



Resposta de resistividade complexa em ambiente de poço considerando meios fractais

Valcir J. C. Farias e Brígida R. P. da Rocha -UFPA – PPGEE

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

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

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represent 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

The response of induced polarization (IP) was obtained for a medium with cylindrical layers (borehole). Starting from that solution, and employing the "Fractal Model for Complex Resistivity" as intrinsic property of the polarized layers, simulations were accomplished to investigate the influence of the fractal parameter of the model in the IP response. The results showed that, in low frequency, the fractal exponent dominates the response of phase of the apparent resistivity. Using these results, it is possible to determine the fractal properties of the medium without the effects of electromagnetic coupling are perceptible for smaller frequencies than 10 KHz.

Introdução

O fenômeno de polarização induzida (IP) tem origem eletroquímica e geralmente é associado a ambientes geológicos e biológicos (Rocha,1995; Rocha et al,1997). Como consequência desse fenômeno, os valores de resistividade elétrica são complexos e dependentes da frequência.

O método de polarização induzida (IP) em geofísica utiliza a dependência de frequência dos parâmetros constitutivos das rochas (condutividade e permissividade) para realizar atividades de prospecção. Originalmente, o método era aplicado para a prospecção de minérios disseminados. Essa técnica gradualmente evoluiu, sendo atualmente empregado em discriminação mineral (Sampaio et al.,1998) e estudos ambientais (Kemna et.al,1999 e 2000).

A interpretação quantitativa de dados de polarização induzida de campo é uma tarefa difícil devido a natureza fractal de meios geológicos e ao acoplamento indutivo causado pela interação eletromagnética entre o meio e o arranjo de eletrodos utilizados para a injeção de corrente e medida de potencial. Para a realização de tal interpretação é necessário um modelo físico para explicar o comportamento de um ambiente polarizável em uma ampla faixa de frequência.

Rocha (1995) desenvolveu um modelo que considera os efeitos fractais das superfícies porosas e inclui a resposta em volume das rochas. A introdução do fator de rugosidade permite a investigação da textura da rocha a qual é muito importante na tentativa de descrever o comportamento elétricas das rochas.

Rocha & Habsby (1995)] empregaram o modelo fractal para resistividade complexa de Rocha(1995) como propriedade elétrica intrínseca de um meio com camadas horizontais e analisaram a resposta de polarização induzida. Foi verificado que o parâmetro fractal do modelo domina a resposta em fase da resistividade aparente; o efeito do acoplamento eletromagnético não é perceptível para frequências inferiores a 10^4 Hz.

Neste trabalho, o modelo fractal para resistividade complexa (Rocha, 1995) é empregado como propriedade elétrica intrínseca de um meio com camadas cilíndricas (poço, zona invadida e formação) para que a influência do parâmetro fractal do modelo na resposta de polarização induzida seja analisada para esta geometria geológica. Este parâmetro do modelo representa a geometria fractal do meio a qual pode ser relacionada com a textura das rochas.

O modelo fractal

Representando a dependência temporal do campo elétrico como $e^{i\omega t}$, a expressão proposta por Rocha (1995) para resistividade complexa $\rho(\omega)$ é:

$$\rho(\omega) = \rho_o \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{1+u}{\delta_r(1+v)}} \right) \right] \gamma_h \quad (1)$$

onde

ρ_o é a resistividade DC do material

m é a cargueabilidade;

δ_r é o parâmetro que relaciona a resistividade dos grãos condutivos que bloqueiam os poros do meio geológico ao valor da resistividade DC da matriz rochosa;

$\gamma_h = 1/(1+i\omega\tau_o)$;

$u = i\omega\tau(1+v)$;

$v = (i\omega\tau_f)^{-c}$;

τ é a constante de tempo de relaxação relacionada às oscilações da dupla camada;

τ_o é a constante de tempo de relaxação associada ao material como um todo;

τ_f é o tempo de relaxação fractal e está relacionado ao tempo envolvido na transferência de carga e energia nas interfaces rugosas e;

η é o parâmetro diretamente relacionado a geometria fractal do meio e é determinado pelo tipo e distribuição do mineral que provoca a polarização em baixa frequência.

Os valores mínimo, típico e máximo dos parâmetros do modelo fractal para resistividade complexa citados por Rocha(1995), são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores mínimo, típico e máximo dos parâmetros do modelo fractal.

Parâmetro	Mínimo	Típico	Máximo
ρ_o ($\Omega.m$)	10^{-1}	10^2	10^5
m	0.05	0.5	0.95
δ_r	10^{-3}	1.0	10^3
η	0.05	0.5	0.95
τ (s)	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}
τ_f (s)	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
τ_o (s)	10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}

Resposta de polarização induzida em poço

Normalmente, são usadas configurações de quatro eletrodos para medir a resistividade complexa de um meio geológico. Uma corrente elétrica é introduzida no meio através de um par de eletrodos (A e B) e a voltagem é medida no outro par de eletrodo (M e N). A figura 1 ilustra uma configuração de quatro eletrodos usada neste trabalho para a determinação da resistividade aparente sobre um meio com camadas cilíndricas.

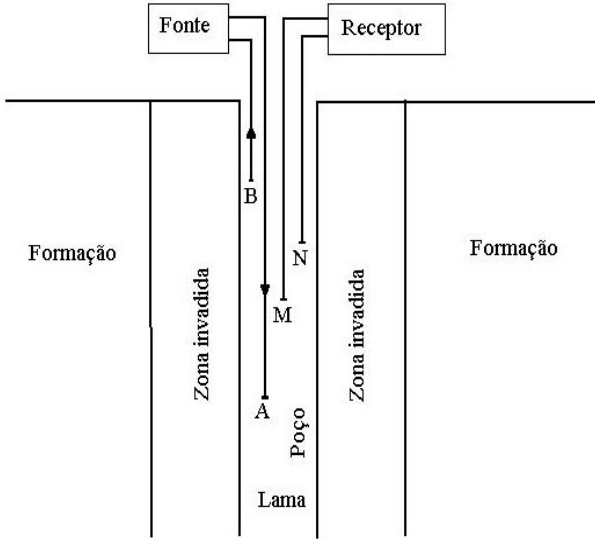


Figura 1 - Ilustração de um arranjo de quatro eletrodos em meio estratificado cilíndrico.

Para calcular o potencial medido pelo par de eletrodo receptor, deve-se resolver o problema eletromagnético para uma configuração de quatro eletrodos. Partindo das equações de Maxwell e assumindo uma dependência temporal do tipo $e^{-i\omega t}$

$$\nabla \times \bar{E} = i\omega \mu \bar{H} \quad (2)$$

$$\nabla \times \bar{H} = -i\omega \epsilon \bar{E} + \sigma \bar{E} + \bar{J}_s \quad (3)$$

onde \bar{J} é a densidade de corrente devido a fonte; ϵ é a constante dielétrica efetiva e μ é permeabilidade do meio e \bar{i} é aproximada pela permeabilidade do vácuo. Combinando a condutividade (σ) e o fator de deslocamento ($i\omega\epsilon$), a densidade de corrente pode ser escrita como

$$\bar{J} = \sigma * \bar{E} \quad (4)$$

e especificando a densidade de corrente, em coordenadas cilíndricas, como

$$\bar{J}_s = -\frac{I\delta(r)[u(z-z_1)-u(z-z_2)]}{r} e_z \quad (5)$$

onde u é a função de Heaviside, I é a intensidade de corrente, z_1 e z_2 são as posições dos eletrodos de corrente (A e B) e e_z é o vetor unitário na direção z .

Resolvendo o problema acima com condições de contorno apropriadas determina-se o campo elétrico no interior do poço, E_{1z} . Com isso, calcula-se o potencial entre os eletrodos M e N integrando este campo elétrico, assim

$$V(r, z) = \frac{1}{\sigma_1^*} \int_0^\infty \frac{k_z^2}{k_z} \left[\frac{I}{2\pi} K_0(k_z r) - B(k_z) I_0(k_z r) \right] \times [\cos k_z z_{AN} - \cos k_z z_{BM} - \cos k_z z_{AM} + \cos k_z z_{BN}] dk_z \quad (6)$$

onde, $\sigma_1^* = \sigma_1 - i\omega\epsilon_1$ é a condutividade complexa da primeira camada (lama); z_{ij} são as distâncias entre os eletrodos; I_0 e K_0 são funções de Bessel modificadas de ordem zero de primeira e segunda espécies, respectivamente; .

$B(k_z)$ é uma função dada por

$$B(k_z) = \frac{\frac{I}{2\pi^2} (F_1 H_1 + F_2 H_2)}{F_3 H_1 + F_4 H_2}$$

sendo

$$F_1 = K_o(k_{1r} a) K_1(k_{2r} a) - \frac{\sigma_1^* k_{2r}}{\sigma_2^* k_{1r}} K_1(k_{1r} a) K_o(k_{2r} a)$$

$$F_2 = K_o(k_{1r} a) I_1(k_{2r} a) + \frac{\sigma_1^* k_{2r}}{\sigma_2^* k_{1r}} K_1(k_{1r} a) I_o(k_{2r} a)$$

$$F_3 = I_o(k_{1r} a) K_1(k_{2r} a) + \frac{\sigma_1^* k_{2r}}{\sigma_2^* k_{1r}} I_1(k_{1r} a) K_o(k_{2r} a)$$

$$F_4 = I_o(k_{1r} a) I_1(k_{2r} a) - \frac{\sigma_1^* k_{2r}}{\sigma_2^* k_{1r}} I_1(k_{1r} a) I_o(k_{2r} a)$$

$$H_1 = K_1(k_{3r} b) I_o(k_{2r} b) + \frac{\sigma_2^* k_{3r}}{\sigma_3^* k_{2r}} K_o(k_{3r} b) I_1(k_{2r} b)$$

$$H_2 = K_o(k_{2r} b) K_1(k_{3r} b) - \frac{\sigma_2^* k_{3r}}{\sigma_3^* k_{2r}} K_1(k_{2r} b) K_o(k_{3r} b)$$

Resultado semelhante foi encontrado por Moran & Gianzero (1979) no estudo do efeito de anisotropia em medidas de resistividade em poço e por Freedman &

Vogiatzis (1986) no estudo de um modelo dinâmico para dados de resistividade e polarização induzida em poço.

Resultados

Usando (6), obteve-se a resposta de polarização induzida de duas situações geológicas: 1) meio com duas camadas cilíndricas (poço e a formação); 2) meio com três camadas cilíndricas (poço, zona invadida e formação).

A resistividade da lama (poço), para as duas geometrias, foi de $1 \Omega.m$ com o efeito de polarização sendo desprezado. As distâncias entre os eletrodos, em metro, foram de 0.4; 6; 21 e 26.6 para AM, NA, BN e BM, respectivamente.

O valor assumido para o raio do poço foi de 10 cm. Os valores 0.25, 0.5 e 0.75 foram considerados para o expoente fractal η . Os outros parâmetros do modelo assumem os valores típicos (Rocha, 1995).

A figura 2 mostra a resposta IP para meio com duas camadas cilíndricas. Observa-se que o modelo fractal pode ser usado em uma ampla faixa de frequência em um meio de camadas cilíndricas.

Como no caso de camadas horizontais (Rocha, 1995), o parâmetro fractal η domina a resposta de fase da resistividade aparente principalmente em baixa frequência. Essa característica é muito importante, pois em baixa frequência os parâmetros possuem informações sobre a rugosidade dos poros das rochas. Desta forma, torna-se possível investigar as propriedades de transporte do meio geológico.

Para a resposta de polarização induzida em um meio com três camadas cilíndricas (lama, zona invadida e formação), foram consideradas três espessuras para a zona invadida: um, dois e cinco vezes o raio do poço. A resistividade DC da zona invadida foi igual a $10 \Omega.m$. As figuras 3, 4 e 5 mostram os resultados.

Comparando as figuras 3, 4 e 5, Como era esperado, nota-se uma atenuação na amplitude da resistividade aparente com o aumento do raio da zona invadida. Com relação a resposta de ângulo de fase, observa-se uma alteração, no entanto, é menos acentuada com relação a amplitude. Este resultado é semelhante ao encontrado para camadas horizontais (Rocha & Habashy, 1995), o que mostra a natureza fractal da resistividade complexa. Ou seja, a variação da escala de medidas não modificou a resposta de fase do meio.

Conclusões

O modelo fractal para resistividade complexa foi aplicado como propriedade elétrica intrínseca de um meio polarizável com camadas cilíndricas onde foi investigada a influência do parâmetro fractal (η) do modelo na resposta de polarização induzida.

Os resultados mostraram que, como no caso de um ambiente com camadas horizontais, o expoente fractal domina a resposta de fase da resistividade aparente complexa do meio em baixa frequência. Como em baixas frequências os parâmetros de polarização induzida carregam informações sobre a rugosidade dos poros

rochosos, este resultado é torna-se importante na interpretação de dados petrofísicos.

Adicionalmente, é possível determinar, a partir de dados de polarização induzida, as características do meio sem que os efeitos de acoplamento eletromagnético sejam perceptíveis para frequências inferiores a 10^4 Hz.

Referências

- Kemna, A., Räckers, E. and Dresen, L.**, 1999, Field application of complex resistivity tomography. Presented at the Society of Exploration of Geophysicists 69th Annual Meeting, Expanded Abstract.
- Kemna, A., Binley, A., Ramirez, A. and Daily, W.**, 2000, Complex resistivity tomography for environmental applications. Chemical Engineering Journal, vol. 77, pp. 11 – 18, 2000.
- Sampaio, E. E. S., Santos, A. B. and Sato, H. K.**, 1998 Spectral induced polarization and mineral discrimination. Presented at the Society of Exploration of Geophysicists 68th Annual Meeting, Expanded Abstract.
- Rocha, B. R. P. da** 1995, Modelo fractal para resistividade complexa de rochas: sua interpretação petrofísica e aplicação à exploração geoeletrica. Tese de doutorado, Centro de Geociências - Universidade Federal do Pará.
- Rocha, B. R. P. da, Tejo, A. F., Valle, R. R. M. and Melo, M. A. B.**, 1997, Fractal eletromagnetic model for biological systems. In : Progress in electromagnetic research, proceedings vol. 1, Cambridge, Massachusetts, USA, pp. 101 – 101.
- Rocha, B. R. P. da and Habashy, T. M.**, 1995, Fractal geometry, porosity and complex resistivity II: from hand specimens to field data. In: M. A. Lovell, Developments in petrophysics, London Geological Society, special publication, pp. 287 – 296.
- Moran, J. H. and Gianzero, S.**, 1979, Effects of formation anisotropy on resistivity-logging measurements. Geophysics, vol. 44, pp. 1266 – 1286.
- Freedman, R. and Vogiatzis, J. P.**, 1986, Theory of induced-polarization logging in a borehole. Geophysics, vol. 51, pp. 1830 – 1849.

Agradecimentos

Ao Campus Universitário de Abaetetuba e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará.

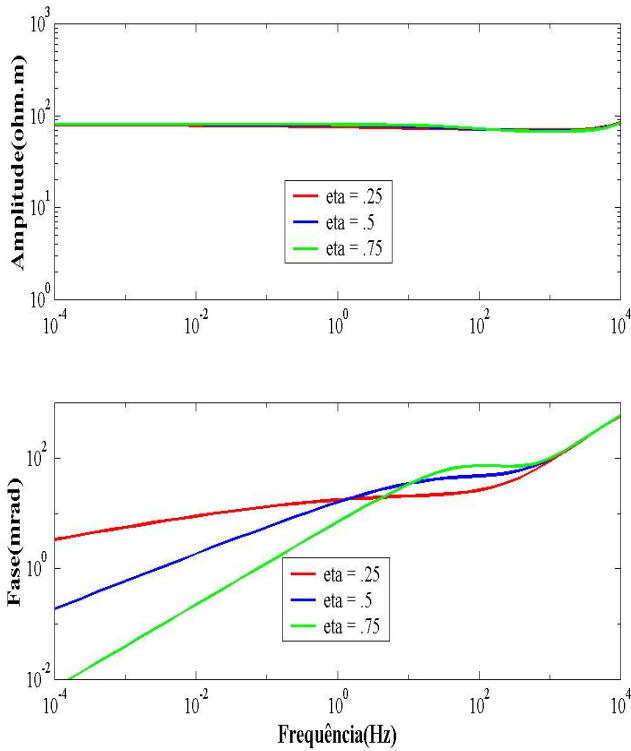


Figura 2 - Amplitude e fase da resistividade aparente em um poço com lama e formação. A formação é polarizável, com as propriedades elétricas intrínsecas dadas pelo modelo fractal.

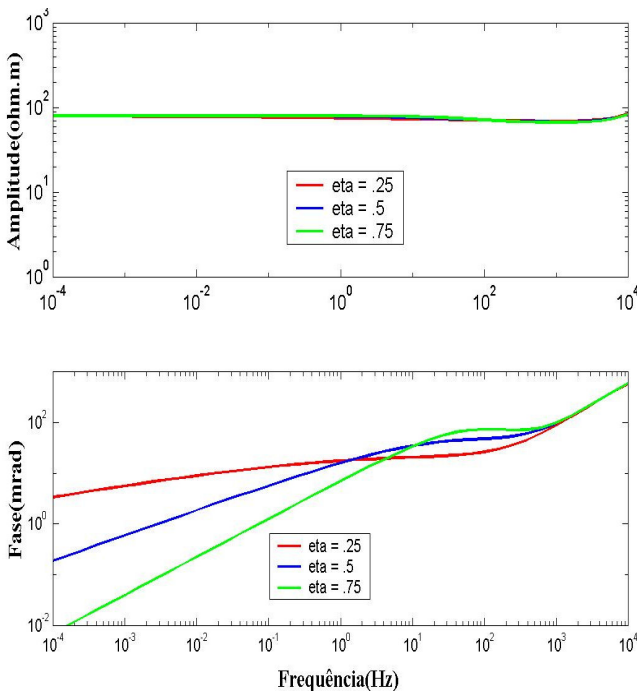


Figura 3 - Amplitude e fase da resistividade aparente em um poço com lama, zona invadida e formação. A zona invadida e a formação são polarizáveis com as propriedades elétricas intrínsecas dadas pelo modelo fractal. O raio da zona invadida é o mesmo do poço.

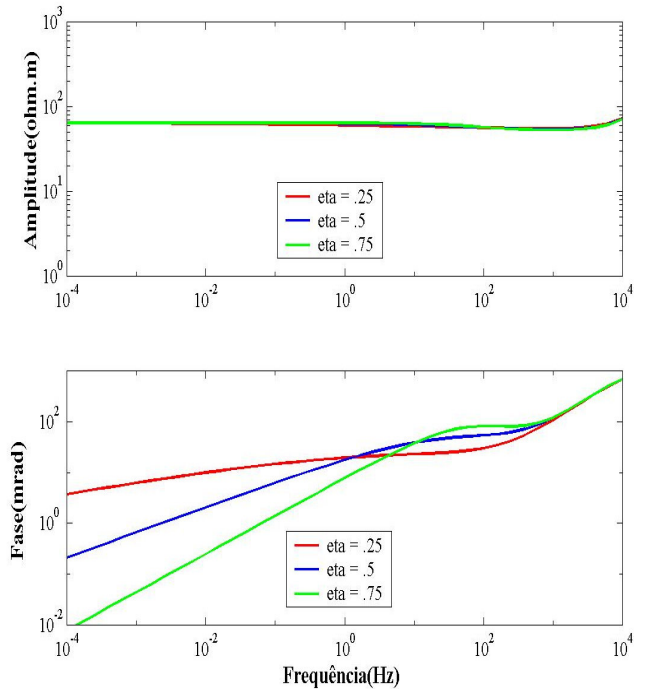


Figura 4 - Amplitude e fase da resistividade aparente em um poço com lama, zona invadida e formação. A zona invadida e a formação são polarizáveis com as propriedades elétricas intrínsecas dadas pelo modelo fractal. A profundidade da zona invadida é duas vezes o raio do poço.

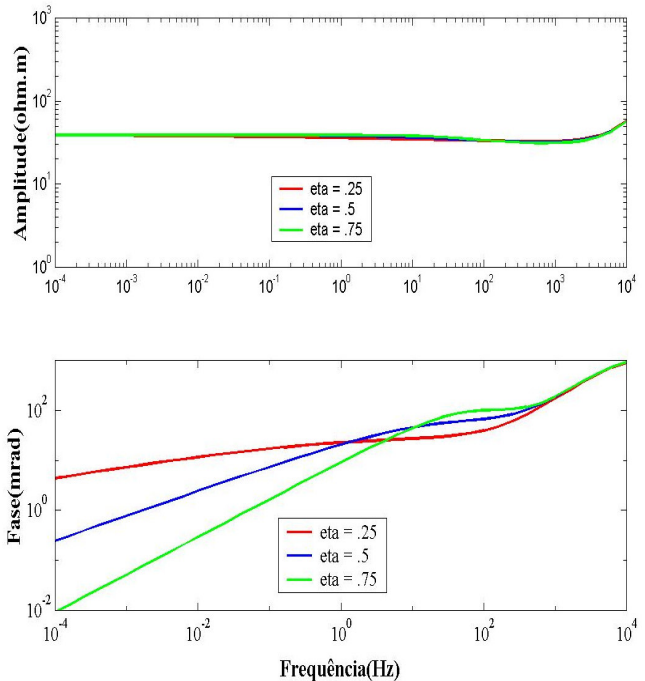


Figura 5 - Amplitude e fase da resistividade aparente em um poço com lama, zona invadida e formação. A zona invadida e a formação são polarizáveis com as propriedades elétricas intrínsecas dadas pelo modelo fractal. A profundidade da zona invadida é cinco vezes o raio do poço.