



Aplicação de Modelagem 3D na Perfuração de Indução em Turbiditos da Bacia de Almada - Ba

Tomaso, K., PETROBRAS; Carrasco, A. UNIGRANRIO & Carrasquilla, A., LENEP – UENF; Macaé -RJ

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th 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 9th 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

Induction logging is one of the most important geophysical methods used in the petroleum industry. In this work, we employ a three dimensional algorithm to interpret induction well log data from Almada Basin (Bahia – Brazil). This algorithm, which uses the integral equation method, has been applied successfully in other geophysical methods and its response was already tested with others mathematical algorithms using synthetic models. That models represented complex geologic environments and, in this particular case, we are going to modelate falling overburden into the formations using the wellbore data from Almada Basin. In order to achieve this objective we use the classical SCHLUMBERGER coil arrangements with the objective to analyze the difference between the 1D and 3D responses.

Introdução

A resistividade elétrica é um dos parâmetros mais importantes utilizados para medir o potencial produtor de um poço, seja de petróleo ou de gás. Estes parâmetros visam avaliar num reservatório, a saturação de água, frente de invasão, etc., sendo que estes cenários geológicos se distinguem por ter características tridimensionais, características que usualmente são difíceis de modelar com algoritmos unidimensionais. Assim, neste trabalho utilizamos a informação do poço SA-01, perfurado na porção emersa da Bacia de Almada, para modelar tridimensionalmente um caso específico de desmoronamento nas paredes internas em um determinado trecho do poço. Para avaliar estas características tridimensionais vamos utilizar um algoritmo direto 3D de modelamento. Este algoritmo utiliza o método das equações integrais, e tem como base o cálculo do campo primário (camadas estratificadas 1D) e na discretização em células do campo secundário (corpo tridimensional). Este algoritmo já foi testado usando modelos sintéticos e comparados com outros algoritmos. Com este objetivo empregamos os arranjos clássicos das bobinas de indução da companhia SCHLUMBERGER.

Quanto à geologia regional, a Bacia de Almada é delimitada a norte pela Bacia de Camamu (Alto de Itacaré) e a sul pela Bacia do Jequitinhonha (Alto de Olivença). Inclui uma pequena porção emersa, aflora

entre os paralelos de 14° 30' e 15° 00'S, e os meridianos 39° 00' e 39° 14'W com aproximadamente 250 km² e espessura máxima de sedimentos de 1.800 m. Nesta porção afloram turbiditos areno-conglomeráticos e folhelhos ricos em foraminíferos planctônicos, que definem litoestratigraficamente a Formação Urucutuca, correspondente ao Mesozóico/Cretáceo Superior. Esta Formação é o alvo deste estudo, aflorando predominantemente no Distrito de Sambaituba a 16 Km do centro de Ilhéus, sua relevância está no fato de compor a parte exumada do Câmbrio de Almada, que corresponde a uma grande feição erosiva de idade Pós-Cenomaniana, e principalmente por possuir analogia a outras formações contemporâneas e produtoras de hidrocarbonetos das Bacias de Campos, Espírito Santo e Cumuruxatiba (Figura 1); sendo ainda que, estes turbiditos (canalizados) são o principal reservatório em mais de 20 campos de petróleo nas Bacias de Campos, Espírito Santo e Sergipe-Alagoas (BRUHN & MORAES, 1989).

A perfuração geofísica é um método que representa um pequeno percentual do custo no total do poço, e fornece importantes informações das propriedades petrofísicas da rocha nas condições do reservatório. No presente trabalho utilizamos o perfil de indução *Induction Logging Depth* (ILD) e o perfil do Caliper no poço SA-01, para fazer o modelamento tridimensional das dimensões de um trecho onde aconteceu um desmoronamento nas paredes do poço (110-140m). Posteriormente fizemos o análise das respostas através do arranjo de indução utilizando o algoritmo tridimensional de registro de indução. Trata-se de um poço de 255 m de profundidade e 8.5 polegadas de diâmetro, com as seguintes coordenadas: 14° 39' 31" S e 39° 06' 05" W. Os perfis estudados foram obtidos em um poço (SA-01) perfurado à margem da estrada Ilhéus – Urucutuca, no Distrito de Sambaituba, junto ao afloramento 2, descrito inicialmente por BRUHN & MORAES (1989). Este afloramento já vem sendo estudado em diversos trabalhos envolvendo métodos geológicos (D'ÁVILA et al., 2004) e geofísicos (CEIA, 2004) no objetivo de caracterizar estes turbiditos. Os perfis de resistividade podem ser utilizados para correlações geológicas e, quando possível (camadas bastante espessas), para a determinação da resistividade verdadeira das rochas. O principal problema encontrado nestes perfis está relacionado com a diferença que existe entre o diâmetro das sondas e o diâmetro dos poços. Um significativo volume de lama influencia a leitura final da resistividade afastando-a cada vez mais dos valores reais desejados para a realização dos cálculos petrofísicos quantitativos (NERY et al., 1997). Sendo este problema ainda maior quando existe problemas de desmoronamento nas paredes do poço.

Metodologia

O Problema Tridimensional (3D)

A formulação das equações integrais em problemas da física tem provado ser eficiente e compacta, devido a que as condições de fronteira são satisfeitas de forma automática na sua formulação. Além disso, é freqüentemente mais eficiente em computadores de alta velocidade.

A resposta eletromagnética de um corpo 3D dentro de um meio estratificado pode ser calculada usando as equações integrais. O problema é formulado substituindo o corpo por uma corrente de espalhamento, e transformando a equação integral numa equação matricial, para ser resolvida numericamente utilizando as funções de Green (HOHMANN 1975).

O método da equação integral, por limitar-se a discretizar somente a heterogeneidade, utiliza menos memória num sistema e, com isso, reduz o tempo computacional, e ainda muito útil quando as heterogeneidades são pequenas e há poucos corpos para modelar (Das & Verma, apud CARRASQUILLA, 1993).

Considerando um corpo 3D e as Equações de Maxwell, em unidades MKS ($e^{i\omega t}$ dependente do tempo), encontram-se as seguintes expressões:

$$-\nabla \times \bar{E} = \hat{z} \bar{H} + M_i, \quad (1)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \hat{y} \bar{E} + J_i, \quad (2)$$

em que M_i e J_i são as correntes magnéticas e elétricas, e os parâmetros \hat{z} e \hat{y} são as impetividades e admitividades respectivamente e cujas expressões estão dadas por $\hat{z} = i\omega m$ e $\hat{y} = s + i\omega e$, respectivamente.

HARRINGTON (1968) apud HOHMANN (1975) mostra que numa equação integral, o campo elétrico pode ser derivado da Equação (2), resultando:

$$\nabla \times H = s_1 E + J_s + J_i, \quad (3)$$

em que: J_s é a corrente de espalhamento existente só no corpo, sendo $J_s = (s_2 - s_1) E$, em que s_2 é a resistividade da parte não homogênea, e s_1 é a resistividade do meio.

Tomando o rotacional de Equação (3) e substituindo para $\nabla \times H$, obtemos um vetor não homogêneo para o campo elétrico:

$$\nabla \times \nabla \times E - k^2 E = -i\omega m_0 (J_s + J_i) - \nabla \times M_i, \quad (4)$$

considerando $k^2 = \omega^2 m_0 e_0$ no ar, e $k^2 = i\omega m_0 s_1$ no meio terrestre, incluindo a parte não homogênea.

Também, considerando:

$$E = E_i + E_s, \quad (5)$$

em que E_i e E_s representam os campos incidente e espalhado respectivamente, e satisfazem as seguintes equações:

$$\nabla \times \nabla \times E_i - k^2 E_i = -i\omega m_0 J_i - \nabla \times M_i \quad (6)$$

$$\nabla \times \nabla \times E_s - k^2 E_s = -i\omega m_0 J_s. \quad (7)$$

A solução da Equação (6), corresponde ao campo elétrico devido às fontes. Para resolver a Equação (7) tratamos J_s como uma fonte ordinária de corrente, assim, fazemos a multiplicação com a apropriada função de Green diadica e integramos em torno ao volume do corpo heterogêneo, tendo a seguinte expressão:

$$E_s(r) = \int_V \hat{G}(r, r') \cdot J_s(r') dV', \quad (8)$$

em que a expressão $G(r, r')$ é a função de Green diadica G é expressado por Van Bladel (1961) apud (HOHMANN, 1975) como:

$$\hat{G}(r, r') = \frac{1}{s_1} [k_1^2 g - \nabla \nabla'] G(r, r'), \quad (9)$$

em que 'g' é a identidade diadica e G a função escalar de Green. A expressão para um espaço homogêneo está dada por:

$$G(r, r') = \frac{e^{-ik_1 R}}{4\pi R}, \quad (10)$$

sendo $R = |r - r'|$ e $k_1 = (-i\omega m_0 s_1)^{1/2}$.

Substituindo J_s dentro da Equação (8), a expressão para o campo elétrico total resulta em:

$$E(r) = E_i(r) + (s_2 - s_1) \int_V \hat{G}(r, r') \cdot E(r') dV'. \quad (11)$$

Esta equação é conhecida como a integral de Fredholm de segundo ordem, singular e não homogênea, cujo campo elétrico é resolvido dentro do corpo (HOHMANN, 1975).

Para facilitar o arranjo da matriz, resolve-se a Equação (11) utilizando o método de colocação com funções de pulso seccional e divide-se o corpo num prisma em N células cúbicas. Portanto, podemos formular a equação integral em forma aproximada como uma somatória finita de todos os campos para cada sub célula em n :

$$E(r) = E_i(r) + (s_2 - s_1) \sum_{n=1}^N \int_{V_n} \hat{G}(r, r') dV' \cdot E_n, \quad (12)$$

em que:

- * $E(r)$ é o campo elétrico total,
- * $E_i(r)$ é o campo elétrico primário do meio encaixante,
- * $\hat{G}(r, r')$ é a função diadica de Green,
- * E_n é o campo elétrico total discretizado em 'n' células,
- * $(s_2 - s_1)$ é a diferença entre as condutividades do corpo heterogêneo e o meio encaixante,
- * dV é a função diferencial correspondente à função de Green diadica.

A Equação (12) pode ser discretizada como uma matriz simétrica. O campo eletromagnético espalhado pode ser

determinado através do uso da função de Green. A forma mais simples para discretizar é dividindo a estrutura do corpo 3D em N células, usando uma função base:

$$E(r) = E_i(r) + \frac{(s_2 - s_1)}{s_1} \sum_{n=1}^N \Gamma(r, r') E_n, \quad (13)$$

em que G é a função de Green diádica para um elemento cúbico de volume. A partir da Equação (13) podemos expressar o campo elétrico para cada célula como

$$\sum_{n=1}^N \left[\frac{s_2 - s_1}{s_1} \Gamma_{nm} - d_{nm} \right] E_n = -E_m^{-1}, \quad (14)$$

sendo

$$d_{nm} = \begin{cases} \Theta, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases}, \quad (15)$$

na qual δ é o delta de Kronecker e T é a unidade tensorial. Esta expressão pode ser escrita em forma matricial como:

$$[\Gamma][J_s] = [E_n]. \quad (16)$$

Usualmente referimos o coeficiente da matriz G na Equação (16) como a matriz de espalhamento (HOHMANN, 1975).

RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO

O poço perfurado é caracterizado litologicamente por possuir uma grande intercalação de arenitos, folhelhos e conglomerados, predominando os folhelhos que chegam a atingir até 50 m na profundidade de 60 - 110 m com uma resistividade média em torno de 6 ohm-m. Os arenitos chegam a atingir espessuras de até 6 m e os conglomerados, apresentam-se como maciços e atingem espessura máxima de 3 metros.

Para uma melhor análise das respostas obtidas no modelamento direto tridimensional, selecionamos um trecho do perfil caliper onde apresenta as maiores medidas no diâmetro do poço (100 - 150 m), lugar onde se estaria indicando problemas de desmoronamento na parede do poço.

Na Figura 2 mostramos este trecho, junto com a resposta da perfilagem de indução ILD (Induction Logging Depth) para o poço SA - 01. Nesta seção é observado contraste entre as resistividades devido às intercalações de arenito folhelho. Nesta figura também mostramos duas seções marcadas em dois retângulos (superior e inferior) onde o diâmetro do poço atinge uma média aproximada de 29 cm, regiões onde o desmoronamento é maior. Estas zonas foram as selecionadas para fazer o modelamento tridimensional da perfilagem de indução. A resposta do *caliper* é correlacionada com a informação do perfil de indução ILD como aparece nesses retângulos antes mencionados, e neles notamos um valor de resistividade aparente média de 4 ohm-m.

Para efetuar nossa modelagem consideramos o poço e o desmoronamento como um corpo tridimensional prismático dentro de uma seqüência de camadas com resistividades concordantes ao meio circundante. O erro volumétrico para um prisma e um cilindro pode ser de até 27% segundo a geometria de aproximação (CARRASCO, 2004).

O diâmetro do poço é de 0.25 m e é considerado na modelagem um valor máximo no diâmetro de invasão de 0.30 m em concordância à informação dada pelo caliper. A resistividade da lama foi considerada como 20 ohm-m a partir dos dados de campo. O arranjo utilizado para esta simulação foi o ILD.

Modelando tridimensionalmente os trechos superior e inferior da Figura 2 obtemos as respostas mostradas na Figura 3 (não desenhado em escala), a seguir:

A distribuição de resistividades nas formações foi obtida através do modelamento direto tridimensional usando o arranjo de indução ILD. A resposta resultante deste modelo aparece na Figura 4.

Nessa figura, aparecem as respostas obtidas como resultado do modelo testado. A curva contínua representam os dados de campo, a curva tracejada corresponde à resposta obtida com a modelagem as linhas retas correspondem aos valores de resistividade resultante da modelagem direta. Desta maneira, podemos notar uma boa aproximação entre as curvas dos dados reais e da resposta 3D. Este resultado era esperado devido à utilização de um arranjo de indução profunda na modelagem e também devido ao pequeno diâmetro de desmoronamento e invasão da lama de perfuração dentro dos dois intervalos modelados (superior e inferior). O efeito da lama de perfuração nas respostas não é significativo para este tipo de arranjo (ILD) devido a que sondas focalizadas têm uma tendência a diminuir este efeito. A resposta do efeito *shoulder* se apresenta com maior notoriedade nas camadas mais resistivas pela influência das camadas condutivas adjacentes. A seção desmoronada nos dois trechos modelados corresponde a uma espessura na camada de folhelhos de aproximadamente 5 metros.

Utilizando este mesmo esquema de modelamento e um arranjo mais simples (2C40) que investiga a menores profundidades, podemos notar que neste caso existe bastante influencia tanto do efeito do poço quanto da camada afetada pelo desmoronamento, já que existe um pequeno afastamento entre a resposta 3D e a curva correspondente aos dados reais.

Desta maneira podemos notar maiores valores de resistividade aparente nas zonas de desmoronamento devido ao efeito da lama de perfuração (intervalos 120-123 m e 128-134 m) com 20 ohm-m de resistividade.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma aplicação direta do modelamento tridimensional de sondas de indução para dois diferentes arranjos, 2C40 e ILD, arranjos clássicos da companhia SCHLUMBERGER. Embora atualmente

tenha-se ferramentas com maior poder de penetração, a utilização dos arranjos clássicos como esses está justificado como uma forma de testar novos algoritmos que possam ajudar na interpretação tridimensional de ambientes geológicos complexos.

Este algoritmo emprega o método das equações integrais e ele já foi testado com modelos sintéticos de ambientes geológicos com características tridimensionais particulares, como por exemplo: fraturas verticais, fraturas inclinadas num meio homogêneo, paredes de reboco num poço, poço com diferentes diâmetros de invasão, etc. (Carrasco, 2004). A boa resposta obtida com estes modelos facilita a modelagem de outras muitas situações de geologia complexa encontradas nos poços. Para este trabalho foi simulado um caso de desmoronamento nas paredes de um poço perfurado na Bacia de Almada no Sul da Bahia, obtendo respostas satisfatórias tanto no uso do arranjo ILD quanto do arranjo 2C40.

O número de células empregada no modelo foi de 80, demorando menos de 15 segundos na execução do programa. A velocidade do programa vai depender do número delas, chegando a demorar até 15 minutos quando o número de células é de 420.

Este algoritmo pode ser utilizado para trabalhos futuros no cálculo da resposta da sonda de indução em ambientes 3D, com sondas mais atuais como aquelas da SCHLUMBERGER (Phasor, etc) ou a russa Víkiz, ou também para casos de poços inclinados ou horizontais, com prévia modificação que considere a anisotropia resistiva.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam ao LENEP/UENF pelo suporte computacional e pelos dados de poço fornecidos para a elaboração deste trabalho. Um dos autores (A. Carrasquilla) agradece ao CNPq pela bolsa de Produtividade em Pesquisa fornecida no período.

REFERÊNCIAS

- Bruhn, C. & Moraes, M., 1989. Turbiditos da Formação Urucutuca na Bacia de Almada, Bahia: Um laboratório de campo para estudo de reservatórios canalizados. Boletim de Geociências da PETROBRAS, 3 (3); 235-267.
- Carrasco, A. M. 2004. *Simulação numérica tridimensional de perfis indutivos em poço*, Tese de Doutorado, Macaé – Rio de Janeiro, 83 p.
- Carrasquilla, A. A. 1993. *Modelagem Numérica da influencia do eletrojato equatorial em dados magnetotelúricos produzidos por estruturas 3D*, Tese de Doutorado, Belém -Pará, 176 p.
- Ceia, M. A., 2004. *Estudo dos Afloramentos Turbidíticos da Bacia de Almada (Ba) com imagens de Geo-radar (GPR)*, Tese de Doutorado, Macaé – Rio de Janeiro, 183 p.
- D'Ávila, R.S.F., Souza-Cruz, C.E., Oliveira Filho, J.S.O, Menezes, C., Cesero O, P., Dias Filho, D.C., Lima, C.C., Queiroz, C.L., Santos, S.F. & Ferreira, E.A., 2004 – Fácies e Modelo Depositional do Canyon de Almada. In: (Eds) Dias, C.A., Thomaz Filho, A. e D'Ávila, R.S.F., UENF/UERJ. Relatório Final apresentado à FINEP/CTPETRO – PETROBRAS e FAPERJ, Projeto “Turbiditos de Almada”. Seção II/2. No prelo.
- Hohmann, G. W. 1975. Three-dimensional induced polarization and electromagnetic modeling. *Geophysics*. 309-324.
- Nery G. G.; Feitosa, F & Manoel Filho, J., 1977. Hidrogeologia, Conceitos e Aplicações – Perfilagem Geofísica Aplicada à Água Subterrânea. CPRM, LABHID – UFPE, Brasil.

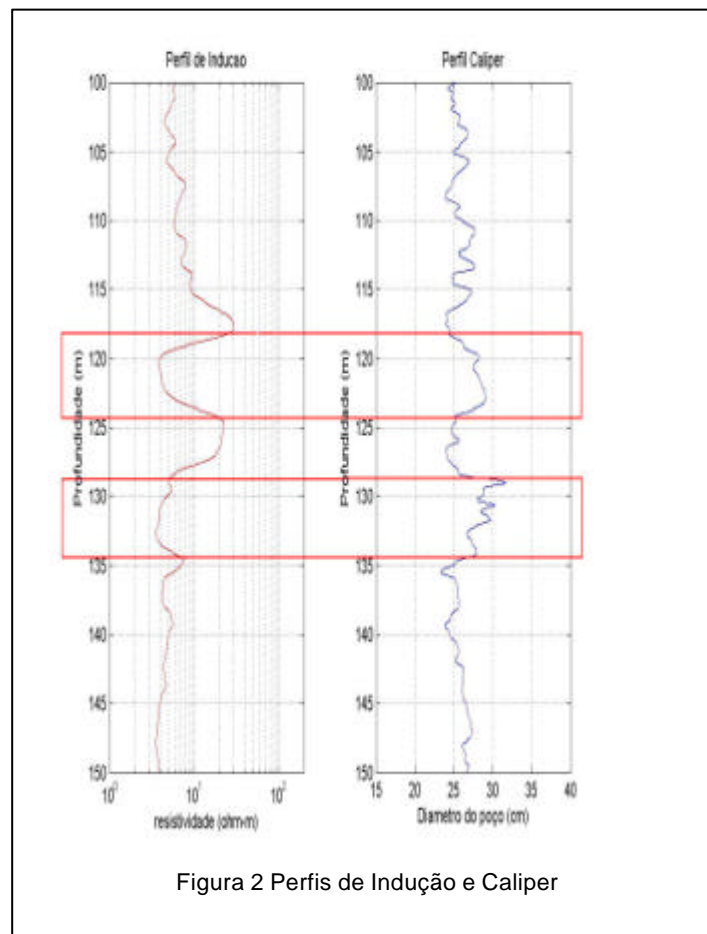
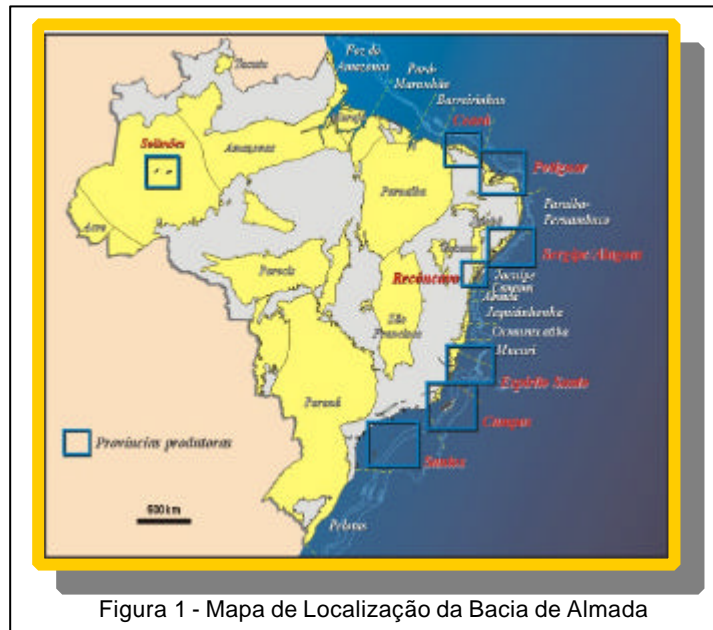


Figura 2 Perfis de Indução e Caliper

