



# Efeitos transientes da invasão nos perfis sintéticos das ferramentas ILM e 6ff40

Klaus Cozzolino\*, UFPA – Depto. de Física e Jadir da Conceição da Silva, UFRJ – Depto. de Geologia

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

## Abstract

This study shows how electromagnetic logs can be influenced by dynamic mud filtrate invasion into oil reservoir. The invasion simulation is performed in a single two layer permeable formation, with different porosities and permeabilities, through mixed Finite Element and Finite Difference Methods. We consider immiscible and incompressible fluid displacement as well as capillary pressure and virtual mud cake growth (VMCG) assuming a two-dimensional axi-symmetric formation model. The water saturation distribution and Archie's law are used to generate spatial distribution of electrical conductivity (or resistivity) at different invasion times. These conductivities are input for a code that makes synthetic electromagnetic logs (ILM and 6ff40) by Finite Element Method at predefined times. The resistivity logs are compared with log without invasion by relative difference (RD) between them and shows up to 30% of log variation for 6ff40 and up to 50% for ILM devices when conductive mud is used.

## Introdução

As medidas geofísicas de poço (perfis) sofrem inúmeras influências ambientais e carecem de correções antes de serem interpretadas e usadas na avaliação do potencial dos reservatórios (Schlumberger, 1979). Dentre as várias correções ressaltam-se o reboco de lama (espessura), diâmetro do poço (desmoronamento), composição da lama, pressão, salinidade dos fluidos, etc., além daquela que compõem a temática deste trabalho: invasão do filtrado da lama. Entretanto, antes de propor correções novas ou específicas, devemos compreender como os perfis são afetados pelo fenômeno em questão.

As técnicas numéricas de Elementos Finitos (MEF) e Diferenças Finitas (MDF) foram empregadas na geração das distribuições espaço-temporal de saturação em água da formação (Cozzolino e Silva, 2003). Nos cálculos, leva-se em consideração a pressão capilar e o crescimento virtual do reboco de lama na parede do poço.

Neste trabalho apresentamos uma aplicação específica da simulação da invasão do filtrado na interpretação dos perfis de indução eletromagnética. Para avaliar os efeitos da invasão escolhemos duas ferramentas de indução: a ILM, com média investigação, e a 6ff40, de investigação profunda. O modelo supõe simetria axial sendo composto de quatro camadas folhelho, arenito1, arenito2 e folhelho,

todas dispostas horizontalmente e atravessadas perpendicularmente pelo poço.

## Resumo teórico

A condutividade aparente  $\sigma_a(z,t)$  registrada por uma ferramenta de indução com múltiplas bobinas, no tempo  $t$  e na profundidade  $z$ , é obtida segundo a média ponderada proposta em Moran e Kunz (1962),

$$\sigma_a(z,t) = \frac{1}{R_a(z,t)} = \sum_{i,j} \left( \frac{N_T N_R}{L} \right)_{i,j} \sigma_{i,j} / \sum_{i,j} \left( \frac{N_T N_R}{L} \right)_{i,j} \quad (1)$$

onde  $R_a$  é a resistividade aparente,  $N_{T,i}$  e  $N_{R,j}$  são os números de espiras nas bobinas transmissora e receptora,  $L_{i,j}$  é o espaçamento do par transmissor (i) e receptor (j) e  $\sigma_{i,j}$  a condutividade elétrica aparente do respectivo par, fornecida por

$$\sigma_{i,j} = - \frac{2\pi a N_{R,j}}{K_{i,j}} E_\phi(a, L_{i,j}, t), \quad (2)$$

onde  $a$  é o raio da bobina receptora (e transmissora) e  $K$  a constante geométrica da ferramenta, i. e.,

$$K_{i,j} = \frac{(w\mu\pi a^2)^2 l_w N_{T,i} N_{R,j}}{4\pi L_{i,j}}. \quad (3)$$

Na equação (3),  $l_w$  representa a intensidade de corrente da fonte, com freqüência angular  $w$ , e  $\mu$  é a permeabilidade magnética (vácuo). A componente  $\phi$  do campo elétrico total é dada pela soma do campo primário (incidente) de meio homogêneo

$$E_\phi^p(a, L_{i,j}) = iw\mu \frac{N_{T,i} l \pi a^2}{4\pi} \frac{1}{L_{ij}^3} (1 - ik_m L_{ij}) \exp(ik_m L_{ij}) \quad (4)$$

com o campo secundário (espalhado) proveniente da solução da equação diferencial

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial E_\phi^s}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\phi^s) \right] + k^2 E_\phi^s = -(k^2 - k_m^2) E_\phi^p, \quad (5)$$

onde  $k^2 = iw\mu\sigma(r,z,t)$  e  $k_m^2 = iw\mu\sigma_m$  são, respectivamente, os números de onda da formação e do meio onde se encontra a fonte.

## Metodologia

A simulação da invasão supõe fluxo bifásico de fluidos imiscíveis e incompressíveis em formação incompressível, levando em consideração a pressão capilar e o crescimento virtual do reboco de lama. As equações diferenciais da pressão média e da saturação em água são resolvidas seqüencialmente a cada intervalo de tempo com o método de elementos finitos (Cozzolino e Silva, 2003).

Os perfis de indução foram obtidos resolvendo a equação diferencial (5)  $n$ -vezes para cada ponto de medida, com  $n$  igual ao número de transmissores da ferramenta. O campo espalhado devido a  $i$ -ésima fonte é somado ao campo primário calculado no  $j$ -ésimo receptor, e o resultado convertido em condutividade elétrica ( $\sigma_{ij}$ ). Ao final do *loop* de transmissores, a equação (1) é usada para compor o registro de condutividade aparente  $\sigma_a(z,t)$ .

Uma etapa importante na solução da equação (5) ocorre no cálculo das propriedades do meio. A malha de elementos finitos é realocada para cada posição do transmissor, implicando numa redistribuição das propriedades  $\sigma(r,z,t)$ , bem como de  $k^2$ . Suprimindo maiores detalhes, as distribuições de saturação foram transformadas em condutividade através da lei de Archie

$$\sigma(r, z, t) = \frac{\phi^2 S_w^2(r, z, t)}{0.81 R_{eq}} \quad (6)$$

onde  $\phi$  é a porosidade e  $S_w$  a distribuição de saturação em água no tempo  $t$ . O parâmetro  $R_{eq}$  é a resistividade equivalente calculada pela seguinte equação

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1 - F_w(r, z, t)}{R_{mf}} + \frac{F_w(r, z, t)}{R_w} \quad (7)$$

onde

$$F_w(r, z, t) = \frac{S_{wi}(r, z)}{S_w(r, z, t)}$$

e  $S_{wi}$  representando a saturação irreduzível de água,  $R_{mf}$  a resistividade do filtrado e  $R_w$  a resistividade da água da formação. Como as propriedades foram atribuídas aos nós da malha, as matrizes elementares 3x3 foram calculadas através de quadratura Gaussiana (3 pontos).

### Verificação do algoritmo numérico

As soluções semi-analíticas da equação diferencial (5) só são possíveis em modelos simples como no caso de camadas plano-paralelas (sem poço) ou no caso de cilindros concêntricos (sem interface horizontal). Tais soluções analíticas são propostas em inúmeros trabalhos (Hardman e Shen (1986); Wait (1984); Rijo (1990); etc).

Encontramos em Anderson e Chang (1982), bem como em Chang e Anderson (1984), o desenvolvimento necessário à aplicação do método de elementos finitos na simulação dos perfis de indução eletromagnética, usando elementos retangulares. Neste trabalho usamos um procedimento numérico similar, entretanto com elementos triangulares.

Aplicamos o método de elementos finitos (Galerkin) à equação (5) assumindo um modelo composto de camadas plano-paralelas com duas interfaces horizontais e propriedades constantes. Os resultados numéricos estão ilustrados nas Figuras 1 e 2, juntamente com os perfis semi-analíticos. Também estão ilustrados os perfis corrigidos pela componente em quadratura da *fem* (*skin effect correction*) como proposto por Moran e Kunz (1962) e usada nas ferramentas de indução denominadas de *Phasor* (Anderson e Barber, 1988).

### Resultados e discussões

A metodologia proposta na simulação da invasão foi aplicada apenas no trecho permeável (-4m, 4m) composto de duas camadas com 4 metros de espessura e diferentes porosidades e permeabilidades. Na Figura 3 estão ilustradas as distribuições de saturação nos tempos de 1h, 10h, 24h 26h, 34h e 48h, supondo um tempo de circulação da lama  $T_c = 24h$ .

O modelo usado na geração dos perfis sintéticos é aumentado para acomodar duas camadas de folhelho com resistividades idênticas e iguais a  $R_{sh}=10\Omega m$ , confinando o trecho permeável no topo e na base. As resistividades usadas na conversão de saturação para condutividade elétrica foram:  $R_m=2,75\Omega m$ ,  $R_{mf}=R_m/1,5$  e  $R_w=0,05\Omega m$ . As porosidades empregadas foram as totais de 10% para o arenito1 (superior) e de 20% para o arenito2 (inferior). Observe que na simulação da invasão as porosidades usadas foram as efetivas  $\phi_e=\phi (1-S_{or}-S_{wi})$  onde  $S_{wi}=20\%$  e  $S_{or}=15\%$ .

Os perfis sintéticos da ferramenta 6ff40 (corrigidos) estão divididos em dois gráficos: durante a circulação da lama e após a circulação da lama. Os resultados estão ilustrados na Figura 4 onde se vê claramente as alterações dos perfis à medida que a invasão progride. Observamos ainda que após cessar a circulação os perfis pouco se modificam.

Assumindo o perfil sem invasão (0h) como o padrão, calculamos as diferenças relativas entre os diferentes perfis através da expressão

$$DR\%(z, t) = \frac{R_a(z, 0) - R_a(z, t)}{R_a(z, 0)} \times 100 \quad (8)$$

obtendo assim uma estimativa percentual da variação dos perfis em relação ao modelo não invadido. Os resultados estão ilustrados na Figura 5 onde verificamos alterações de até 30% para o arenito1 e de até 20% para o arenito2.

Com o mesmo procedimento, os perfis da ferramenta ILM foram gerados e dispostos na Figura 6. Por ser uma ferramenta com investigação mais rasa, os perfis são precocemente afetados pela invasão, se comparados aos resultados da 6ff40. As diferenças relativas ilustradas na Figura 7 mostram diferenças da ordem de 45% a 50% para os dois arenitos.

### Conclusões

De acordo com a metodologia proposta e as propriedades usadas, os perfis obtidos em diferentes tempos, frente às camadas permeáveis, são completamente alterados pelo processo de invasão do filtrado da lama. Considerando as mesmas distribuições de saturação, as diferenças relativas obtidas dependerão da condutividade da lama e do filtrado: lamas mais condutivas implicarão em diferenças relativas maiores.

A aplicação da simulação da invasão na interpretação dos perfis eletromagnéticos mostra-se promissora. As maiores dificuldades associadas à metodologia são:

- a correta inserção dos parâmetros petrofísicos dos meios e propriedades dos fluidos,

- um modelo realista para o crescimento do reboco,
- o tempo de computador necessário aos cálculos das distribuições de saturação

As correções normalmente empregadas para invasões do tipo “piston like”, “slope” e “ramp” se aplicam em casos e tempos específicos. Um aprofundamento deste estudo pode ajudar a esclarecer quando e como aplicar tais correções além de sugerir correções novas.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem aos departamentos de Física (UFPA) e de Geologia (UFRJ) bem como a CAPES através do PICDT.

#### Referências

- Anderson, B. e Barber, T. D.**, 1988. Strange induction logs – a catalog of environmental effects. *The Log Analyst*, v. 29, no. 4, p. 229-243.
- Anderson, B. e Chang, S. K.**, 1982. Syntetic induction logs by the finite element method. *The Log Analyst*, v. 24, no. 1, p.17-26.
- Chang, S. K. e Anderson, B.**, 1984. Simulation of induction logging by finite-element method. *Geophysics*, v. 49, no. 11, p. 1943-1958.

**Cozzolino, K. e Silva, J. C.**, 2003. Simulação da invasão em reservatórios: caso axi-simétrico 2D com reboco virtual. *8<sup>th</sup> International Congress of Brazilian Geophysical Society*. (submetido ao congresso).

**Hardman, R.H. e Shen, L. C.**, 1986. Theory of induction sonde in dipping beds. *Geophysics*, v. 51, no. 3, p. 800-809.

**Moran, J. H. e Kunz, K. S.**, 1962. Basic theory of induction logging and application to study of two-coil sondes. *Geophysics*, v. 27, no. 6, p.829-858.

**Rijo, L. R.**, 1990. Teoria dos métodos eletromagnéticos. Universidade Federal do Pará. CG. p.269 (notas de aula).

**Schlumberger**, 1979. Log interpretation charts, Schlumberger Well Surveying Corporation.

**Wait, J. R.**, 1984. General formulation of the induction logging problem for concentric layers about the borehole. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-22, no. 1, p.34-42.

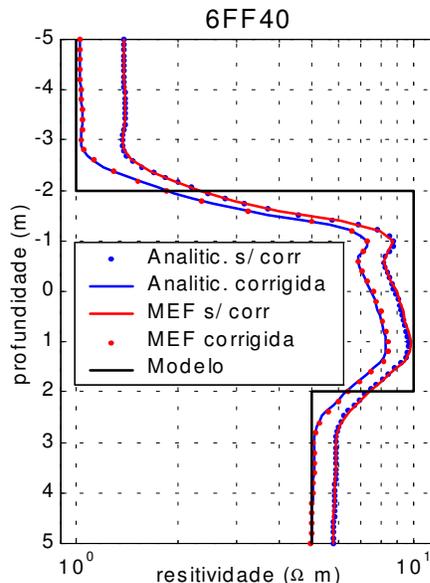


Figura 1 – Comparação entre os perfis analítico e numérico (MEF) para a ferramenta 6ff40 sem a presença do poço. As curvas corrigidas foram obtidas usando a componente em quadratura da *fem*.

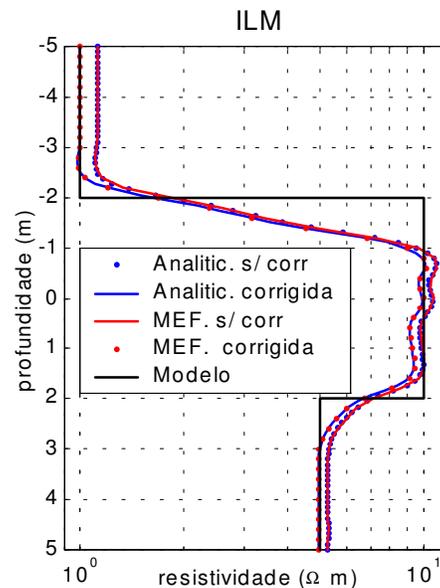


Figura 2 – Comparação entre os perfis analítico e numérico (MEF) para a ferramenta ILM sem a presença do poço. As curvas corrigidas foram obtidas usando a componente em quadratura da *fem*.

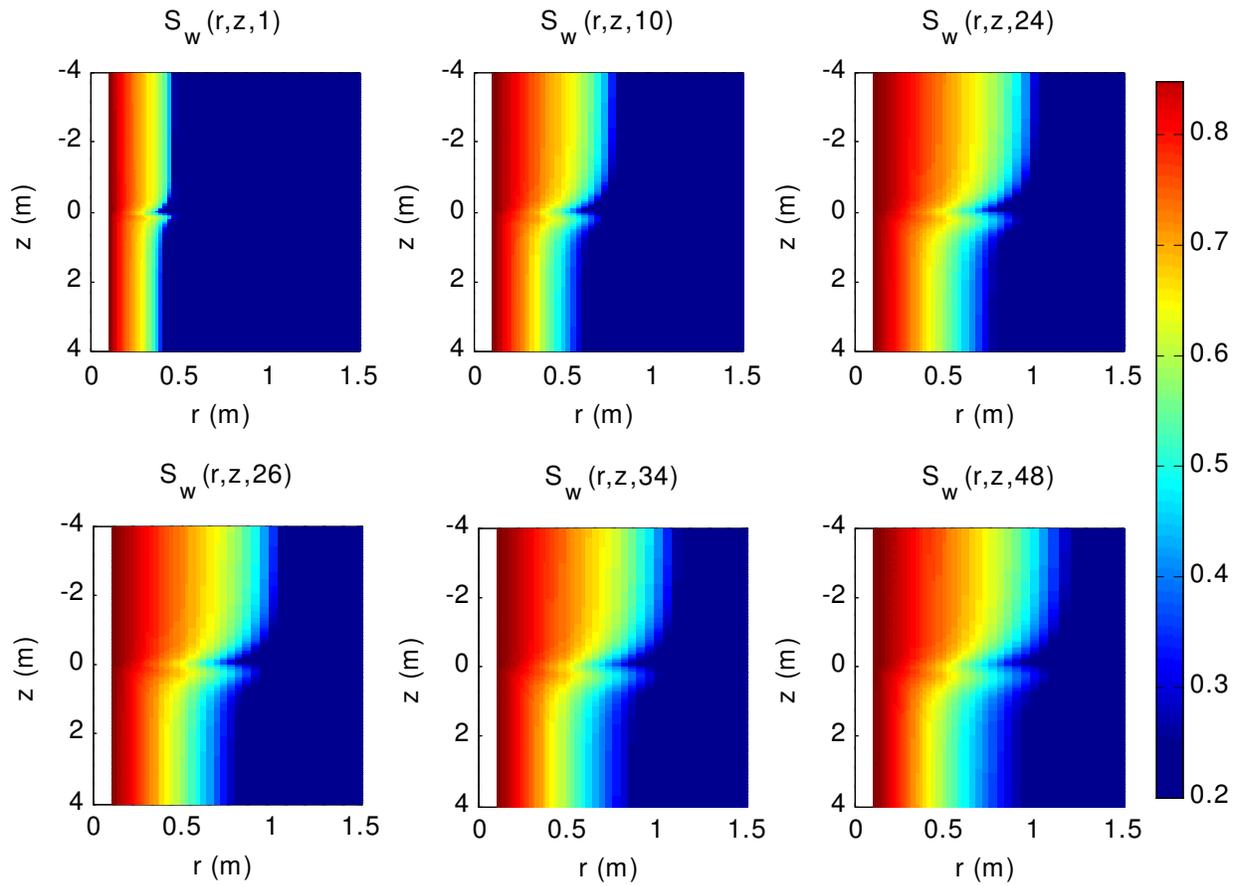


Figura 3 – Distribuições espaciais de saturação em água da formação nos instantes de 1h, 10h, 24h, 26h, 34h e 48h. O tempo de circulação da lama foi estipulado em 24h. Maiores detalhes vide referências.

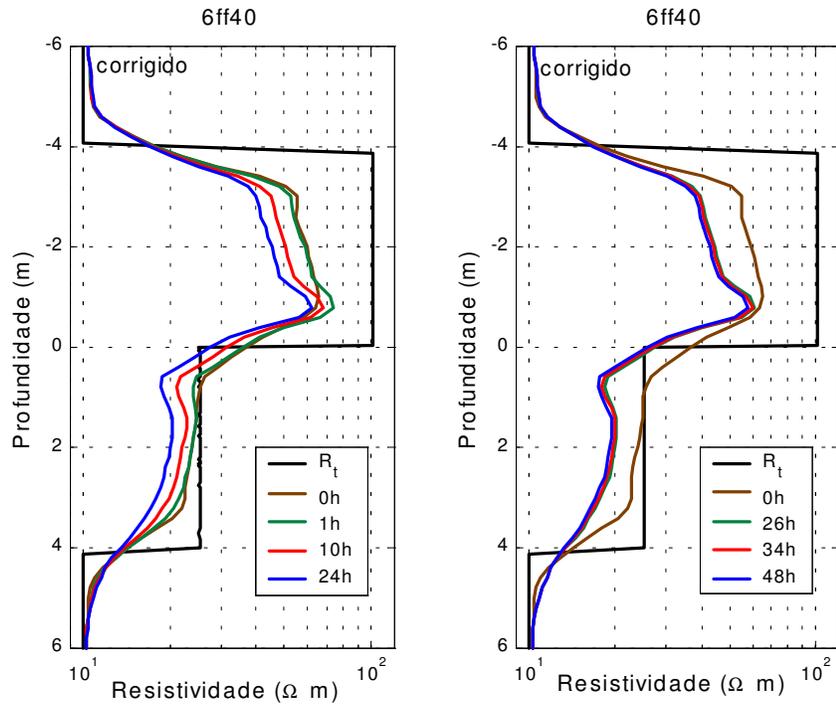


Figura 4 – (esquerda) perfis sintéticos da ferramenta 6ff40 obtidos durante o período de circulação da lama e (direita) perfis sintéticos depois de cessada a circulação.  $R_t$  é a resistividade verdadeira da zona não invadida.

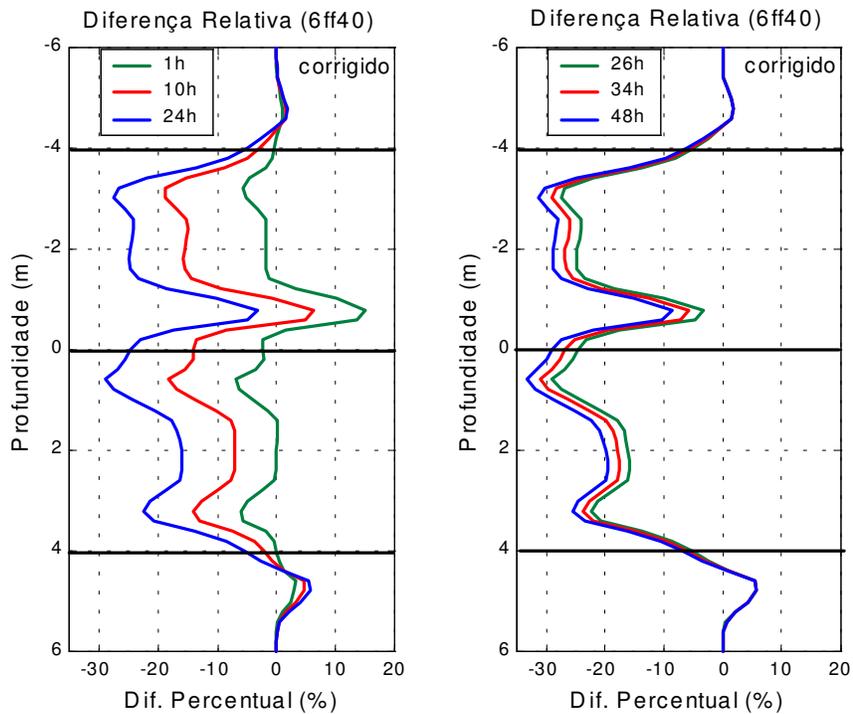


Figura 5 – Diferenças relativas calculadas entre cada perfil da Figura 4 com invasão e o perfil sem invasão (0h, padrão) segundo a equação (8).

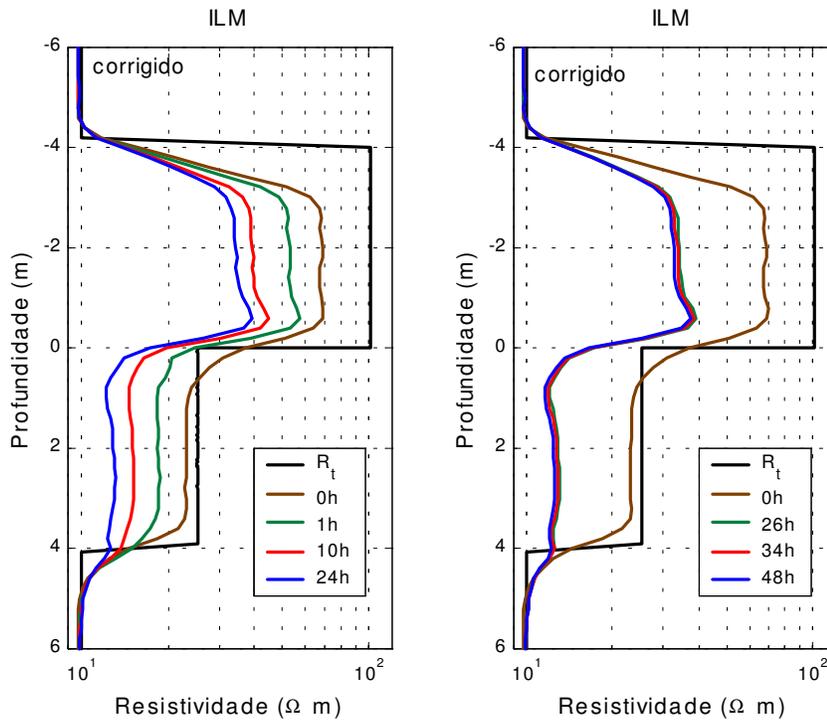


Figura 6 – (esquerda) perfis sintéticos da ferramenta ILM obtidos durante o período de circulação da lama e (direita) perfis sintéticos depois de cessada a circulação.  $R_t$  é a resistividade verdadeira da zona não invadida.

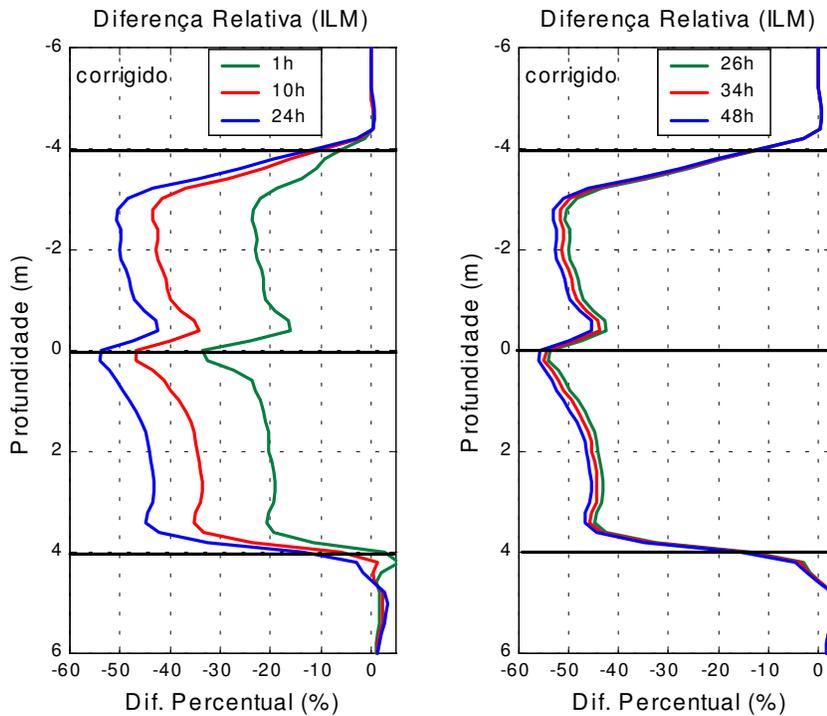


Figura 7 – – Diferenças relativas calculadas entre cada perfil da Figura 6 com invasão e o perfil sem invasão (0h, padrão) segundo a equação (8).