

MODELAMENTO DE PERFIS DE INDUÇÃO

por

ANDRÉ LUIZ DA COSTA VIEIRA

Engenheiro de Minas (Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 1987)

Tese submetida como requisito parcial ao grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

em

GEOFÍSICA

ao

Colegiado do Curso de Pós-Graduação em

Geofísica

da

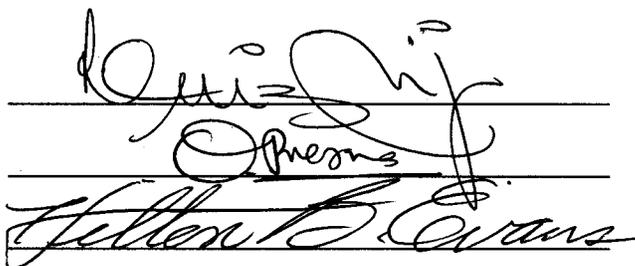
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Banca Examinadora :

Dr. Luiz Rijo (Orientador)

Dr. Om Prakash Verma

Dr. Hilton B. Evans



The image shows three handwritten signatures in black ink, each written over a horizontal line. The first signature is 'Luiz Rijo', the second is 'Om Prakash Verma', and the third is 'Hilton B. Evans'.

Data da Homologação : 28/12/1990

VIEIRA, André Luiz da Costa. Modelamento de perfis de indução. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1990. 55 p. il.

Tese (Mestrado em Geofísica) – Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa., 1990.

1. PERFILAGEM DE INDUÇÃO DE POÇO. 2. MODELAMENTO NUMÉRICO.

ÍNDICE

Índice	i
Lista de figuras	ii
Resumo	v
Abstract	vi
CAPÍTULO 1. Introdução	1
CAPÍTULO 2. O Algoritmo	5
2.1 Considerações sobre o modelo	5
2.2 Desenvolvimento do algoritmo	7
CAPÍTULO 3. Verificação do algoritmo	12
CAPÍTULO 4. Reservatórios laminados	21
4.1 Introdução	21
4.2 Laminações arenito/folhelho	22
4.3 Laminações arenito/arenito moderadamente silicificado	30
4.4 Laminações arenito moderadamente silicificado/arenito/folhelho	35
CAPÍTULO 5. Conclusões e Recomendações	42
Agradecimentos	45
Referências Bibliográficas	46
Anexos. Tabelas dos valores numéricos das respostas das sondas	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.01 Modelo geológico geral com o esquema do posicionamento de uma sonda	6
Fig.02 Esquema estrutural da sonda 2C40	13
Fig.03 Esquema estrutural da sonda 6FF40	14
Fig.04 Esquema estrutural da sonda ILD	15
Fig.05 Respostas da sonda 2C40 pelos algoritmos de Moran–Kunz e deste trabalho, em um modelo geológico de uma camada.	16
Fig.06 Resposta da sonda 2C40 pelos algoritmos de Anderson–Chang e deste trabalho, em modelo geológico de duas camadas.	16
Fig.07 Resposta da sonda 6FF40 pelos algoritmos deste trabalho e de Anderson–Chang em um modelo geológico de duas camadas.....	17
Fig.08 Resposta da sonda ILD pelos algoritmos de Anderson–Gianzero e deste trabalho , em modelo geológico de três camadas.	18
Fig.09 Resposta da sonda ILD pelos algoritmos de Anderson–Gianzero e deste trabalho , em modelo geológico de onze camadas.	19
Fig.10 Respostas da sonda ILD em um reservatório com 33 lâminas, alternadas em lâminas arenito com 10 ohm.m e folhelho 1 ohm.m. O percentual em volume de arenito no reservatório varia de 8%–92%. O reservatório é mostrado esquematicamente.....	23
Fig.11 Respostas da sonda ILD em um reservatório com 33 lâminas, alternadas em lâminas arenito com 25 ohm.m e folhelho 1 ohm.m. O percentual em volume de arenito no reservatório varia de 8%–92%. O reservatório é mostrado esquematicamente.....	24
Fig.12 Respostas da sonda ILD em um reservatório com 33 lâminas, alternadas em	

lâminas arenito com 40 ohm.m e folhelho 1 ohm.m. O percentual em volume de arenito no reservatório varia de 8%–92%. O reservatório é mostrado esquematicamente.....	25
Fig.13 Respostas da sonda ILD em um reservatório com 33 lâminas, alternadas em lâminas arenito com 100 ohm.m e folhelho 1 ohm.m. O percentual em volume de arenito no reservatório varia de 8%–92%. O reservatório é mostrado esquematicamente.....	26
Fig.14 Respostas da sonda ILD em um reservatório com 33 lâminas, alternadas em lâminas arenito com 25 ohm.m e folhelho 2 ohm.m. O percentual em volume de arenito no reservatório varia de 8%–92%. O reservatório é mostrado esquematicamente.....	28
Fig.15 Resumo das respostas da sonda ILD em reservatórios do tipo arenito/folhelho.....	29
Fig.16 Respostas da sonda ILD em um reservatório com 33 lâminas, alternadas em lâminas arenito com 30 ohm.m e arenito moderadamente silicificado 50 ohm.m. O percentual em volume de arenito no reservatório varia de 8%–92%. O modelo do reservatório é mostrado esquematicamente.....	31
Fig.17 Respostas da sonda ILD em um reservatório com 33 lâminas, alternadas em lâminas arenito com 30 ohm.m e arenito moderadamente silicificado 200 ohm.m. O percentual em volume de arenito no reservatório varia de 8%–92%. O modelo do reservatório é mostrado esquematicamente.....	32
Fig.18 Resumo das respostas da sonda ILD em reservatórios do tipo arenito/arenito moderadamente silicificado.....	34
Fig.19 Respostas da sonda ILD em um reservatório com 49 lâminas, alternadas em lâminas arenito com 30 ohm.m, arenito moderadamente silicificado 50 ohm.m e folhelho com 2,0 ohm.m. O percentual de arenito no reservatório é 25% e folhelho varia de 15% a 60%. O modelo do reservatório é mostrado esquematicamente.....	36

Fig.20	Respostas da sonda ILD em um reservatório com 49 lâminas, alternadas	
	em lâminas arenito com 30 ohm.m, arenito moderadamente silicificado 50 ohm.m	
	e folhelho com 2,0 ohm.m. O percentual de arenito no reservatório é 50% e folhelho	
	varia de 8% a 42%. O modelo do reservatório é mostrado esquematicamente.	37
Fig.21	Respostas da sonda ILD em um reservatório com 49 lâminas, alternadas	
	em lâminas arenito com 30 ohm.m, arenito moderadamente silicificado 50 ohm.m	
	e folhelho com 2,0 ohm.m. O percentual de arenito no reservatório é 75% e folhelho	
	varia de 4,2% a 20,8%. O modelo do reservatório é mostrado esquematicamente.....	39
Fig.22	Resumo das respostas da sonda ILD, em reservatórios do tipo arenito	
	moderadamente silicificado/arenito/folhelho.....	40

MODELAMENTO DOS PERFIS DE INDUÇÃO

(TESE DE MESTRADO : Nov /90)

ANDRÉ LUIZ DA COSTA VIEIRA

Orientador : Dr. Luiz Rijo

Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/UFPA

Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brasil

RESUMO

Neste trabalho foi implementado um algoritmo que permite o modelamento das respostas das sondas de indução (2C40–6FF40–ILD) em meios estratificados. O algoritmo é baseado na solução exata do problema de Green para a obtenção do campo eletromagnético em meios estratificados com a fonte no interior dos estratos.

O código computacional desenvolvido neste trabalho para meios horizontalmente estratificados tem o objetivo de auxiliar o desenvolvimento de códigos mais avançados, uma vez que é difícil o acesso para a pesquisa dos códigos citados na literatura. Os códigos disponíveis são comerciais, mas estes têm o objetivo único de produção, além de serem, bastante dispendiosos.

O código também foi utilizado para a obtenção da resposta da sonda ILD em reservatórios do tipo laminado, onde a sonda tem baixa resolução. E verificamos, a exemplo de outros autores, que a condutividade obtida pela sonda pode ser expressa pela soma das condutividades dos constituintes litológicos do reservatório ponderada pelos seus percentuais em volume. Esta relação foi definida para reservatórios ainda não analisados na literatura, tipo arenito moderadamente silicificado/arenito/folhelho, onde a lâmina de interesse tem resistividade superior a resistividade de uma das lâminas, e inferior a resistividade da outra. Foi analisado também reservatórios tipo arenito moderadamente silicificado/arenito, onde a lâmina de interesse tem a menor resistividade. Com esta relação pode-se obter para estes reservatórios laminados estimativas mais precisas de R_t e conseqüentemente determinar as saturações água/óleo e produtividade, também de forma mais precisa.

MODELING INDUCTION SONDES RESPONSE

(MASTER THESIS : Nov /90)

ANDRÉ LUIZ DA COSTA VIEIRA

Adviser : Dr. Luiz Rijo

Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/UFPa

Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brazil

ABSTRACT

This thesis applies an algorithm that allows modeling induction sondes (2C40–6FF40–ILD) responses in multi layered configuration. The algorithm is based on the exact solution of the Green's problem to obtain the electromagnetic field in layered configuration with the source located in the layers.

The code, developed for horizontal layers, can be used to develop advanced codes, because there are not codes available for research. The codes available are comercial, but these are very expensive and primarily useful for production processing.

The code was applied to obtain ILD sonde response in laminated reservoirs, where the sonde resolution is reduced. Using this code, the conductivity from the sonde response, can be expressed by the sum of the conductivities of the lithologic constituents of the reservoirs, weighed by their volume contribution. This relation was defined for reservoir type not yet analyzed. The models are for reservoirs of silicified sandstone/sandstone/shale where the resistivity of the layer of interest is superior to the resistivity of one layer and inferior to the resistivity of another layer, and for reservoirs of silicified sandstone/sandstone where the layer of interest has the lower resistivity. These models allow the establishment of better estimates of resistivity (R_t) in layered reservoirs, and consequently, to the hydrocarbon saturation and producibility.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Henri G. Doll (1949) desenvolveu uma ferramenta de perfilagem de poços cujo o princípio é a indução eletromagnética. Esta sonda de perfilagem tinha o objetivo de superar as dificuldades das sondas elétricas em poços que usavam lama a base de óleo. Outra dificuldade para as sondas elétricas eram as perfilagens de poços secos (Anderson & Barber, 1988), situações essas que dificultam o contacto dos eletrodos e conseqüentemente o fluxo de corrente elétrica. Superando estas dificuldades a técnica de Doll tornou-se importante, mesmo no seu estado inicial. Doll considerava que a formação geológica era subdividida em anéis, e que cada um deles contribui individualmente para o sinal condutivo da formação. Outra simplificação da teoria de Doll era o alto "skin depth" (profundidade pelicular), o que não é válido para litologias condutivas. Apesar disto o modelamento com a teoria de Doll mostrou-se eficiente e tornou-se usual, nas décadas de 50 e 60.

De Witte & Lowitz (1961) na tentativa de superar algumas limitações do modelo de Doll, formularam a resposta das sondas de perfilagem de indução em meios estratificados com um número qualquer de camadas. O modelamento apresentado por eles é baseado na teoria eletromagnética e tem a natural incorporação do skin effect, por isto, apresenta vantagens sobre o modelo de Doll, mas o algoritmo não apresenta formas recursivas para os coeficientes de transmissão e reflexão, o que torna-o de difícil utilização.

Duesterhoeft & Smith (1961), Moran & Kunz (1962) baseados na teoria eletromagnética desenvolveram algoritmos que melhor incorporavam o skin effect, mas estes algoritmos restringiam-se a análise de uma camada entre shoulders.

O desenvolvimento da teoria eletromagnética para a perfilagem, permitiu a compreensão do skin effect. Precisava-se então superar a simplificação da teoria de Doll quanto a interação entre camadas adjacentes e o poço ou invasão.

Kaufman (1965) para aumentar a acuracidade do sinal da interação de camadas adjacentes e o poço e ou invasão, desenvolveu um algoritmo baseado em uma solução assintótica. O algoritmo compunha a teoria eletromagnética e a teoria de Doll. Era eficiente unicamente para formações com baixa condutividade e pequenas profundidades de invasão.

Loocke (1969), na tentativa de melhoria da interação das camadas com o poço ou invasão, utilizou o método das equações integrais, mas este mostrou-se ineficiente pois envolvia a construção e resolução de um sistema de equações lineares disperso. Wharton (1975) utilizou o método das diferenças finitas, mas seu algoritmo fixa a malha, o que o torna ineficiente para um modelamento sistemático.

Os algoritmos que modelam os perfis de indução desenvolveram-se com o uso da técnica dos Elementos Finitos, o qual permite fácil incorporação do skin effect e da interação entre o poço e ou superfície de invasão. O modelamento das sondas de indução foi executado pela primeira vez por Anderson e Chang (1982) com o objetivo de aprimorar a interpretação. O algoritmo também mostrou-se eficiente no processamento de sinais.

Anderson & Gianzero (1983) modelaram as sondas de indução em um meio de multicamadas plano-paralelas, através de uma solução analítica para o campo eletromagnético mostrada em Brekhoskikh (1960) & Wait (1962). O algoritmo desenvolvido a base de relações recursivas para os coeficientes de transmissão e reflexão, mostrou-se mais eficiente que os algoritmos anteriores de De Witte & Lowitz,(1961). Através deste algoritmo foram modeladas as sondas ILD e ILM (Schlumberger Deep e Medium Induction) e construídas as cartas de correções para shoulder effect.

Anderson & Chew(1984) no desenvolvimento de algoritmos ótimos para o modelamento das sondas de indução, combinaram os algoritmos de Anderson & Chang,(1982) e Anderson & Gianzero,(1983). O algoritmo subdivide o modelo bidimensional, obtendo a resposta para o meio estratificado através do algoritmo de Anderson e Gianzeiro (1983) e a resposta das invasões nas camadas através do algoritmo de elementos finitos de Anderson & Chang(1982). O tempo de CPU deste algoritmo baixou sensivelmente em relação aos algoritmos anteriores.

Os avanços nas sondas de indução continuam. Atualmente são desenvolvidos algoritmos para modelamento da resposta das sondas em meios tridimensionais, onde as camadas podem ser inclinadas, as zonas de invasão podem ser superfícies não planas e a sonda pode estar excêntrica no poço. Estes algoritmos ainda em desenvolvimento tem tempo de CPU superior a duas horas em um supercomputador do tipo Cray, (Anderson et al,1989)

O presente trabalho tem o objetivo de desenvolver um algoritmo para modelamento das

sondas de indução em meios complexos. O algoritmo apresentado mostra o modelamento das sondas de indução em meios multiplano estratificados, podendo ainda ser generalizado para estratos inclinados. O código computacional é baseado na solução exata do campo eletromagnético em meios estratificados com um número qualquer de camadas, e com a fonte no interior das camadas conforme Wannamaker et al(1984) e Rijo(1990). O código computacional assim desenvolvido pode ser utilizado como parte da resposta de modelamentos bidimensionais, e se o código for generalizado para obter as respostas das sondas em meios estratificados inclinados, poderá também ser utilizado como parte da resposta de modelamentos tridimensionais. O trabalho apresenta também uma aplicação do algoritmo na correção da condutividade medida pelas sondas de indução em reservatórios laminados, onde as lâminas (estratos com espessura menor que a resolução da sonda) de interesse estão entre lâminas de resistividade superior e inferior a sua resistividade, ou reservatórios onde as lâminas de interesse são as lâminas de menor resistividade do reservatório laminado.

O quadro, a seguir, resume a evolução do modelamento das sondas de perfilagem de indução.

PESQUISADORES (Data)	ALGORITMO/ MÉTODO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Doll(1949)	Fator Geométrico	Modelamento Pioneiro	Sem skin effect e interações poço/camadas
De Witte & Lowitz(1961)	Teoria Eletromagnética	Inclui Skin effect	Obtenção difícil dos coef. de reflexão
Moran & Kunz(1962)	Teoria Eletromagnética	Inclui Skin effect	Só modelos de uma camada
Kaufmam(1965)	Solução Assintótica	Inclui skin Effect e interações poço/camadas	Ineficiente em alta condutividade
Loocke (1969)	Equações Integrais	Inclui interações poço/camadas	Excessivo tempo de CPU
Wharton (1975)	Diferenças Finitas	Inclui interações poço/camadas	Malha utilizada é fixa
Anderson & Chang (1982)	Elementos Finitos	Inclui skin effect e interações poço/camadas	Tempo de cpu elevado
Anderson & Gianzero(1983)	Solução Analítica	Fácil obtenção dos coef. de reflexão	Só camadas planas
Anderson & Chew(1984)	Elmen. Finitos e Solução Analítica	Redução tempo de CPU	Só camadas planas e superfícies de invasão verticais
Anderson (1989)	Composição de diversas técnicas	Uso de modelos complexos	Tempo de CPU ainda elevado

CAPÍTULO 2

O ALGORÍTMO

2.1. Considerações Sobre o Modelo

O modelo geológico considerado para o desenvolvimento do algoritmo é composto de múltiplas camadas planas paralelas, com diversas espessuras e condutividades. O sistema de coordenadas cilíndricas (ρ, ϕ, z) é utilizado, com o eixo "z" perpendicular ao plano do acamamento.

O sistema de bobinas transmissoras e receptoras serão caracterizados por "sonda", neste trabalho. As bobinas da sonda são consideradas como dipolos magnéticos em função de suas dimensões reduzidas, menores que a décima parte da distância entre um par de bobina transmissora e receptora.

As bobinas ou dipolos magnéticos são modelados definindo-se o momento do dipolo magnético como vertical. A direção do momento do dipolo vertical é perpendicular ao plano das camadas, paralelo ao eixo "z" do sistema de coordenadas.

Conforme a Fig.1, a origem do modelo é no topo da primeira camada. As posições das bobinas transmissoras serão definidas por z_t e as camadas onde estão as bobinas transmissoras terão índice l . A posição das bobinas receptoras serão definidas por z_r , as bobinas receptoras estarão nas camadas de índice j .

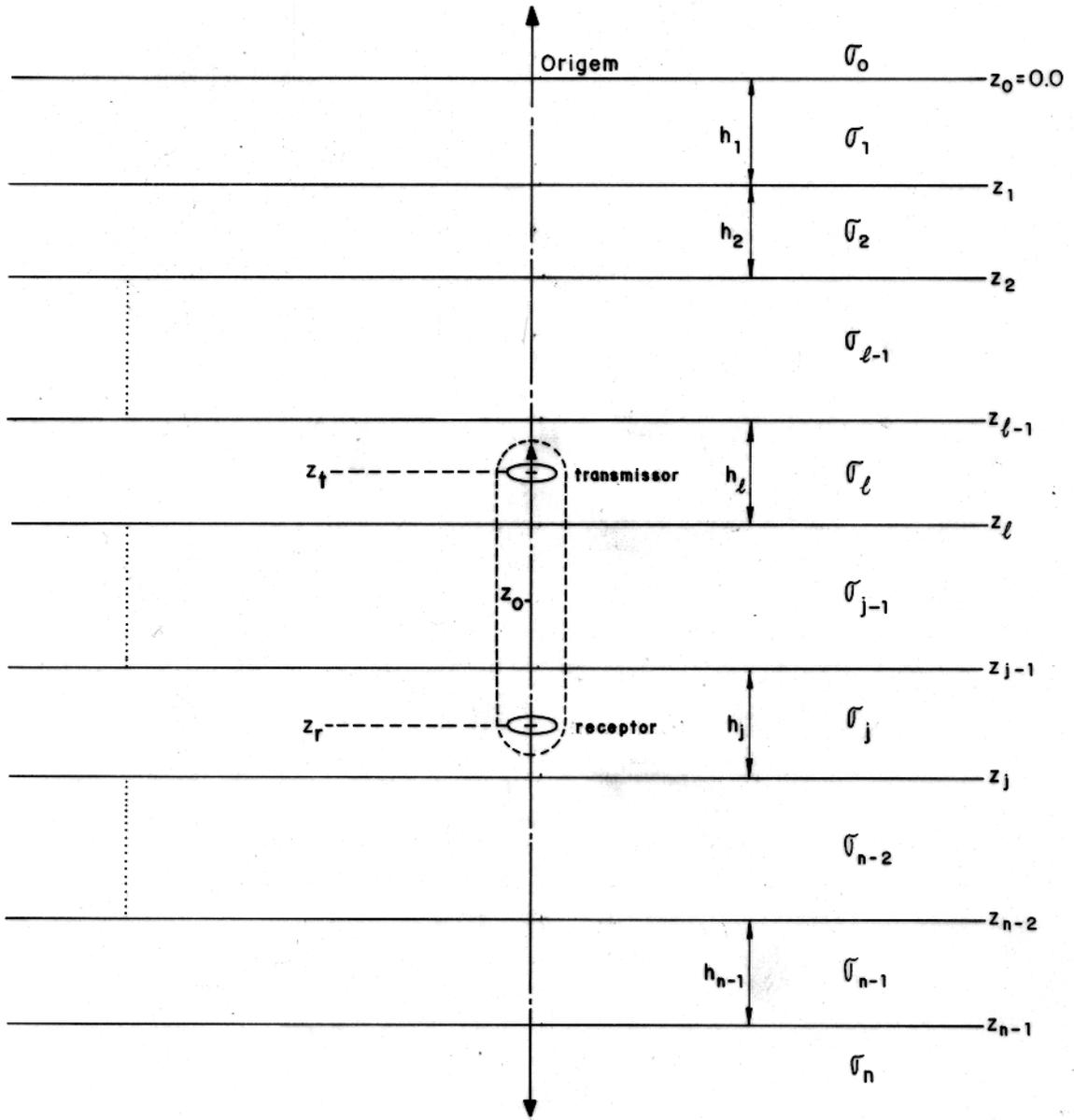


Fig.1- Modelo geológico com um esquema do posicionamento da sonda.

2.2. Desenvolvimento do Algoritmo

O desenvolvimento do algoritmo é baseado na obtenção da solução do problema de Green, para a determinação do campo eletromagnético no interior de um meio estratificado.

A determinação do campo eletromagnético é realizado pelo desacoplamento das componentes do campo através dos potenciais de Debye, conforme mostra Harrington(1961).

Os potenciais de Debye e as componentes eletromagnéticas geradas por estes potenciais, em um meio estratificado, estão desenvolvidas com detalhes em Wannamaker et al(1984) e Rijo(1990). Com as componentes eletromagnéticas, expressas em coordenadas cilíndricas e definidas para todo o meio estratificado, poderemos obter o perfil de condutividade através das componentes E_ϕ e ou H_z , da seguinte forma:

$$\epsilon_{mf} = iw\mu_0 N_R N_T H_z, \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{\text{Real}(\epsilon_{mf})}{K}, \quad (2)$$

onde, w é a frequência angular, μ_0 é a permeabilidade magnética do meio. N_R é o número de bobinas do receptor, N_T é o número de bobinas do transmissor, H_z é a componente z campo magnético, ϵ_{mf} é a força eletromotriz, σ é a condutividade e K é a constante da ferramenta ,dada por:

$$K = \left(\frac{w^2 \mu_0^2 A_T A_R I_T N_R N_T}{4\pi L} \right), \quad (3)$$

onde L é a distância entre o receptor e o transmissor, A_R e A_T são as áreas das bobinas do receptor e transmissor respectivamente. O sistema métrico de unidades é utilizado nas grandezas mostradas nas formulações.

A condutividade também pode ser determinada através da componente E_ϕ do campo elétrico, como segue:

$$V = 2\pi r N_R E_\phi, \quad (4)$$

$$\sigma = -\frac{V}{K}, \quad (5)$$

onde V é o potencial elétrico, r é o raio da bobina receptora e E_ϕ é a componente tangencial do campo elétrico em coordenadas cilíndricas. Assim o algoritmo que define o perfil de condutividade para uma sonda com múltiplos transmissores e receptores, que passa por um meio multiestratificado, pode ser definido pelas seguintes expressões:

1) Transmissor e receptor no shoulder superior ($l=j=0$), onde l é o índice da camada onde está o transmissor, e j é o índice da camada onde está o receptor.

$$\sigma_a + i\sigma_x = \frac{i\sigma\delta^2}{2L^2} \int_0^\infty \left(e^{-u_l|z-h_0|} + R_{(TE)_l}^{(+)} e^{u_l(z+h_0)} \right) \lambda d\lambda. \quad (6)$$

2) Transmissor e receptor no shoulder inferior ($l=j=N$).

$$\sigma_a + i\sigma_x = \frac{i\sigma\delta^2}{2L^2} \int_0^\infty \left(e^{u_l|z-h_0|} + R_{(TE)_l}^{(-)} e^{-u_l(z+h_0-2z_N)} \right) \lambda d\lambda. \quad (7)$$

3) Transmissor e receptor em uma mesma camada $l=j$.

$$\begin{aligned} \sigma_a + i\sigma_x = & \frac{i\sigma\delta^2}{2L^2} \int_0^\infty \left\{ (e^{-u_l|z-h_0|} + R_{(TE)_l}^{(-)} e^{u_l(z+h_0-2z_{(l-1)})}) \right. \\ & \left. + A_{(TE)_l} (e^{u_l(z-z_{l-1})} + R_{(TE)_l}^{(-)} e^{-u_l(z-z_{(l-1)})}) \right\} \lambda d\lambda. \end{aligned} \quad (8)$$

4) Transmissor no shoulder superior e receptor em uma camada subjacente ($l=0 < j$).

$$\sigma_a + i\sigma_x = \frac{i\sigma\delta^2}{2L^2} \int_0^\infty \left(e^{-u_j(z-z_j)} + R_{(TE)_j}^{(+)} e^{u_j(z-z_j)} \right) \lambda d\lambda. \quad (9)$$

5) Transmissor no shoulder superior e receptor no shoulder inferior ($l=0 < (j=N)$).

$$\sigma_a + i\sigma_x = \frac{i\sigma\delta^2}{2L^2} \int_0^\infty \left(e^{-u_N(z-z_N)} \right) \lambda d\lambda. \quad (10)$$

6) Transmissor no shoulder inferior e receptor em uma camada sobrejacente ($l=N > j$).

$$\sigma_a + i\sigma_x = \frac{i\sigma\delta^2}{2L^2} \int_0^\infty \left(e^{u_j(z-z_{j-1})} + R_{(TE)_j}^{(-)} e^{-u_j(z-z_{j-1})} \right) \lambda d\lambda. \quad (11)$$

7) Transmissor no shoulder inferior e receptor no shoulder superior ($l=N$) e ($j=0$).

$$\sigma_a + i\sigma_x = \frac{i\sigma\delta^2}{2L^2} \int_0^\infty \left(e^{u_0(z-z_0)} \right) \lambda d\lambda. \quad (12)$$

8) Transmissor em uma camada sobrejacente à camada do receptor $l < j$.

$$\sigma_a + i.\sigma_x = \frac{i\sigma\delta^2}{2L^2} \int_0^\infty G(\lambda)\lambda d\lambda, \quad \text{onde} \quad (13)$$

$$G(\lambda) = B_{(TE)_{(j,l)}}^{(+)} \left(\frac{A_{(TE)_l} e^{u_l h_l}}{R_{(TE)_l}^{(+)}} \right) (R_{(TE)_j}^{(+)} e^{u_j(z-z_j)} + e^{-u_j(z-z_j)}).$$

9) Transmissor em uma camada sobrejacente ao receptor que está no shoulder inferior $l < (j=N)$

$$\sigma_a + i.\sigma_x = \frac{i\sigma\delta^2}{2L^2} \int_0^\infty \left\{ B_{(TE)_{(j,l)}}^{(+)} \left(\frac{A_{(TE)_l} e^{u_l h_l}}{R_{(TE)_l}^{(+)}} \right) (e^{-u_N(z-z_{N-l})}) \right\} \lambda d\lambda. \quad (14)$$

10) Transmissor em uma camada subjacente a camada do receptor $l > j$.

$$\sigma_a + i.\sigma_x = \frac{i\sigma\delta^2}{2L^2} \int_0^\infty G(\lambda)\lambda d\lambda, \quad \text{onde} \quad (15)$$

$$G(\lambda) = B_{(TE)_{(j,l)}}^{(-)} (A_{(TE)_l} + e^{-u_l(h_0-z_{l-1})}) (R_{(TE)_j}^{(-)} e^{-u_j(z-z_{(j-l)})} + e^{u_j(z-z_{(j-l)})})$$

11) Transmissor em uma camada subjacente ao receptor que está no shoulder superior $l > (j=0)$.

$$\sigma_a + i.\sigma_x = \frac{i\sigma\delta^2}{2L^2} \int_0^\infty \left\{ B_{(TE)_{(l,0)}}^{(-)} (A_{(TE)_l} + e^{-u_l(h_0-z_{l-1})}) (e^{u_0 z}) \right\} \lambda d\lambda. \quad (16)$$

A parte real da condutividade é simbolizada por σ_a e a parte imaginária é simbolizada por σ_x . A variável z define a posição do receptor, h_0 define a posição do receptor, e z_j define a profundidade da camada "j", e $\delta^2 = \sqrt{2/w\mu\sigma}$. A variável "u_j" e as constantes R_{TE} , B_{TE} e A_{TE} são definidas a seguir.

Os coeficientes de reflexão R_{TE} são obtidos a partir das condições de continuidade das componentes tangenciais do campo nas interfaces, os detalhes estão em Rijo(1990). Os coeficientes são definidos por

$$R_{TE_j}^{(+/-)} = \frac{Y_j - \hat{Y}_j^{(+/-)}}{Y_j + \hat{Y}_j^{(+/-)}}. \quad (17)$$

Os sinais + ou - são relativos ao uso das admitâncias aparentes $\hat{Y}_j^{(+)}$ ou $\hat{Y}_j^{(-)}$, dadas a seguir. A admitância verdadeira Y_j é definida por

$$Y_j = \frac{u_j}{i\omega\mu_0}, \quad \text{onde} \quad (18)$$

$$u_j = (\lambda^2 - k_j^2)^{(1/2)} \quad e \quad (19)$$

$k_j = -i\omega\mu\sigma_j$ é o número de onda, e σ_j é a condutividade da camada j .

As admitâncias aparentes $\hat{Y}_j^{(+/-)}$ também são determinadas a partir da continuidade das componentes tangenciais. As admitâncias são definidas por uma recorrência, dada por:

$$\hat{Y}_j^{(+/-)} = Y_j \frac{\hat{Y}_{j+1}^{(+/-)} + Y_j \tanh(u_j h_j)}{Y_j + \hat{Y}_{j+1}^{(+/-)} \tanh(u_j h_j)}. \quad (20)$$

Onde o uso do sinal + define o início da recorrência a partir do shoulder inferior, considerando-se que no shoulder inferior a admitância aparente do topo do shoulder é igual a admitância intrínseca do shoulder $\hat{Y}_j^{(+)} = Y_N$. Utilizando-se o sinal - definimos o início da recorrência a partir do shoulder superior, considera-se que a admitância aparente na base do shoulder seja igual a sua admitância verdadeira $\hat{Y}_0 = Y_0$.

Os coeficientes B_{TE} definem a transmissão do campo do transmissor(1) ao receptor(j). São obtidos através das condições de continuidade das componentes tangenciais nas interfaces. Os coeficientes B_{TE} tem a forma

$$B_{(TE)_{(I,J)}}^{(+/-)} = \prod_{(M=I+1)}^{(J)} \frac{1 + R_{(TE)_{(m-1)}}^{(+/-)} e^{-u_m h_m}}{1 + R_{(TE)_m}^{(+/-)} e^{-2u_m h_m}}. \quad (21)$$

Se o receptor estiver no shoulder inferior ($j=N$), então teremos

$$B_{(TE)_{(i,N)}}^{(+)} = B_{(TE)_{(i,N-1)}}^{(+)} (1 + R_{(TE)_{(N-1)}}^{(+)}). \quad (22)$$

E se o receptor estiver no shoulder superior ($j=0$), teremos

$$B_{(TE)_{(i,0)}}^{(-)} = B_{(TE)_{(i,1)}}^{(-)} (1 + R_{(TE)_{(1)}}^{(-)}). \quad (23)$$

O uso dos sinais + ou - é relativo ao uso dos coeficientes $R_{TE}^{(+)}$ ou $R_{TE}^{(-)}$, já definidos.

O coeficiente A_{TE} é obtido das condições de continuidade das componentes tangenciais, aparecem quando determinamos o campo na mesma camada onde está a fonte, sua forma é

$$A_{(TE)_l} = \frac{R_{(TE)_l}^+ e^{-2u_l h_l} e^{u_l(h_0 - z_{(l-1)})} (R_{(TE)_l}^+ e^{-2u_l(h_0 - z_{(l-1)})} + 1.)}{1 - R_{(TE)_l}^+ R_{(TE)_l}^- e^{-2u_l h_l}} \quad (24)$$

Definidas as expressões de condutividade para todas as posições mostradas nas equações (6-16), o algoritmo que define perfil de condutividade para sondas com transmissores e receptores múltiplos já pode ser concluído. Para isto basta que definamos a forma de compor a condutividade gerada pelos diversos pares de bobinas transmissoras e receptoras.

Moran e Kunz (1962) mostraram que a condutividade medida por uma sonda com múltiplos pares de bobinas, pode ser determinado por

$$\sigma_m = \frac{\sum_{i,j} \left(\frac{N_T N_R}{L} \cdot \sigma_a \right)_{i,j}}{\sum_{i,j} \left(\frac{N_T N_R}{L} \right)_{i,j}} \quad (25)$$

O subíndice i é referente a bobina transmissora, j é o subíndice da bobina receptora, N_T e N_R é o número de espiras do transmissor i e do receptor j, respectivamente. σ_a é a condutividade medida pelo par de bobinas i, j, equações (6-16), e σ_m é a condutividade de resposta da sonda.

Os nossos esforços na implementação do algoritmo foram na construção de subrotinas eficientes e precisas para os coeficientes e para a integração. Outro ponto que nos exigiu atenção foi a escolha correta da forma de normalização empregada nas expressões de condutividade(6-16), neste trabalho a normalização feita foi através da distância entre transmissor e receptor.

A utilização da programoteca EMLIB, implantada no sistema disco VAX-8600 por Rijo (1990), auxiliou a implementação do referido algoritmo.

CAPÍTULO 3

VERIFICAÇÃO DO ALGORÍTMO

A sonda 2C40 e as sondas focalizadas 6FF40 e ILD da companhia Schlumberger, foram utilizadas para verificação do algoritmo apresentado neste trabalho. Os esquemas das bobinas nestas sondas, cedidas pela Schlumberger (Anderson,1990), são mostradas nas Figs. 2 a 4. As respostas destas sondas obtidas pelo algoritmo proposto neste trabalho é chamada na literatura de "raw signal", ou seja, a resposta das sondas sem qualquer pós-processamento. Eventualmente a resposta destas sondas serão "boosted", ou seja, pós-processadas para correção do "skin effect". O algoritmo para este pós-processamento também foi cedido pela Schlumberger (Anderson,1990).

A Fig.5 mostra a resposta da sonda 2C40, em um modelo de uma camada resistiva entre "shoulders" condutivos, com espessuras de 1,54 m e 3,3 m respectivamente. A Fig.5 compõe-se de três curvas, uma curva representando a condutividade verdadeira da formação, duas curvas representando as resposta da sonda considerando condutividades diferentes para o "shoulder". A resistividade da camada é 1000 ohm.m, as resistividades do "shoulder" são de 16,0 ohm.m e 0,25 ohm.m respectivamente. Cada uma destas curvas é normalizada pela condutividade do "shoulder", assim o maior valor lido na ordenada é 1,0. Como consequência as respostas das sondas começam próximo do valor 1 e no intervalo de 0 a 1,016 ohm onde a curva verdadeira descreve a condutividade da camada, as respostas da sonda tendem a aproximar esta condutividade. Sobre cada uma destas curvas estão plotados as respostas das sondas baseadas no algoritmo de Moran e Kunz (1962). A acuracidade entre as respostas do algoritmo de Moran e Kunz e as respostas do algoritmo proposto neste trabalho é excelente, como mostra a Fig.5.

As Figs. 6 e 7 comparam as respostas obtidas para as sondas 2C40 e 6FF40 com as respostas geradas por estas sondas utilizando o algoritmo de Anderson e Chang (1982). O modelo geológico utilizado compõe-se de duas camadas entre "shoulders", cujas resistividades são respectivamente de 0,2 ohm.m, 20,0 ohm.m e 1,0 ohm.m. As espessuras das camadas são de 2,25 m e 1,5 m. Os pontos plotados das respostas geradas pelo algoritmo de Anderson e Chang acompanham as curvas das respostas obtidas nesse trabalho, dessa forma garantindo a acuracidade do nosso algoritmo. A resposta da sonda 6FF40 na Fig.7 apresenta nas profundidades de 0 a 2,25 m uma discrepância,

SONDA 2C40

Número de enrolamentos
das bobinas

Posição (metros)

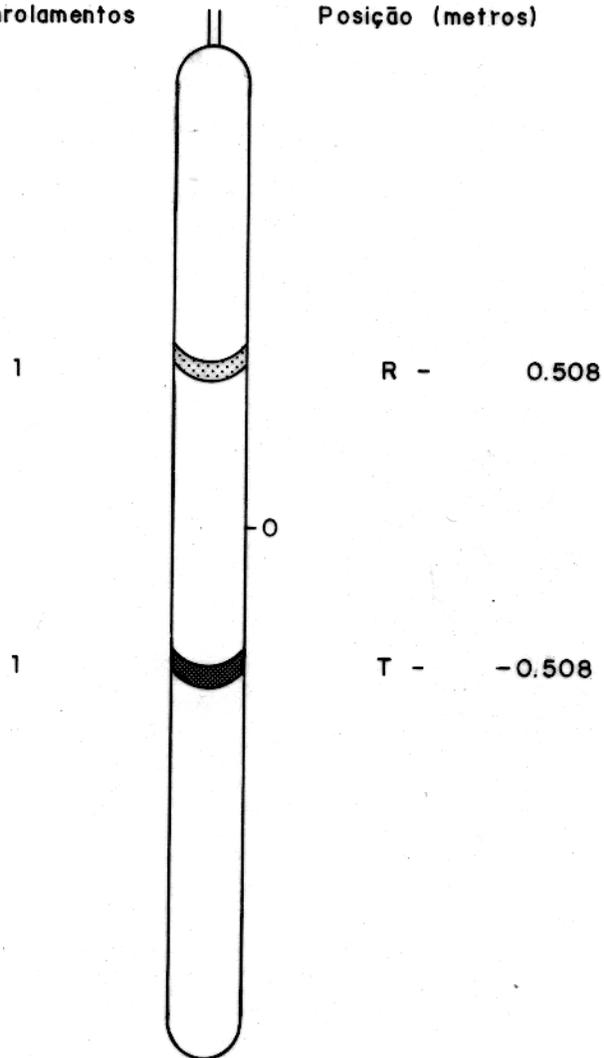


Fig.2- Esquema estrutural da sonda 2C40, onde T é transmissor, e R é receptor.

SONDA 6FF40

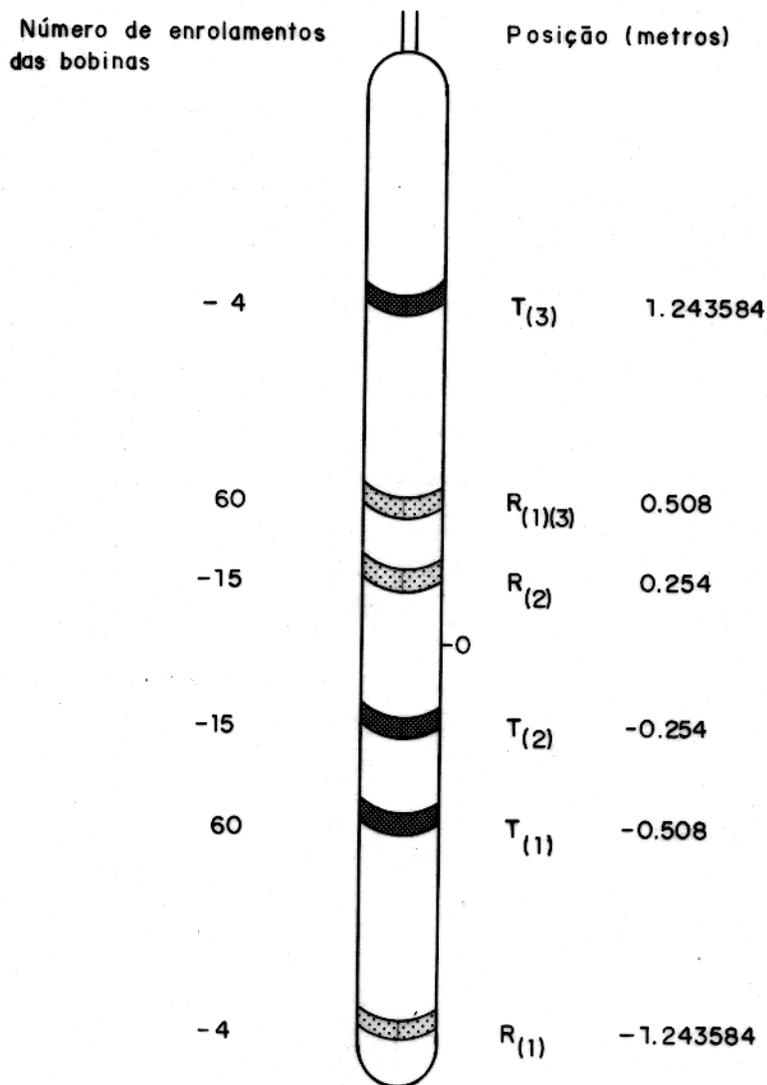


Fig.3- Esquema estrutural da sonda 6FF40, onde T é transmissor, e R é receptor. Os subíndices indicam quais transmissores e receptores relacionam-se (Anderson, 1990).

SONDA ÎLD - DEEP DUAL INDUCTION

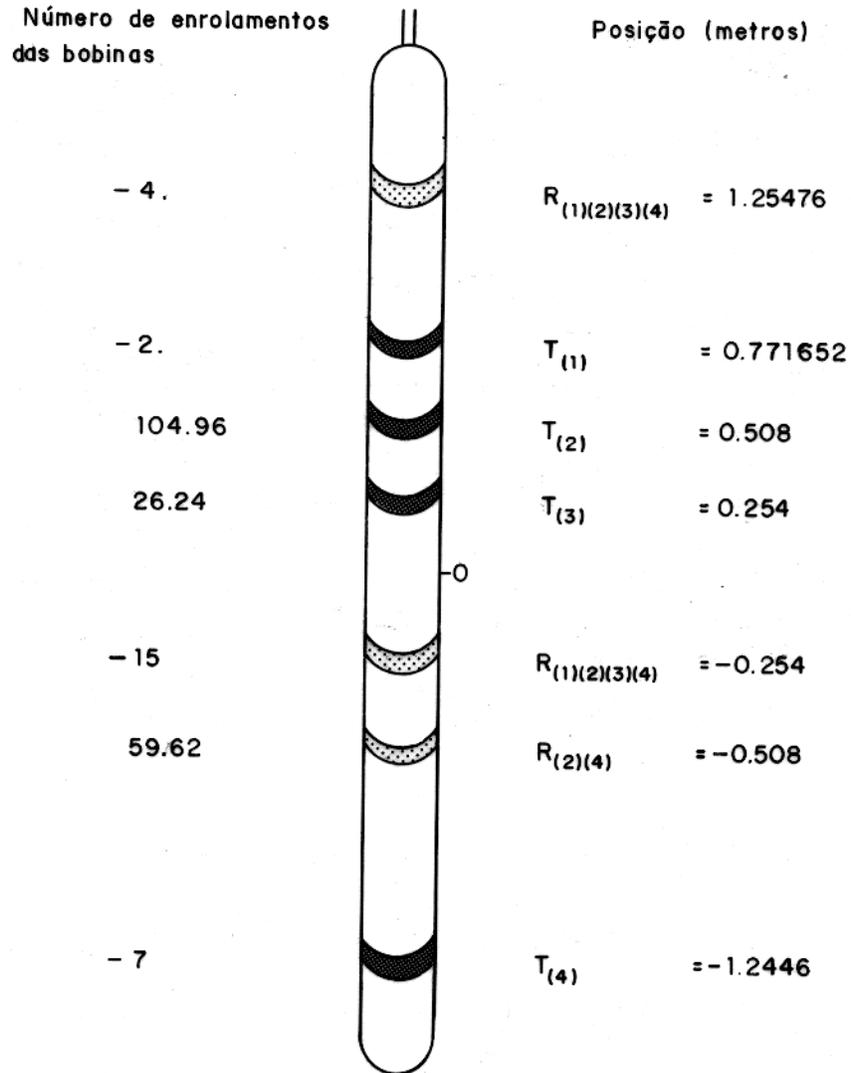


Fig.4- Esquema estrutural da sonda ILD, onde T é transmissor, e R é receptor. Os subíndices indicam quais transmissores e receptores relacionam-se (Anderson, 1990).

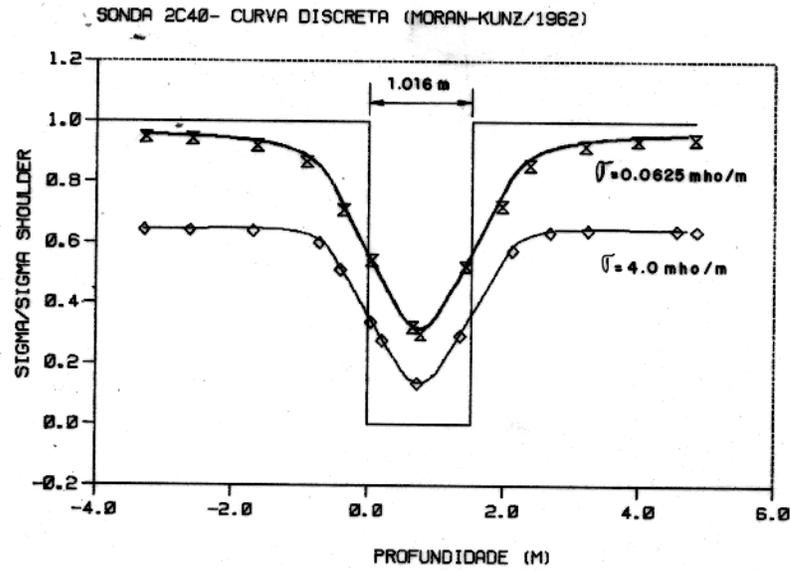


Fig.5- Respostas da sonda 2C40 em modelo de uma camada entre shoulders condutivos. As curvas estão normalizadas pelas condutividades do shoulder, indicadas nas mesmas. As curvas discretas são obtidas pelo algoritmo de Moran e Kunz(1962).

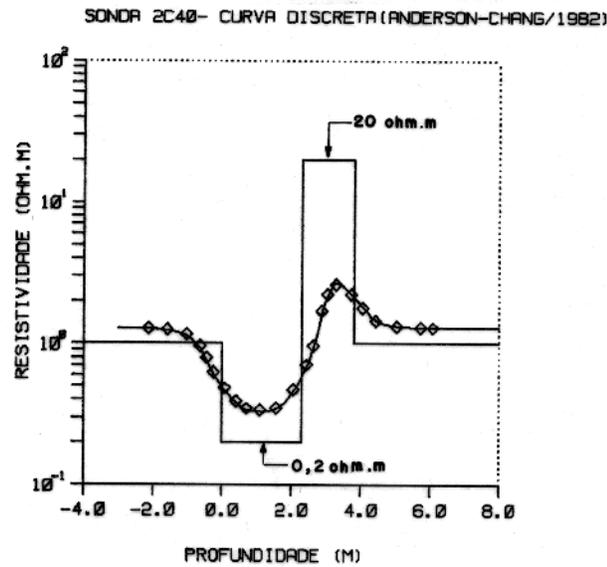


Fig.6- Resposta da sonda 2C40 em modelo de duas camadas de resistividades de 0,2 ohm.m e 20 ohm.m. A curva discreta é obtida pelo algoritmo Anderson e Chang(1982)

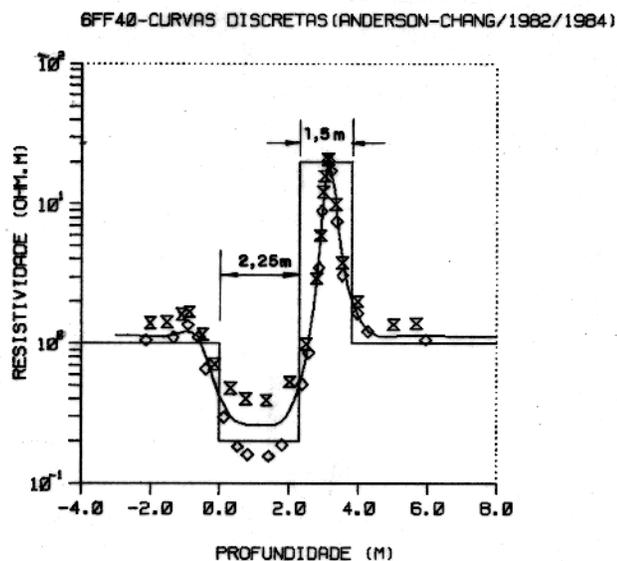


Fig.7- Resposta da sonda 6FF40 em modelo de duas camadas de resistividades de 0,2 ohm.m e 20 ohm.m. A espessuras são de 2,25m e 1.5m. As curvas discretas são do algoritmo de Anderson & Chang(1982) e Chang & Anderson(1984).

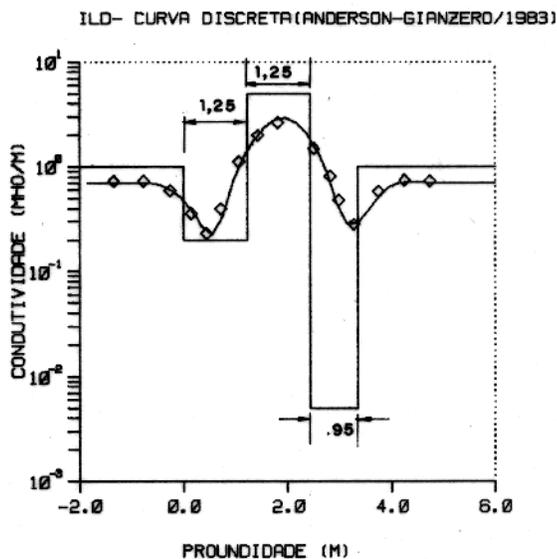


Fig.8- Resposta da sonda ILD em modelo de três camadas com resistividades de 5 ohm.m, 0,2 ohm.m e 200ohm.m. A curva discreta é obtida pelo algoritmo Anderson e Gianzero(1983).

que atribuímos a um erro na plotagem do gráfico da Fig.10 (Anderson & Chang,1982). Este erro pode ser facilmente detectado observando-se a resposta da sonda 6FF40 deste mesmo modelo geológico apresentado na Fig.9a no trabalho de Chang & Anderson(1984), que ironicamente também contém um erro de plotagem. Para facilitar a comparação de nossos resultados por outros pesquisadores, apresentamos os valores numéricos das respostas das sondas mostradas nas Figs. 5 a 9, nas tabelas(1 a 5), em anexo.

A resposta da sonda ILD (deep induction) foi comparado à resposta da mesma sonda gerada pelo algoritmo de Anderson e Gianzero (1983). O modelo geológico utilizado para comparação constitui-se de três camadas entre shoulders de igual resistividade, onde as resistividades das camadas e dos shoulders são de 5,0 ohm.m, 0,2 ohm.m, 200,0 ohm.m e 1,0 ohm.m, respectivamente. As espessuras das camadas são de 1,25 m, 1,25 m e 0,95 m. A Fig.8 mostra a curva da resposta obtida para a sonda ILD, inclusive alguns pontos da resposta da sonda ILD gerada pelo algoritmo de Anderson e Gianzero (1983). Também aparece na Fig.8 a curva de condutividade verdadeira do modelo geológico. Ambas as curvas delimitam de igual forma as camadas, bem como aproximam suas resistividades quando comparadas à curva de condutividade verdadeira, o que confirma a acuracidade do nosso algoritmo. Ainda para verificação do algoritmo utilizou-se a resposta da sonda ILD(Fig.4) em um modelo de 11 camadas entre shoulders de resistividades diferentes. As camadas do modelo geológico utilizado tem resistividades de 20 ohm.m, 100 ohm.m, 10 ohm.m, 5 ohm.m, 200 ohm.m, 100 ohm.m, 20 ohm.m, 200 ohm.m, 5 ohm.m, 20 ohm.m, 10 ohm.m e 200 ohm.m e as resistividades dos shoulders são de 20 ohm.m e 100 ohm.m. As espessuras das camadas são 0,6 m, 0,85 m, 0,7 m, 3,2 m, 0,6 m, 0,95 m, 1,2 m, 1,2 m, 2,45 m, 2,2 m, 0,6 m. A resposta obtida para a sonda ILD foi comparada à resposta gerada pelo algoritmo de Anderson & Gianzero (1983), no modelo geológico acima descrito. A comparação das curvas geradas por ambos algoritmos é apresentada na Fig.9, juntamente com a curva de condutividade verdadeira do modelo geológico. Ambas as curvas aproximam as condutividade das camadas, bem como, definem suas espessuras de forma bastante próxima. A pequena diferença, menor que 3%, que existe entre as curvas em determinados pontos, é relativa ao pós-processamento. A curva obtida recebeu o pós-processamento de "Boosted"(correção do skin effect), enquanto a curva gerada pelo algoritmo de Anderson & Gianzero(1983) além de Boosted recebeu o pós-processamento da deconvolução.

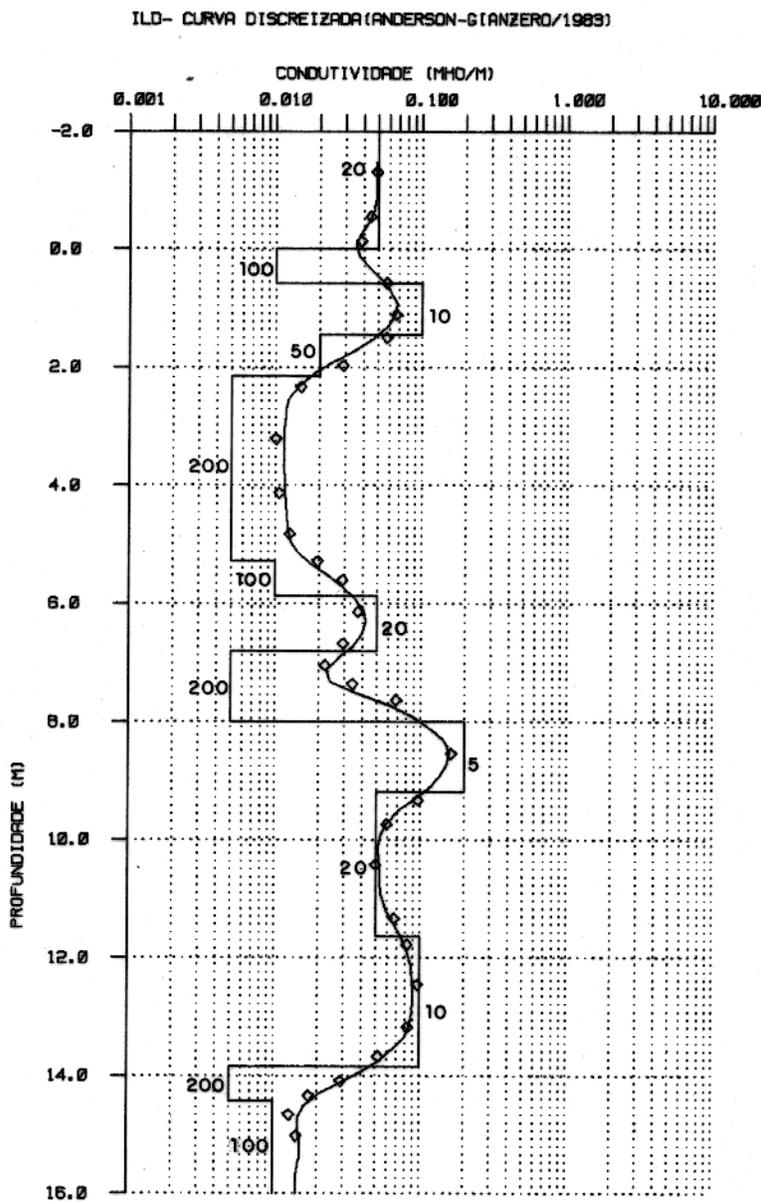


Fig.9- Resposta da sonda ILD em modelo de onze camadas. As resistividades das camadas são 100,10,50,200,100,20,200,5,20,10 e 200 ohm.m, e as espessuras 0.6, 0.85, 0.7, 3.2, 0.6, 0.95, 1.2, 1.2, 2.45, 2.2 e 0.6 m. A curva discreta é obtida pelo algoritmo Anderson e Gianzero(1983).

A acuracidade mostrada na comparação das curvas obtidas das respostas das sondas, e das curvas geradas pelos algoritmos apresentados na literatura, viabilizam a utilização do algoritmo em outras análises.

CAPÍTULO 4

RESERVATÓRIOS LAMINADOS

4.1 Introdução

Muitos reservatórios atualmente em produção têm as zonas de interesse com espessuras menores que a resolução das ferramentas de indução, Anderson (1986), Petrobrás/Schlumberger (1987,1988) e Anderson & Barber (1988), ou seja, espessura menor que a menor distância dentre um dos pares de bobinas transmissoras e receptoras da sonda. A alternância de camadas produtoras e camadas não produtoras entre um par de bobinas transmissora e receptora, fazem com que as reflexões internas nestas camadas não sejam todas detectadas pelo par de bobinas. Como consequência, a ferramenta não delimita as camadas nem aproxima individualmente suas condutividades. A ferramenta define uma condutividade "bulk" (global) para o conjunto de finas camadas produtoras e camadas não produtoras, o que caracteriza a baixa de resolução, para estes tipos de perfis elétricos.

Estes reservatórios, ditos reservatórios laminados, estarão conhecidos determinando-se o percentual do reservatório constituído de lâminas produtoras e o percentual constituído de lâminas não produtoras, bem como estimando-se suas condutividades.

O modelamento das sondas de indução nestes reservatórios laminados, mostra um comportamento linear na resposta da sonda quando expressamos a resposta em termos de condutividade. Anderson (1986) e Anderson & Barber (1988) tratando de reservatórios (arenito/folhelho) onde as lâminas de interesse tem resistividade maior que as outras lâminas, determinaram que a resposta da sonda de indução é prevista pela relação da soma das condutividades dos constituintes do reservatório ponderada, pelos seus percentuais em volume. Eles mostraram que as quantidades de arenito e folhelho no reservatório podem ser estimadas por perfis do tipo "Micro-electrical scanner image" ou outras metodologias, usando a relação acima citada. Assim pode-se melhor estimar a condutividade das lâminas produtoras e como consequência a saturação água/óleo e a produtibilidade destes reservatórios laminados, com maior precisão.

No item 4.2 analisamos a resposta da sonda de indução em reservatórios laminados quando a resistividade das lâminas de interesse é maior que a resistividade das outras lâminas, (areni-

to/folhelho). No item 4.3 analisamos as respostas da sonda quando a resistividade das lâminas de interesse é a menor do reservatório, (arenito moderadamente silicificado/arenito). E no item 4.4 analisamos a resposta da sonda quando as lâminas de interesse tem resistividade maior em relação algumas lâminas do reservatório e resistividade menor em relação a outras lâminas por exemplo no caso de laminações arenito silicificado/ arenito/ folhelho. Assim poderemos verificar a relação existente entre o percentual das lâminas de interesse no reservatório e a variação da condutividade medida pela sondas de indução em reservatórios do tipo arenito silicificado/arenito e arenito silicificado/ arenito/ folhelho.

4.2 Laminações Folhelho/Arenito

A condutividade medida pela sondas de indução, em reservatórios laminados do tipo arenito/folhelho, é predita pela relação linear para condutividade, indicada por Anderson (1986). Para verificar esta relação linear com o algoritmo proposto neste trabalho, geramos alguns modelos neste tipo de reservatórios, porém com percentuais e espessuras das lâminas diferentes daqueles de Anderson(1986).

A Fig.10 mostra cinco respostas da sonda ILD em um reservatório de 33 lâminas com alternância de lâminas de arenito com resistividade de 10 ohm.m e lâminas de folhelho com resistividade de 1,0 ohm.m. A espessura das lâminas de arenito variam de 2,54 cm até 27,94 cm enquanto as lâminas de folhelho variam de 27,94 cm até 2,54 cm, assim o percentual de arenito e de folhelho no reservatório variam de 8% a 92% e de 92% a 8% respectivamente. Com o aumento do percentual de arenito no reservatório, a resposta da sonda ILD tende linearmente para a condutividade verdadeira do arenito, 0,1 mho/m. Devido a baixa resolução da sonda para camadas de pequena espessura, a partir da profundidade de 1,0 m até 4,0 m a condutividade mantém-se aproximadamente constante. As respostas da sonda ILD na Fig.10, foram determinadas nos percentuais de 8%, 25%, 50%, 75% e 92% de arenito em relação ao folhelho. O esquema do modelo geológico utilizado, também é mostrado na Fig.10. As Figs.11–13 ilustram as respostas da sonda ILD em um reservatório de características estruturais idênticas ao reservatório da Fig.10. Foram alterados unicamente as resistividades do arenito para 25 ohm.m, 40 ohm.m e 100 ohm.m, respectivamente.

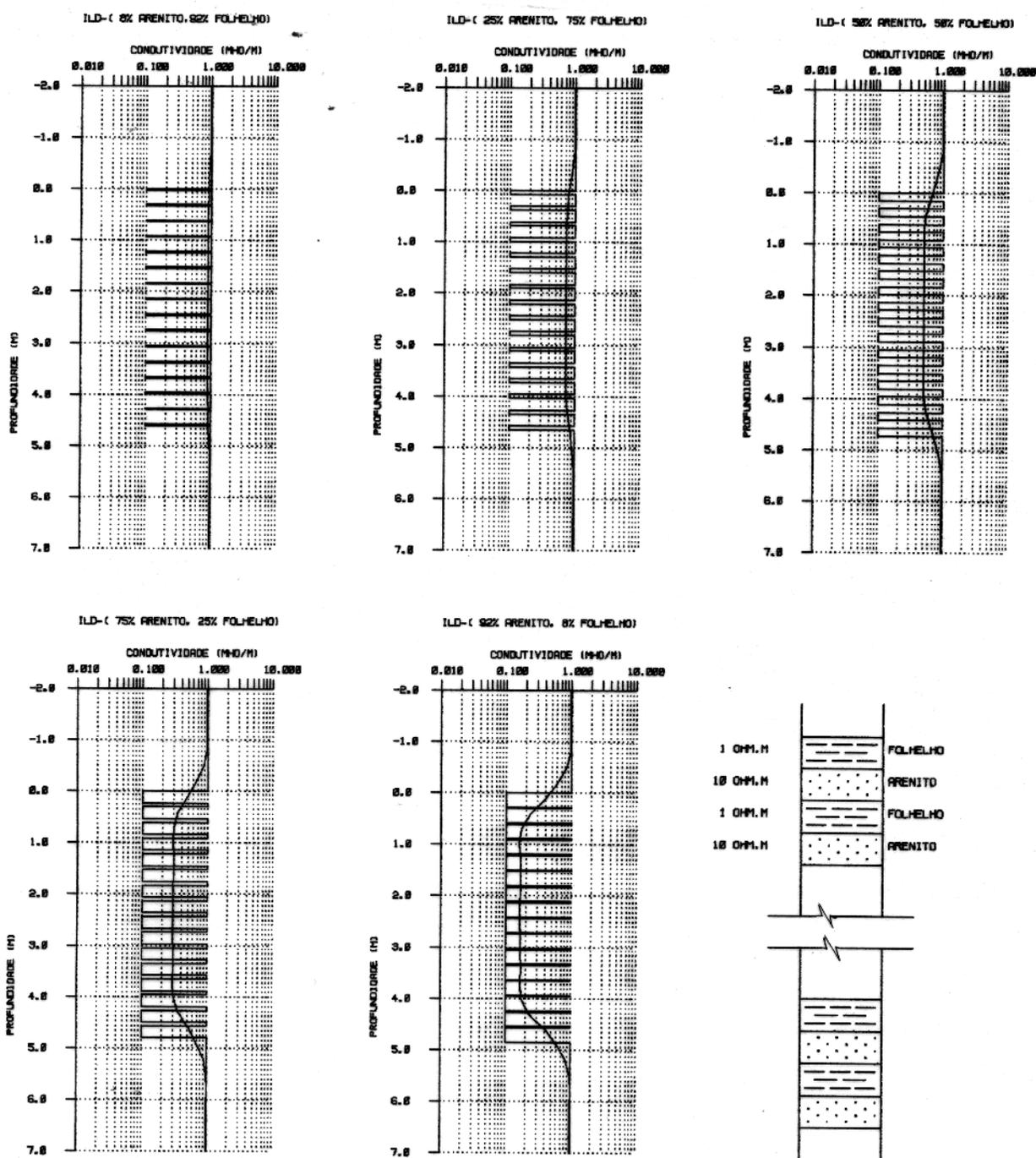


Fig.10- Respostas da sonda ILD em um reservatório com 33 lâminas de folhelho e arenito alternadas. As respostas da sonda foram determinadas nos percentuais de 8,25,50,75 e 92% de arenito no reservatório. A espessura das lâminas de arenito em cada resposta é de 2,54 ,7,6, 15,2, 22,9 e 27,9cm. O arenito tem $\rho = 10\text{ohm.m}$ e folhelho tem $\rho = 1\text{ohm.m}$.

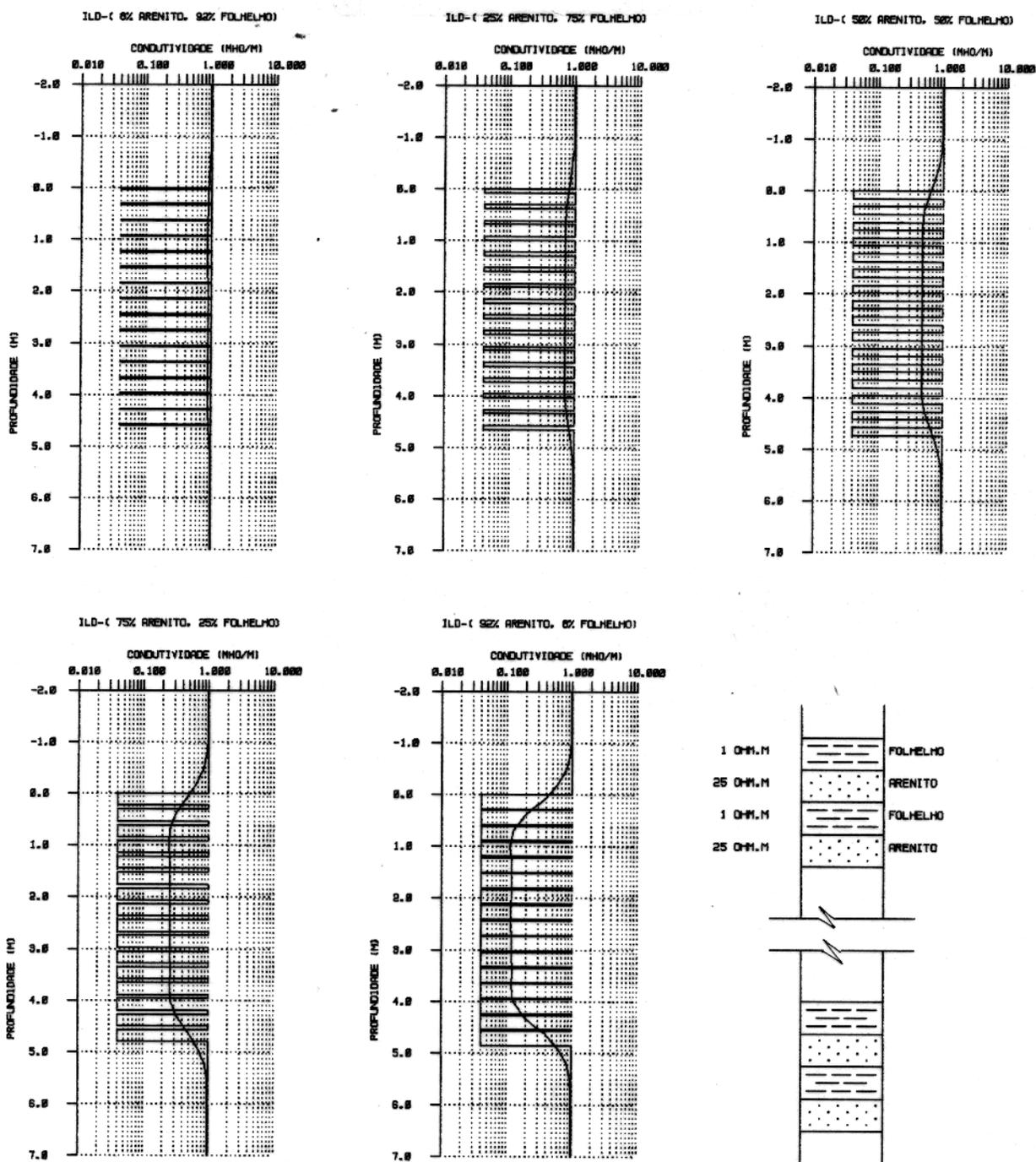


Fig.11- Respostas da sonda ILD em um reservatório com 33 lâminas de folhelho e arenito alternadas. As respostas da sonda foram determinadas nos percentuais de 8,25,50,75 e 92% de arenito no reservatório. A espessura das lâminas de arenito em cada resposta é de 2,54 ,7,6, 15,2, 22,9 e 27,9cm. O arenito tem $\rho = 250\text{ohm.m}$ e folhelho tem $\rho = 10\text{ohm.m}$.

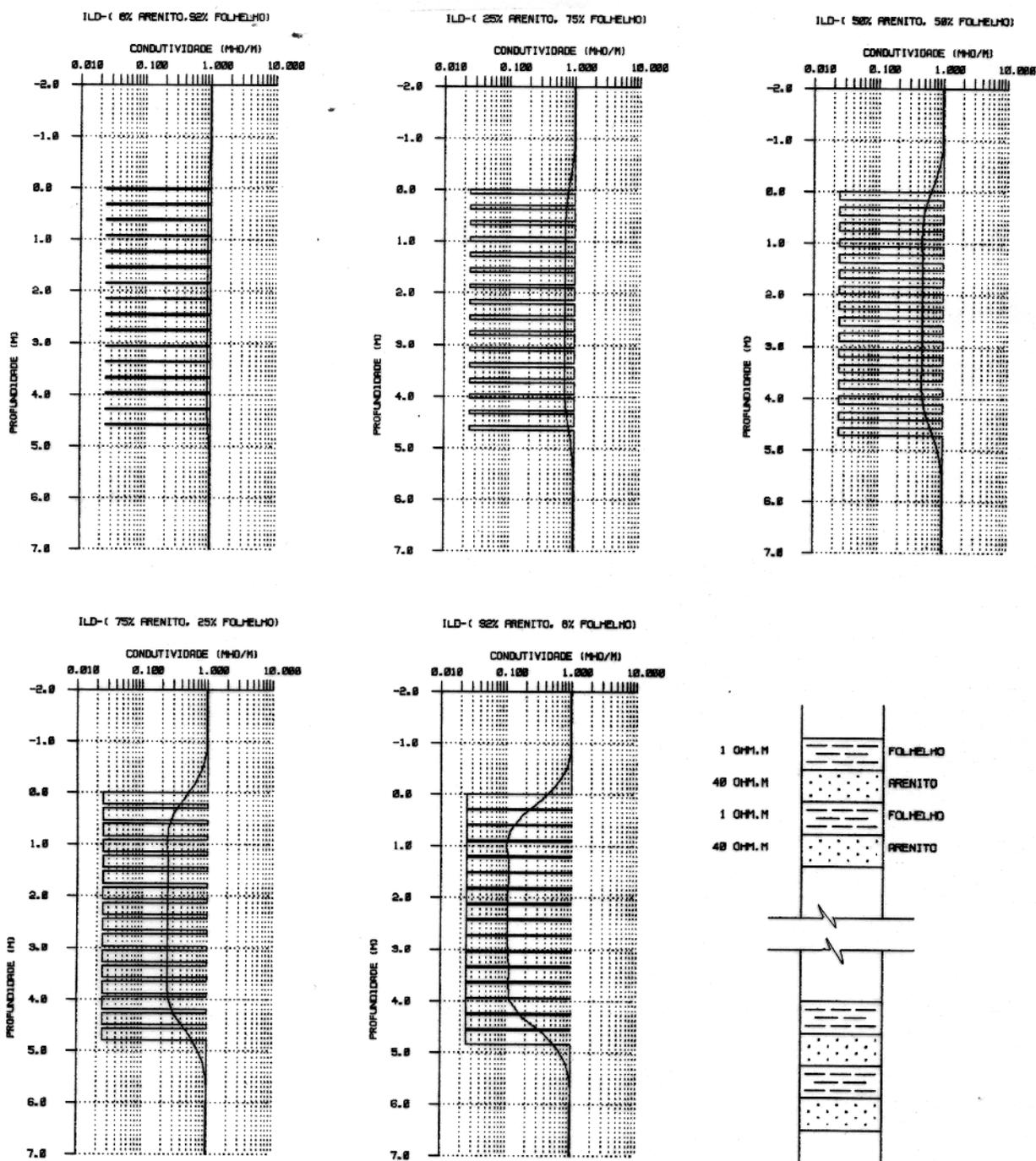


Fig.12- Respostas da sonda ILD em um reservatório com 33 lâminas de folhelho e arenito alternadas. As respostas da sonda foram determinadas nos percentuais de 8,25,50,75 e 92% de arenito no reservatório. A espessura das lâminas de arenito em cada resposta é de 2,54 ,7,6, 15,2, 22,9 e 27,9cm. O arenito tem $\rho = 40\text{ohm.m}$ e folhelho tem $\rho = 1\text{ohm.m}$.

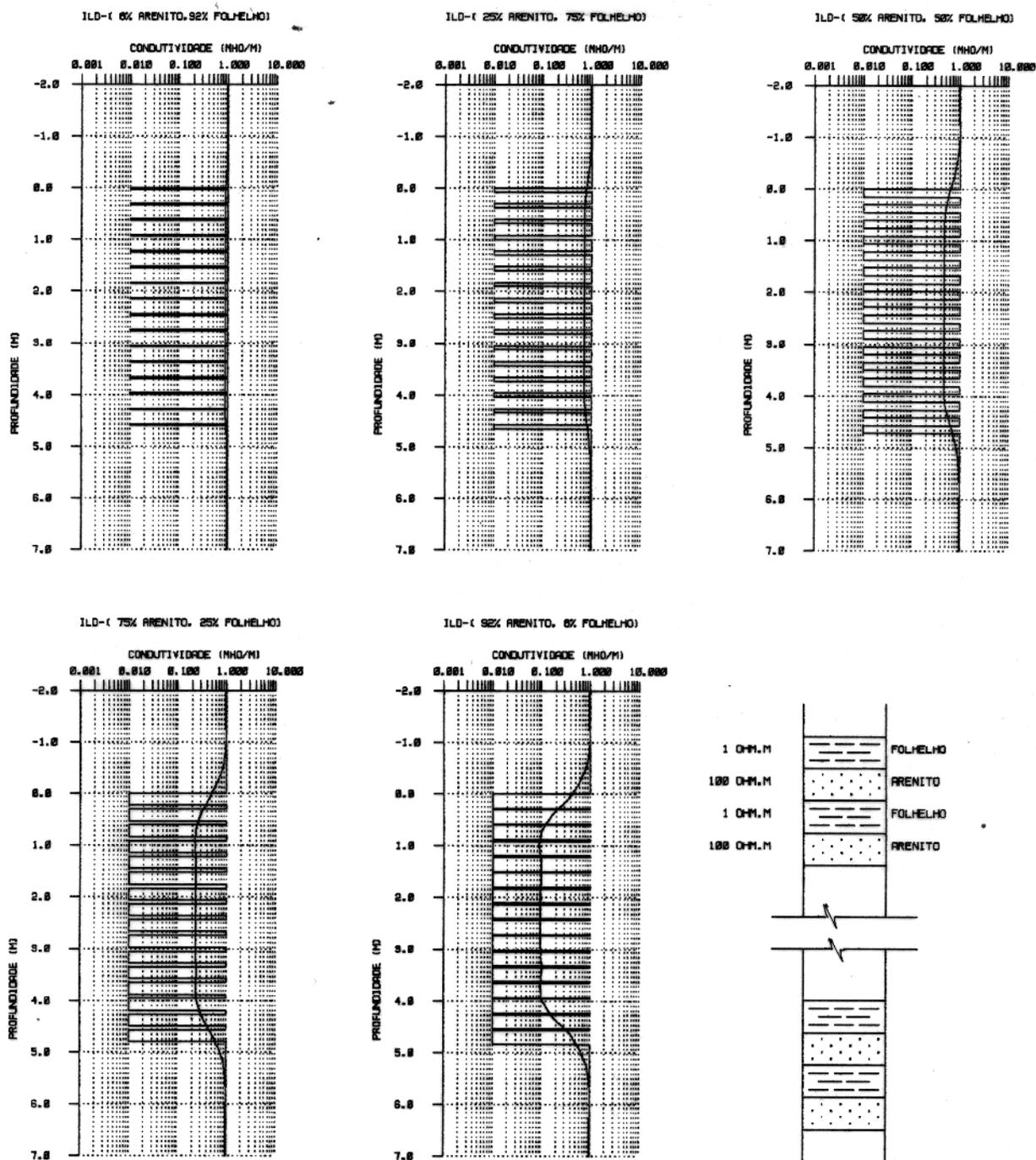


Fig.13- Respostas da sonda ILD em um reservatório com 33 lâminas de folhelho e arenito alternadas. As respostas da sonda foram determinadas nos percentuais de 8,25,50,75 e 92% de arenito no reservatório. A espessura das lâminas de arenito em cada resposta é de 2,54 ,7,6, 15,2, 22,9 e 27,9cm. O arenito tem $\rho = 100\text{ohm.m}$ e folhelho tem $\rho = 1\text{ohm.m}$.

A Fig. 14 mostra a resposta da sonda neste mesmo reservatório, agora alterando-se a resistividade do folhelho para 2 ohm.m e do arenito para 25 ohm.m. As Figs.11-14 mostram também, um esquema dos modelos geológicos utilizados no modelamento.

As respostas da sonda ILD nos reservatórios das Figs.10-14, tende a aproximar a condutividade do arenito, com o aumento de seu percentual no reservatório, ou seja, o aumento da espessura das lâminas de arenito no reservatório e respectiva diminuição da espessura e do percentual das lâminas de folhelho .

Como consequência da diminuição da resolução da sonda ILD devido a pequena espessura das lâminas, a resposta da sonda tem um valor aproximadamente constante no intervalo de profundidade de 1,0m até 4,0m.

Um resumo das variações de condutividade, medidas pelas sonda ILD, devido o aumento percentual de arenito no reservatório, é mostrado na Fig.15. A Fig.15 mostra um gráfico com o percentual(0%-100%) de arenito no eixo das abscissas, e a condutividade(mho/m) no eixo das ordenadas. Nos percentuais de 8%, 25%, 50%, 75% e 92% de arenito é plotado o valor da condutividade medida pela sonda ILD para cada um dos reservatórios mostrados nas Figs.10-14.

A Fig.15 demonstra que com o aumento percentual de arenito nos reservatórios, a condutividade do reservatório é regida por uma relação linear. Isto significa que a condutividade medida é a soma das condutividades de arenito e folhelho ponderadas por seus percentuais em volume. Assim considerando-se a influência da resistividade na fórmula de Archie(1942), pode-se deduzir que os valores estimados pela fórmula serão mais precisos.

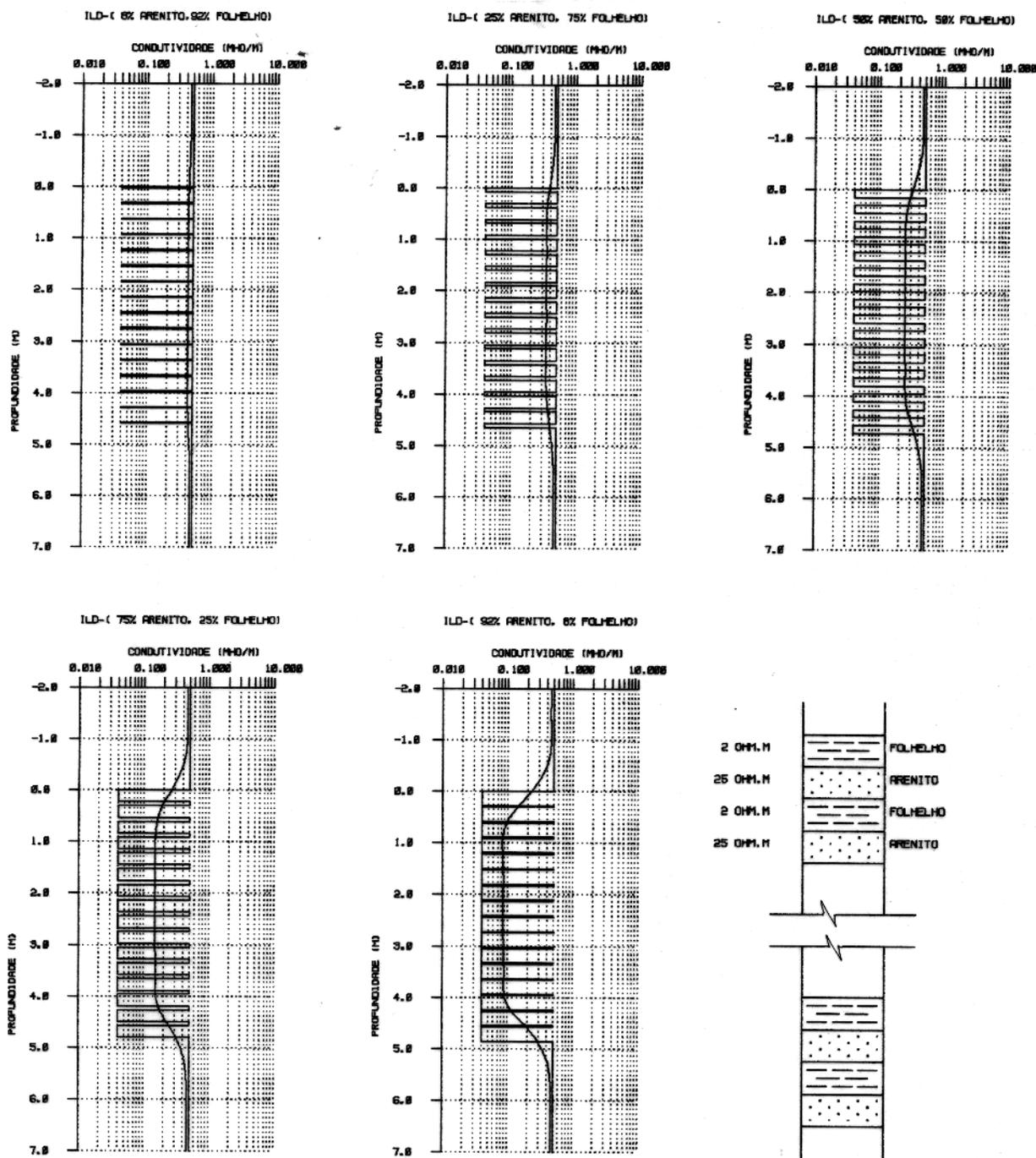


Fig.14- Respostas da sonda ILD em um reservatório com 33 lâminas de folhelho e arenito alternadas. As respostas da sonda foram determinadas nos percentuais de 8,25,50,75 e 92% de arenito no reservatório. A espessura das lâminas de arenito em cada resposta é de 2,54 ,7,6, 15,2, 22,9 e 27,9cm. O arenito tem $\rho = 25$ ohm.m e folhelho tem $\rho = 2$ ohm.m.

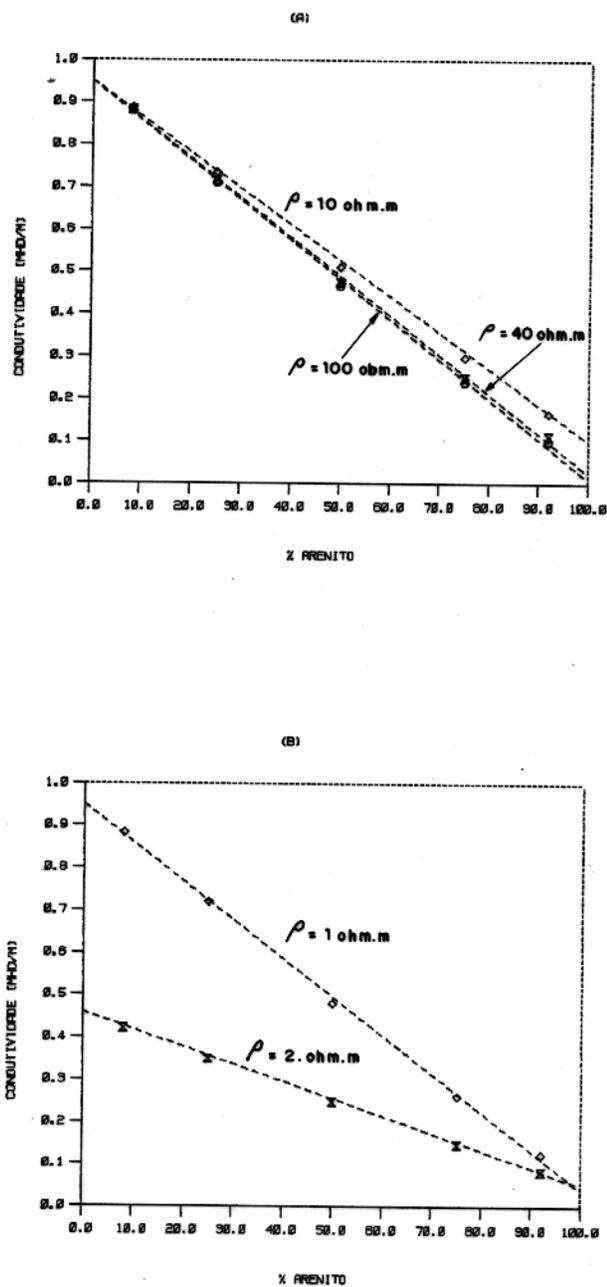


Fig.15- Resumo das respostas da sonda ILD em reservatórios do tipo arenito/folhelho, considerando-se o percentual variável de arenito. A fig.15 (A) mostra reservatórios onde a resistividade do folhelho é 1,0ohm.m e do arenito $\rho = 10, 40$ e 100 ohm.m. Na fig.15 (B) a resistividade do arenito é 25ohm.m e do folhelho $\rho = 1$ e 2 ohm.m. está indicado na reta.

4.3 Laminações Arenito / Arenito Moderadamente Silicificado

A denominação de laminações arenito/arenito moderadamente silicificado é utilizada neste trabalho, para caracterizar reservatórios onde as lâminas produtoras tem resistividade menor que as lâminas não produtoras. Para estabelecer a relação entre a variação percentual de arenito nestes reservatórios e a resposta obtida pela sonda ILD, determinou-se a resposta da sonda ILD em alguns modelos geológicos, através do algoritmo proposto neste trabalho. A determinação desta relação é de interesse, em função da baixa resolução da sonda ILD em camadas de pequena espessura.

Simulou-se um reservatório com 33 lâminas constituído de arenito com 30 ohm.m de resistividade e de arenito moderadamente silicificado de 50 ohm.m de resistividade, na Fig.16. A espessura das lâminas de arenito variam de 2,54cm até 27,94cm, enquanto as lâminas de arenito moderadamente silicificado variam de 27,94cm até 2,54cm. Assim os percentuais de arenito no reservatório variam de 8% até 92% e de arenito silicificado variam de 92% até 8%. A Fig.16 mostra que com o aumento percentual de arenito no reservatório, representado pelo aumento da espessura de suas lâminas, a condutividade medida pela sonda ILD tende a aproximar a condutividade verdadeira do arenito. A baixa resolução da sonda ILD em lâminas de pequena espessura, fazem com que as respostas da sonda na Fig.16, tenham um valor aproximadamente constante nas profundidades de 1,0 até 4,0m. A Fig. 16 mostra as respostas da sonda ILD nos percentuais de 8%, 25%, 50%, 75% e 92% de arenito. A Fig.16 também mostra o modelo geológico esquematicamente.

A Fig.17 mostra a simulação de um reservatório com características estruturais idênticas ao reservatório da Fig. 16, alterando-se unicamente a resistividade do arenito moderadamente silicificado para 200 ohm.m. Também neste reservatório, como era de se esperar, com o aumento percentual das lâminas de arenito a condutividade medida pela sonda ILD tende a aproximar a condutividade verdadeira do arenito. A baixa resolução da sonda determina a quase constância da condutividade medida pela sonda no intervalo de profundidade de 1,0 m a 4,0 m. O modelo geológico considerado também aparece na Fig.17.

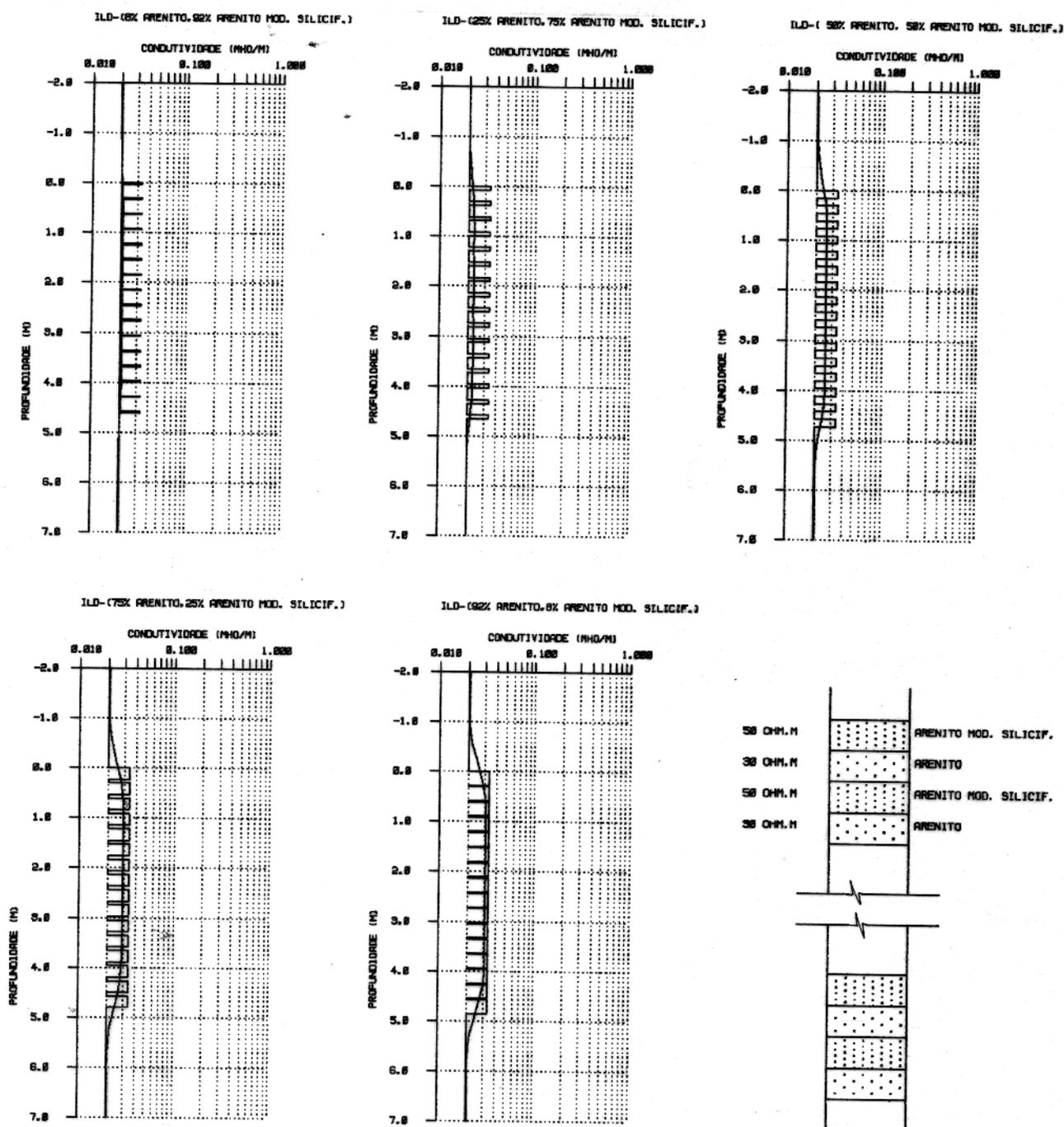


Fig.16- Respostas da sonda ILD em um reservatório com 33 lâminas de arenito e arenito silicificado alternadas. As respostas da sonda foram determinadas nos percentuais de 8,25,50,75 e 92% de arenito no reservatório. A espessura das lâminas de arenito é de 2,54 ,7,6, 15,2, 22,9 e 27,9cm. O arenito tem $\rho = 30$ ohm.m e arenito mod. silicificado tem $\rho = 50$ ohm.m.

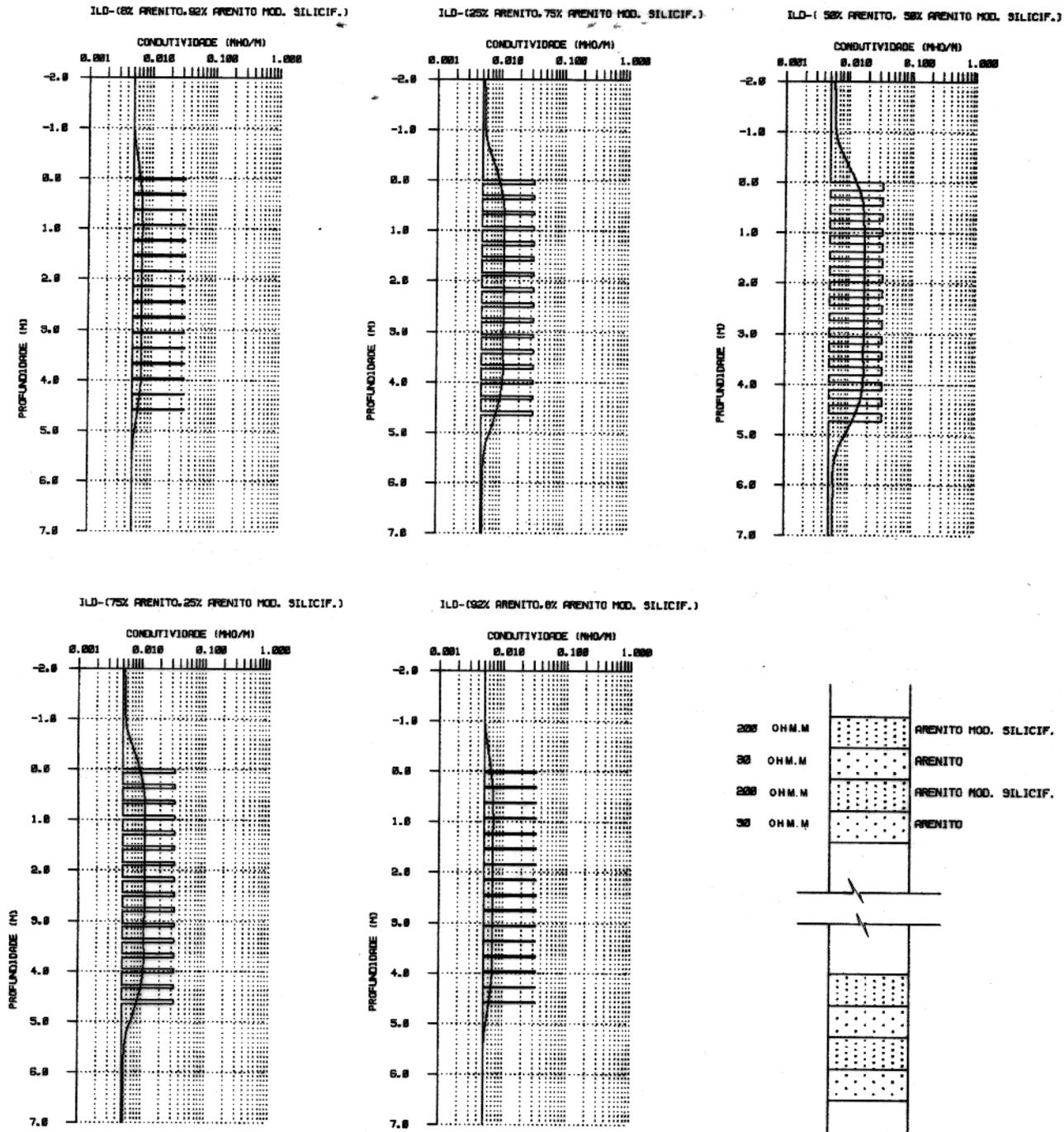


Fig.17- Respostas da sonda ILD em um reservatório com 33 lâminas de arenito mod. silicificado e arenito alternadas. As respostas da sonda foram determinadas nos percentuais de 8,25,50,75 e 92% de arenito no reservatório. A espessura das lâminas de arenito é de 2,54 ,7,6, 15,2, 22,9 e 27,9cm. O arenito tem $\rho = 30 \text{ ohm.m}$ e arenito mod. silicificado tem $\rho = 200 \text{ ohm.m}$.

A Fig.18 mostra um resumo das respostas da sonda ILD, para os modelos geológicos das Figs.16 e 17. As respostas estão plotadas em um gráfico que tem na abscissa o percentual de arenito variando de 0%–100% e tem na ordenada a condutividade variando de 0,0 mho/m–0.05 mho/m. As respostas da sonda para o modelo geológico das Figs 16 e 17, foram plotados nos percentuais de 8%, 25%, 50%, 75% e 92% de arenito no reservatório.

A relação estabelecida entre o aumento percentual de arenito e a condutividade medida pela sonda, é linear e similar a relação estabelecida nos reservatórios do tipo arenito/folhelho. A relação para reservatórios do tipo arenito moderadamente silicificado/arenito pode ser definida como a soma das condutividades dos constituintes litológicos ponderada por seus percentuais em volume.

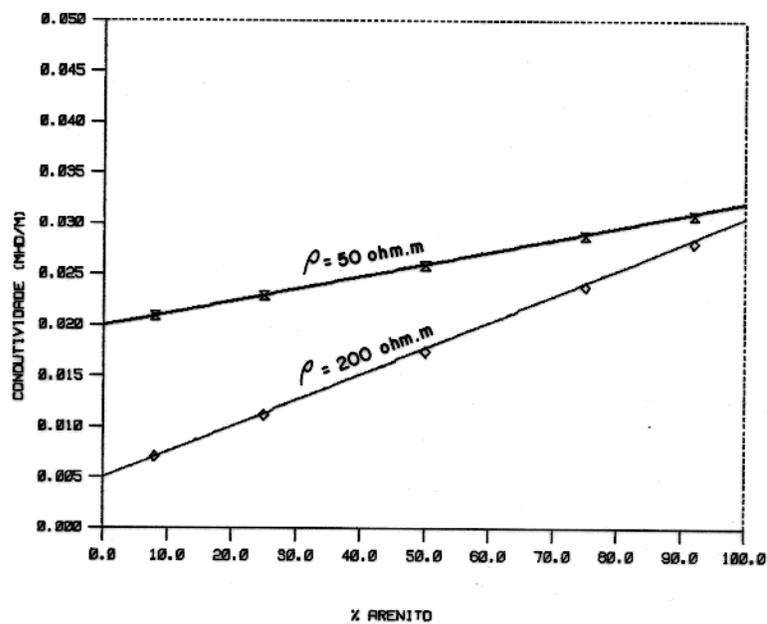


Fig.18- Resumo das respostas da sonda ILD em reservatórios do tipo arenito mod. silicificado/arenito, considerando-se o percentual variável de arenito. As retas mostram os reservatórios onde a resistividade do arenito é de 30 ohm.m e a resistividade do arenito moderadamente silicificado é $\rho = 50$ e 200 ohm.m.

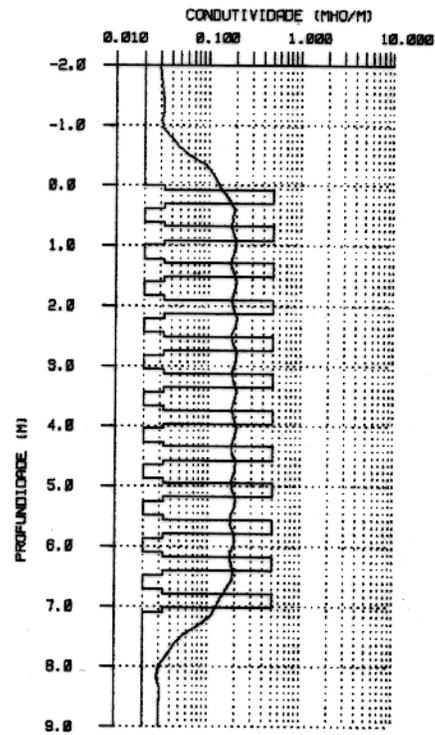
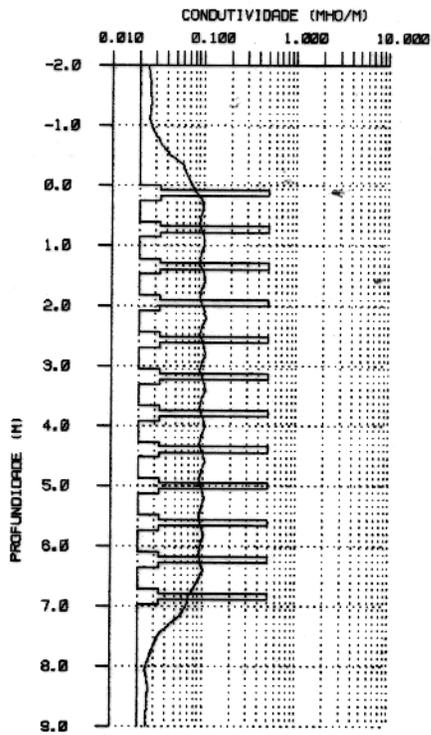
4.4 Laminações Arenito Moderadamente Silicificado/ Arenito / Folhelho

A designação arenito moderadamente silicificado/ arenito/ folhelho descreve, neste trabalho, reservatórios cujo modelo geológico é laminar, ou seja, a espessura das camadas é menor que a resolução da sonda, cuja a lâmina(arenito) de interesse está entre uma lâmina de maior resistividade (arenito silicificado) e outra de menor resistividade (folhelho), ambas lâminas não produtoras.

Com o objetivo de estabelecer a relação existente entre o aumento percentual de arenito nestes reservatórios e a condutividade medida pela sonda ILD, determinou-se a resposta da sonda em modelos geológicos que simulassem estes reservatórios.

A Fig.19 mostra as respostas da sonda ILD em um reservatório de 49 lâminas, onde a resistividade das lâminas de arenito é de 30 ohm.m, a resistividade das lâminas de folhelho é de 2,0 ohm.m e a resistividade das lâminas arenito silicificado é de 50,0 ohm.m. A espessura das lâminas de arenito é de 7,62 cm, as lâminas de arenito moderadamente silicificado tem espessura variando entre 35,56 cm e 10,16 cm e as lâminas de folhelho tem espessura variando entre 10,16 cm e 35,56 cm. Assim o percentual de arenito no reservatório é de 25% e os percentuais de arenito moderadamente silicificado e folhelho variam de 75 até 0% e de 0 até 75%, respectivamente. A Fig.19 mostra que com o aumento percentual de folhelho no reservatório, a condutividade medida pela sonda ILD tende a aproximar a condutividade verdadeira do folhelho. O aumento de alguns centímetros na espessura das lâminas do reservatório, em comparação à espessura das lâminas dos reservatórios mostrados nas Figs. 10-14, determinam uma oscilação na resposta da sonda ILD. Esta oscilação não permite definir condutividades e delimitar espessuras, devido a baixa resolução da sonda. Isto implica em determinar um valor médio aproximado como resposta da sonda ILD, para isto, utilizando o intervalo de profundidade de 1,0 m até 6,0 m. Na Fig.19 são plotados as respostas da sonda ILD para os percentuais de 25% de arenito e 15%, 37,5% e 60% de folhelho, ou reciprocamente 60%, 37,5% e 15% de arenito silicificado. Também é mostrado na Fig.19 o modelo geológico esquematicamente.

Mantendo-se as características litológicas e o valor da resistividade das lâminas do reservatório da Fig.19, mas alterando-se a espessura das lâminas, obtemos o reservatório mostrado na Fig.20.



ILD-(60% FOLHELHO, 15% ARENITO MOD. SILICIF.)

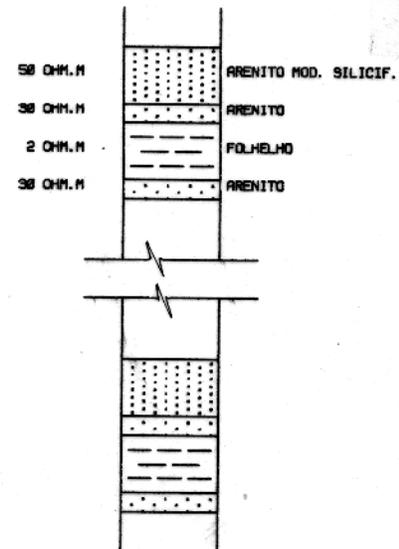
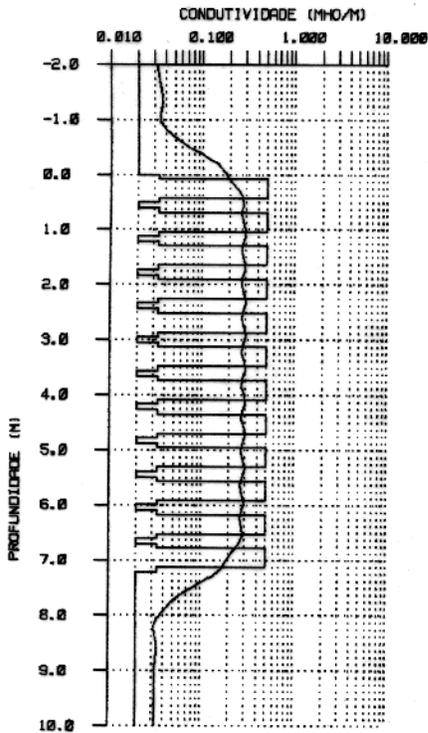


Fig.19- Respostas da sonda ILD em um reservatório com 49 lâminas de arenito silicificado, arenito e folhelho alternadas. As respostas da sonda foram obtidas considerando-se no reservatório 25% de arenito, e 15, 37.5 e 60% de folhelho. As lâminas de arenito tem espessura de 7,6cm, as de folhelho de 10,2cm, 22,9cm e 35,6cm e as de arenito mod. silicificado 35,6cm, 22,9cm e 10,2cm. O reservatório mostra a resistividade das lâminas.

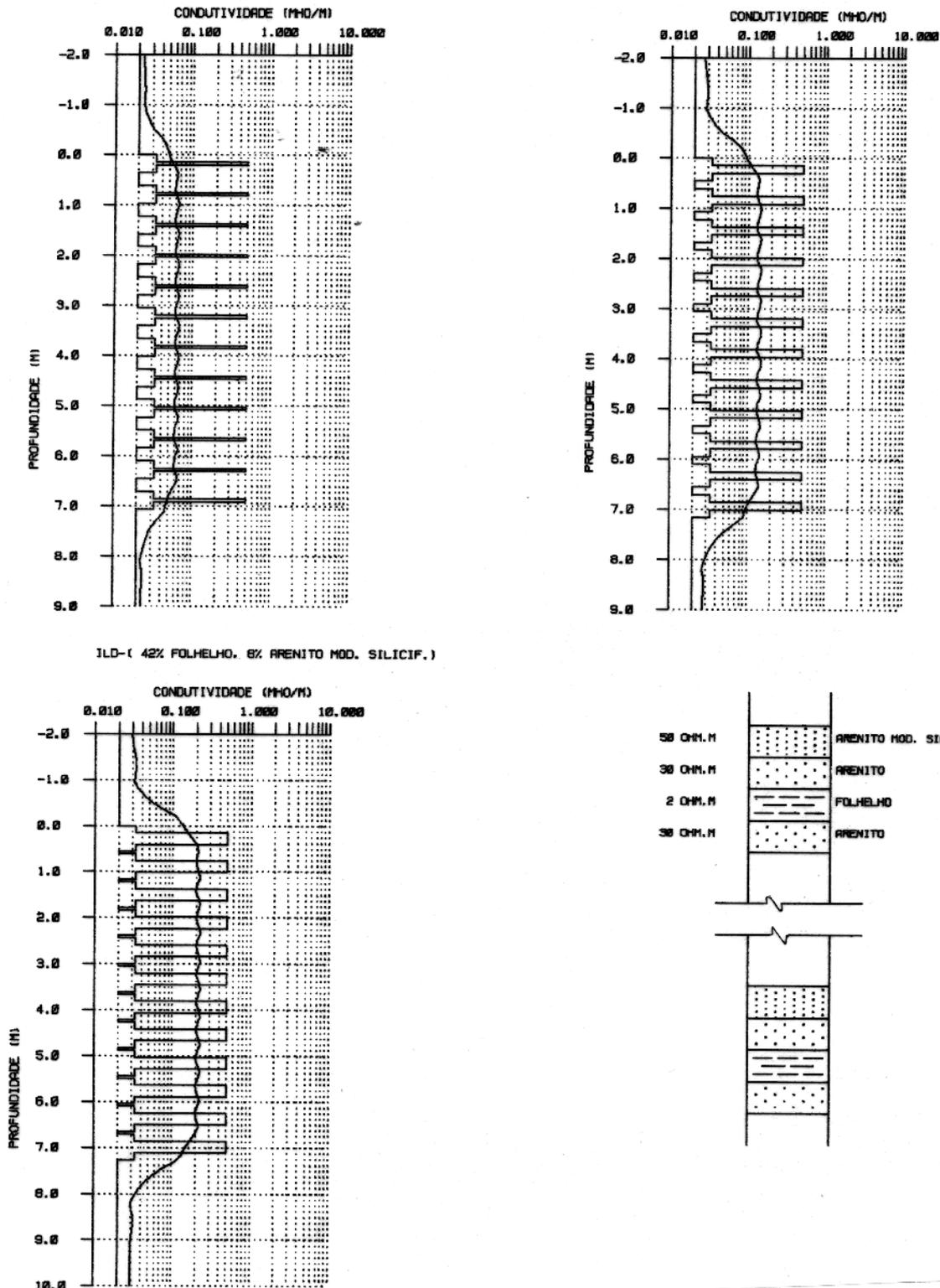
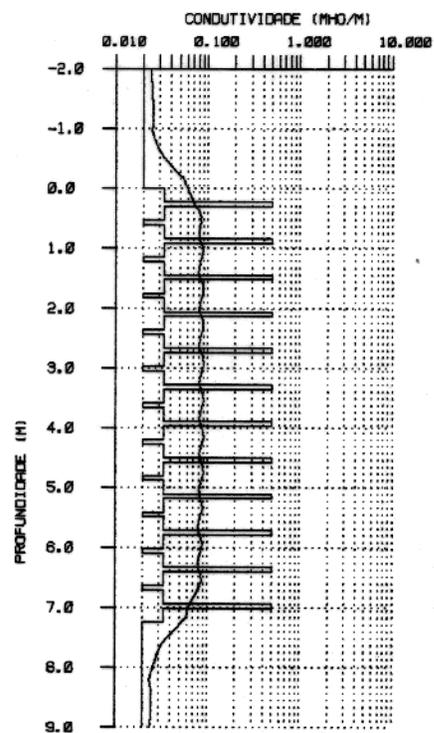
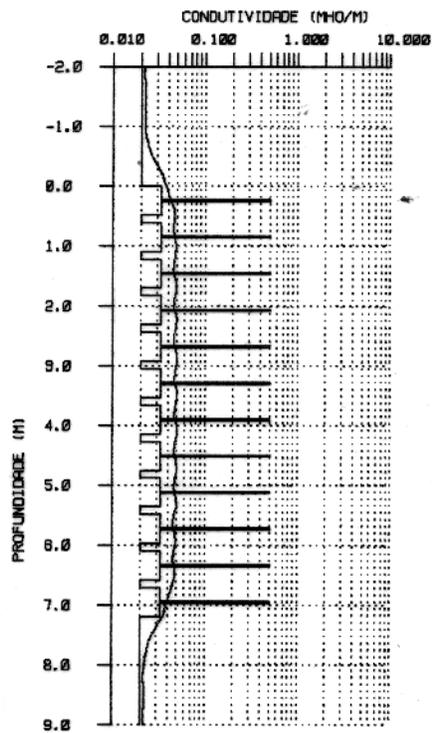


Fig.20- Respostas da sonda ILD em um reservatório com 49 lâminas de arenito silicificado, arenito e folhelho alternadas. As respostas da sonda foram obtidas considerando-se no reservatório 50% de arenito, e 8, 25 e 42% de folhelho. As lâminas de arenito tem espessura de 15,2cm, as de folhelho de 5,1cm, 15,2cm e 25,4cm e as arenito moderadamente silicificado 35,6cm, 22,9cm e 10,2cm. O reservatório mostra a resistividade das lâminas.

As lâminas de arenito passam a ter 15,54 cm, as lâminas de arenito moderadamente silicificado e de folhelho variam de 5,08 cm a 25,4 cm e de 25,4 cm a 5,08 cm, respectivamente. Assim o percentual de arenito no reservatório é de 50% e os percentuais de folhelho e arenito silicificado variam de 50% a 0% e de 0% a 50% respectivamente. As respostas da sonda ILD para este reservatório mostradas na Fig. 20, são obtidas para os percentuais de 50% de arenito e 8%, 25% e 42% de folhelho ou reciprocamente 42%, 25% e 8% de arenito moderadamente silicificado. O aumento percentual de folhelho no reservatório implica em um aumento da condutividade medida pela sonda. Esta condutividade tende a aproximar a condutividade verdadeira do folhelho, mas é atenuada pelo percentual constante de arenito no reservatório. A oscilação existente nas respostas da sonda é insuficiente para extrapolar limite de lâminas ou suas resistividades, ao contrário dá indicativos inversos sobre a condutividade das lâminas. Assim consideramos como a condutividade medida pela a sonda, o valor numérico médio obtido entre as profundidades de 1,0m e 6,0m.

A Fig.21 mostra as respostas da sonda ILD em um modelo geológico laminar cujas características litológicas e de resistividades são idênticas ao modelo da Fig. 19, alterando-se unicamente as espessuras das lâminas. As lâminas de arenito passam a ter espessura de 22,86cm e as lâminas de arenito moderadamente silicificado e folhelho passam a ter espessuras variando entre 2,54cm a 12,7cm e 12,7cm a 2,54cm, respectivamente. Assim o percentual de arenito é de 75% e os percentuais de arenito moderadamente silicificado e de folhelho variam entre 0% a 25% e 25% a 0% respectivamente. Na Fig.21 foram plotadas as respostas da sonda ILD nos percentuais de 75% de arenito e 4,2%, 12,5% e 20,8% de folhelho. Estas respostas da sonda tendem a aproximar a condutividade verdadeira do folhelho com o seu aumento percentual, mas a resposta é atenuada pela contribuição da condutividade dos 75% de arenito existente no reservatório. As oscilações que aparecem na resposta da sonda ILD, similarmente às respostas das Figs.19-20, são de baixa resolução não permitindo melhores delimitações do reservatório. Assim o valor medido pela sonda ILD foi aproximado pelas médias dos valores entre 1,0m e 6,0m de profundidade.

A Fig.22 mostra o resumo das respostas da sonda ILD, nos modelos geológicos mostrados nas Figs.19-21.



ILD-(20.8% FOLHELHO, 4.2% ARENITO MOD. SILICIF.)

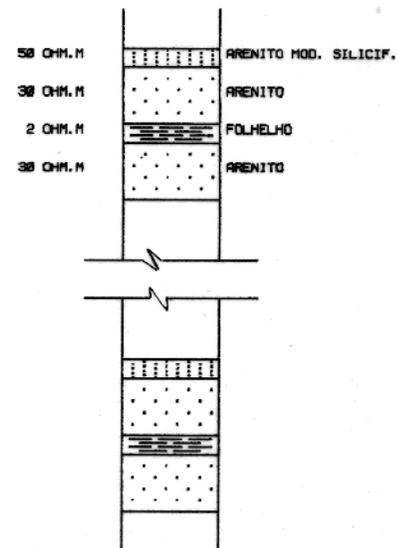
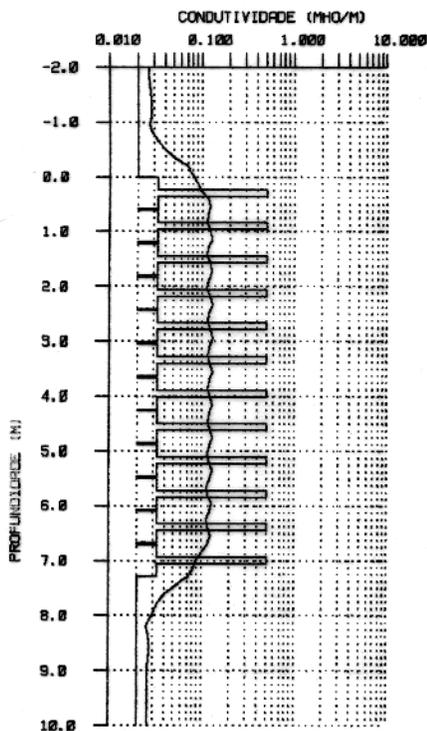


Fig.21- Respostas da sonda ILD em um reservatório com 49 lâminas de arenito silicificado, arenito e folhelho alternadas. As respostas da sonda foram obtidas considerando-se no reservatório 75% de arenito, e 4,2, 12,5 e 20,8% de folhelho. As lâminas de arenito tem espessura de 22,86cm, as de folhelho de 2,5cm, 7,6cm e 12,7cm e as arenito moderadamente silicificado 12,7cm, 7,6cm e 2,5cm. O reservatório mostra a resistividade das lâminas.

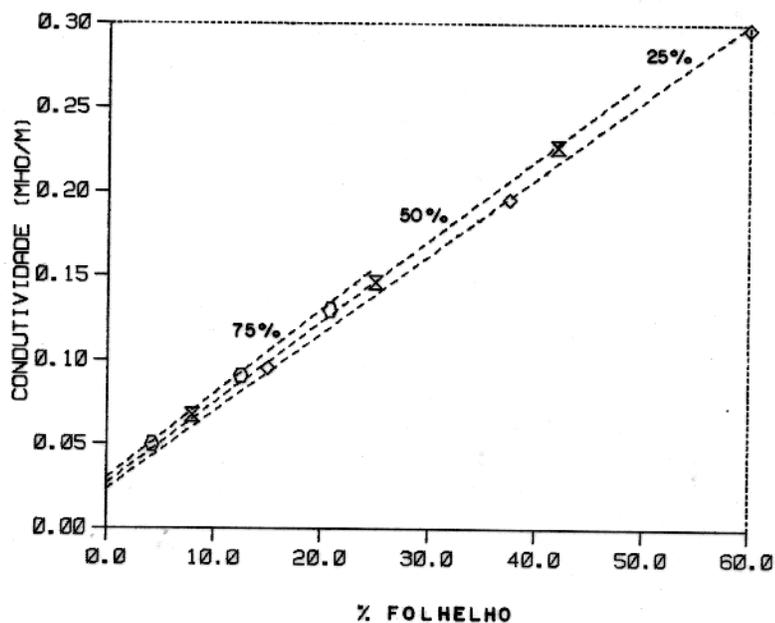


Fig.22- Resumo das respostas da sonda ILLD em reservatórios nos tipo arenito moderadamente silicificado, arenito e folhelho (Fig.19-Fig.21), considerando-se o percentual variável de folhelho, e fixo de arenito. As retas mostram os reservatórios onde a resistividade do arenito é de 30 ohm.m, a resistividade do arenito moderadamente silicificado é de 50 e do folhelho 2 ohm.m., o percentual de arenito para cada reservatório é de 25%, 50% e 75%.

O gráfico da Fig.22 tem na abscissa o percentual de folhelho variando de 0% até 60%, e na ordenada a condutividade variando de 0,0 até 0,5 mho/m. Os valores médios (profundidade de 1,0m–6,0m) aproximados medidos pela sonda ILD para o reservatório da Fig.19, foram plotados na Fig.22, nos percentuais de 15%, 37,5% e 60% de folhelho. Os valores médios (profundidade de 1,0m–6,0m) obtidos pela sonda ILD no reservatório mostrado na Fig.20, foram plotados nos percentuais de 8%, 25% e 42% de folhelho. Para o reservatório mostrado na Fig.21, os valores numéricos obtidos pela sonda ILD foram plotados nos percentuais de 4,2%, 12,5% e 20,8% de folhelho. A Fig.22 mostra que a relação existente entre a condutividade medida pela sonda ILD nestes reservatórios, com 25%, 50% e 75% de arenito, e o aumento percentual de folhelho nos reservatórios é uma relação linear. Esta relação pode ser definida como sendo a soma da condutividade dos constituintes do reservatório ponderada pelos seus respectivos percentuais em volume, ou seja

$$\sigma_{ILD} = \sigma_{arn} \cdot \%arn + \sigma_{arnslf} \cdot \%arnslf + \sigma_{slt} \cdot \%slt, \quad (19)$$

onde os símbolos *arn*, *arnslf* e *slt* significam arenito, arenito silicificado e folhelho respectivamente.

Fica assim definida a identidade nas relações condutividade/percentual de constituintes litológicos do reservatório laminado, encontrada nos reservatórios arenito/folhelho Anderson(1986), e os reservatórios arenito/arenito moderadamente silicificado e arenito moderadamente silicificado/arenito/folhelho/arenito mostrados neste trabalho.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclusões

A solução do problema de Green para a determinação do campo eletromagnético, emitido por uma fonte no interior de um meio multi-planoestratificado, e medida em um ponto qualquer deste meio, foi utilizada para o modelamento das sondas de indução. Desta forma:

-- O algoritmo desenvolvido mostrou-se preciso quando comparado às soluções numéricas de Anderson & Chang(1982) e as soluções analíticas de Anderson & Gianzero(1983). Obtendo tempos de CPU, para a sonda ILD em modelos com 5 e 13 camadas, de 10 segundos de CPU e 2 minutos de CPU, respectivamente. Estes tempos são comparáveis aos tempos de 28 segundos e 2 minutos e 53 segundos mostrados na literatura, obtidos por outros algoritmos nestes modelos geológicos.

--O algoritmo foi comparado com os mesmos algoritmos usados para a obtenção das cartas de correção de shoulder effect. Assim o algoritmo pode ser utilizado para o aprimoramento dos valores obtidos nestas cartas.

-- Através do algoritmo foi possível verificar a relação linear, expressa por Anderson(1986), entre a variação da condutividade e a variação do percentual em volume dos tipos litológicos de um reservatório laminado (espessuras menor que resolução sonda). Considerando apenas duas litologias constituintes do reservatório.

-- Através do algoritmo, comprovou-se a possibilidade da utilização da relação linear existente entre a condutividade, medida pelas sondas de indução, e o percentual em volume dos constituintes de um reservatório laminado, também para reservatórios mais atípicos com dois ou três tipos litológicos. Assim para reservatórios do tipo arenito silicificado, arenito e filhelho, temos que

$$\sigma_{ILD} = \sigma_{arn} \%arn + \sigma_{arnslf} \%arnslf + \sigma_{flh} \%flh .$$

onde os símbolos arn, arnslf e flh significam arenito, arenito silicificado e folhelho, respectivamente.

Recomendações para futuros programas

-- O algoritmo pode ser generalizado para modelamento das sondas de indução em meios estratificados inclinados. Isto permite sua utilização como parte primária do campo no modelamento das respostas das sondas de indução em meios bidimensionais e tridimensionais, tornando mais rápidos estes códigos.

O código, proposto neste trabalho, está em fase de implantação no sistema Disco Vax-8600 da UFPa, na programoteca EMLIB. Assim através do acesso ao sistema ter-se-á acesso ao programa.

Recomendações para interpretação

O modelamento das respostas da sonda de indução em meios estratificados com espessura dos estratos menor que a resolução das ferramentas, mostra-se útil para estimar a condutividade (R_t) de forma mais precisa em reservatórios laminados. Assim:

-- O algoritmo pode, portanto, ser utilizado para melhor estimar R_t em reservatórios do tipo arenito/arenito moderadamente silicificado, arenito silicificado/arenito/folhelho e outros. Uma das metodologias para uma melhor estimativa de R_t , por exemplo, segue:

a) Definição das zonas laminadas (espessuras menores do que a resolução da sonda), através do perfil Dual Induction-SFL. Tendo como indicativo, para regiões de laminações, as medidas contíguas das sondas ILD e ILM (Dual) e estas separadas da medida da sonda SFL. Definida a região de laminações pode-se utilizar o perfil MSFL como medida de condutividade bulk mais precisa para esta região.

b) Definição das zonas de laminações a partir das medidas do perfil Gama Spectral, e definição dos tipos litológicos a partir de testes de formação.

c) Utilização de perfis de maior precisão como o sônico digital (SDT) para estimativas de tipos litológicos, e perfis como o imagem microelétrica (FMS) e o Bore Hole Televiwer (BHTV) tanto para estimativa dos tipos litológicos como seus percentuais em volume.

Desta forma tendo-se a informação da condutividade bulk, dos tipos litológicos e seus percentuais em volume pode-se utilizando a relação linear mostrada no item 4.4, equação 19,

determinar de forma mais precisa a condutividade das lâminas de interesse e, conseqüentemente, melhores definições de saturação água/óleo, producibilidade e "net pay", para estes reservatórios.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Luiz Rijo pelo empenho e apoio científico na orientação da tese bem como pelo convívio fraterno, que permitiram o bom desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Om Verma no auxílio e no aprimoramento do trabalho no período de correções.

Ao professor Hilton Evans pela disponibilidade para o aprimoramento do trabalho no período de modificações e por sua intercessão junto a Barbara Anderson (Schlumberger) a qual cedeu informações estruturais das sondas, e por isso também recebe o nosso reconhecimento.

Ao Departamento de Geofísica da UFPa pela infraestrutura oferecida.

Ao convênio PETROBRAS, UFPa, CNPq, FINEP e FADESP, pelo suporte financeiro necessário para a realização do trabalho.

A todos os colegas que com ajuda científica ou amiga auxiliaram o desenvolvimento do trabalho, em particular a Abel Carrasquilla, Joaquim Permínio, Sérgio Brochado e Paulo Salvadorette pelos enriquecedores debates técnicos.

Aos meus pais e familiares que pelos imprescindíveis apoio e amor fortaleceram esta realização.

A Deus.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, B., 1990, *Personel Communications*.
- ANDERSON, B., 1986, The analisys of some unsolved induction interpretation problems using computer modeling. *The Log Analyst*, 27, 60–73.
- ANDERSON, B. & BARBER, T., 1988, Using computer modeling to provide missing information for interpreting resistivity logs. *SPWLA 29th Annual Logging Symposium*, 1–23.
- ANDERSON, B.; BARBER, T.; SCHAEFER, R., 1988, Induction log: Evolution of a Technique. *The Technical Review*, 35, 35–41
- ANDERSON, B. & CHANG, S. K., 1982, Synthetic induction logs by the finite element method. *The Log Analyst*, 23, 17–26.
- ANDERSON, B. & CHEW, W. C., 1984, SFL Interpretation using high seepd synthetic computer generated logs. *SPWLA Trans.*, 26th Annual Logging Symposium.
- ANDERSON B. GIANZERO, S., 1983, Induction sonde response in stratified media. *The Log Analyst*, 24, 25–31
- ATTALI, G., 1962, Dual induction sonde. US Patents #3,067,383.
- ABBADIA, M., R., D.; ASSIS, P., I.; PELLEGRINI, E., 1987, Estudo de camadas delgadas poço:7–lor–18–rn.Rio Grande do Norte. PETROBRÁS/SCHLUMBERGER.
- ARCHIE,G.,E., 1942, The eletrical resistivity logs as an aid determining some reservaiors characteristics. *Pet. Tech.*, 5 (1).
- BREKHOVSKIKH, L., M., 1960, *Waves in layered media*. Academic Press.
- BUCHEB, J., A., 1988, Interpretação integrada dos perfis do campo de Siririzinho. Sergipe. PETROBRÁS/DENEST/DIRGEO.

- CHARI, M.,V.,K. & SILVESTER, P., P., 1980, Finite elements in electrical and magnetic field problems. John Wiley & Sons.
- CHANG, S. & ANDERSON, B., 1984, Simulation of induction logging by the finite-element method. *Geophysics*, 49 (11), 1943–1958.
- DEWITTE, A., J. & LOWITZ, D., A., 1961. Theory of induction log. Transactions SPWLA 2nd Annual Logging Symposium, May. Dallas, Texas.
- DOLL, H., G., 1949, Introduction on induction logging and application to logging of wells drilled with oil base mud. *Petroleum Transactions, AIME*, 148–162.
- DOLL, H., G., 1949, Induction sonde. US Patents #2,582,314.
- DUESTERHOEFT, W., C., & SMITH, H., W., 1962, Propagation effects on radial response in induction logging. *Geophysics*, 27 (4), 463–469.
- HARDMAN, R., H., & SHEN, L.,C., 1986, Theory of induction sonde in dipping beds. *Geophysics*, 51 (3), 800–809.
- HARRINGTON, 1961, Time harmonic electromagnetic field. MacGraw–Hill.
- KAUFMAN, A., A., 1965, Theory of induction logging. Novosibersk, Siberian Dept. of Nauka Press.
- LOCKE, S., 1969, The wedge problem for induction sondes. Schulumberger report.
- MORAN, J., H., & KUNZ, S., 1962, Basic theory of induction logging and application to study of two-coil sondes. *Geophysics*, 27 (6), 829–858.
- RIJO, L., 1989, Notas de aulas do curso " Teoria dos métodos elétricos e eletromagnéticos I e II".
- TANGHY, D., 1959, 6FF40 Sonde. US Patents #3,067,383.
- WANNAMAKER, P.,E.; HOHMANN, G., W.; SANFILIPO, W.,A., 1984, Eletromagnetic modeling of three-dimensional bodies in layered earths using integral equations. *Geophysics*, 49 (1), 60–74.

WHARTON, R., P., 1975, A difference potencial method for induction sondes. Instituto elect. and electron. Transaction on geosciense and eletronics, 13, 87-92.

Anexos: Valores Numéricos das Respostas das Sondas.

Tabela 1 – Valores numéricos da resposta da Sonda 2C40, no modelo da Fig.5.

Número de Camadas= 3			
Sequência Geológica Básica			
Espessura (m)		Condutividade(mho/m)	
3.300000		0.0625000	
1.5240000		0.0001000	
3.3000000		0.0625000	
Profundidade(PZ)-metros		Condutividade(CD) -mho/m	
PZ	CD	PZ	CD
-3.3	0.9574	0.7	0.3215
-3.2	0.9569	0.8	0.3201
-3.1	0.9563	0.9	0.3304
-3.0	0.9556	1.0	0.3547
-2.9	0.9549	1.1	0.3914
-2.8	0.9541	1.2	0.4303
-2.7	0.9533	1.3	0.4706
-2.6	0.9523	1.4	0.5121
-2.5	0.9513	1.5	0.5545
-2.4	0.9502	1.6	0.5976
-2.3	0.9489	1.7	0.6413
-2.2	0.9475	1.8	0.6855
-2.1	0.9460	1.9	0.7301
-2.0	0.9442	2.0	0.7751
-1.9	0.9421	2.1	0.8165
-1.8	0.9398	2.2	0.8458
-1.7	0.9371	2.3	0.8670
-1.6	0.9340	2.4	0.8829
-1.5	0.9303	2.5	0.8953
-1.4	0.9260	2.6	0.9051
-1.3	0.9208	2.7	0.9130
-1.2	0.9146	2.8	0.9195
-1.1	0.9071	2.9	0.9248
-1.0	0.8978	3.0	0.9293
-0.9	0.8862	3.1	0.9331
-0.8	0.8712	3.2	0.9364
-0.7	0.8514	3.3	0.9392
-0.6	0.8245	3.4	0.9416
-0.5	0.7860	3.5	0.9437
-0.4	0.7409	3.6	0.9455
-0.3	0.6962	3.7	0.9472
-0.2	0.6519	3.8	0.9486
-0.1	0.6080	3.9	0.9499
0.0	0.5648	4.0	0.9511
0.1	0.5222	4.1	0.9521
0.2	0.4805	4.2	0.9530
0.3	0.4399	4.3	0.9539
0.4	0.4006	4.4	0.9547
0.5	0.3631	4.5	0.9554
0.6	0.3348	4.6	0.9561

Tabela 2 – Valores numéricos da resposta da Sonda 2C40; ilustrada na Fig.5.

Número de Camadas= 3		Seqüência Geológica Básica	
Espessura (m)		Condutividade(mho/m)	
3.3000000		1.0000000	
1.5240000		0.0001000	
3.3000000		1.0000000	

Profundidade(PZ)-metros		Condutividade(CD) -mho/m	
PZ	CD	PZ	CD
-3.3	0.6453	0.7	0.1400
-3.2	0.6454	0.8	0.1387
-3.1	0.6455	0.9	0.1483
-3.0	0.6456	1.0	0.1710
-2.9	0.6456	1.1	0.2056
-2.8	0.6458	1.2	0.2417
-2.7	0.6459	1.3	0.2788
-2.6	0.6460	1.4	0.3165
-2.5	0.6461	1.5	0.3546
-2.4	0.6463	1.6	0.3929
-2.3	0.6464	1.7	0.4313
-2.2	0.6466	1.8	0.4696
-2.1	0.6467	1.9	0.5077
-2.0	0.6468	2.0	0.5456
-1.9	0.6469	2.1	0.5796
-1.8	0.6469	2.2	0.6019
-1.7	0.6467	2.3	0.6165
-1.6	0.6464	2.4	0.6264
-1.5	0.6459	2.5	0.6332
-1.4	0.6450	2.6	0.6379
-1.3	0.6437	2.7	0.6411
-1.2	0.6417	2.8	0.6433
-1.1	0.6388	2.9	0.6448
-1.0	0.6345	3.0	0.6457
-0.9	0.6283	3.1	0.6463
-0.8	0.6193	3.2	0.6467
-0.7	0.6059	3.3	0.6468
-0.6	0.5859	3.4	0.6469
-0.5	0.5547	3.5	0.6468
-0.4	0.5168	3.6	0.6467
-0.3	0.4787	3.7	0.6466
-0.2	0.4405	3.8	0.6465
-0.1	0.4021	3.9	0.6463
0.0	0.3638	4.0	0.6462
0.1	0.3256	4.1	0.6460
0.2	0.2878	4.2	0.6459
0.3	0.2505	4.3	0.6458
0.4	0.2141	4.4	0.6457
0.5	0.1790	4.5	0.6456
0.6	0.1524	4.6	0.6455

Tabela 3 – Valores numéricos da resposta da Sonda 2C40; ilustrada na Fig.6
Número de Camadas= 4

Sequência Geológica Básica	
Espessura (m)	Condutividade(mho/m)
3.0000000	1.0000000
2.2860000	0.2000000
1.5240000	20.0000000
3.0000000	1.0000000

Profundidade(PZ)-metros		Condutividade(CD) -mho/m			
PZ	CD	PZ	CD		
-3.0	1.2863	0.0	0.49342	3.0	2.0685
-2.9	1.2859	0.1	0.45962	3.1	2.3757
-2.8	1.2853	0.2	0.43052	3.2	2.5910
-2.7	1.2846	0.3	0.40522	3.3	2.6600
-2.6	1.2837	0.4	0.38302	3.4	2.6045
-2.5	1.2825	0.5	0.36342	3.5	2.5030
-2.4	1.2810	0.6	0.34892	3.6	2.3767
-2.3	1.2791	0.7	0.34052	3.7	2.2407
-2.2	1.2766	0.8	0.33552	3.8	2.1045
-2.1	1.2735	0.9	0.33252	3.9	1.9735
-2.0	1.2696	1.0	0.33102	4.0	1.8508
-1.9	1.2648	1.1	0.33042	4.1	1.7373
-1.8	1.2589	1.2	0.33082	4.2	1.6334
-1.7	1.2515	1.3	0.33222	4.3	1.5386
-1.6	1.2423	1.4	0.33492	4.4	1.4635
-1.5	1.2310	1.5	0.33942	4.5	1.4165
-1.4	1.2171	1.6	0.34672	4.6	1.3851
-1.3	1.1998	1.7	0.35882	4.7	1.3630
-1.2	1.1786	1.8	0.37992	4.8	1.3468
-1.1	1.1523	1.9	0.40772	4.9	1.3345
-1.0	1.1197	2.0	0.44062	5.0	1.3251
-0.9	1.0794	2.1	0.47972	5.1	1.3177
-0.8	1.0293	2.2	0.52722	5.2	1.3118
-0.7	0.9673	2.3	0.58572	5.3	1.3071
-0.6	0.8906	2.4	0.65982	5.4	1.3032
-0.5	0.7963	2.5	0.75642	5.5	1.3001
-0.4	0.7075	2.6	0.88702	5.6	1.2975
-0.3	0.6372	2.7	1.07342	5.7	1.2953
-0.2	0.5802	2.8	1.35952	5.8	1.2936
-0.1	0.5330	2.9	1.71772	5.9	1.2921
0.0	0.4934	3.0	2.06852	6.0	1.2909
0.1	0.4596	3.1	2.37572	6.1	1.2899
0.2	0.4305	3.2	2.59102	6.2	1.2891

Tabela 5 – Valores numéricos das respostas da sonda ILLD; ilustradas na Fig.8.
Número de Camadas= 5

Sequência Geológica Básica	
Espessura (m)	Condutividade(mho/m)
2.0000000	1.0000000
1.2200000	0.2000000
1.2200000	5.0000000
0.9200000	0.0050000
2.0000000	1.0000000

Profundidade-metros	Condutividade-mho/m
PZ	CD
-2.0	0.6981
-1.8	0.6973
-1.6	0.6966
-1.4	0.6970
-1.2	0.7022
-1.0	0.7067
-0.8	0.7014
-0.6	0.6744
-0.4	0.6028
-0.2	0.5114
0.0	0.3914
0.2	0.2702
0.4	0.2241
0.6	0.3358
0.8	0.7282
1.0	1.2438
1.2	1.8129
1.4	2.3910
1.6	2.8244
1.8	2.9166
2.0	2.6202
2.2	2.1039
2.4	1.5104
2.6	0.9173
2.8	0.4480
3.0	0.2814
3.2	0.2856
3.4	0.3796
3.6	0.5219
3.8	0.6467
4.0	0.6980
4.2	0.7139
4.4	0.7138
4.6	0.7056
4.8	0.6994
5.0	0.6982

Tabela 6 – Valores numéricos das respostas da Sonda ILD; ilustradas na Fig.9.

Resposta Sonda ILD					
Número de Camadas= 13					
Sequência Geológica Básica					
Espessura (m)		Condutividade(mho/m)			
1.5000000		0.0500000			
0.5934000		0.0100000			
0.8534000		0.1000000			
0.7010400		0.0200000			
3.1394000		0.0050000			
0.5934000		0.0100000			
0.9296400		0.0500000			
1.1887200		0.0050000			
1.1887200		0.2000000			
2.4536400		0.0500000			
2.1945601		0.1000000			
0.5934000		0.0050000			
1.5000000		0.0100000			

Profundidade(PZ)-metros		Condutividade(CD) -mho/m			
PZ	CD	PZ	CD	PZ	CD
-1.5	0.0486	4.5	0.01202	10.5	0.0529
-1.3	0.0486	4.7	0.01222	10.7	0.0533
-1.1	0.0489	4.9	0.01282	10.9	0.0541
-0.9	0.0488	5.1	0.01432	11.1	0.0569
-0.7	0.0475	5.3	0.01722	11.3	0.0628
-0.5	0.0437	5.5	0.02272	11.5	0.0693
-0.3	0.0389	5.7	0.02922	11.7	0.0760
-0.1	0.0357	5.9	0.03532	11.9	0.0826
0.1	0.0371	6.1	0.04042	12.1	0.0870
0.3	0.0434	6.3	0.04212	12.3	0.0890
0.5	0.0522	6.5	0.03932	12.5	0.0896
0.7	0.0613	6.7	0.03432	12.7	0.0900
0.9	0.0678	6.9	0.02752	12.9	0.0892
1.1	0.0652	7.1	0.02252	13.1	0.0865
1.3	0.0578	7.3	0.02392	13.3	0.0799
1.5	0.0474	7.5	0.03712	13.5	0.0677
1.7	0.0348	7.7	0.06112	13.7	0.0545
1.9	0.0244	7.9	0.08872	13.9	0.0414
2.1	0.0182	8.1	0.11812	14.1	0.0286
2.3	0.0146	8.3	0.14502	14.3	0.0203
2.5	0.0125	8.5	0.15752	14.5	0.0163
2.7	0.0119	8.7	0.15282	14.7	0.0149
2.9	0.0117	8.9	0.13582	14.9	0.0147
3.1	0.0115	9.1	0.11442	15.1	0.0152
3.3	0.0115	9.3	0.09162	15.3	0.0153
3.5	0.0115	9.5	0.07092	15.5	0.0149
3.7	0.0115	9.7	0.05922	15.7	0.0145
3.9	0.0116	9.9	0.05382	0.0	0.0000
4.1	0.0116	10.1	0.05202	0.0	0.0000
4.3	0.0118	10.3	0.05212	0.0	0.0000