



## Discussão do conceito de *Skin Depth* e estimativa de parâmetros elétricos considerando os efeitos de polarização envolvidos a partir de medidas com GPR

Carlos A. Dias(\*), Marcos V. Barbosa M., Flavia M. R. Patrício, Diego R. Borçoi, Bruno C. Moreira e Marco A. R. Ceia LENE/CCT/UENF, Brasil

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do 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 authors analyze, in this work, the polemic question of the signal, being measured by GPR, coming from depth greater than the plane wave *skin depth*. They conclude that signals are being measured, reflected from depths of the order of five times the *skin depth* for the 100 MHz frequency being used. They also estimate the dielectric constant for the mapped geologic formations using GPR. More realistic values of  $K$  are obtained, for considering: a) the squared index of refraction,  $(c/v)^2$ , as due to the electronic polarization, associated to the rock matrix,  $K_M$ ; b) the orientational polarization for the saline water, equal to 78, being considered for the water saturated pore spaces of the rocks,  $K_f$ . The mixed relation for a two components material was then used for the final estimation.

### Introdução

O GPR é um método geofísico eletromagnético amplamente utilizado para detalhar estruturas rasas presentes em sub-superfície. Sua aplicação abrange desde a localização de objetos metálicos enterrados até o traçado da seqüência estratigráfica de um terreno sedimentar. Além disso, Ceia (2004) verificou a possibilidade de estimar parâmetros elétricos, no caso, a constante dielétrica  $K$  do meio, a partir de medidas efetuadas com o Geo-Radar. No entanto, essas estimativas foram realizadas sem considerar os efeitos da polarização orientacional presente nos materiais estudados. Sendo a água um dos seus constituintes, deve-se levar em conta a sua polarização, do tipo orientacional, que ocorre com saturação às frequências de  $10^{10}$  Hz (para água líquida) mantendo-se às frequências inferiores (Dias, 2004). O presente trabalho propõe-se fazer novas estimativas da constante dielétrica a partir de dados coletados no mesmo local em que o trabalho de Ceia (2004) foi realizado, considerando os efeitos associados.

Procura-se também discutir a aplicação do conceito de *skin depth*, que compreende uma profundidade onde o sinal perdeu cerca de 90% de sua energia inicial, como um limite físico da penetração do sinal ou apenas como um valor de referência para definição da profundidade de penetração, no caso de medições feitas com o GPR, no presente estágio do avanço tecnológico instrumental.

### Relação entre velocidade de propagação da onda, condutividade, constante dielétrica do meio e frequência

No GPR, admite-se a hipótese de onda plana, mesmo que esta represente uma simples aproximação, já que se trabalha com comprimentos de onda da ordem de 1 m diante de distâncias de apenas alguns metros até poucas dezenas de metros de profundidade. Para a onda plana de frequência  $f$ , tem-se a velocidade de propagação da onda dada por:

$$\frac{v}{c} = \frac{1}{\sqrt{KK_m}} \left\{ \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\epsilon_o 2\pi f K} \right)^2} \right) \right\}^{-1/2}, \quad (1)$$

onde:

$v$  é a velocidade de propagação da onda eletromagnética;

$c$  é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo dada por  $2,998 \times 10^8$  m/s;

$K$  é a constante dielétrica;

$\epsilon_o$  é a permissividade do vácuo dada por  $8,854 \times 10^{-12}$  F/m;

$f$  é a frequência utilizada dada em Hz;

$\sigma$  é a condutividade do meio dada em S/m;

$K_m$  é a permeabilidade magnética relativa, considerada igual à unidade.

Em rochas muito argilosas, como folhelhos, a condutividade é normalmente alta (da ordem de 1 a 10 S/m), produzindo uma velocidade da onda menor, que, também, tende a cair com a diminuição da constante dielétrica. No intervalo de transição entre o comportamento dielétrico e o *quasi*-estático, arenitos com lentes de argila podem apresentar condutividade da ordem de  $10^{-2}$  a 1 S/m. Abaixo de  $10^{-2}$  S/m, tais materiais comportam-se como dielétrico, no qual a velocidade da onda não mais depende da condutividade. Tal fato pode ser comprovado pela equação (1), que no intervalo em questão fica reduzida a:

$$\frac{\sigma}{2\pi f \epsilon} \ll 1 \Rightarrow v = \frac{c}{K^{1/2}} \quad (2)$$

Verifica-se que a presença de um pequeno percentual de argilominerais promove queda abrupta da resistividade comparada à de uma rocha "limpa". Segundo medidas realizadas em laboratório com testemunhos da bacia de Almada em uma faixa de frequência de  $10^{-3}$  a  $10^4$  Hz, por Dias *et al.* (2004), a presença de 2 a 4% de argilominerais em arenitos fornece uma condutividade de 2,7 a  $3,0 \times 10^{-3}$  S/m. Com o dobro de argilominerais (5 a 6%), para a mesma rocha e porosidade, a condutividade

aumenta para 2,05 a  $2,45 \times 10^{-2}$  S/m, deste modo, crescendo em cerca de 10 vezes o valor anterior.

O gráfico a seguir mostra a variação da velocidade com a condutividade e a constante dielétrica para a frequência de 100 MHz, a mesma frequência usada no experimento de Ceia (2004). A linha vermelha vertical divide os valores de condutividade de acordo com o intervalo de comportamento do material.

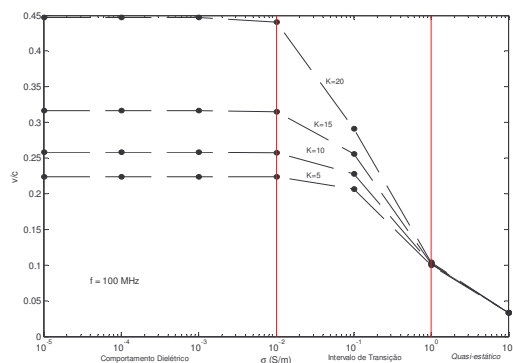


Figura 1 – Curvas do comportamento da velocidade de propagação da onda com a constante dielétrica e condutividade para uma frequência de 100 MHz.

#### Profundidade de exploração versus *skin depth* no caso GPR

O trabalho de Ceia (2004) compreende o estudo de afloramentos de turbiditos da bacia de Almada (BA/Brasil), através da utilização do Geo-Radar. Neste trabalho, foram realizados perfis de formações constituídas, principalmente, por arenitos em sua composição geológica, com profundidade da ordem de até 20 m. O equipamento utilizado foi um Pulse Ekko IV, operando com antenas de 100 MHz. A correlação entre o perfil geológico da área (figura 2) e a pseudo-seção originada pelos dados coletados com o GPR (figuras 3 e 4) mostra-se convincente.

No trabalho de Dias (2004, p.34), através de testemunhos recolhidos na referida bacia, constatou-se, por análises laboratoriais, que a condutividade do arenito estudado é de  $6,0 \times 10^{-3}$  S/m, fornecendo, deste modo, um *skin depth* da ordem de 4 m.

Uma provável explicação para o fato de Ceia ter podido medir sinais refletidos a uma profundidade maior que a profundidade definida pelo *skin depth*, é que a sensibilidade do equipamento esteja conseguindo medir sinais espalhados abaixo da profundidade do *skin depth*, separados dos sinais gerados nas camadas mais rasas pela seqüência temporal do instante da chegada do sinal no receptor.

Essa hipótese é comprovada pelos cálculos do módulo dos campos elétricos emitido e captado pelas antenas do equipamento de GPR a partir das diferenças de potencial transmitida ( $\Delta\phi_t$ ) e medida ( $\Delta\phi_m$ ), pelo comprimento das antenas ( $L$ ) e a frequência de 100 MHz.

Dados (Comum. Pessoal de Ceia, 2004):

$$\Delta\phi_t \cong 1000V, \quad \Delta\phi_m \cong 32000 \mu V, \quad L = 0,92m, \quad f = 100MHz.$$

Partindo da equação da onda plana em um meio infinito:

$$\vec{E} = e^{-\alpha r} \vec{E}_0 e^{i\omega\left(t - \frac{\beta}{\omega}r\right)}, \quad (3)$$

onde:

$\alpha$  é o termo associado ao amortecimento;

$\beta$  é a constante de fase;

$\omega$  é a frequência angular;

$t$  é a variável temporal;

$r$  é a variável espacial na direção de propagação da onda, considerada vertical.

Calculando o módulo dos campos elétricos transmitido e captado:

$$E_o^{\text{transmitido}} \cong \frac{\Delta\phi_t}{L} = 1087 V/m$$

$$E_o^{\text{captado}} \cong \frac{\Delta\phi_m}{L} = 3,5 \times 10^{-2} V/m. \quad (4)$$

Fazendo a razão entre os valores encontrados:

$$\frac{E_o^{\text{captado}}}{E_o^{\text{transmitido}}} = \frac{3,5 \times 10^{-2}}{1087} = 3,219 \times 10^{-5} = e^{-\alpha r}, \quad (5)$$

de modo que:

$$-\alpha r = -10,344 \Rightarrow r = \frac{10,344}{\alpha} \Rightarrow r = 10,344 \cdot \delta_{op}, \quad (6)$$

onde  $\delta_{op}$  é o *skin depth* da onda plana ( $\alpha=1/\delta_{op}$ ).

Isto mostra que com essas diferenças de potencial emitida e captada foi possível obter informação a uma profundidade de  $10,344/2=5,172$  vezes o *skin depth*, ou seja, algo em torno de 20,481 m, como reportado no trabalho de Ceia (2004).

#### Estimativa das constantes dielétricas

No trabalho de Ceia (2004), foi elaborado um modelo de velocidade obtido através de perfis CMP (*Common Mid Point*). A partir destas velocidades, o autor do referido trabalho calculou a constante dielétrica utilizando a relação de Lorenz-Lorentz (equação (7)), que é válida para o intervalo de frequência em que apenas a polarização do tipo eletrônica prevalece. Quando outro tipo de polarização estiver presente, esse valor será uma aproximação por baixo.

$$K = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (7)$$

Esta aproximação gera imprecisão, pelo fato de que esta relação não considera a condutividade e a constante dielétrica das litologias e fluidos presentes e não possui termos que englobem a possibilidade da ocorrência de polarização orientacional exercida pela água (e da polarização iônica, quando for o caso).

Para estimativa da constante dielétrica, utilizaremos o modelo usado em Lange (1983) (equação (8)), válido no intervalo de frequência de microonda, considerando-se a existência da polarização orientacional devida à água, presente nos poros das rochas.

$$K = \phi K_f + (1 - \phi) K_M, \quad (8)$$

onde:

$K_f$  é a constante dielétrica do fluido saturante;

$K_M$  é a constante dielétrica da matriz;

$\phi$  é a porosidade efetiva da rocha, considerada saturada.

Considera-se que seja água o fluido percolante, de modo que  $K_f = K_{\text{água}} = 78$  (considerando solução salina), e que  $K_M$  seja dada pela relação (7). Da tese de Ceia (2004), tem-se para arenito  $K_M$  igual a 4 e, para conglomerado,  $K_M = 2,25$ . Já do trabalho de Lima e Dias (2004), pode-se obter para arenito, na mesma região em que o trabalho de Ceia foi realizado, uma porosidade máxima de 27%, uma porosidade mínima de 5%, numa média de 16%. No caso do conglomerado, atribuem-se os seguintes valores de porosidade: máxima de 26%, mínima de 18% e uma média de 22%.

Considerando a equação (8), temos os seguintes valores de constante dielétrica, para arenito e conglomerado, apresentados na Tabela 1, plausíveis se comparados com os valores medidos por Lange (1983):

Tabela 1 – Valores de K estimados.

Arenito	K	Conglomerado	K
$\phi_{\text{max}} = 27\%$	23,98	$\phi_{\text{max}} = 26\%$	21,95
$\phi_{\text{min}} = 5\%$	7,7	$\phi_{\text{min}} = 18\%$	15,89
$\phi_{\text{media}} = 16\%$	15,84	$\phi_{\text{media}} = 22\%$	18,92

### Conclusão

Conclui-se que a técnica do Geo-Radar mostra-se eficaz para mapear contatos de uma seqüência estratigráfica, e na determinação da constante dielétrica do meio

analisado, sendo necessária a utilização de modelos matemáticos que considerem os efeitos de polarização presentes e o intervalo de comportamento em estudo, seja ele dielétrico ou *quasi*-estático.

Verificou-se também a capacidade do método fornecer informação da região mais profunda do que o *skin depth*, por uma ordem de 5 vezes este parâmetro.

### Referências

- Ceia, M. A. R., 2004, Estudo dos afloramentos turbidíticos da bacia de Almada (BA), com imagens de Geo-Radar (GPR): Tese de doutorado. Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo (LENEP), CCT/UENF, Macaé-RJ, Brasil;
- Dias, C. A., Silva, D. N., Carageorgos, T., Lenharo, S. L. R., 2004, Condutividade elétrica espectral em testemunhos de poços perfurados nos turbiditos de Almada, BA, in: Dias, C. A. (Editor), Turbiditos da Bacia de Almada/Bahia: Pesquisas Geológicas e Geofísicas, p. 119-139
- Dias, C. A., 2004, Propriedades elétricas das rochas e seus constituintes (livro em preparação). Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo (LENEP), CCT/UENF, Macaé-RJ, Brasil, p.35;
- Lange, J. N., 1983, Microwave properties of saturated reservoirs: Geophysics, Vol. 48, No. 3, p.367-375, March.
- Lima, K. T. P., Dias, C. A., 2004, Poço perfilado em Sambaituba – Bacia de Almada, BA, in: Dias, C. A. (Editor), Turbiditos da Bacia de Almada/Bahia: Pesquisas Geológicas e Geofísicas, p. 93-104

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo (LENEP/CCT/UENF) pela infraestrutura disponibilizada, ao CNPq pela bolsa de produtividade de C. A. Dias e ao Programa PRH-20 da ANP/MCT pelas bolsas de Iniciação Científica concedidas a M. Barbosa, F. Patrício e D. Borçoi.

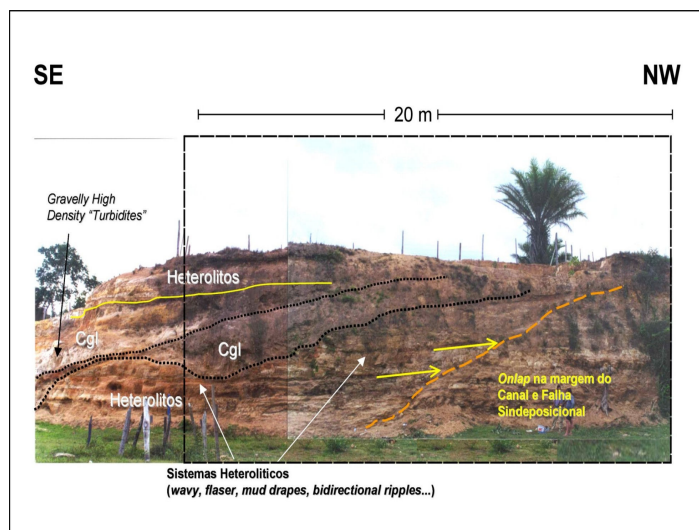


Figura 2 – Seção geológica de um afloramento turbidítico da bacia de Almada/BA (Ceia, 2004).

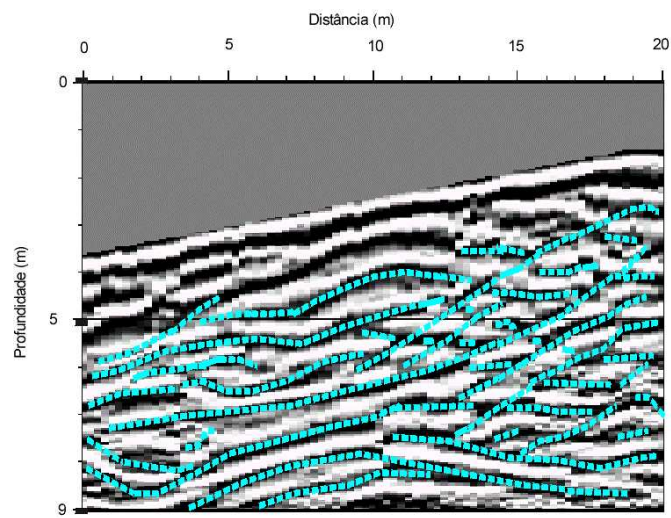


Figura 3 – Pseudo-Seção produzida com a metodologia GPR do afloramento acima (Ceia, 2004).

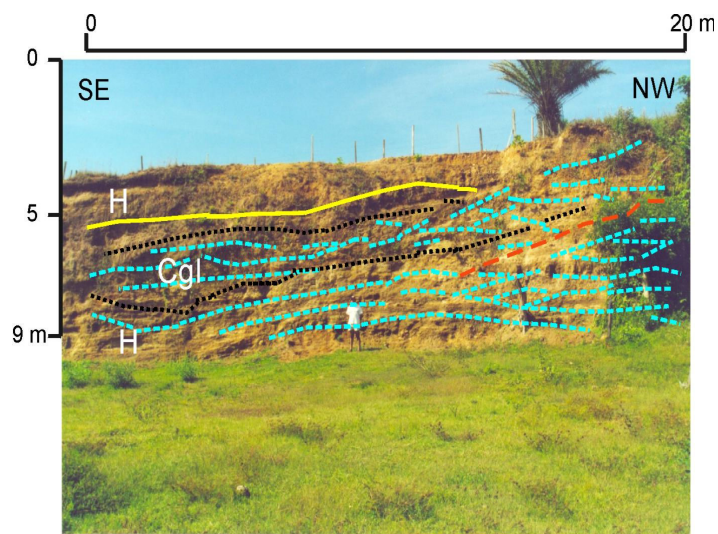


Figura 4 – Visualização dos marcadores sobre o afloramento (Ceia, 2004).

