioria das zonas do campo em estudo (entre 20 e 30%, segundo a tabela 2).

A comparação do comportamento quantitativo das saturações de água mostradas nas figuras 21a, b e c, leva a se admitir que as baixas resistividades observadas nas bases das zonas F e G do campo de Ubarana, são bastante sugestivas de intervalos subsaturados de hidrocarbonetos, eliminando-se desta forma a hipótese delas serem resultantes de elementos matriciais condutivos.

Realizou-se também, neste trabalho, comparações entre a resposta deste modelo e as res-

postas dos modelos de Waxman-Smits, Patchett-Herrick, Duas Águas e Argila Dispersa, através das figuras 22, 23, 24 e 25, respectivamente. Como acontece para o intervalo superior (com altas resistividades e produtor de óleo), os valores calculados com as equações de Patchett-Herrick (Fig. 23) e Waxman-Smits (Fig. 22) são superestimados, enquanto que os valores de saturação de água calculados através das equações para Argila Dispersa (Fig. 25) e Duas Águas (Fig. 24) são também subestimados em relação à equação proposta. A melhor correlação entre os valores de saturação de água se verifica para aqueles calculados com a equações proposta e a de Waxman-Smits (coeficiente de correlação = 0,98).

A resposta da equação proposta para reservatórios com baixas resistividades também é consistente, e para o caso particular do campo de Ubarana, mostra-se melhor do que a resposta das demais equações estudadas.

## 5.2. Análise da possibilidade de Ocorrência de Invasão Profunda

Para uma efetiva análise do fenómeno da invasão fluida em uma camada permoporosa, alguns aspectos devem ser observados. É imprescindível o uso de pelo menos três curvas de resistividades (como por exemplo, as curvas RILD, RSFL e RMSFL), preferentemente do tipo focalizada, que tenham iguais resoluções verticais e radiais. Com isto os programas computacionais podem gerar valores corrigidos de  $R_t$  e  $R_{xo}$  pelo efeito da invasão, através dos gráficos conhecidos como "tornados". Entretanto, nos casos em que se dispõe de apenas duas curvas de resistividade, torna-se difícil o cálculo do diâmetro de invasão, conforme discutido anteriormente.

Deste modo, para que se pudesse realizar uma análise da ocorrência de invasão profunda nos intervalos de baixas resistividades, estudou-se, além dos dados de produção diária de cada poço, a mobilização dos fluidos dentro da rochas reservatório, de acordo com Fertl (1981).

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

$$\left(\frac{S_w}{S_{xo}}\right)^n = \frac{R_{xo}}{R_t} \cdot \frac{R_w}{R_{mf}} \quad (44)$$

que pode ser simplificada em  $S_{xo} = b \cdot S_w^x$ , onde,

$S_{xo}$  = Saturação de filtro na zona lavada,

$R_{mf}$  = Resistividade do filtrado do fluido de perfuração, que preenche a zona lavada, e

$b$  e  $x$  são parâmetros que relacionam  $R_{xo}$ ,  $R_t$ ,  $R_{mf}$ ,  $R_w$  e litologia.

Para a quantificação da saturação de água na zona lavada ( $S_{xo}$ ), foram usados valores de resistividade ( $R_{xo}$ ) calculados com auxílio do sistema "Logcalc" da Petrobrás, a partir das curvas de investigação média (RSN e RSFL), corrigidas pelos efeitos ambientais. Tal fato deveu-se a ausência de perfis específicos de pequena profundidade de investigação, tipo microlateroperfil ou microesférico (marca registrada da Schlumberger). Tentou-se também reconstruir a curva de  $R_{xo}$  a partir dos dados de saturação de água irredutível e óleo residual. Tal reconstrução não produziu resultados esperados e coerentes com aquelas duas curvas citadas, razão da sua não utilização neste trabalho.

### 5.2.1. Zona G

A análise dos fluidos recuperados nesta zona, em diferentes amostragens realizadas no intervalo 2481,0 a 2502,0 m do poço 7- UB-47-RNS, mostrou que o mesmo produziu inicialmente óleo, e logo após, sucessivamente, uma mistura de água da formação e fluido de completção; uma mistura de água da formação e filtrado da lama de perfuração; e finalmente, água da formação.

Diagramas de Stiff (1951), confeccionados a partir dos dados da tabela 3, sugerem que o fluido recuperado nas diferentes amostragens se trata de água da formação (Fig.26). Após fraturamento, o poço entrou em produção com uma baixa percentagem inicial de água de 4%, aumentando gradativamente até produzir somente água em todos os níveis canhoneados. O intervalo foi, finalmente, isolado e abandonado pela Petrobrás, como intervalo não comercial.

O gráfico  $\log R_t$  vs  $\log R_{xo}$ , para este intervalo (Fig. 27), define claramente uma linha de água ( $S_w = 100\%$ ). Observa-se, também, que a maioria dos pontos estão situados entre duas retas definidas pelas relações  $S_{xo} = b \cdot S_w^x$  e  $R_t = R_{xo}$ . Esta última caracteriza a presença de hidrocarboneto para os pontos situados à sua direita. Já o gráfico  $\log S_w$  vs  $\log S_{xo}$  (Fig. 28), define em sua bissetriz um ponto de água ( $S_w = S_{xo} = 100\%$ ), e na reta  $S_{xo} = b \cdot S_w^x$  o limite máximo da invasão do filtrado, conseqüentemente, da eficiência da invasão ou de fluxo fluido na rocha.

A análise dos fluidos recuperados através dos diagramas de Stiff (Fig 26), indicando

tratar-se de água da formação; o comportamento da produção do poço com água crescente com o tempo (desde 4 até 100% de água), e das figuras 21b, 27 e 28, sugerem ainda que o intervalo se caracteriza muito mais por apresentar uma sub-saturação de óleo do que uma possível ocorrência de invasão profunda. Esta sub-saturação poderá ser uma das causas das baixas resistividades desta zona, uma vez que a água intersticial constitui a fase contínua para o desenvolvimento da corrente elétrica.

### 5.2.2. Zona F

Testes de formação realizados em intervalos da zona F de vários poços, onde ocorrem baixas resistividades, recuperaram concomitantemente, óleo e mistura de óleo e água. A análise dos diagramas de Stiff (Fig. 29), indica também tratar-se de água da formação, pois os mesmos são coerentes com os padrões conhecidos para a água da formação Alagamar.

As figuras 30 e 32 mostram as relações entre  $\log R_t$  e  $\log R_{xo}$ , enquanto as figuras 31 e 33 mostram a relação entre  $\log S_w$  e  $\log S_{xo}$ , para os poços 7-UB-37D-RNS e 7-UB-43D-RNS, respectivamente. Estes poços foram escolhidos como exemplo por apresentarem, na zona F, seções com baixas resistividades bem desenvolvidas e litologicamente bem caracterizadas.

Observa-se nas figuras 30 e 32, que os valores de  $R_t$  são aproximadamente iguais aos valores de  $R_{xo}$ . Estes gráficos indicam 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 ( $R_t$ ). As figuras 31 e 33 mostram uma baixa eficiência de fluxo nestes intervalos, caracterizando pouco deslocamento fluido ou ocorrência de uma invasão nula. Deste modo, prevalece a hipótese (2), onde as ferramentas de investigação rasa e profunda estão lendo,  $R_t$  e não  $R_{xo}$ .

Assim sendo, a análise das figuras 21a e 29 a 33 sugere que as baixas resistividades registradas na seção inferior da zona F, aparentemente portadoras de hidrocarbonetos, se devem principalmente ao intervalo ser também sub-saturado de óleo ( $S_w$  maior que 55%), sendo a água igualmente a fase contínua.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

As microfotografias das amostras dos testemunhos dos poços UB-16-RNS, UB-25-RNS, UB-27-RNS e UB-32-RNS na zona F, e do poço UB-47-RNS na zona G, mostraram a presença de argilas autigênicas envolvendo os grãos da matriz (ilita-esmectita, ilita e clorita) e/ou preenchendo total ou parcialmente os poros (caulinita).

Na zona F, tanto nos reservatórios superiores, quanto nos inferiores onde ocorrem as baixas resistividades, foi constatado os mesmos tipos de argilominerais, diferenciando apenas nas proporções volumétricas, relativas de cada um. Os mesmos argilominerais também ocorrem na seção inferior da zona G, também com baixas resistividades.

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

Os valores de saturação de água calculados com as equações de Simandoux, Simandoux Laminar, Simandoux Modificado e Indonésia, são bastante otimistas e apresentam uma 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 as equações propostas e as Waxman-Smits, Patchett-Herrick, Duas Águas e Argila Dispersa, mostrou uma menor dispersão em valores absolutos para a equação proposta, em intervalos portadores de água. Para os intervalos produtores de óleo, a equação proposta apresenta-se mais otimista que as de Waxman-Smits e Patchett-Herrick e menos otimista do que as de Duas Águas e Argila Dispersa. Idêntico comportamento pode ser observado naqueles intervalos com baixas resistividades.

A melhor correlação de valores ocorre entre as equações proposta e a de Waxman-Smits, sendo o coeficiente de correlação da ordem de 0,98. Como a equação de Waxman-Smits é mundialmente reconhecida como válida para a avaliação de reservatórios argilosos, pode-se afirmar que

a equação proposta é consistente e, para o caso particular do Campo de Ubarana, mostrou um comportamento quantitativo melhor do que as demais equações testadas.

Afasta-se a possibilidade da ocorrência de invasão 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. Além do mais, os reservatórios apresentam permeabilidades inferiores a 2 milidarcys, caracterizando-os como de baixa transmissibilidade.

A análise das figuras 21a e b, dos gráficos  $\log R_{xo}$  vs  $R_t$  e  $\log S_{xo}$  vs  $\log S_w$ , dos diagramas de Stiff, além do histórico de produção dos poços estudados, sugere que as baixas resistividades registradas nas bases das zonas F e G, aparentemente portadoras de hidrocarbonetos, são devidas, principalmente, ao fato daqueles intervalos serem subsaturados de óleo, sendo a água a fase elétrica contínua. Este fato vem corroborar com os valores de saturação de água calculados com a equação proposta, bem como com as demais equações que utilizam o conceito de que as argilas contribuem com uma condução extra na resistividade final da rocha.

Os valores de  $R_t$  e  $R_{xo}$  não foram corrigidos, neste trabalho, pelo efeito da invasão, em virtude da dificuldade operacional do cálculo do diâmetro de invasão, quando se dispõe de apenas duas curvas de resistividade; uma profunda (RILD) e outra média (R16 ou RSFL).

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr Hilton B. Evans pela orientação deste trabalho, revisão do texto e sugestões.

Especialmente ao professor Geraldo Girão Nery pelo seu incentivo e efetiva co-orientação nesta pesquisa, leitura, correções e revisão do texto.

Ao geólogo João Rossi Filho pela análise petrográfica das amostra estudadas.

Ao analista de processamento de dados Antonio Adilson Ferreira pela implementação de programas computacionais e confecção de gráficos.

Ao geólogo Fernando Parentes Fortes pela ampliação de microfotografias e leitura do texto.

Ao professor Carlos Alberto Dias coordenador do convênio PETROBRÁS/UFPA.

Aos desenhistas Ronald Vieira e Rosiris Mendes.

Ao secretário André Luiz Oliveira.

À coordenação do curso de Pós-Graduação em Geofísica do Centro de Gociencias da UFPA, principalmente à Sra. Regina de Almeida Neves e à Srta. Bena Nazaré Rodrigues Sarmanho.

À Petróleo Brasileiro S.A pelo apoio logístico, suporte financeiro e por ter fornecido todos os dados necessários para a realização deste trabalho.

A todos aqueles que colaboraram direta e indiretamente na realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCHIE , G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristic. Trans. AIME, 146, 54–62.
- BROWN , G. A., 1986, A mathematical comparison of common saturation equations. Trans. SPWLA 27th Ann. Logging Symposium.
- CASTRO , J.C. de; BARROCAS, S.L.S.; CRUZ, W.M., 1981, Facies, diagenese e reservatórios do campo de Ubarana. Rio de Janeiro, Petrobrás. (Rel. Tec.)
- CLAVIER , C.; HEIM, A.; SCALA, C., 1976, Effect of pyrite on resistivity and other logging measurements. Trans. SPWLA 17th Ann. Logging Symposium.
- CLAVIER , C.; COATES, G.; DUMANOIR, J., 1977, The theoretical and experimental bases for the "Dual Water" model for the interpretation of shaly sands. 52th Ann. Fall Technical Conference.
- DE WITTE , L., 1950, Relations between resistivities and fluid contents of porous rocks. Oil and Gas Journal, 49, 120.
- DOLL , H. G., 1949, The SP log in shaly sands. Trans. AIME, 189, 205.
- FERTL , W. H., 1981, Openhole crossplot concepts – A powerful technique in well log analysis. Journal of Petroleum Technology, march.
- GIVENS , W. W., 1987, A conductivity rock matrix model for the analysis of low–contrast resistivity formation. The Log Analyst, 28 (2) 138–151.
- GIVENS , W. W., & SCHMIDT, F. J., 1988, A generic electrical conduction model for low–contrast resistivity sandstones. Trans. SPWLA 29th Ann. Logging Symposium.
- GRIM , R. E., 1953, Clay mineralogy. McGraw–Hill Book Co., Inc.
- HERRICK , D. C., 1988, Conductivity models, pore geometry, and conduction mechanisms. Trans. SPWLA 29th Ann. Logging Symposium.

- HILL , H. J. & MILBURN, J. D., 1956, Effect of clay and water salinity on electrochemical behavior of reservoir rocks. Trans. AIME, 207, 65.
- JUHASZ , I., 1981, Normalize  $Q_v$  – The key to shaly sand evaluation using the Waxman–Smits equation in absence of core data. Trans. SPWLA 22th Ann. Logging Symposium.
- MURPHY , R. D., OWENS, W. W., 1972, A new approach for low resistivity sand log analysis. Journal of Petroleum Technique, November, 1302–1306.
- NERY , G. G., 1989, Perfilagem geofísica de poços. Salvador, SEDES/CENNOR, Petrobrás. (Rel. Téc.)
- NERY , G. G., 1990, The dual water  $R_{wb}$  parameter as determined through the osmotic filtration process. Trans. SPWLA 31th Ann. Logging Symposium.
- OKADA , A. H., 1982, Facies, petrographic, and engineering analysis of lower cretaceous reservoirs. Ubarana field, Potiguar Basin, Brazil. M. Sc Thesis, Univ. of Texas at Austin.
- PATNODE , H. W. & WILLIE, M. R. J., 1950, The presence of conductive solids in reservoir rocks as a factor in electric log interpretation. Trans. AIME, 189, 47.
- PATCHETT , J. G., 1975, An investigation of shale conductivity. Trans. SPWLA 16th Ann. Logging Symposium.
- PATCHETT , J. G., & HERRICK, D. C, 1982, A review of saturation models. SPWLA Reprint Volume, shaly sand.
- PIMENTEL , A. M., & CORDEIRO, C. R., 1984, Análise ao microscópio eletrônico de varredura e ao difratômetro de raios X de amostras do poço 7–UB–47–RNS. Rio de Janeiro, Petrobrás. (Rel. Téc.)
- POUPON , A.; LOY, M. E.; TIXIER, M. P., 1954, A contribution to electric log interpretation in shaly sands. Trans. AIME, 201, 138–145.
- SCHLUMBERGER LIMITED, 1972, Log interpretation principles. New York.
- SCIENTIFIC SOFTWARE INTERCOMP, 1986, The logcalc models: environ, calc and TDT. Denver, Colorado.

- SIMANDOUX , P., 1963, Mesures dielectriques en milieu poreux, application a mesure des saturations en eau, etude du comportement des massifs argileux. Revue de l'institut Francais du Petrole, Supplementary Issue.
- STIFF , H. A., 1951, The interpretation of chemical analysis by means of patterns. Journal of Petroleum Technology, 3, 15-17.
- SWANSON , B. F., 1985, Microporosity in reservoir rocks - its measurement and influence on electrical resistivity. Trans. SPWLA 26th Ann. Logging Symposium.
- TIXIER , R. P.; MORRIS, R.L.; CONNEL, J.G., 1968, Log evaluation of low-resistivity pay sands in the Gulf Coast. Trans. SPWLA 9th Ann. Logging Symposium.
- VAJNAR , E. A.; KIDWELL, C. M.; HALEY, R. A., 1978, Low resistivity marks high potencial of Gulf coast sands. World Oil, February, 49-54.
- WAXMAN , M. H., & SMITS, L.T.M., 1968, Electrical conductivities in oil bearing shaly sands. SPE Journal, June 107-122.
- WAXMAN , M. H., & THOMAS, E. C., 1974, Electrical conductivities in shaly sands. Journal Petroleum Technology, February, 213-225.

**TABELA 1**  
**Sumário da Mineralogia das Argilas**

| Valores Médios (%) |         |        |      |        |         |        |      |        |          |      |      |        |
|--------------------|---------|--------|------|--------|---------|--------|------|--------|----------|------|------|--------|
| Poço               | Zona F1 |        |      |        | Zona F2 |        |      |        | Zona G/H |      |      |        |
|                    | CAU     | CLO    | ILI  | ILI/ES | CAU     | CLO    | ILI  | ILI/ES | CAU      | CLO  | ILI  | ILI/ES |
| 3-UB-25            | 57,5    | TRAÇOS | 10,0 | 32,5   | 28,0    | 15,0   | 10,0 | 47,0   |          |      |      |        |
| 3-UB-27            | 56,0    | TRAÇOS | 7,5  | 36,5   | 32,0    | TRAÇOS | 10,0 | 58,0   |          |      |      |        |
| 7-UB-47            |         |        |      |        |         |        |      |        | 20,5     | 51,0 | 15,0 | 13,5   |
| <b>Total</b>       | 56,75   | TRAÇOS | 8,75 | 34,5   | 30,0    | 7,5    | 10,0 | 52,5   | 20,0     | 51,0 | 15,0 | 13,5   |

| LEGENDA | CAU= CAULINITA | ILI= ILITA             |
|---------|----------------|------------------------|
|         | CLO = CLORITA  | ILI/ES=ILITA/ESMECTITA |

FONTE: PETROBRAS/CENPES

**TABELA 2**  
**Saturações de água Irredutível e óleo Residual**  
**Determinados em Testemunhos**

| Poço       | Zona | Profundidade (m) | Água Irredutível(%) | Óleo Residual (%) |
|------------|------|------------------|---------------------|-------------------|
| 7-UB-6-RNS | F1   | 2425,9           | 33,2                | 6,7               |
|            | F2   | 2449,9           | 23,1                | 19,8              |

FONTE: OKADA, 1982

TABELA 3

Dados Utilizados para a confecção dos Diagramas de Stiff

| Composição do Fluido Recuperado (mg/l) |       |              |         |         |             |         |         |
|----------------------------------------|-------|--------------|---------|---------|-------------|---------|---------|
| Poço                                   |       | 7-UB-37D-RNS |         |         | 7-UB-47-RNS |         |         |
| Zona                                   |       | F1           |         | F2      | G/H         |         |         |
| cátions                                | Na+   | 2470,0       | 3750,0  | 2800,0  | 26110,0     | 29200,0 | 25800,0 |
|                                        | K+    | 13800,0      | 12600,0 | 14200,0 | 0,0         | 1680,0  | 1835,0  |
|                                        | Ca++  | 13000,0      | 10600,0 | 12300,0 | 9170,0      | 5210,0  | 5000,0  |
|                                        | Mg++  | 180,0        | 130,0   | 140,0   | 610,0       | 810,0   | 865,0   |
|                                        | Fe+++ | 60,0         | 20,0    | 50,0    | 0,0         | 10,0    | 70,0    |
| ânions                                 | Cl-   | 40300,0      | 37200,0 | 37400,0 | 58080,0     | 54400,0 | 54200,0 |
|                                        | HCO3- | 1000,0       | 570,0   | 950,0   | 310,0       | 530,0   | 122,0   |
|                                        | SO4-- | 540,0        | 790,0   | 600,0   | 10,0        | 100,0   | 24,0    |
|                                        | CO3-- | 0,0          | 0,0     | 0,0     | 0,0         | 0,0     | 23,0    |

FONTE: PETROBRAS / DEPRO

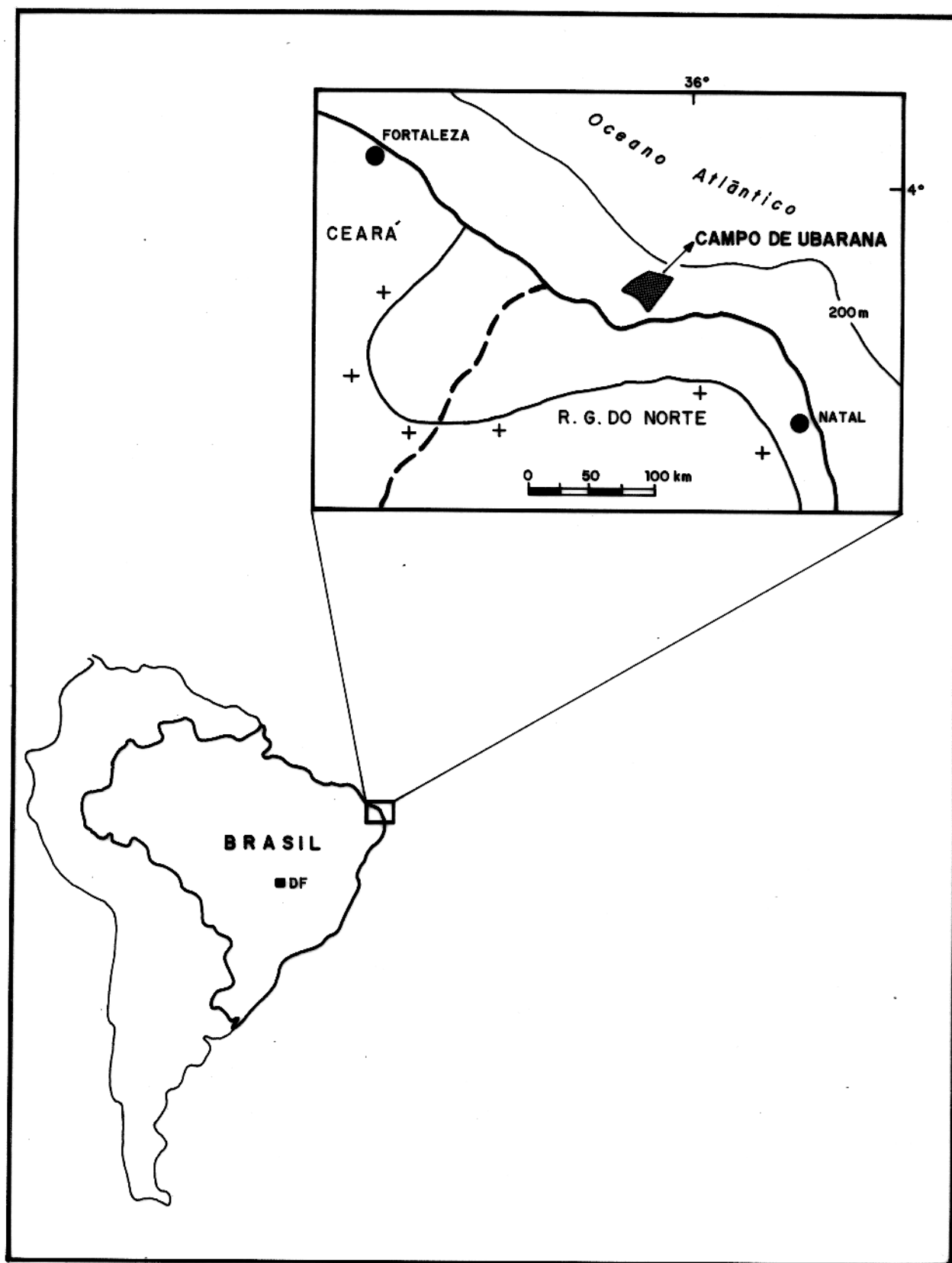


FIG. 1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO CAMPO.

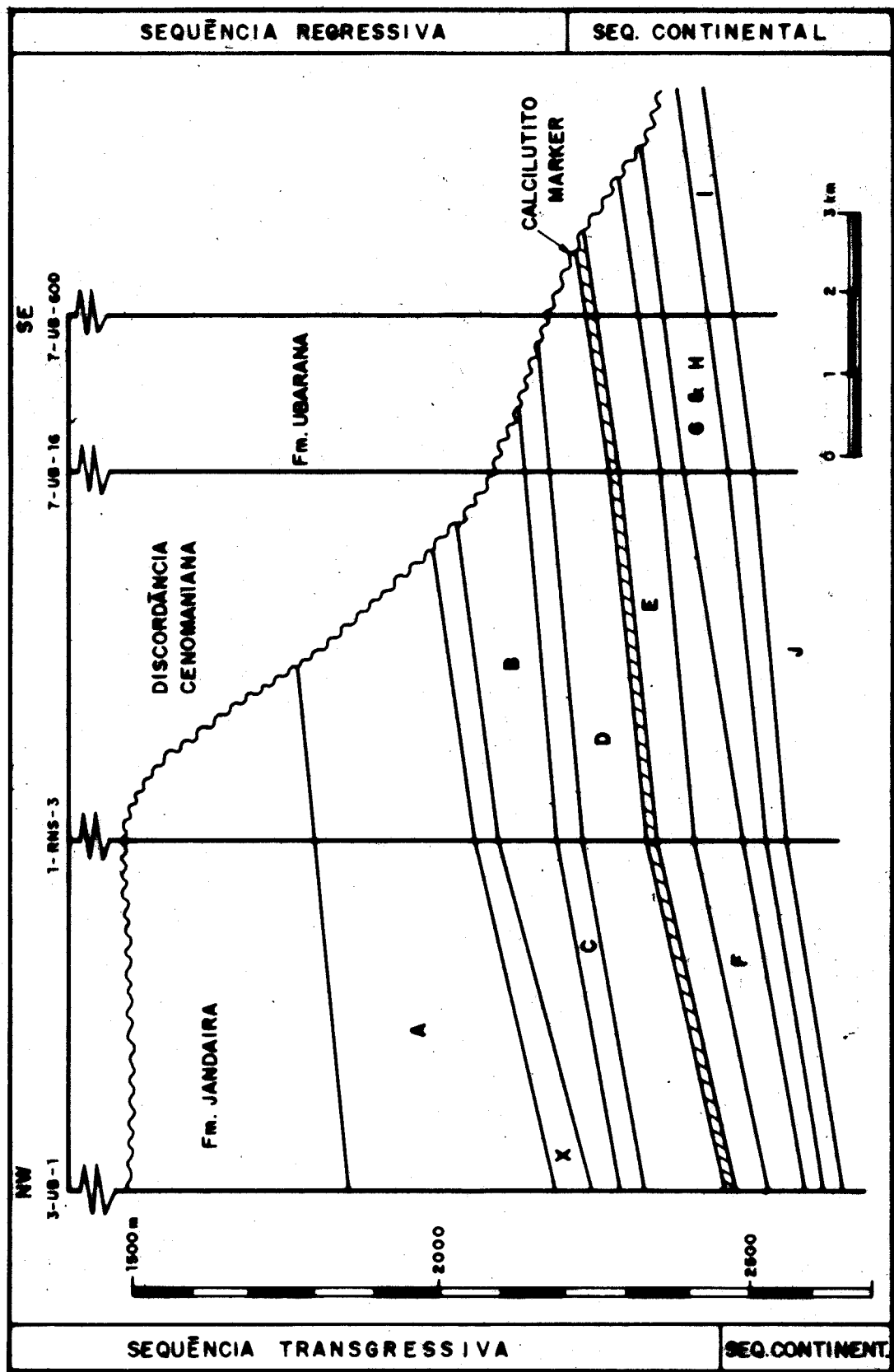


Figura 2 — Esquema de uma seção estrutural transversal do campo de Uberana, mostrando todas as zonas produtoras de Hidrocarbonetos (Okada, 1982).

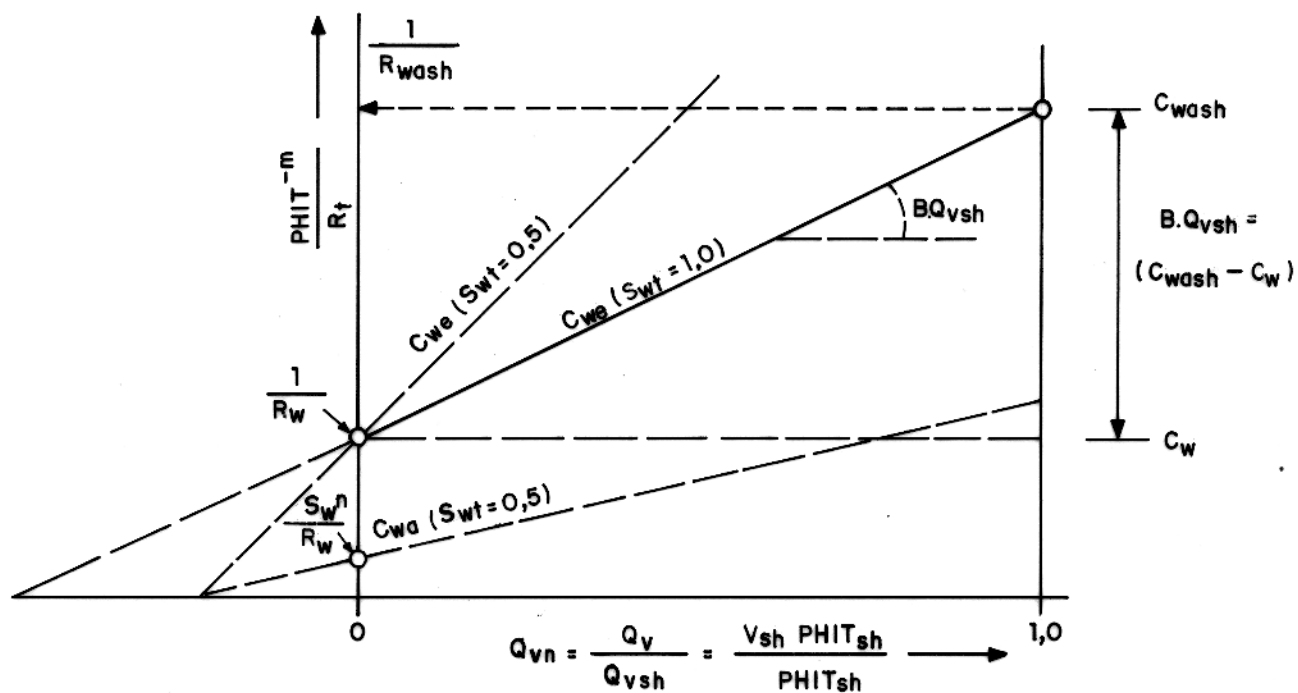
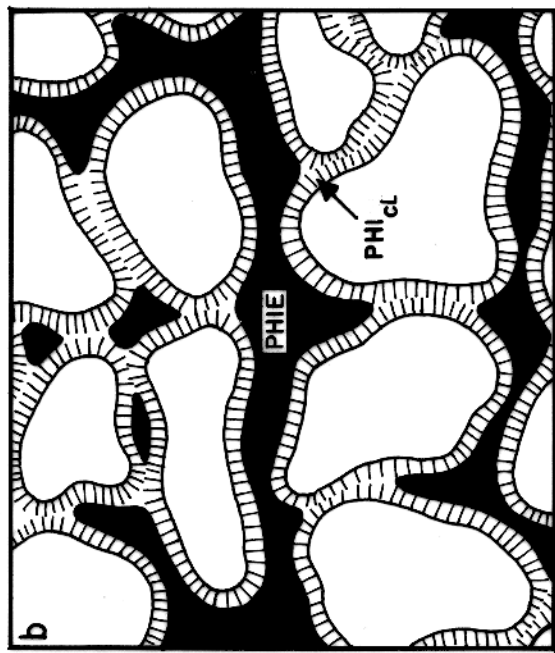
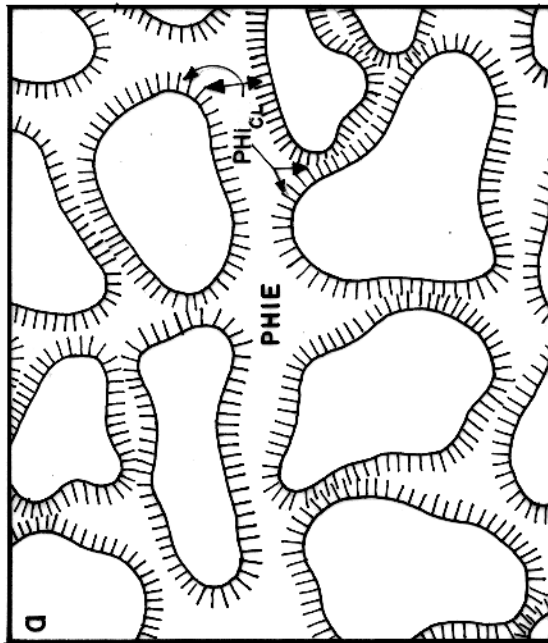


Figura 3 — Representação gráfica da equação de Waxman — Smits normalizada (Adaptado de Juhász 1981).



(b) - Porosidade intergranular (PHIE) preenchida com óleo e microporos ( $PHI_{CL}$ ) preenchidos com água.



(a) - Porosidade intergranular (PHIE) e microporos ( $PHI_{CL}$ ) preenchidos com água.

Figura 4 - Esquema de um arenito argiloso com baixo contraste de resistividade. A rocha ilustrada contém dois tipos de espaço poroso que podem ter diferentes propriedades elétricas e estão eletricamente em paralelo. Adaptado de Givens e Schimdt, 1988.

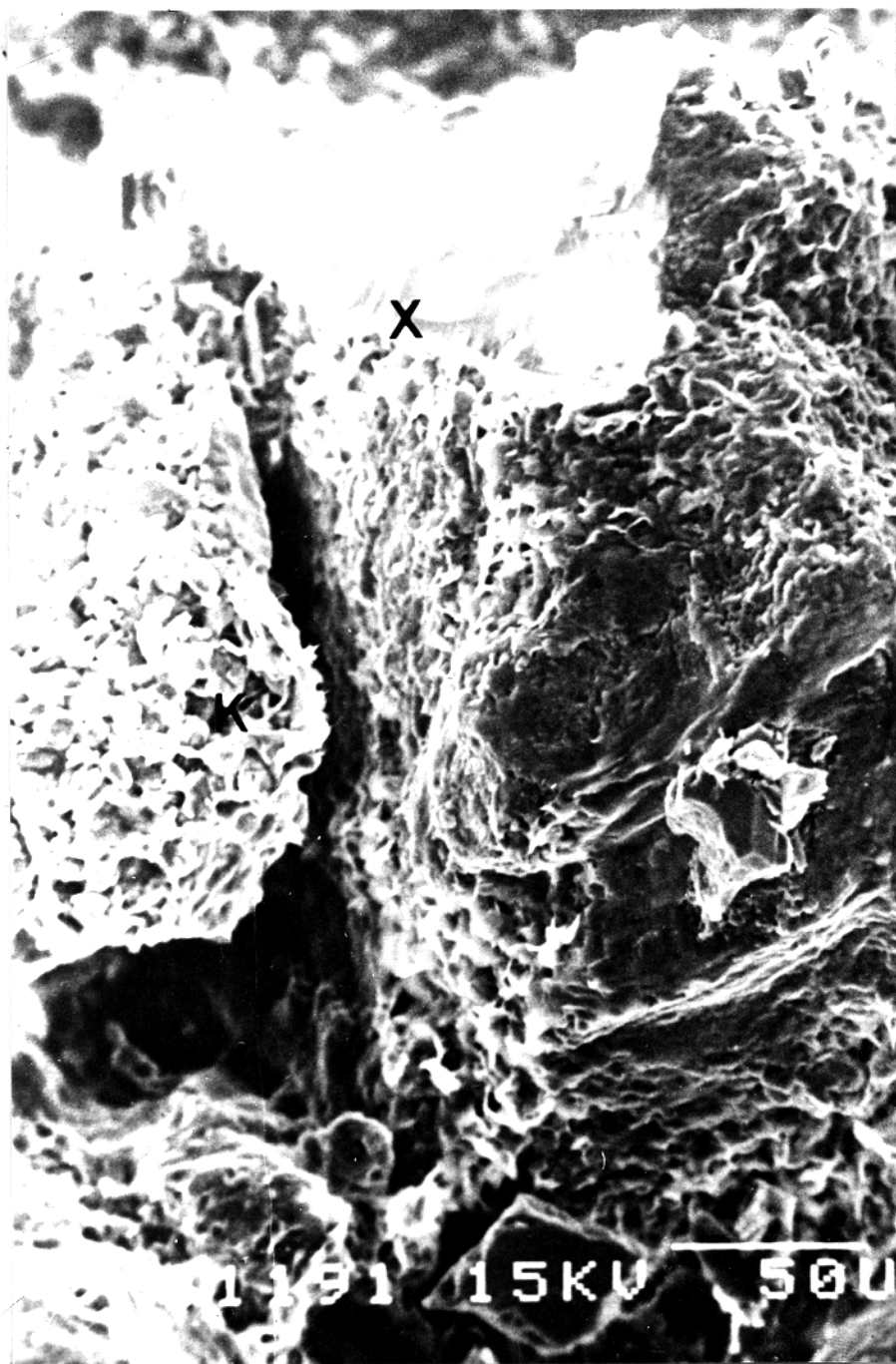


Figura 5 - Detalhe dos poros e da caulinita na superfície dos grãos como provável alteração de Feldspato (K), e clorita capeando grão fragmentado (X). Zona F do poço 7-UB-32-RNS; 2626,4m (Castro et al, 1981).



Figura 6 - Grãos recobertos com argila do tipo illita-esmectita formando "pontes".  
Notar a presença de lamelas de caulinita associada. Zona G do poço  
7-UB-47-RNS ; 2501,2 m ( Pimentel & Cordeiro, 1984 ).

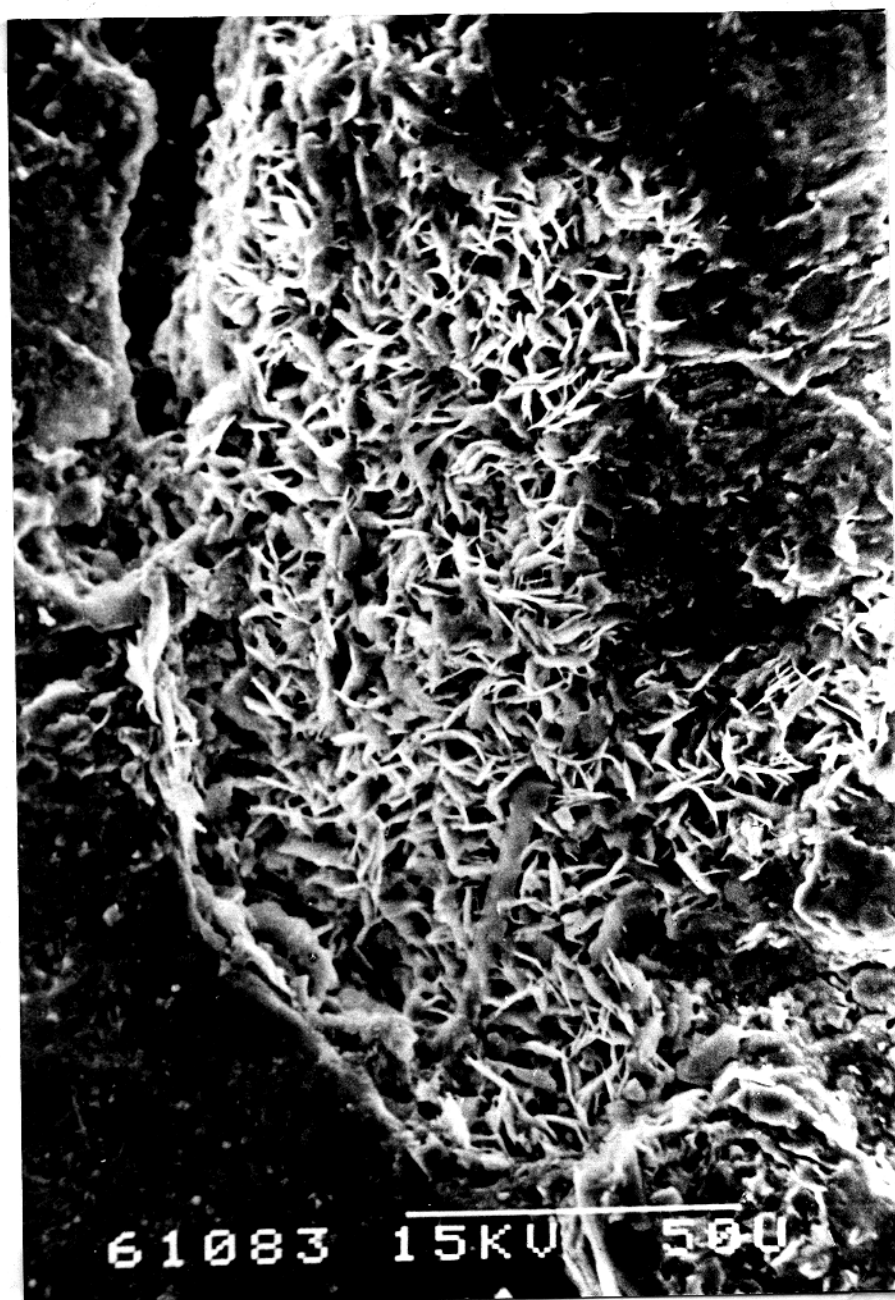


Figura 7 - Clorita autigênica tamponando os poros. Zona F do poço 7-UB-32-RNS, 2582,5m (Castro et al., 1991).

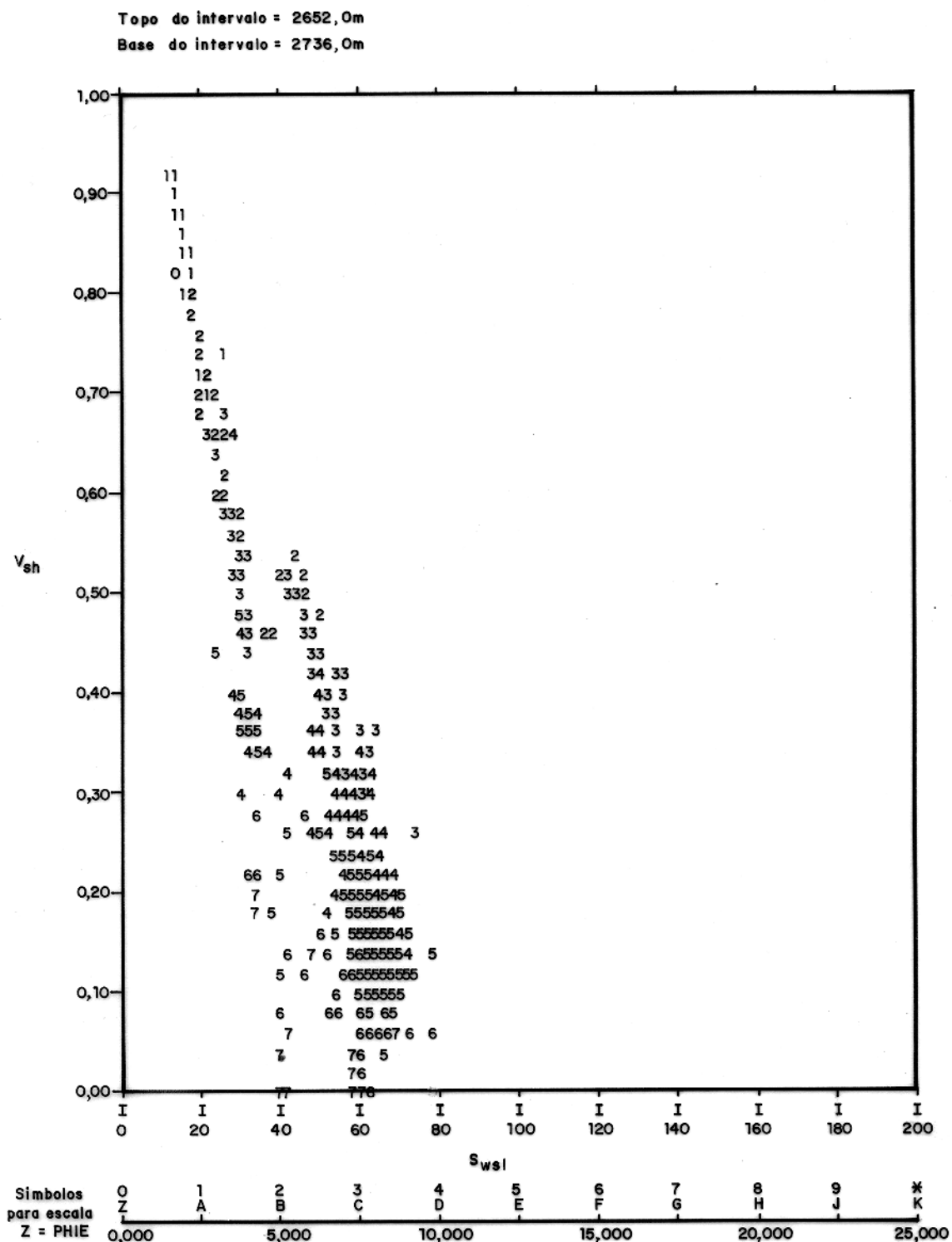


Figura 8 - Resposta do modelo de Simandoux Laminar ( $S_{wsl}$ ) em frente a um intervalo portador de água e com argilosidade variando de 0 a 100%. Poço 7-UB-114D-RNS.

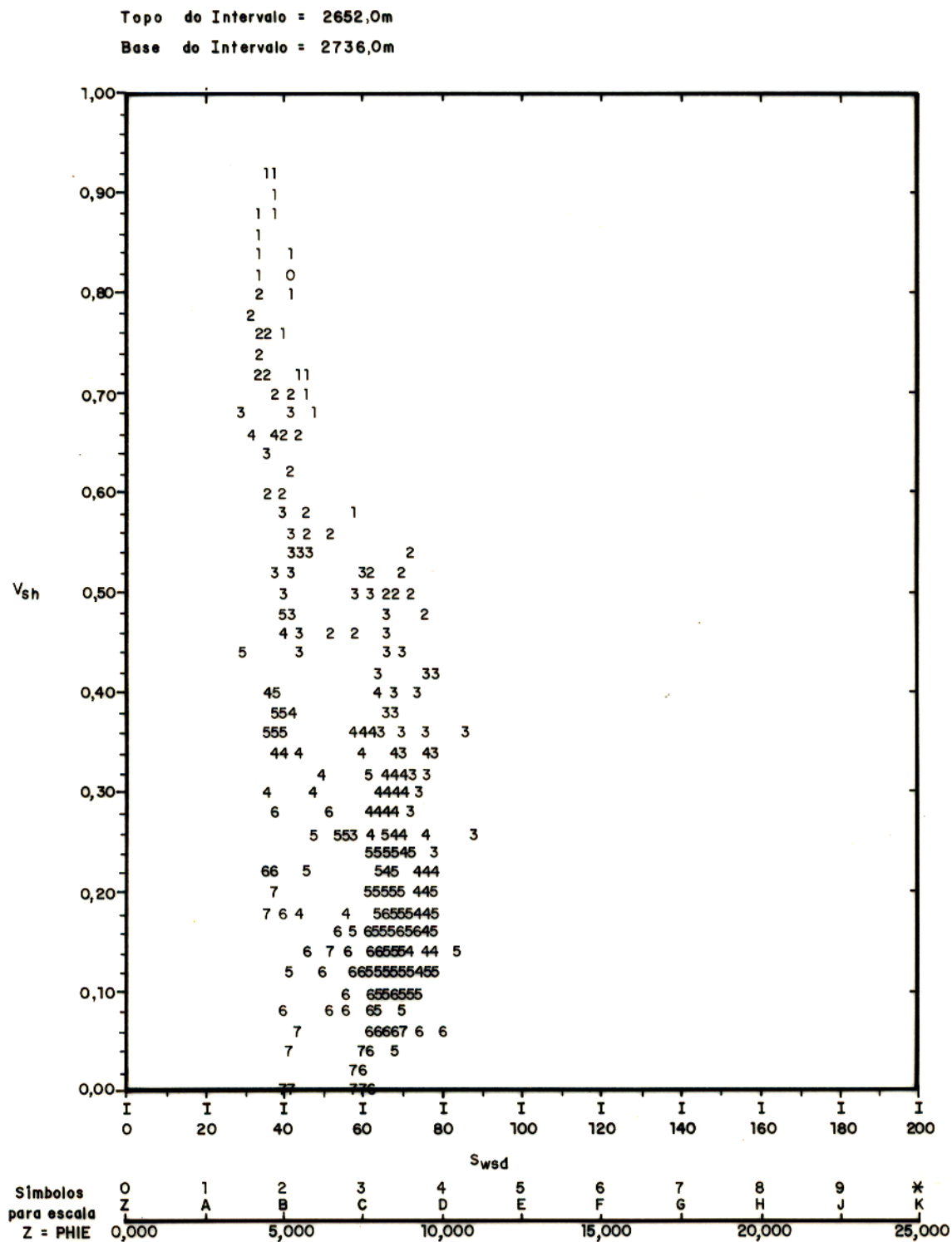


Figura 9 - Resposta do modelo de Simandoux ( $S_{wsd}$ ) em frente a um intervalo portador de água e com argilidade variando de 0 a 100%. Poço 7-UB-114D-RNS.

Topo do Intervalo = 2652,0m

Base do Intervalo = 2736,0m

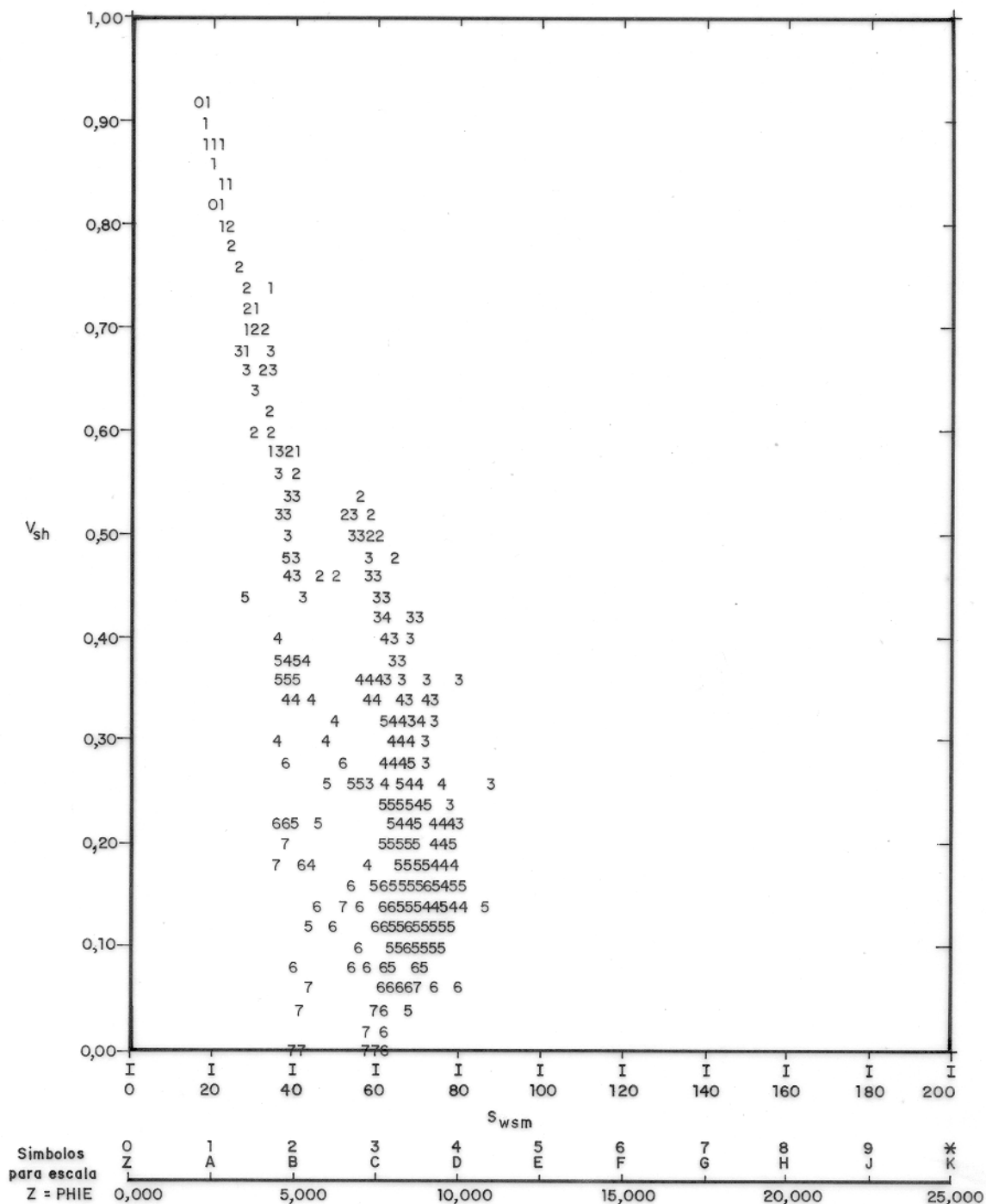


Figura 10 - Resposta do modelo de Simandoux Modificado ( $S_{wsm}$ ) em frente a um intervalo portador de água e com argilosidade variando de 0 a 100%. Poço 7-UB-114D-RNS.

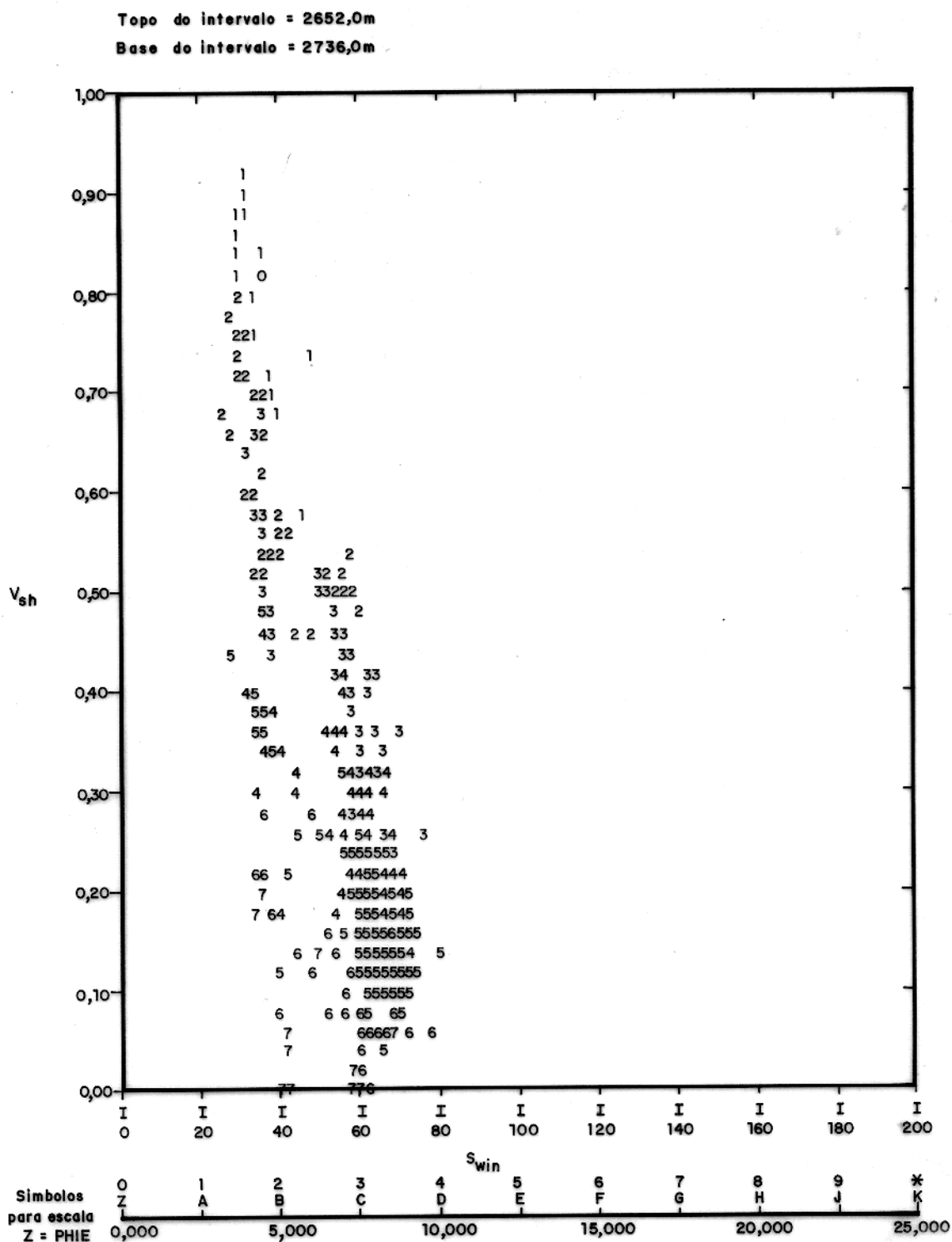


Figura 11 – Resposta do modelo da Indonésia ( $S_{win}$ ) em frente a um intervalo portador de água e com argilosidade variando de 0 a 100%. Poço 7-UB-114D-RNS

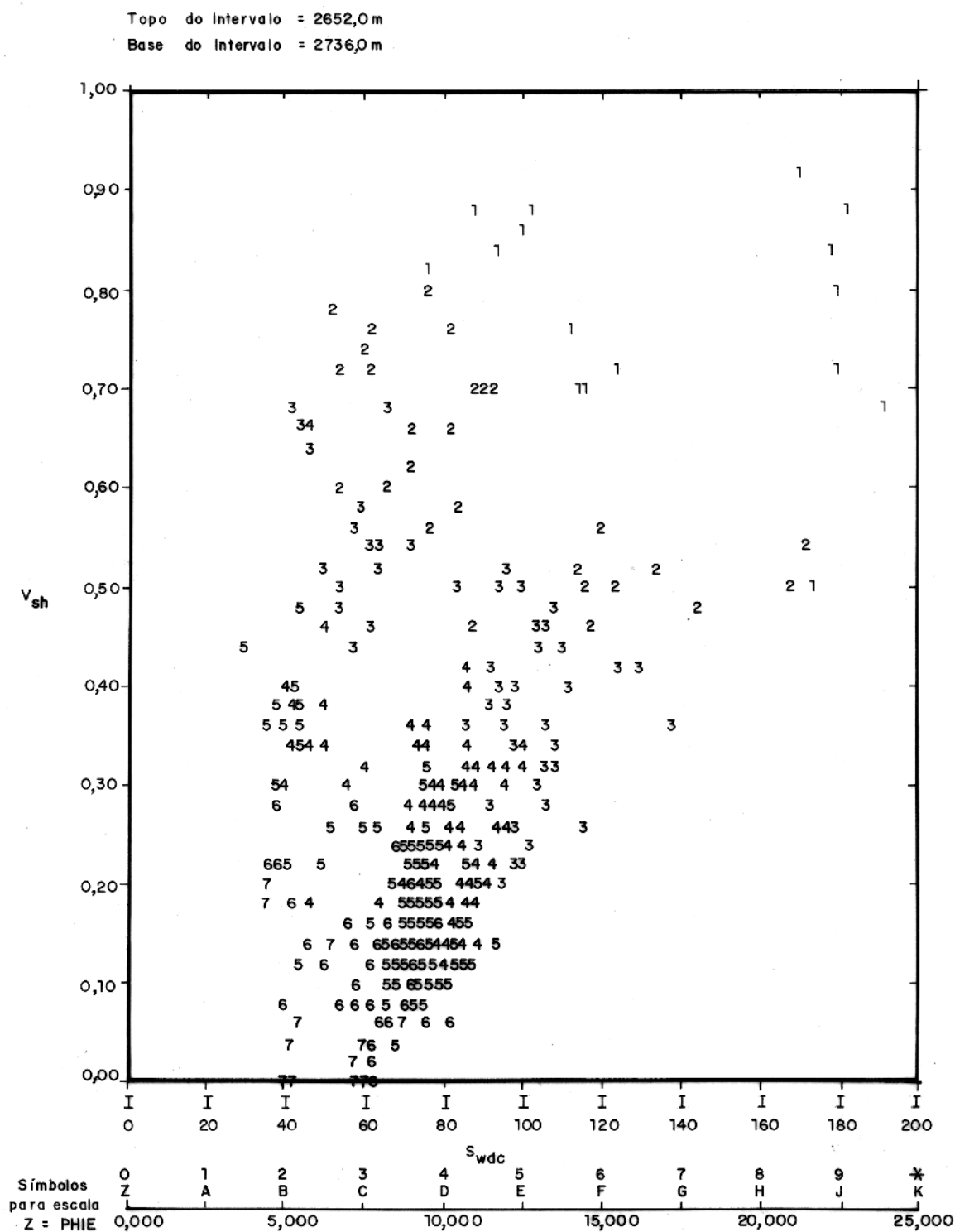


Figura 12 - Resposta do modelo para Argila Dispersa ( $S_{wdc}$ ) em frente a um intervalo portador de água e com argilosidade variando de 0 a 100%. Poço 7-UB-114D-RNS.

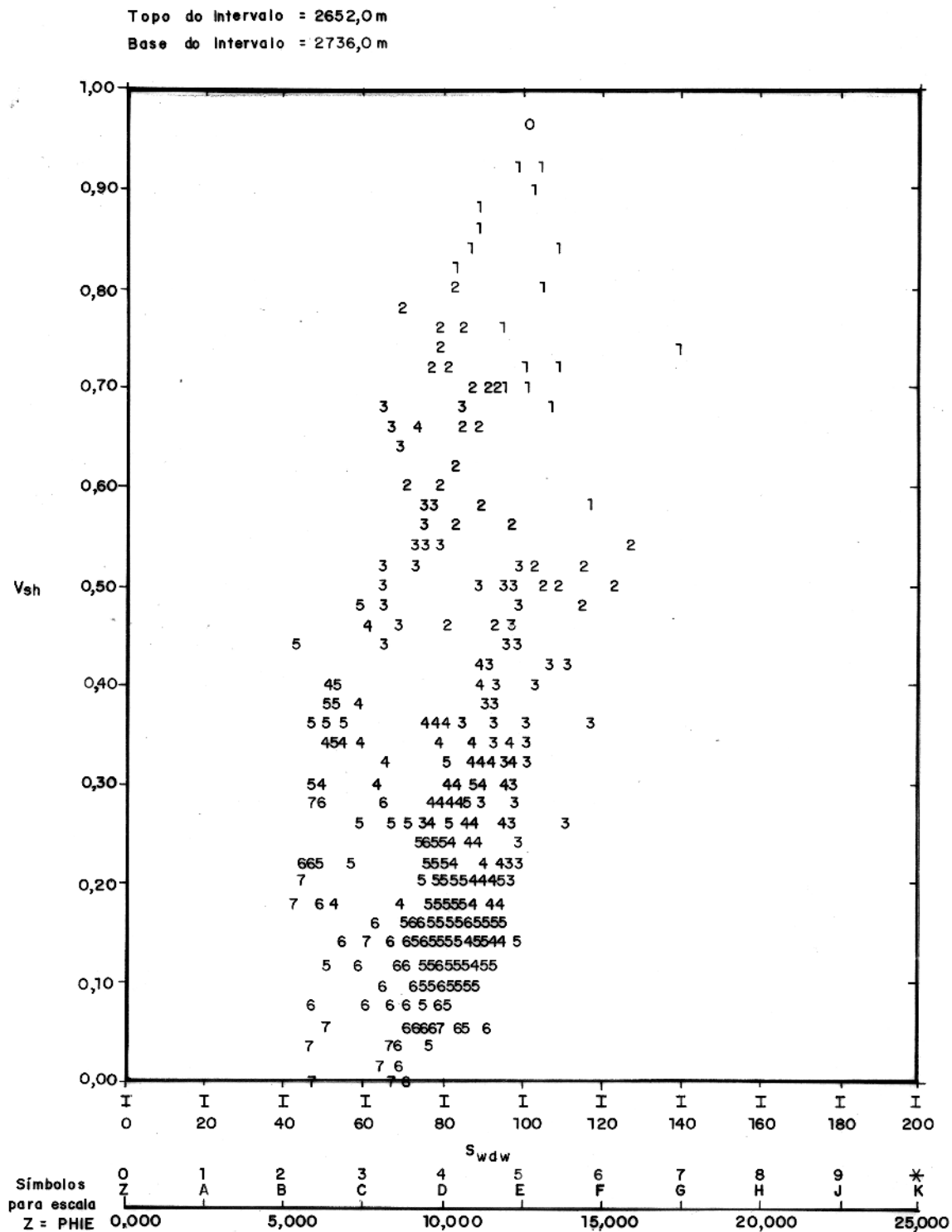


Figura 13 - Resposta do modelo de Duas Águas ( $S_{wsd}$ ) em frente a um intervalo portador de água e com argilosidade variando de 0 a 100 %. Poço 7-UB-114D-RNS.

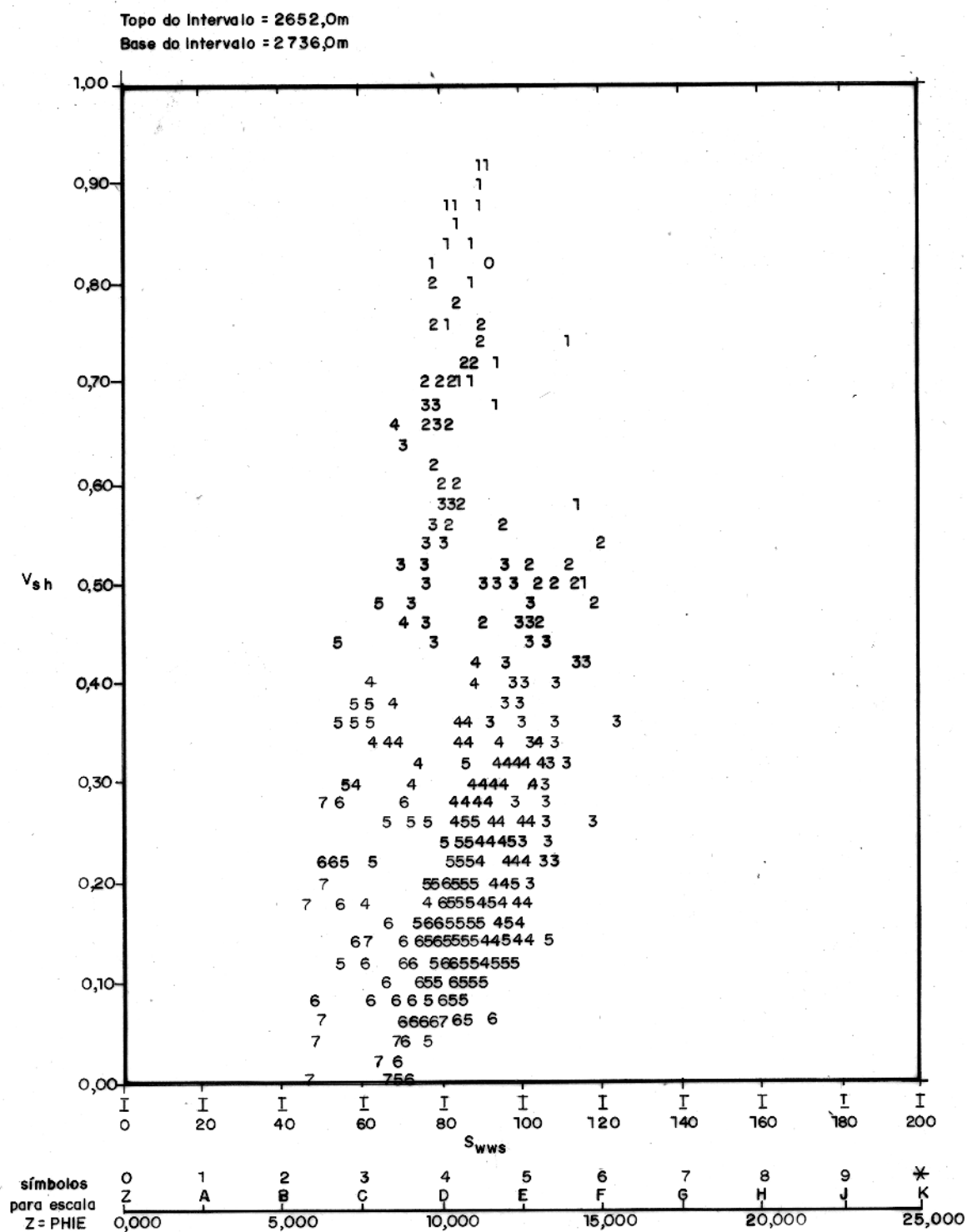


Figura 14- Resposta do modelo de Waxman-Smits ( $S_{wws}$ ) em frente a um intervalo portador de água e com argilosidade variando de 0 a 100 %. Poço 7-UB-114D-RNS.

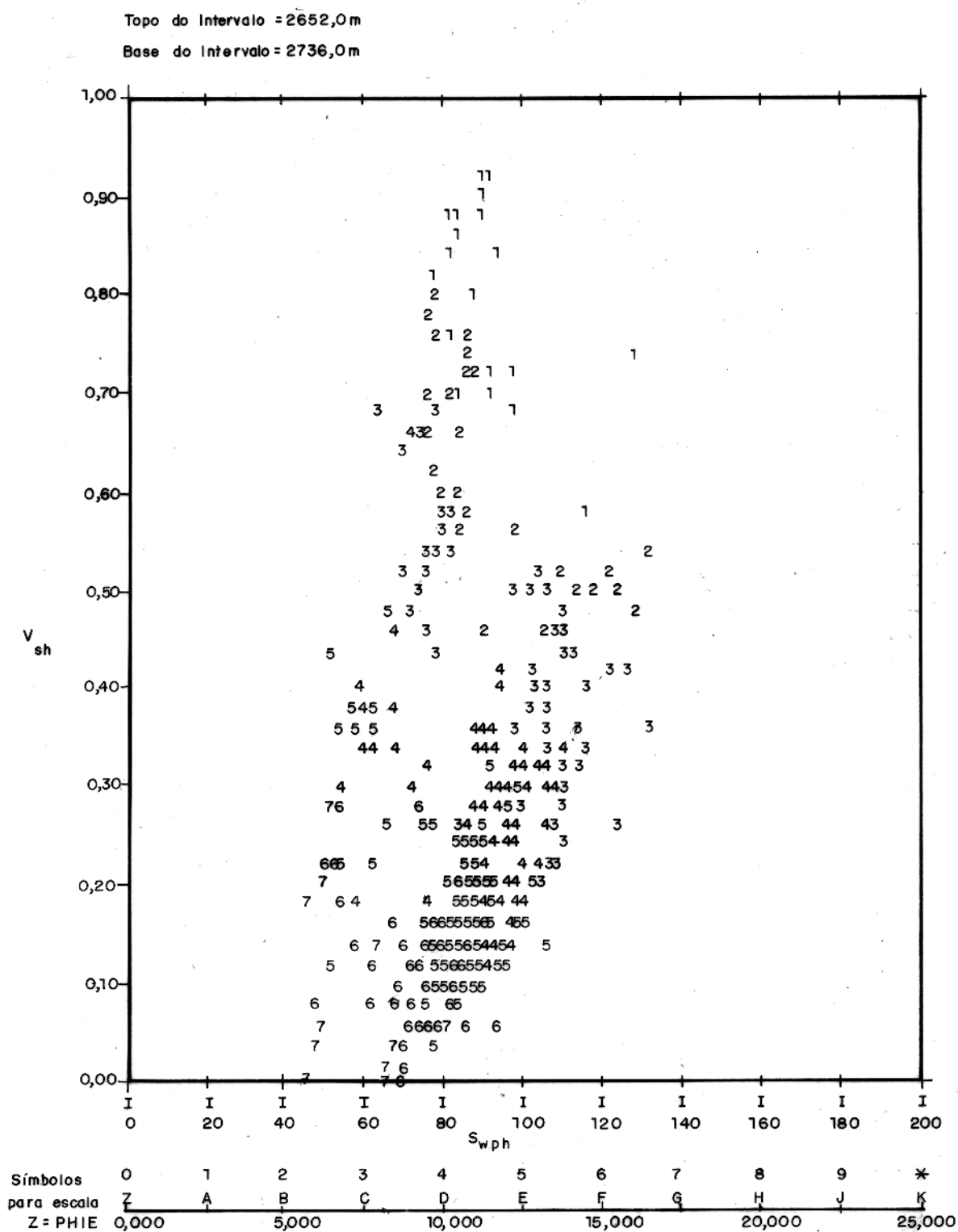


Figura 15 - Resposta do modelo de Patchett-Herrick ( $S_{wph}$ ) em frente a um intervalo portador de água e com argilosidade variando de 0 a 100 %. Poço 7-UB-114D-RNS.

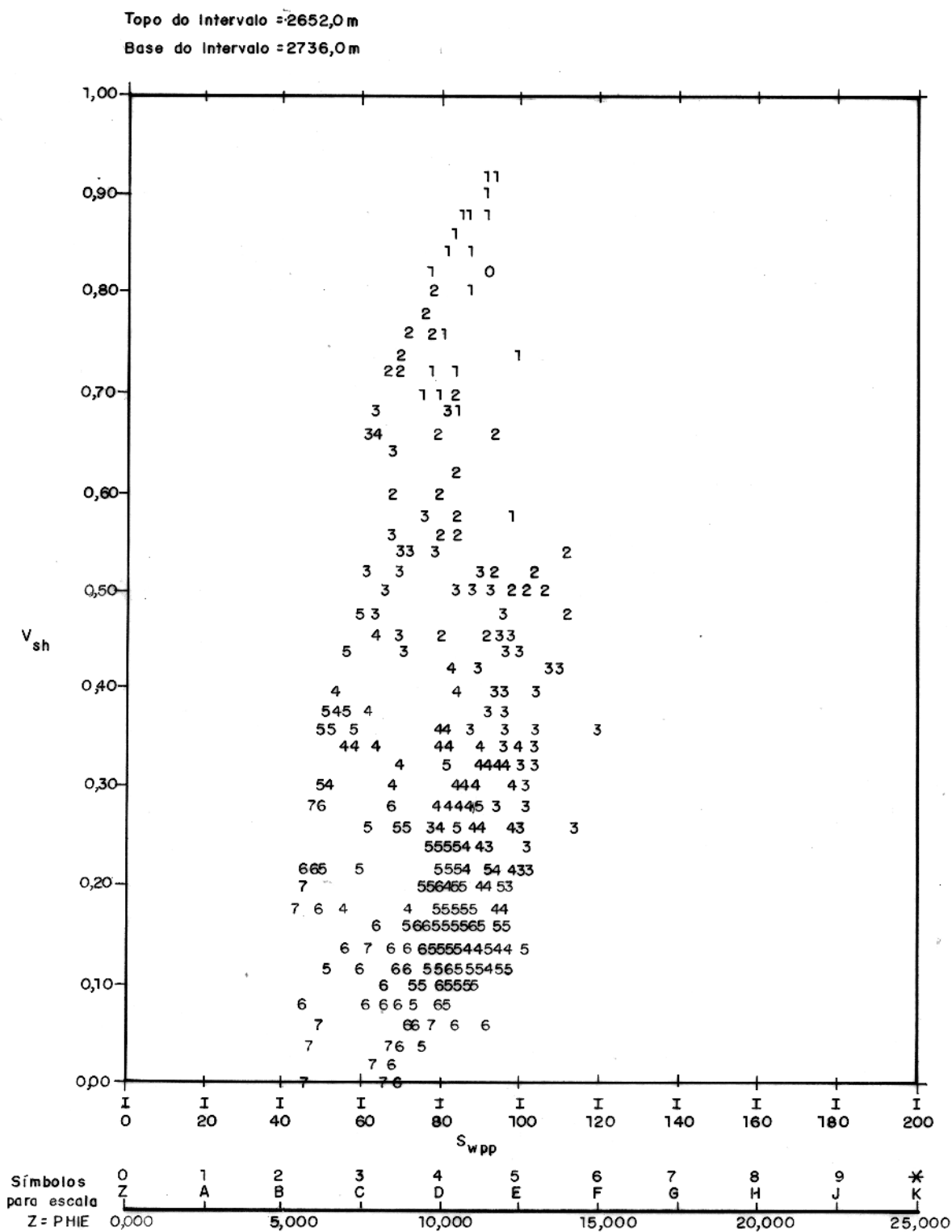


Figura 16 - Resposta do modelo proposto ( $S_{wpp}$ ) em frente a um intervalo portador de água e com argilosidade variando de 0 a 100 %. Poço 7-UB-114D-RNS.

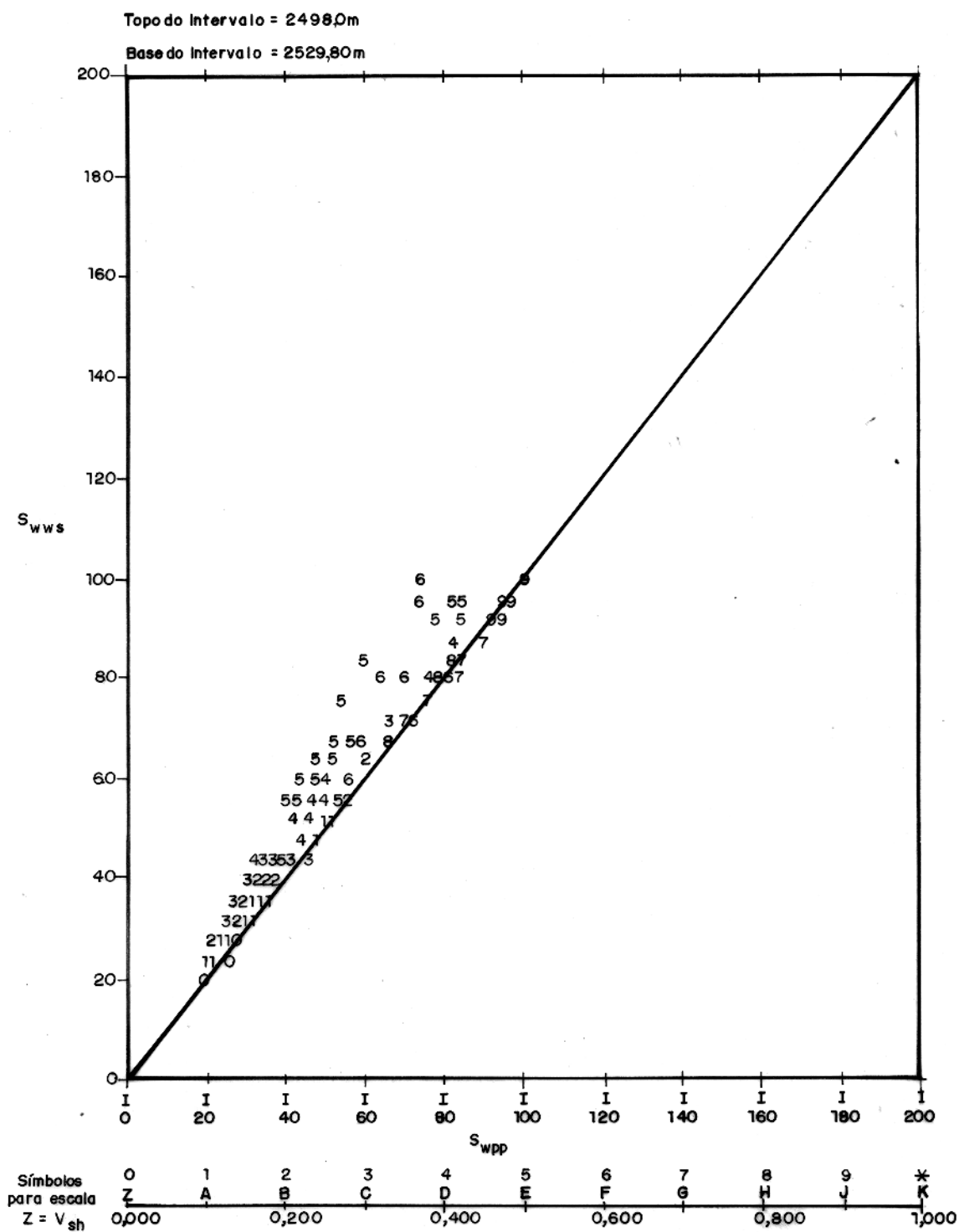


Figura 17 - Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações proposta ( $S_{wpp}$ ) e a de Waxman-Smits ( $S_{wws}$ ). Poço 7-UB-37D-RNS.

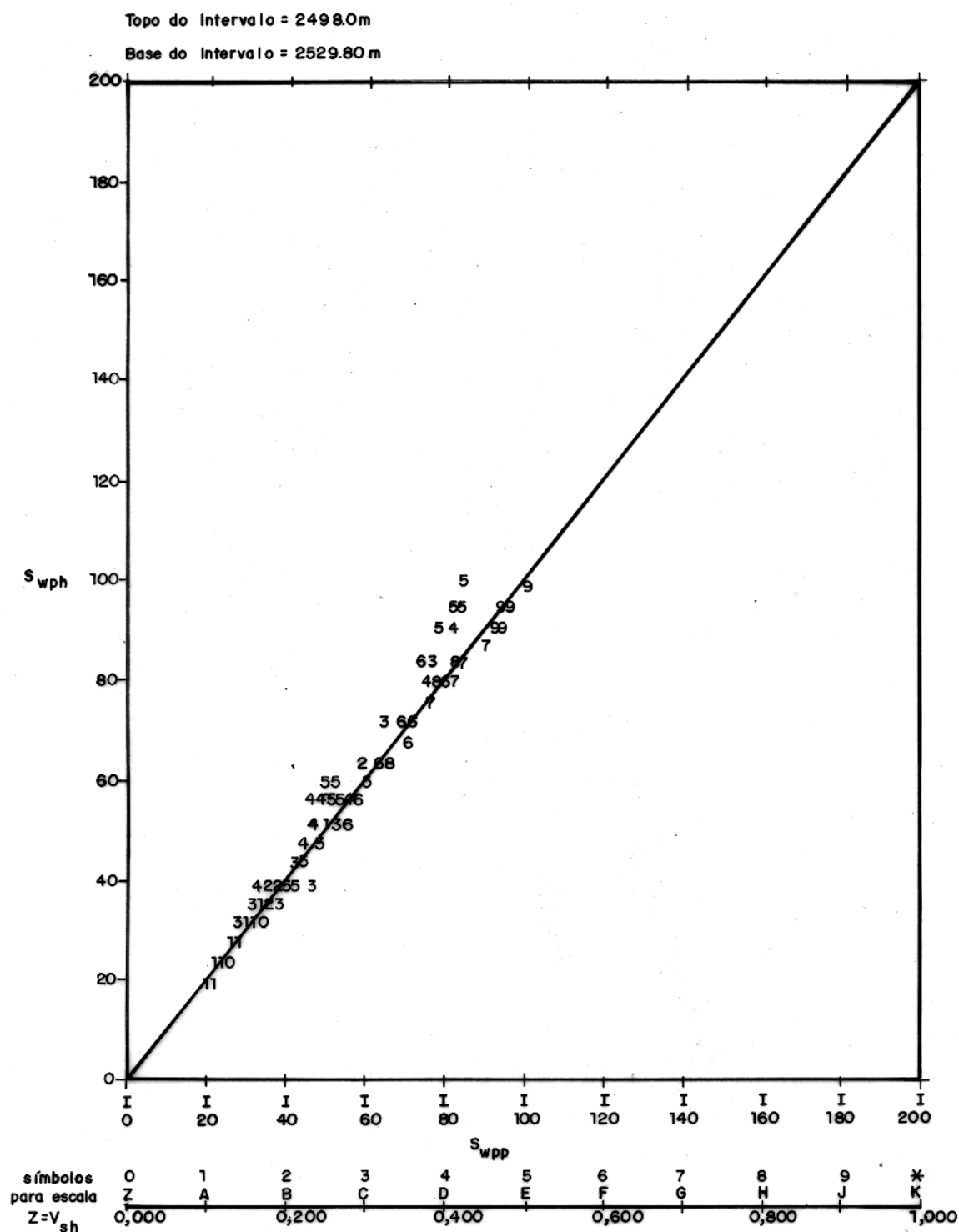


Figura 18 - Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações proposta ( $S_{wpp}$ ) e os de Patchett-Herrick ( $S_{wph}$ ). Poço 7-UB-37D - RNS.

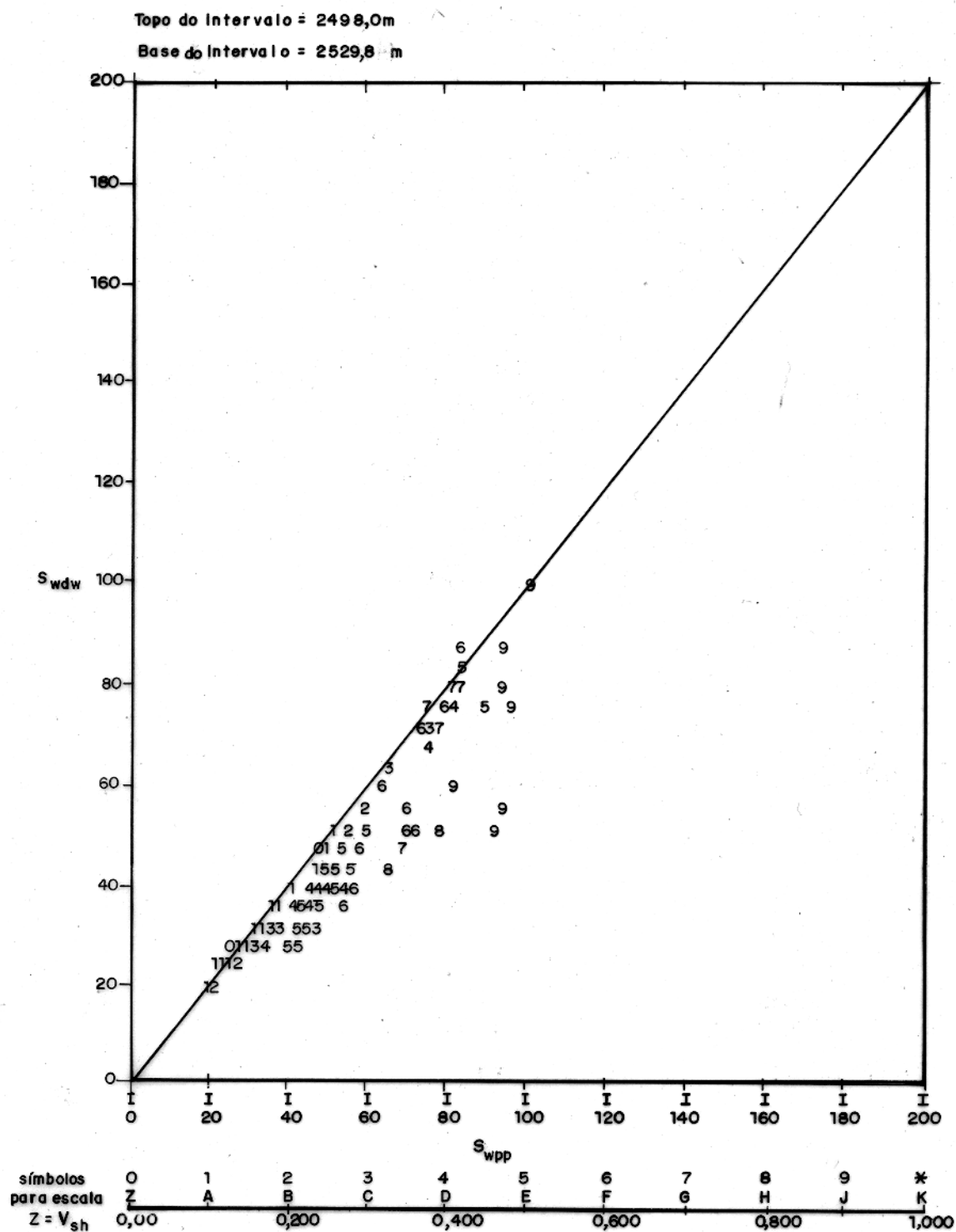


Figura 19- Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações propostas ( $S_{wpp}$ ) e a de Duas Águas ( $S_{wdw}$ ). Poço 7-UB-37D-RNS.

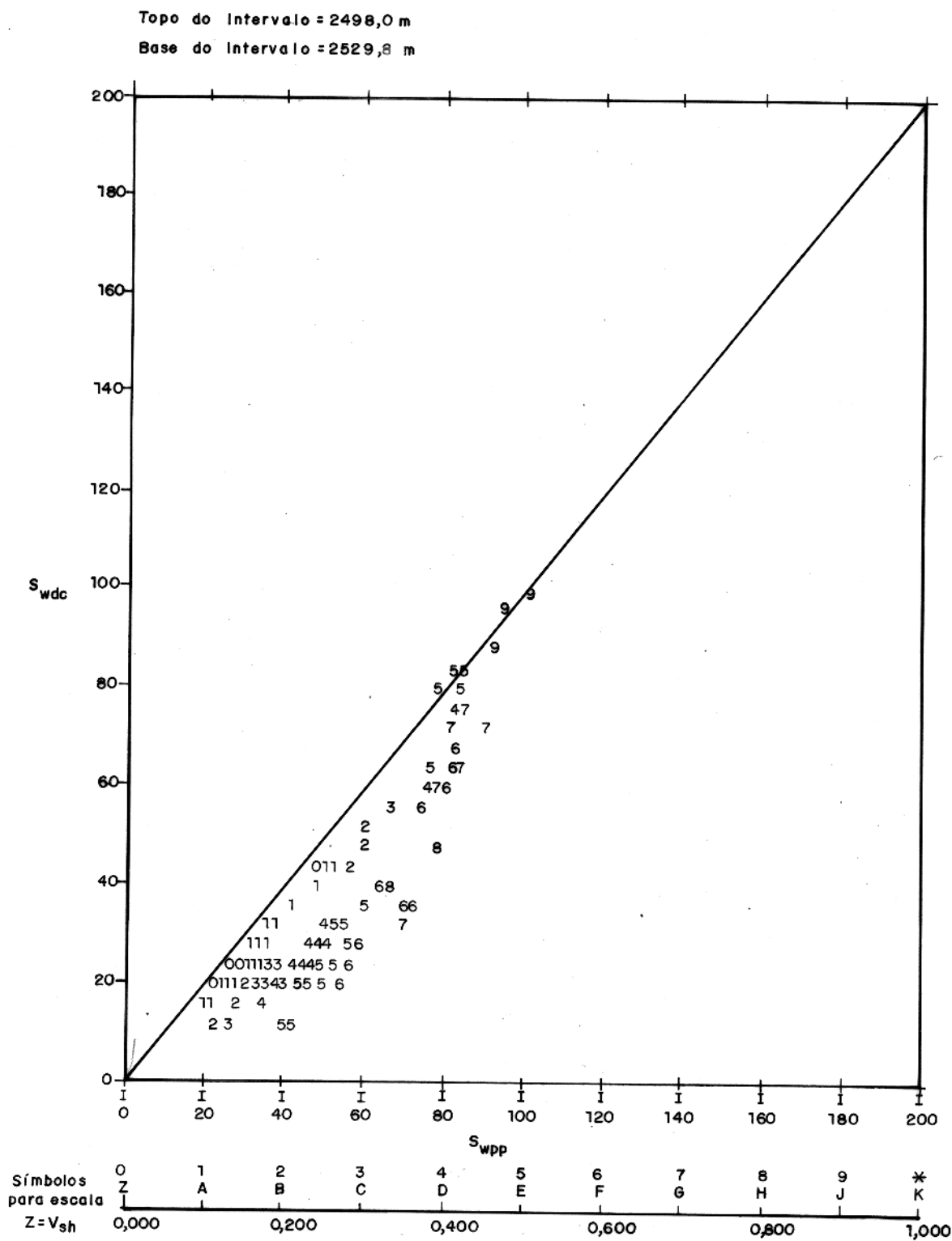


Figura 20 - Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações proposta ( $S_{wpp}$ ) e a de Argila Dispersa ( $S_{wdc}$ ). Poço 7-UB-37D-RNS.

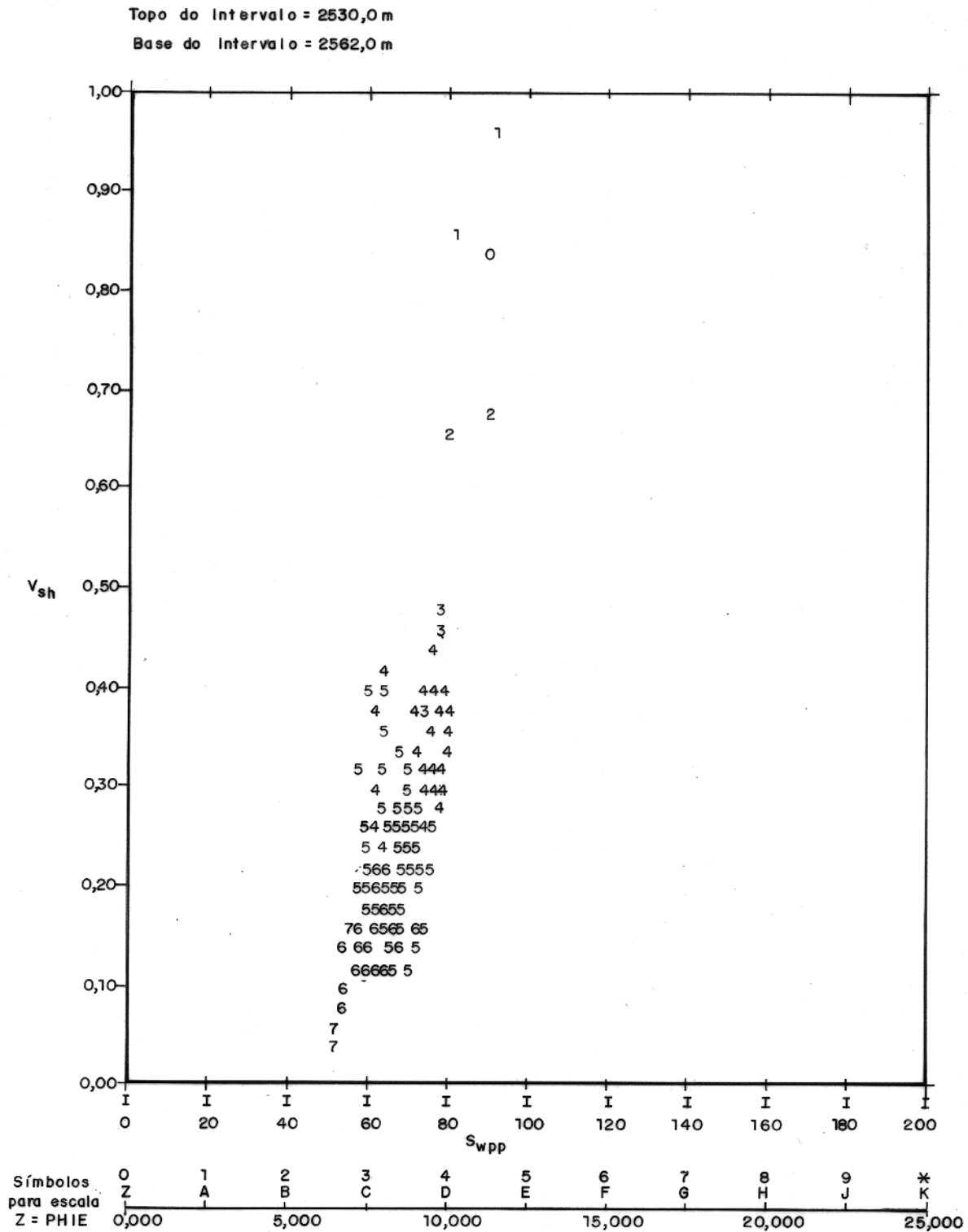


Figura 21a\_Gráfico mostrando a resposta do modelo proposto na base da zona F no poço 7-UB-37D-RNS.  
Intervalo argiloso com baixos valores de resistividade.

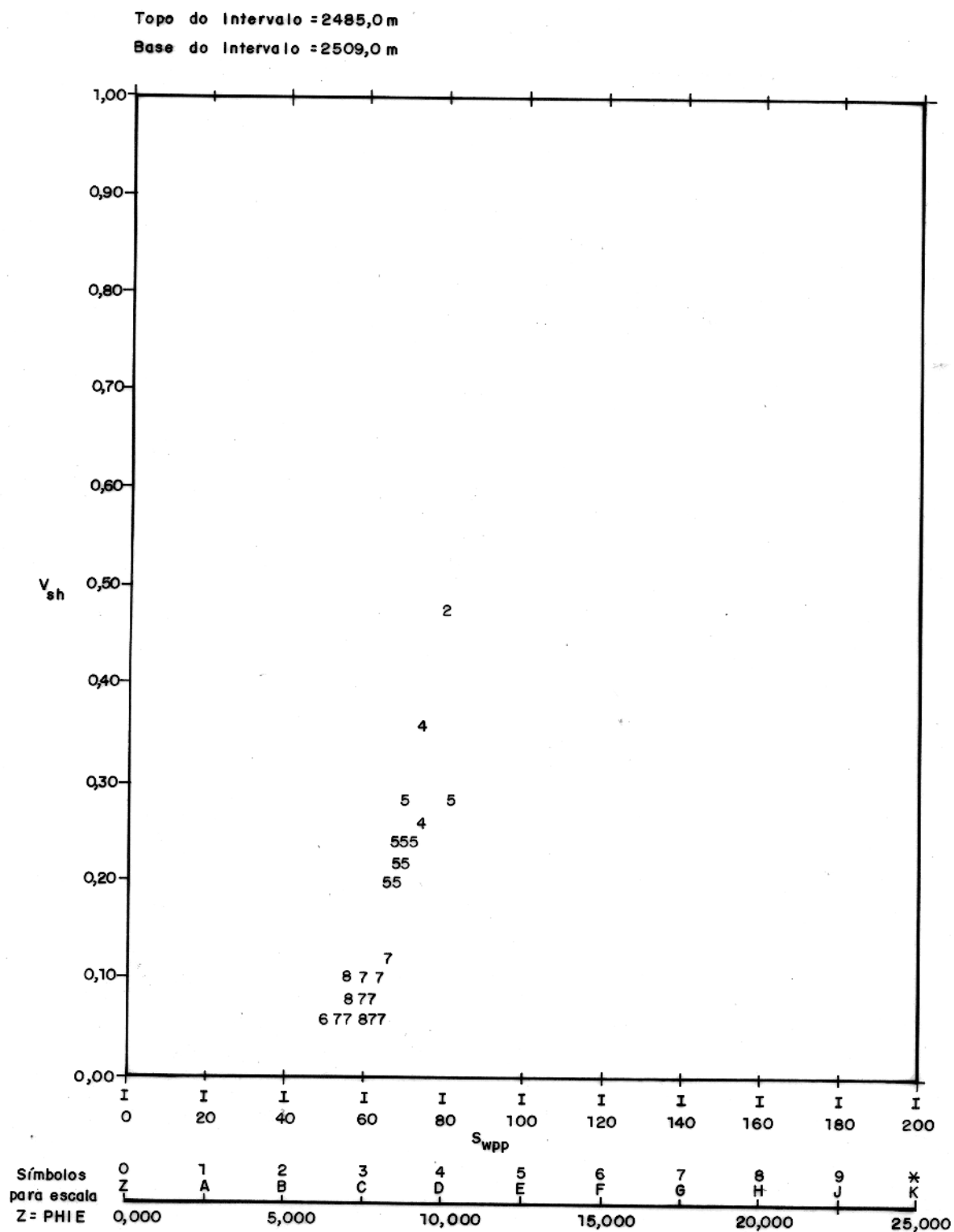


Figura 21b - Gráfico mostrando a resposta do modelo proposto na seção inferior da zona G no poço. 7-UB-47-RNS. Intervalo argiloso com baixos valores de resistividade.

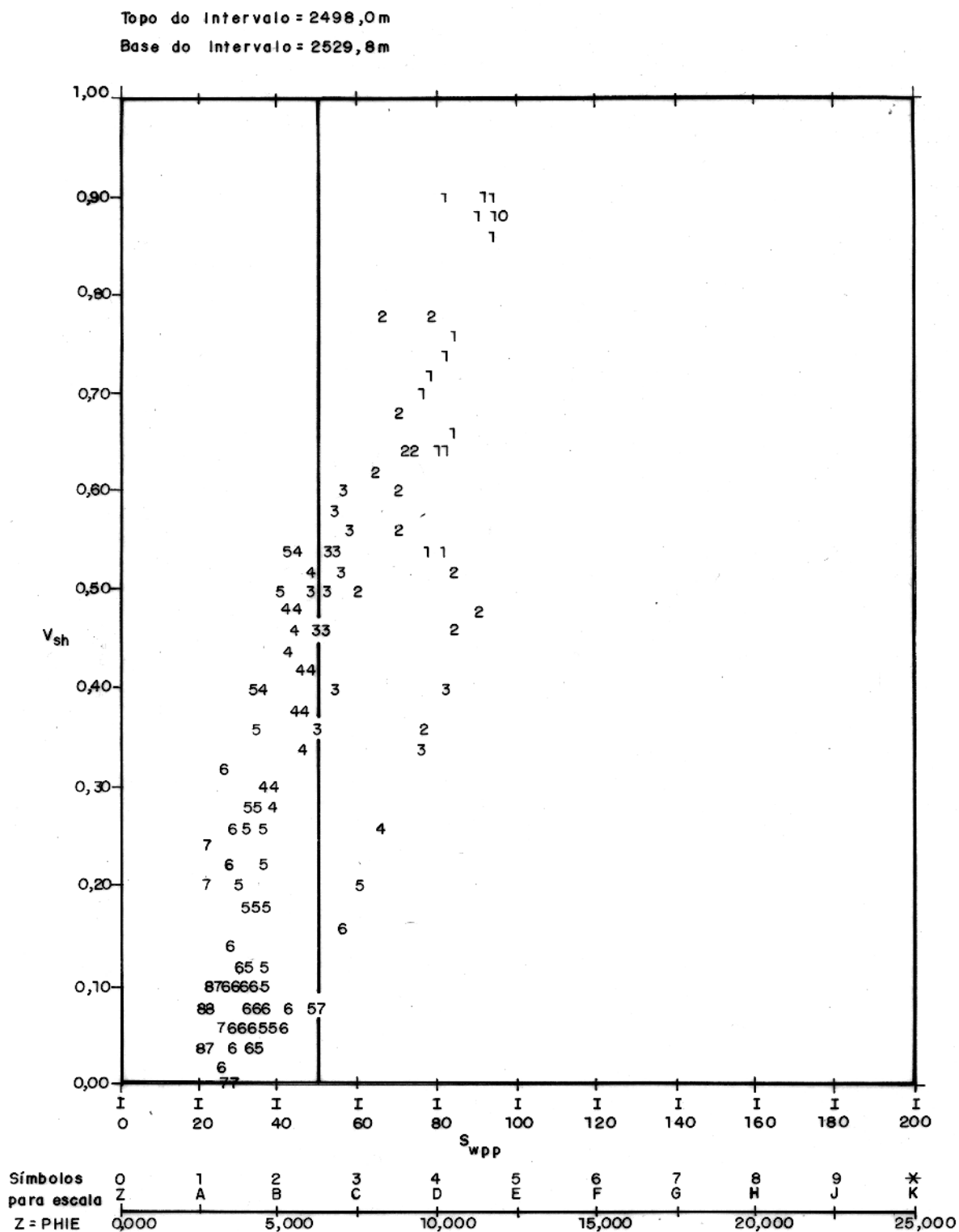


Figura 21C- Gráfico mostrando a resposta do modelo proposto na seção superior da zona F no poço 7-UB-37D-RNS. Intervalo argiloso com resistividades normais, produtor de óleo.

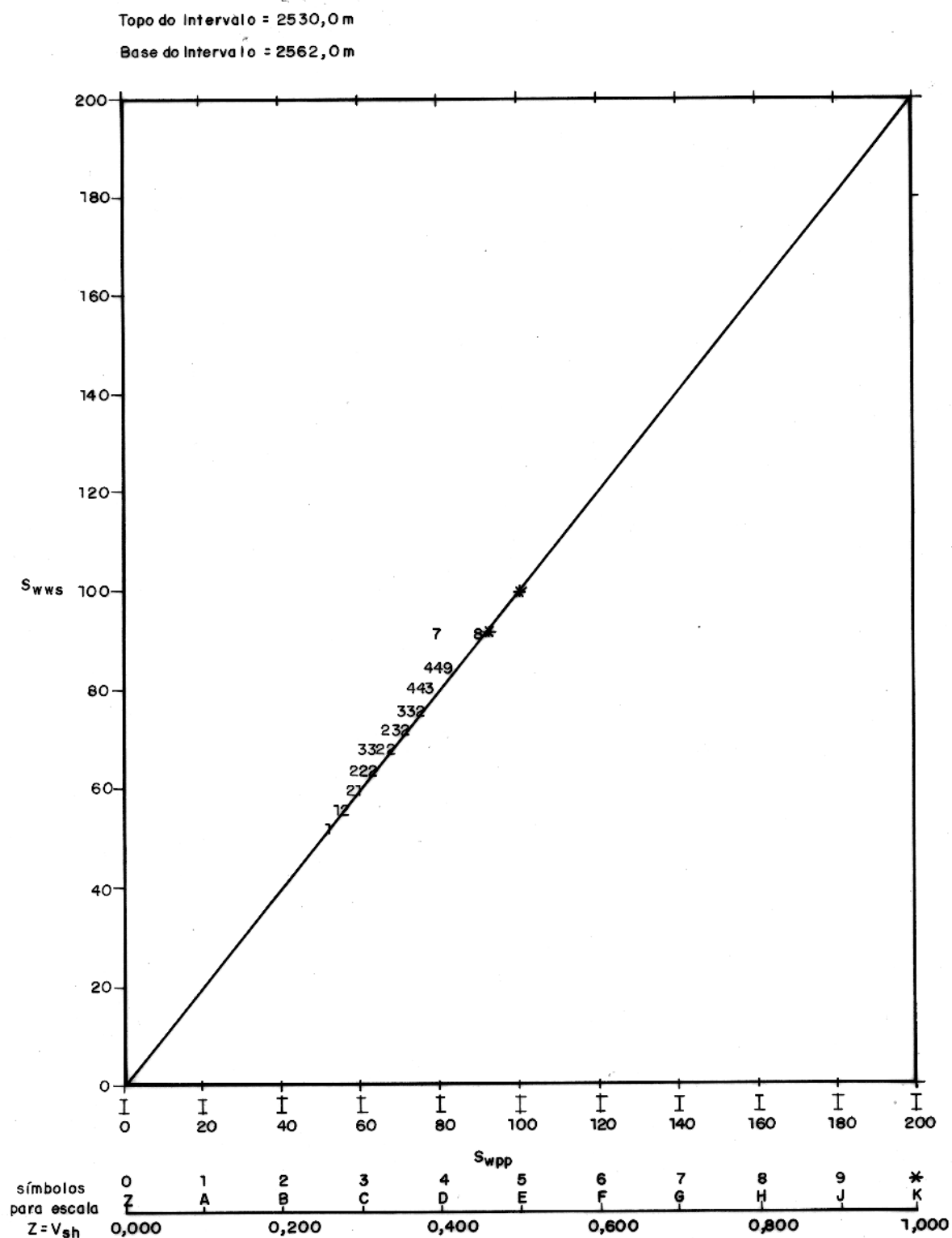


Figura 22 - Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações propostas ( $S_{wpp}$ ) e a de Waxman-Smiths ( $S_{wws}$ ). Base da zona F no poço 7-UB - 37D - RNS. Intervalo argiloso com baixos valores de resistividade.

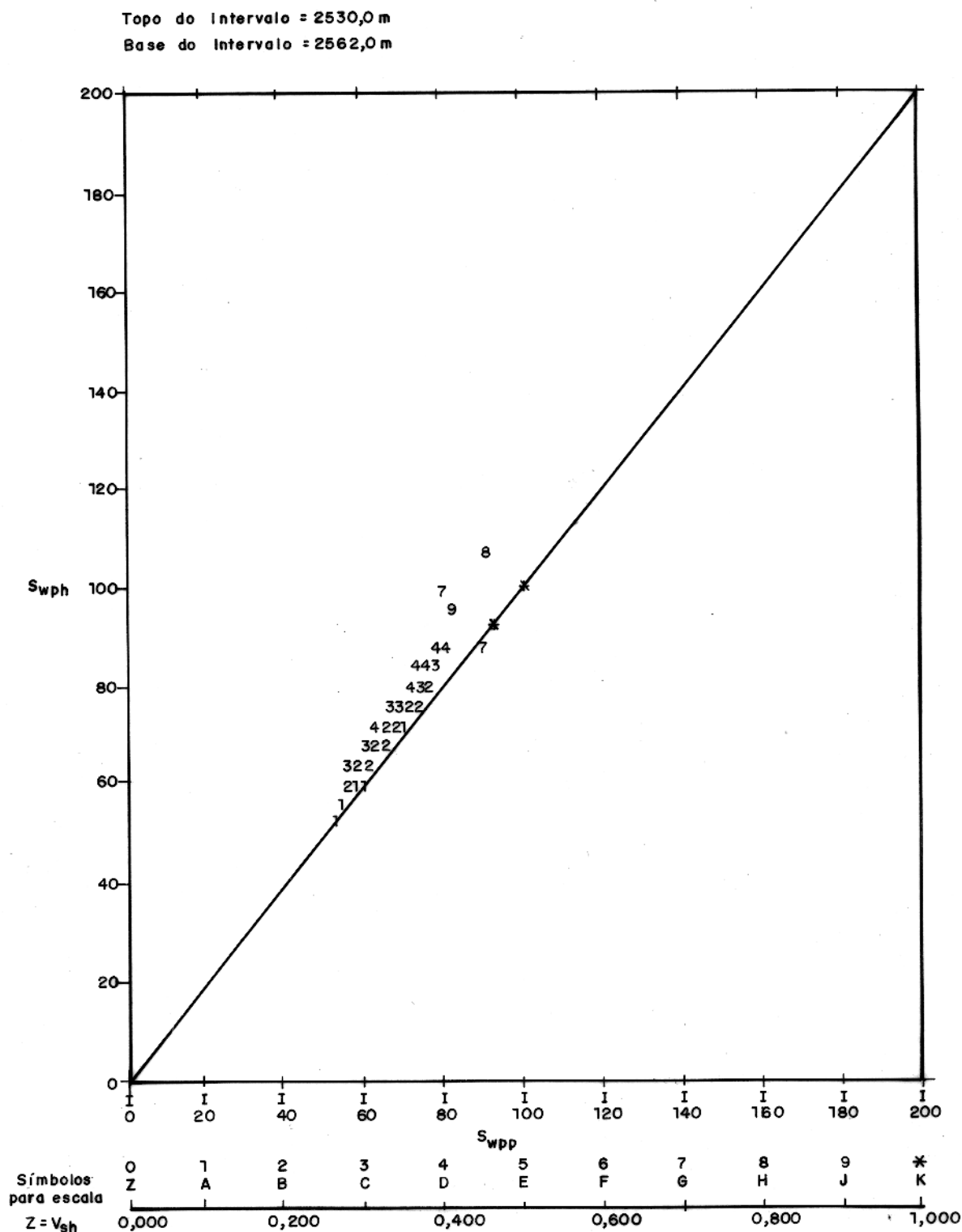


Figura 23- Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações proposta ( $S_{wpp}$ ) e a de Patchett-Herrick ( $S_{wph}$ ). Base da zona F, no poço 7-UB-37D-RNS. Intervalo argiloso com baixos valores de resistividade.

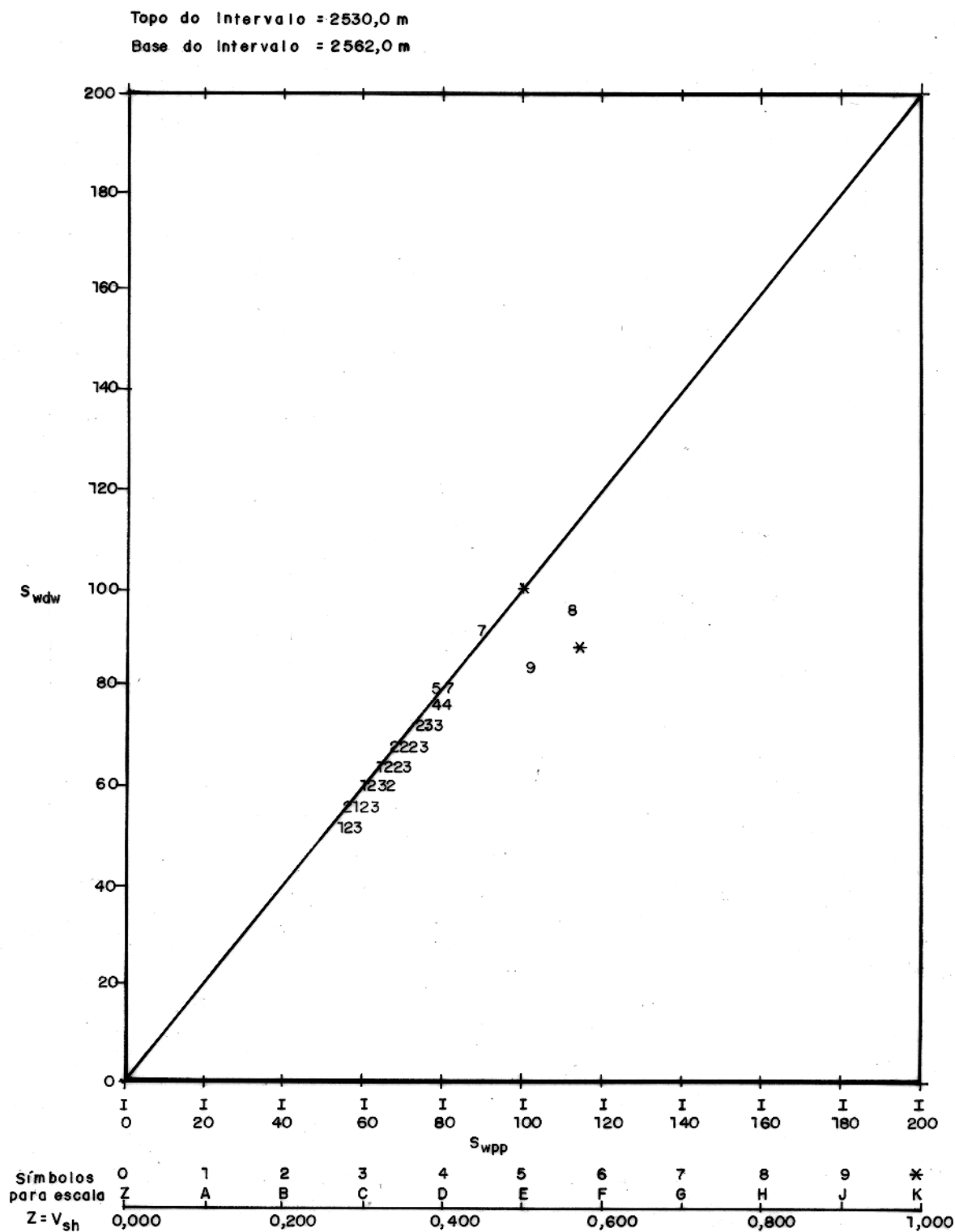


Figura 24 - Comparação entre os valores de saturação de água, calculados com as equações proposta ( $S_{wpp}$ ) e a de Duas Águas ( $S_{wdw}$ ). Base da zona F no poço 7-UB-37D-RNS. Intervalo argiloso com baixos valores de resistividade.

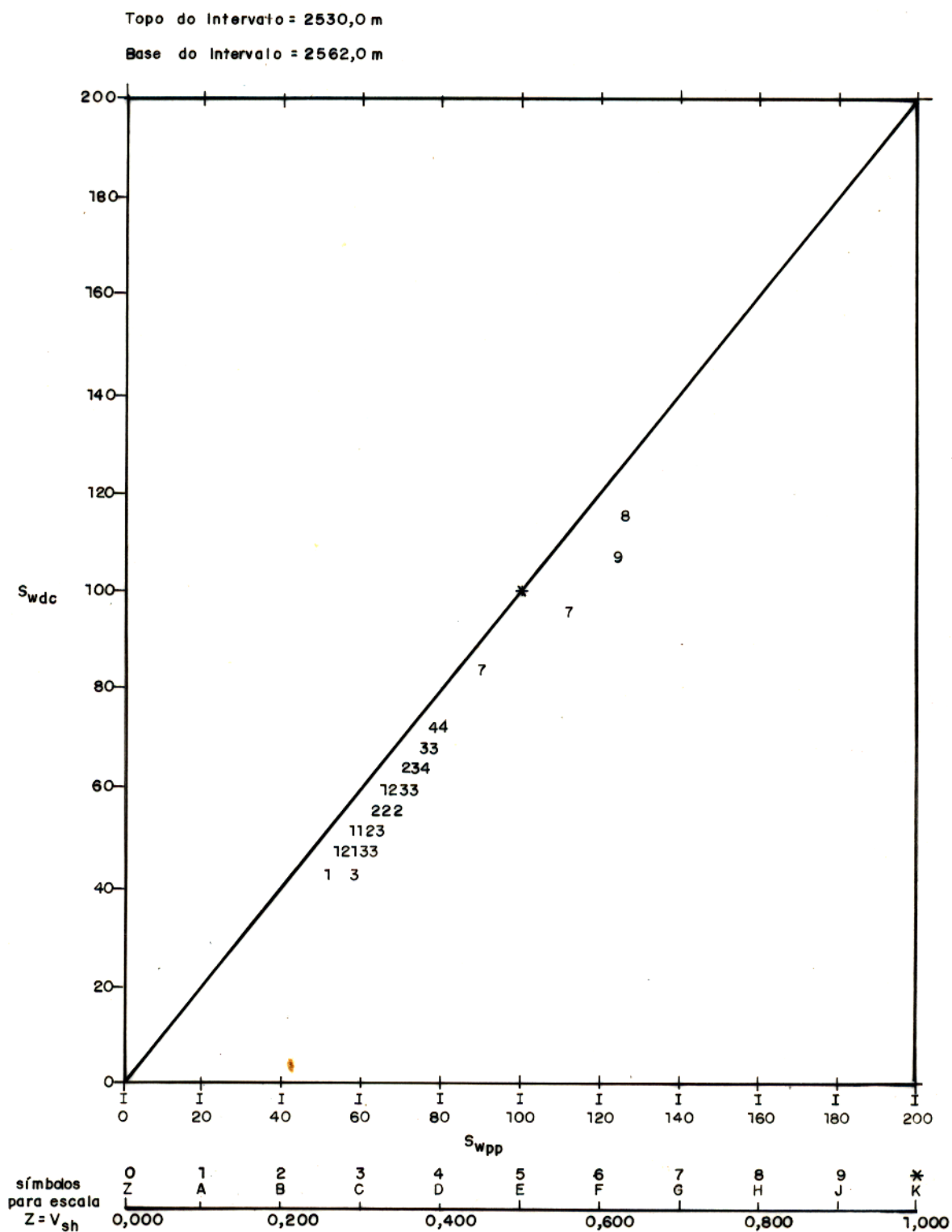


Figura 25 - Comparação entre os valores de saturação de água calculados com as equações proposta ( $S_{wpp}$ ) e a de Argila Dispersa ( $S_{wdc}$ ). Base da zona F, no poço 7- UB - 37 D - RN S. Intervalo argiloso com baixos valores de resistividade.

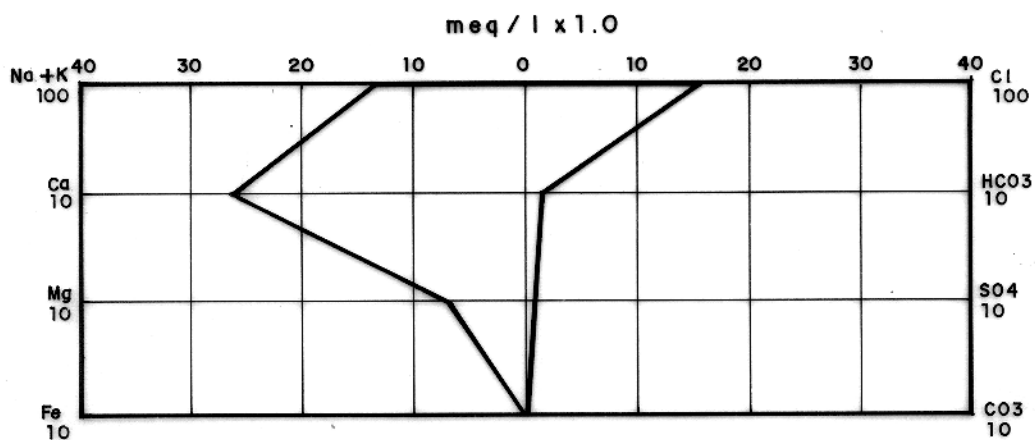
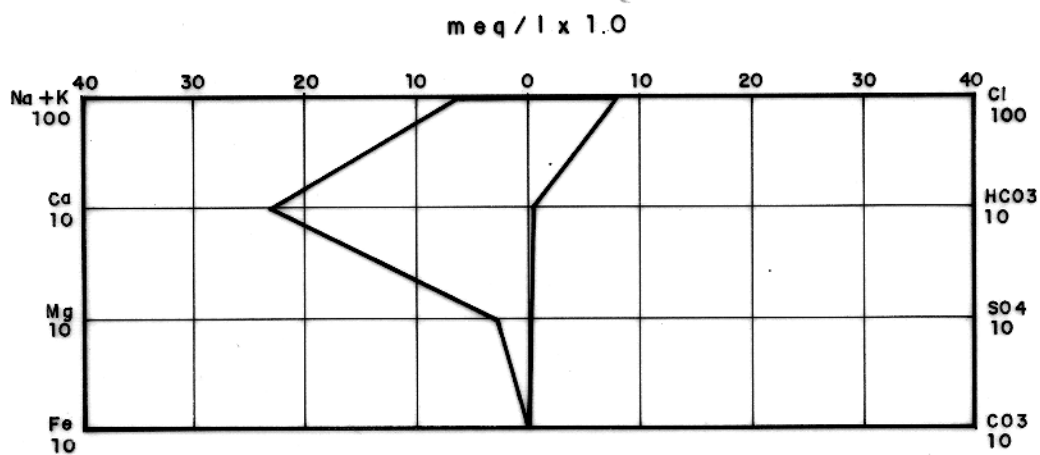
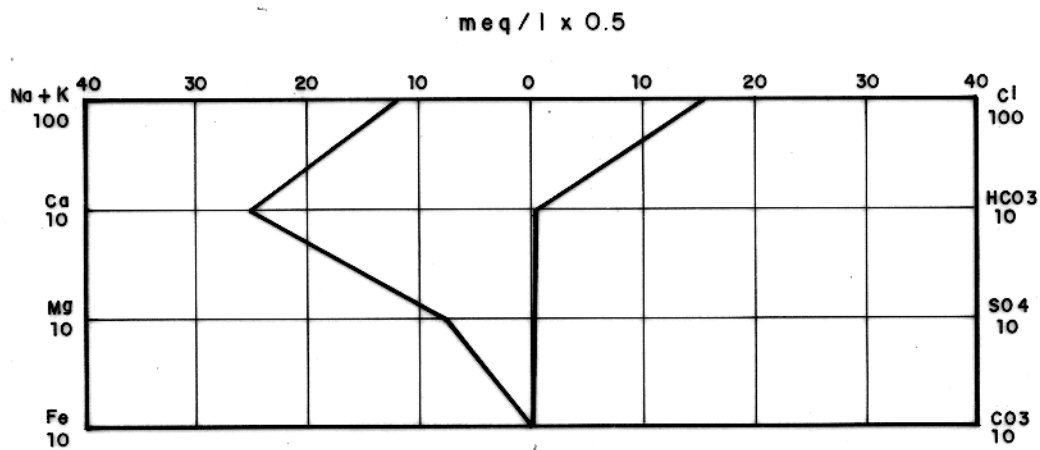


Figura 26 — Diagramas de Stiff para 3 amostras do fluido recuperado no intervalo 2481/2502m. Base da zona G no poço 7-UB-47-RNS.

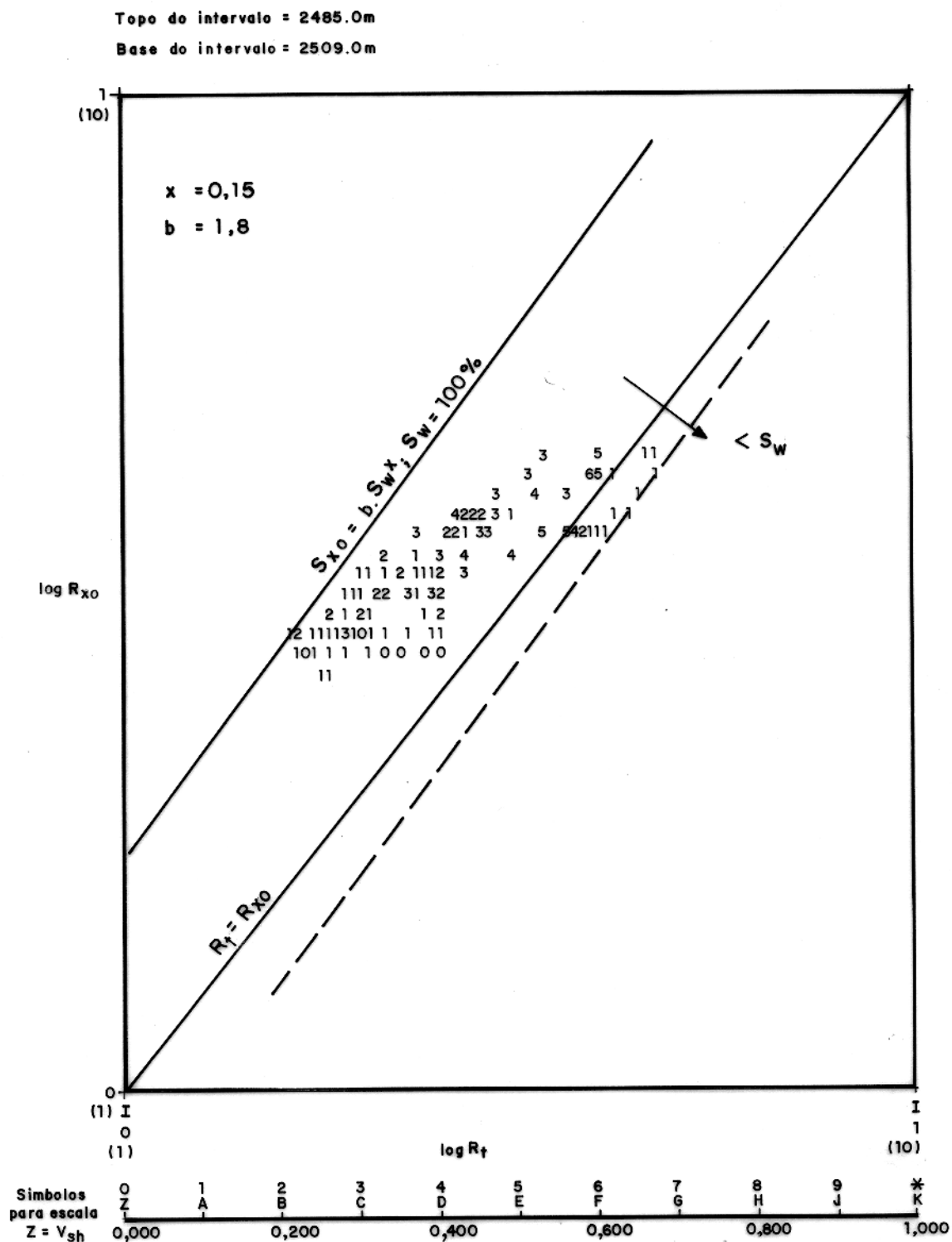


Figura 27 — Gráfico de  $\log R_t$  vs  $\log R_{xo}$  para auxiliar na caracterização de fluidos do reservatório. Poço 7-UB-47-RNS, base da zona G. Intervalo argiloso com baixos valores de resistividade.



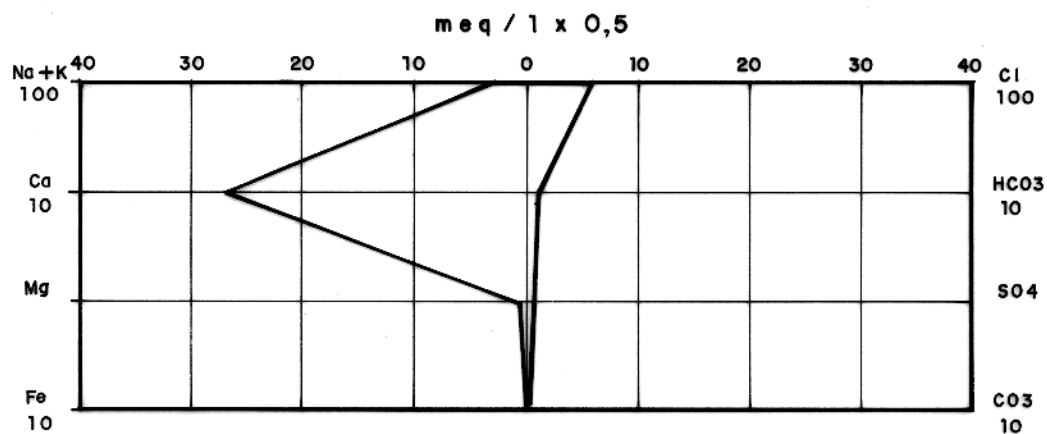
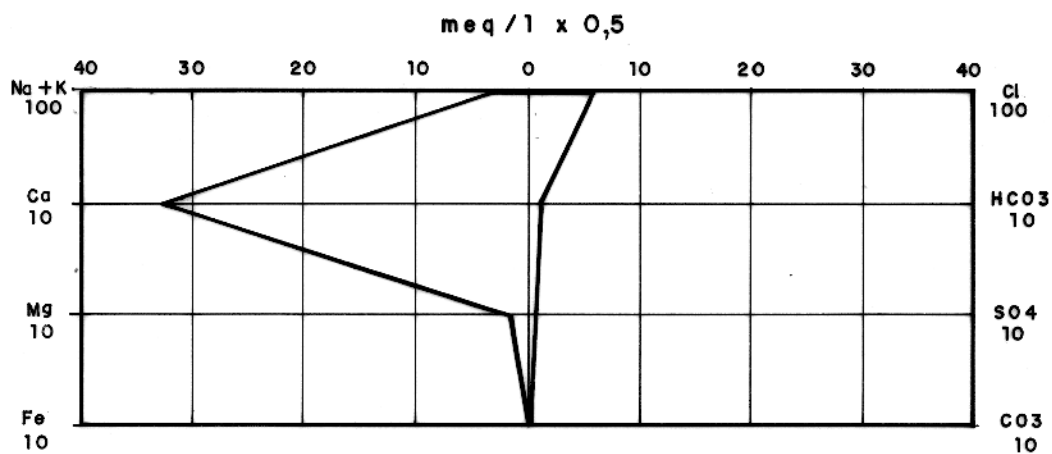
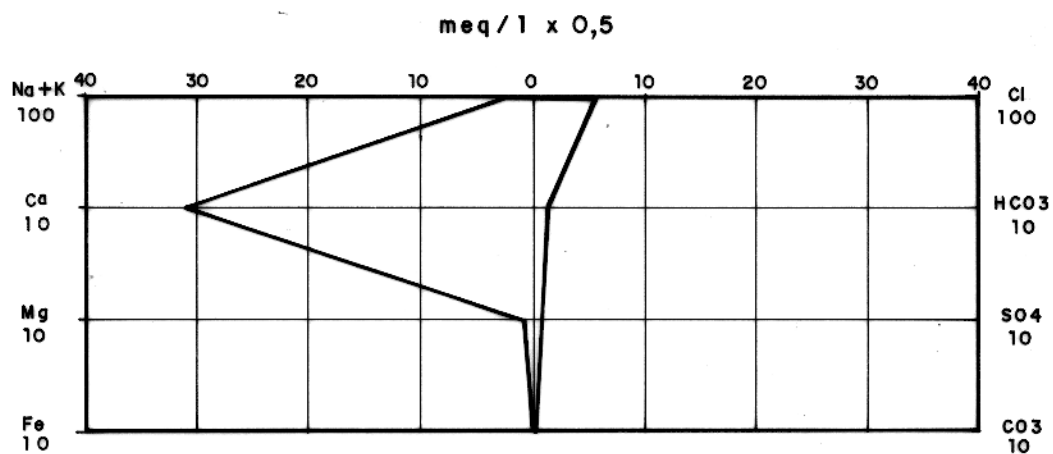


Figura 29 – Diagrama de Stiff para 3 amostras do fluido recuperado nos intervalos 2526/2552m (1ª) e 2520/2536m (2ª e 3ª). Base da zona F no poço 7-UB-37D-RNS.

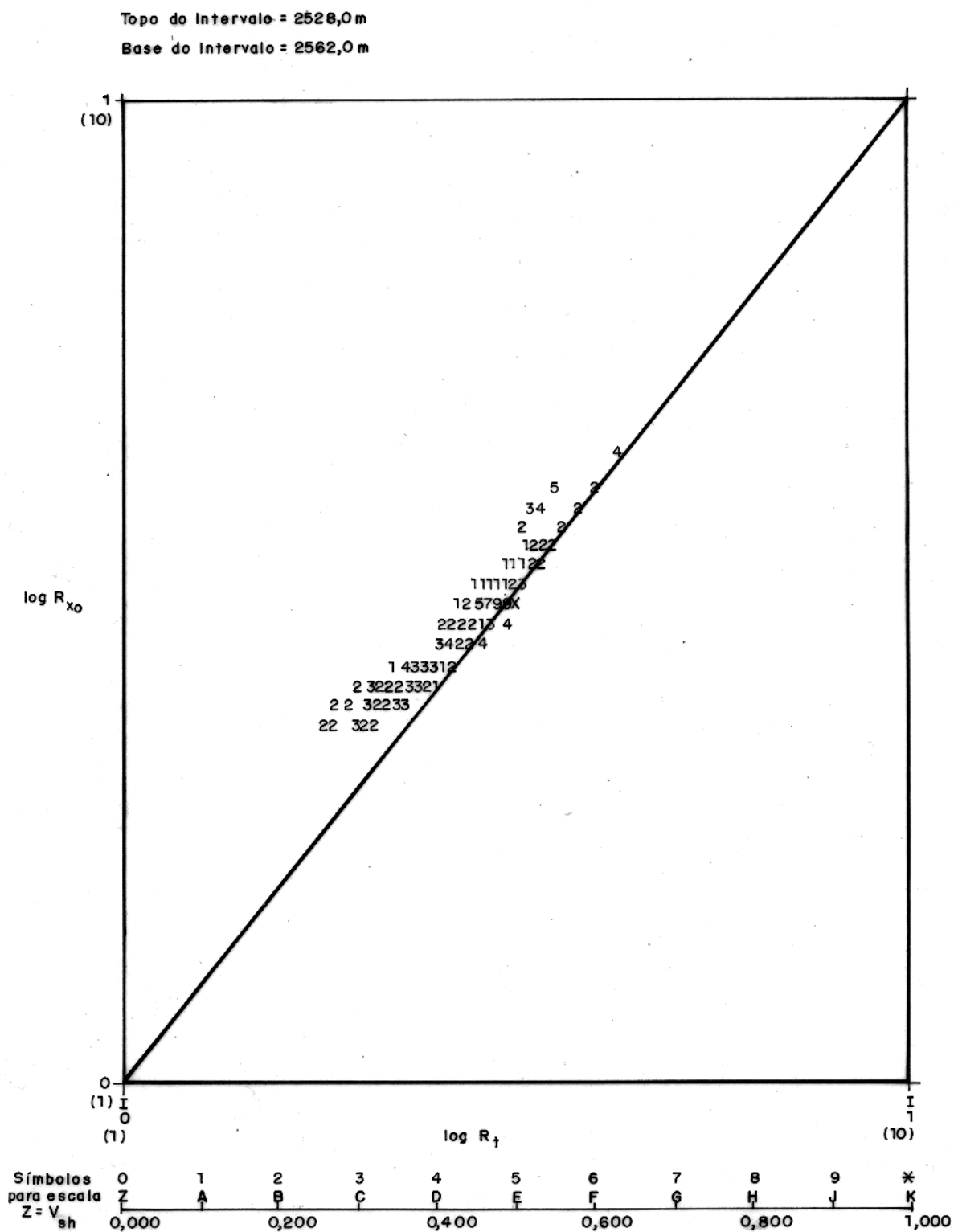


Figura 30 - Gráfico de  $\log R_t$  vs  $\log R_{x0}$  para auxiliar na caracterização de fluidos do reservatório. Poço 7-UB-37D-RNS, base da zona F, Intervalo argiloso com baixos valores de resistividade.



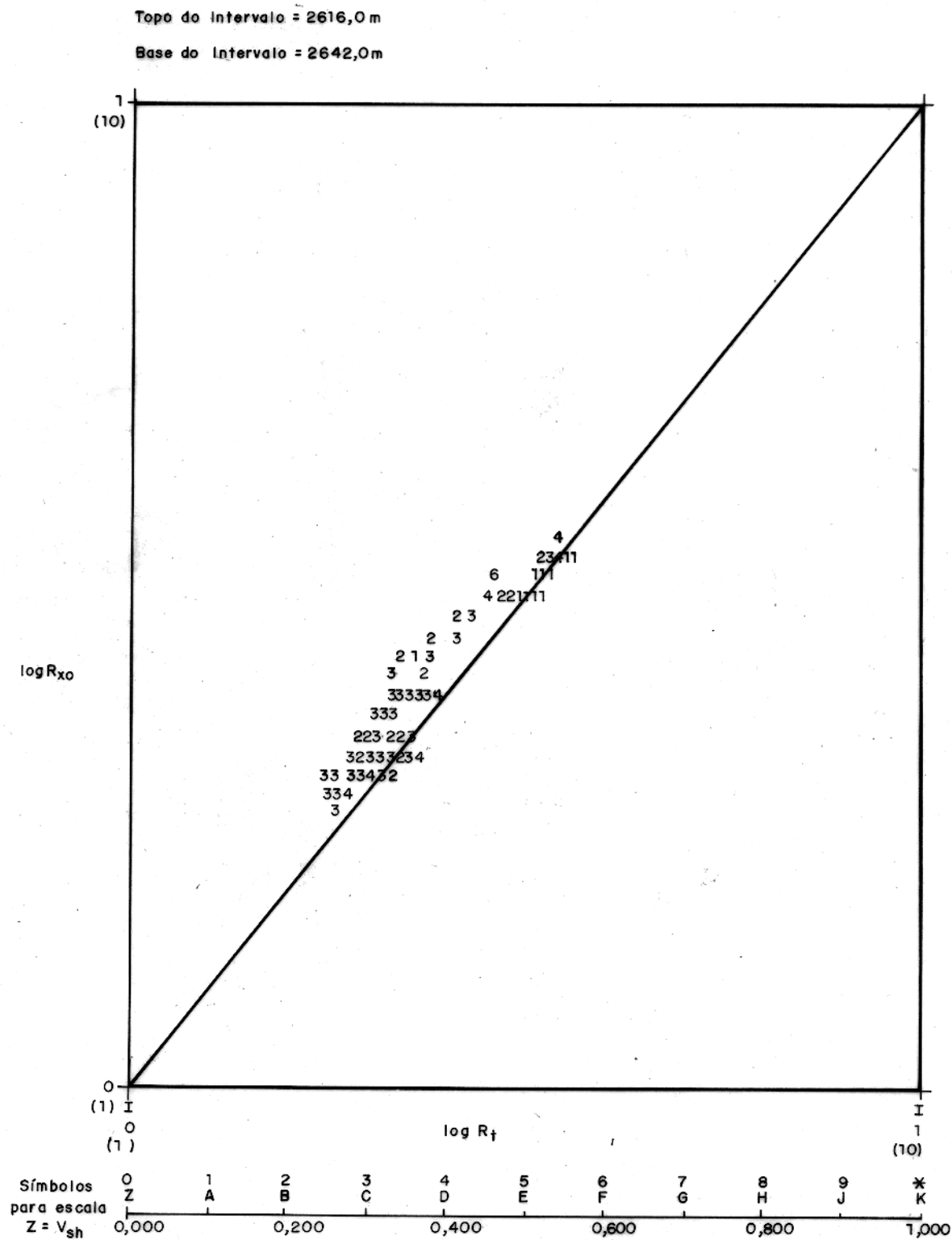


Figura 32 – Gráfico de  $\log R_t$  vs  $\log R_{xo}$  para auxiliar na caracterização de fluidos do reservatório. Poço 7-UB-43D-RNS, base da zona F, intervalo argiloso com baixos valores de resistividade.

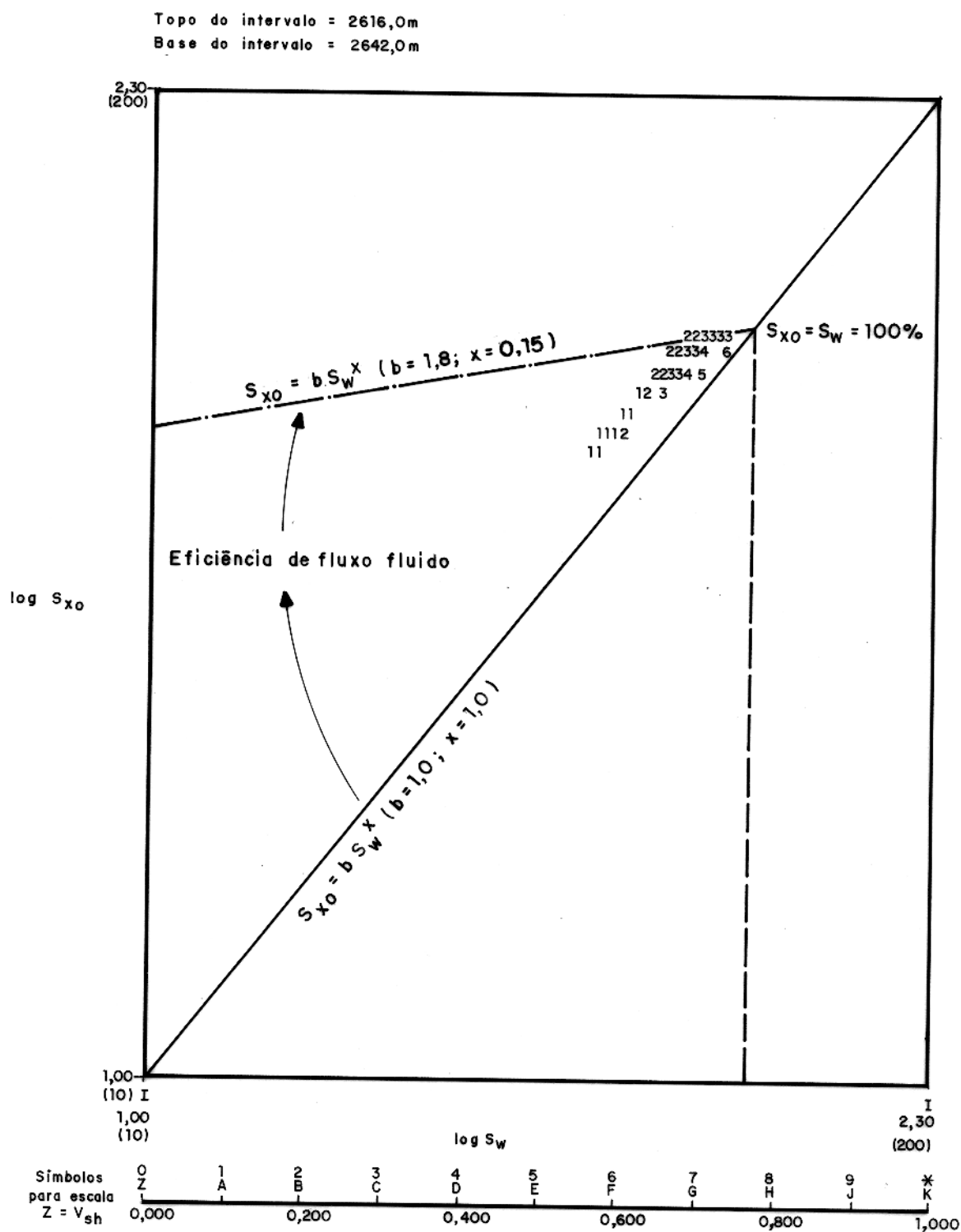


Figura 33 – Gráfico de  $\log S_w$  vs  $\log S_{xo}$  para auxiliar na caracterização da eficiência de fluxo fluido na rocha. Poço 7-UB-43D-RNS, base da zona F. Intervalo argiloso – com baixos valores de resistividade.