



Modelagem de Dados de Radar em Poço (*Borehole Radar*).

Gleide A. N. Dias*, IGEO/UFRRJ, Brazil, Cassiano R. L. S ICE/DeFis/UFRRJ, Brazil e Thiago N. P ICE/DeFis/UFRRJ, Brazil

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 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

We analyzed the responses of electromagnetic wave method using Ground Penetrating Radar (GPR) in surface and pit with 900 MHz antennas for a simple model of plane parallel layers. The algorithm used in the generation of synthetic data was GPRMAX2D radar, developed by Dr Antonis Giannopoulos, University of Edinburg (2002) in which this discretion based on the wave by the Finite Difference Time Domain (FDTD). Just as the response surface method for the BHR is influenced by the conductivity of the formation where the well is located, and the reflectivity of the targets. A comprehensive study of modeling the propagation of electromagnetic wave (EM) in a borehole environment is necessary to understand the ripple effect to assist in the interpretation of geology and resources of complex structures.

Resumo

Foram analisadas as respostas da onda eletromagnética através método Radar de Penetração no Solo (GPR) em superfície e poço com antenas de 900 MHz para um modelo simples de camadas plano paralelas. O algoritmo utilizado na geração dos dados sintéticos de radar foi o GPRMAX2D, desenvolvido pelo Dr. Antonis Giannopoulos da Universidade de Edinburg (2002) no qual esta fundamentada na discricção da onda pela por Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD). Um estudo detalhado da modelagem de propagação da onda eletromagnética (EM) em um ambiente de poço é necessário para a compreensão do efeito de propagação a fim de auxiliar na interpretação de meios de geologia e estruturas complexas. Nesta simulação foram satisfatórias as respostas, referentes aos dados sintéticos, cujo método de superfície e poço identificou os corpos através de hipérboles.

Introdução

O GPR é uma ferramenta geofísica que utiliza pulsos de ondas eletromagnéticas em altas frequências, geralmente da ordem de 10 a 200 MHz, conhecidas como ondas de rádio. Esta é transmitida para o meio a ser investigado e ao incidir em uma interface que separa meios com contraste significativo de propriedades magnéticas e principalmente elétricas, o pulso é parcialmente refletido

e retorna para a superfície onde é detectado e registrado (Dias, 2007).

Os equipamentos para a aquisição de dados de radar podem ser utilizados tanto em superfície como poço com certas adaptações para cada caso sendo utilizado o termo Radar de Poço (*Borehole -BHR*) ou GPR Poço (*Borehole Radar Penetrating Ground - BGPR*). Segundo Wiley (1997) em analogia com o sistema desenvolvido para superfície, o sistema de poço teve a sua utilização iniciada na década de 80. Um sistema chamado RAMAC foi desenvolvido pela *International Stripa Project* na Suécia e manufaturado por *MALÅ Geoscience AB* e patenteado pela ABEM. Onde apresentou bons resultados e tem sido usado em exploração de minas, hidrogeologia e investigações de mecânicas de rochas, localização de túneis, represos e outros tipos de construções. As antenas utilizadas para o método GPR em poço para o sistema RAMAC podem ser usadas em diferentes frequências de 20 MHz a 400 MHz. Os possíveis modos de aquisição em poço são: a) Poço único (*single-hole*): com as antenas, transmissora e receptora, variando sua configuração geométrica de aquisição para um único poço. b) Poço cruzado (*Cross-hole*): com as antenas, transmissora e receptora, variando sua configuração geométrica de aquisição entre poços diferentes (geralmente poços vizinhos).

Metodologia

A modelagem de dados BHR utilizados neste trabalho esta fundamentado no método de FDTD que consiste na implementação de um algoritmo computacional através de aproximações numéricas sucessivas, substituindo as equações diferenciais por diferenças finitas. A substituição se dá pela expansão das equações diferenciais em Série de Taylor e truncamento na segunda ordem. Desta forma, as equações de Maxwell são resolvidas por equações algébricas, através do conceito de discretização desenvolvido por Euler, na qual as taxas relacionadas às derivadas são substituídas por incrementos espaciais e temporais. As equações de Maxwell podem ser escritas na forma pontual como:

$$\nabla_{\mathbf{x}} \vec{E} - \vec{M} = \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla_{\mathbf{x}} \vec{H} - \vec{J} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = \rho_m, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e, \quad (4)$$

Onde ρ_m é a densidade volumétrica de carga magnética equivalente (Wb/m^2) e \vec{M} é o vetor densidade de corrente magnética equivalente à magnetização, o qual foi incluído nas equações acima para introduzir nas equações de Maxwell a dualidade ao tratamento das condições de contorno absorvente. Considerando-se que \vec{M} e \vec{J} possam atuar como fontes geradoras,

$$\vec{J} = \vec{J}_{\text{fonte}} + \sigma \vec{E}, \quad (5)$$

$$\vec{M} = \vec{M}_{\text{fonte}} + \sigma^* \vec{E}, \quad (6)$$

\vec{J}_{fonte} - vetor densidade de corrente elétrica (A/m^2).

\vec{M}_{fonte} - vetor densidade de corrente magnética (V/m^2).

σ - condutividade elétrica (S/m).

σ^* - condutividade magnética equivalente (Ω/m).

Nesse algoritmo o campo eletromagnético está posicionado de forma que sempre existam, em um dado plano, quatro componentes perpendiculares. Isto de certa forma impõe a natureza solenoidal do campo eletromagnético imposto pelas equações de Gauss, em regiões onde há acúmulo de carga, permitindo o estudo da onda eletromagnética em todo o seu espectro de frequência e em ambientes complexos, permitindo uma exatidão de segunda ordem tanto no espaço como no tempo.

As condições de contorno absorventes (*ABC's - Absorbing Boundary Conditions*) são utilizadas a fim de limitar a região de interesse. A função utilizada para o programa de modelagem de dados GPR é a do tipo *wavelet Ricker* com amplitude igual a um,

$$f(t) = -2\xi \sqrt{\frac{1}{e^{2\xi}}} e^{-\xi(t-X)^2} (t-X) \quad (7)$$

O qual é a primeira derivada da função gaussiana normalizada. Nesta Eq. 7 $\xi = 2\pi^2 f_c^2$ e $X = \frac{1}{f_c}$. Onde f_c é a frequência central. Na Fig. 1 é representada a forma da função no domínio do tempo.

O algoritmo FDTD é implementado no plano (x, y). A origem do sistema de coordenada na modelagem para a geração de dados sintéticos de radar está no ponto (0,0), o eixo x na horizontal e o eixo y na vertical. O menor espaço que pode ser alocado para representar um meio específico é uma célula 2D ($\Delta x, \Delta y$). Para um dado grupo de coordenadas no espaço devido ao arranjo da posição com relação às componentes do campo eletromagnético no algoritmo FDTD é:

$$\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y + \frac{\Delta y}{2}\right) \quad \text{Para} \quad \vec{E}_z, \quad (8)$$

$$\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y\right) \quad \text{Para} \quad \vec{H}_x, \quad (9)$$

$$\left(x, y + \frac{\Delta y}{2}\right) \quad \text{Para} \quad \vec{H}_y, \quad (10)$$

No algoritmo de reflexão, o eixo x e y são subdivididos como malha em termos de $x = i\Delta x$ ($i=1, 2, 3, \dots, N_x$) e $y = j\Delta y$ ($j=1, 2, 3, \dots, N_y$), sendo cada ponto da malha representado pelo centro de uma pequena célula retangular com seus contornos compartilhados com as células vizinhas que a circundam (SILVA, 2002).

A discretização dos campos \vec{E} e \vec{H} serão determinados em todo ponto dentro do domínio computacional o qual deverão ser estabilizados. A discretização espacial ($\Delta x, \Delta y$ e Δz) e o temporal (Δt) têm papéis significantes, os quais não podem ser assegurados independentemente. Os valores de incrementos da discretização devem ser finitos, assim, o computador terá uma limitada quantidade de armazenamento e uma velocidade finita de processamento, representado uma versão discretizada do problema real e de tamanho limitado (Giannopoulos, 2002).

Especificando-se o número de repetições, pode se instruir o FDTD a resolver a simulação dos campos dentro de uma janela de tempo. O FDTD é um processo numérico estável, a condição de estabilidade é conhecida como condição CFL (iniciais de Courant, Friedrichs e Lewy) dada por,

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (11)$$

Como c é a velocidade da luz, então, Δt é determinado pelos valores $\Delta x, \Delta y$ e Δz . A condição de estabilidade para o caso 2D é facilmente obtida fazendo $\Delta z \rightarrow \infty$ (Giannopoulos, 2002).

Exemplos

Para a simulação dos dados de radar de superfície *Common-Offset* (COS) e Único Poço (*Single-hole*) foi gerado um modelo geológico sintético. Este apresenta um meio de duas camadas simples, uma representando areia seca e a outra o ar, com dimensões $2,5 \times 0,65 \text{ m}^2$ para uma malha de $0.0025 \times 0.0025 \text{ m}^2$ como mostra a Fig. 2 Sendo considerado como alvo principal um cilindro (A) e uma caixa (B) preenchidos por ar dentro da camada de areia, lembrando que as múltiplas são representados por (C). O programa de modelagem utiliza parâmetros de entrada como a permissividade dielétrica, condutividade e permeabilidade magnética (Tab. 1). Tanto as aquisições de superfície e de poço foram utilizadas a frequência de excitação de 900 MHz.

Para a simulação da aquisição COS da Fig. 3a foram utilizados 115 traços (amostras) separados de 0.02 m. A separação entre as antenas transmissora e receptora foi de 0.02 m e o tempo total de amostragem $12e^{-9}$ s. A posição inicial da antena transmissora está em (0.08, 0.4525) e deslocando-se a cada 0.02 m na direção x. Já a posição inicial da antena receptora é de (0, 1125, 0, 4525), deslocando-se de maneira similar à antena transmissora.

Para o mesmo modelo geológico foram realizadas outras aquisições de BHR *single-hole*. Na Fig. 3b, foram utilizados 94 traços (amostras) separados de 0.02 m. com o tempo total de amostragem $12e^{-9}$ s. a posição da antena transmissora foi mantida fixa em (0.5, 1.96) na direção x. Já a posição inicial da antena receptora é de (2.0, 1.94), deslocando-se ao longo do poço cada 0.02 m na direção y.

Na Fig. 3c, foram utilizados 110 traços (amostras) separados de 0.02 m. mantiveram-se o mesmo tempo total de amostragem do modelo anterior. A posição da antena transmissora esta em (1.25, 0.33) na direção x, e a posição da antena receptora é de (0.02, 0.6), e manteve-se fixa na direção y.

Resultados

Na Fig. 4 o resultado obtido através do radargrama através do método de aquisição COS foi confirmado à existência dos dois corpos em estudo através da presença de duas hipérbolas referenciada por (A) e (B) para uma profundidade de 600 ns e 900 ns respectivamente, sendo também observada na figura a presença de múltiplas (C), devido às pequenas dimensões do modelo (efeito de borda) e da própria hipérbole.

Para os resultados obtidos através dos radargramas para uma aquisição *single-hole* na Fig. 5a foi verificado também a presença de hipérbolas sendo (A) e (B) de fraca amplitude e (C) de forte amplitude, neste resultado. As hipérbolas (A) e (C) representam o efeito de bordas do modelo e (B) representa a caixa. Para essa aquisição com a antena transmissora fixa no eixo x não foi possível a detecção do cilindro (A).

Na Fig. 5b aquisição *single-hole*, com geometria de aquisição diferente da descrita anteriormente, nos resultados obtidos através do radargrama foram identificadas três hipérbolas de forte amplitude sendo (A) que representa o corpo cilíndrico, (B) a caixa e (C) é verificado da mesma forma que os demais modelos como devido o efeito de borda, com essa configuração, a

antena transmissora fixa em y, tanto o cilindro quanto a caixa foram detectados com clareza.

Conclusões

Para os três métodos de aquisição foi estabelecida a mesma frequência, porém obtiveram-se respostas diferentes. Foram observadas que a velocidade de propagação e o tempo de resposta tiveram valores diferentes, ocasionando a formação de diferentes imagens. Aquisição COS verificou satisfatoriamente os dois corpos em profundidade sendo o sinal atenuado com a profundidade. Sendo as respostas da configuração *single-hole*, influenciadas pela geometria de aquisição.

Da mesma forma que o método de superfície a resposta para o BHR é influenciada pelo valor de permissividade dielétrica da formação em que o poço se encontra, e a refletividade dos alvos.

Agradecimentos

Ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Setor de geofísica, pela infraestrutura oferecida.

Referências

- DIAS G. A. N. 2007. Modelagem e Imageamento dos Dados de GPR Adquiridos em Afloramentos Visando o Estudo de Reservatório Petrolífero. Tese de Doutorado. UFRJ.
- GIANNOPOULOS, A. 2002. GPRMAX2d. *User's Manual. Version 1.5.*
- WILEY J. 1997 *An Introduction To Applied And Environmental Geophysics. livro*
- Mukhopadhyay P. radip Kumar 2005, A thesis submitted to the Department of Electrical Engineering, university of Cape Town
- K. S. Yee. 1966. "Numerical solution of initial boundary value Problems involving Maxwell's equations in isotropic media", IEEE transactions on antennas and propagation, maio.

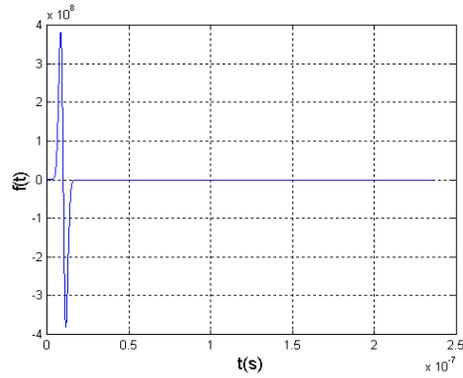


Fig. 1. Função excitação *Ricker* para uma frequência de 100 MHz.

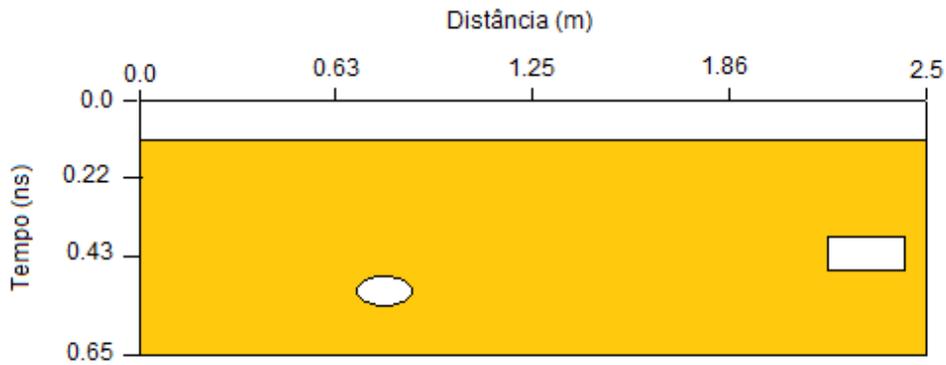


Fig. 2. Modelo geológico.

Tab. 1. Parâmetros Físicos

Meio	Permissividade Dielétrica (F/m)	Condutividade Elétrica (S/m)
Espaço Livre	1	0
Areia	30	0.01

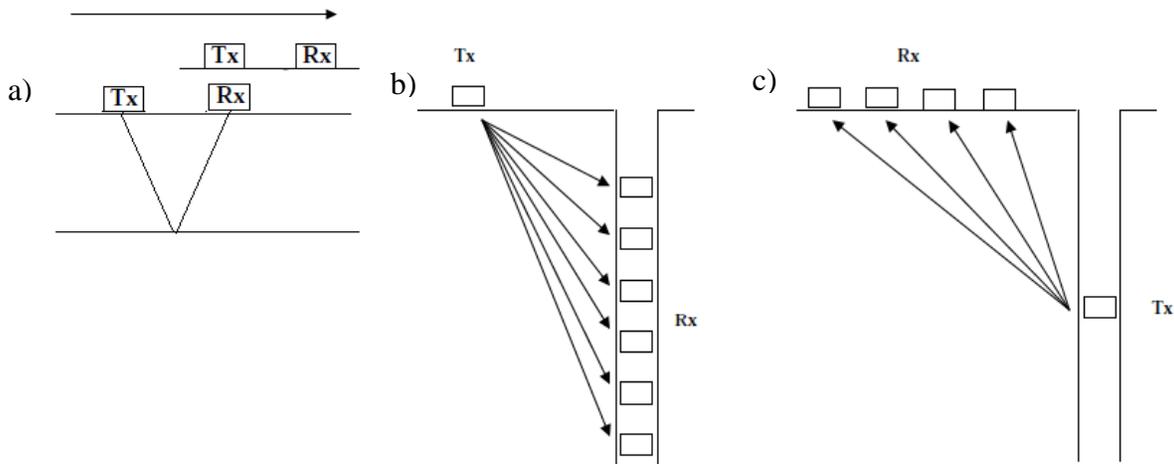


Fig. 3. Esquema de aquisição de dados. a) COS. b) *Single-hole* com transmissor em superfície. c) *Single-hole* com transmissor dentro do poço em superfície.

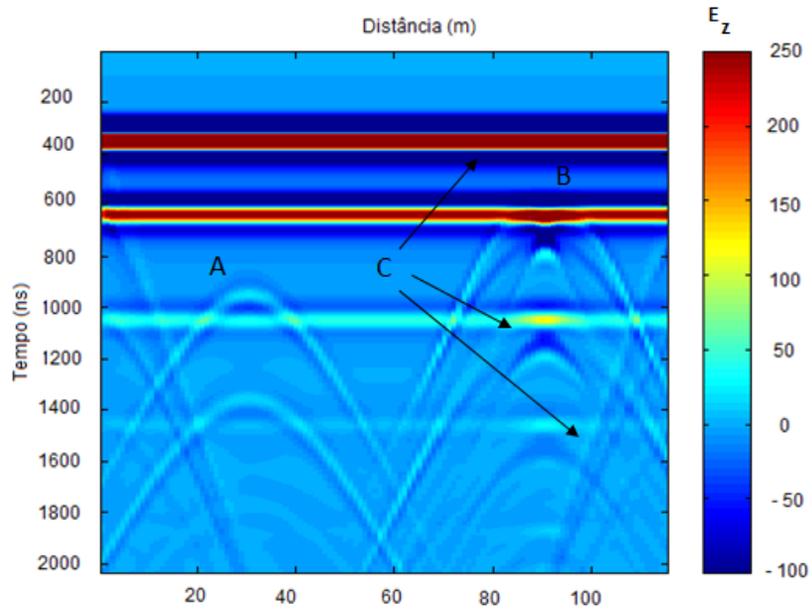


Fig. 4. Radargrama representativo de uma aquisição COS.

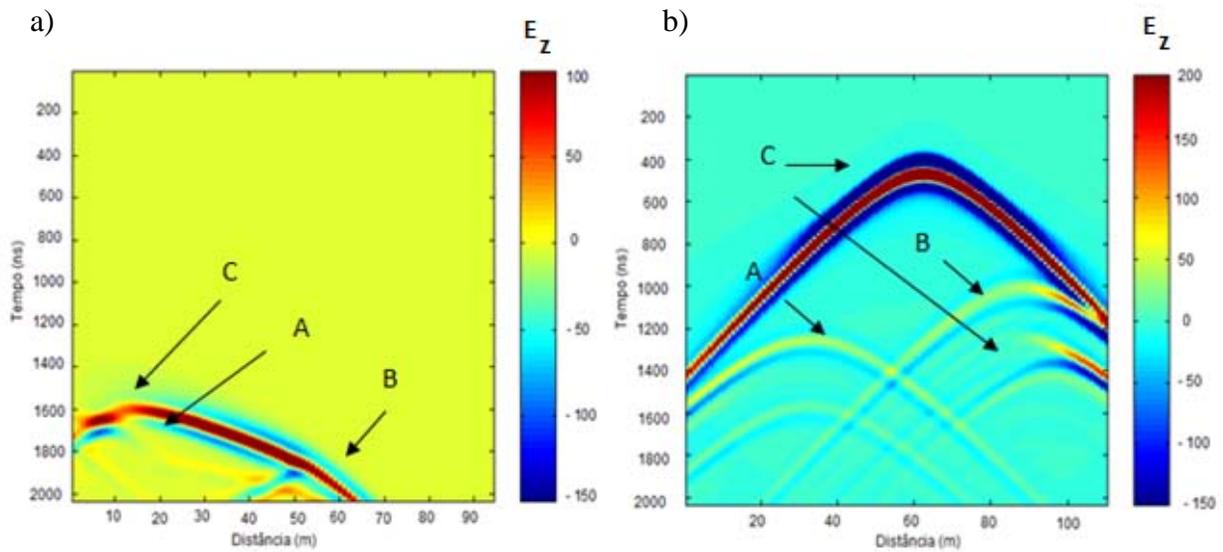


Figura 5 – Radargrama representativo de uma aquisição *Single-Hole*. a) Antena transmissora fixa em superfície b) Antena fixa em meio ao poço.