

## Modelagem AVO – Estudo de Caso em um poço no Campo de Namorado

Evângela Patrícia Alves da Silva, IG/UNICAMP, Brasil  
Rodrigo de Souza Portugal, IG/UNICAMP, Brasil  
Alexandre Campane Vidal, IG/UNICAMP, Brasil

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11<sup>th</sup> 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

This work presents fluid substitution simulation and AVO modeling studies in order to characterize sandstone intervals of a well of Namorado field. The fluid substitution simulation study was done by saturating the sandstone with oil in situ then with brine water. The AVO modeling simulated attributes that were interpreted with the help of amplitude and crossplotting analyses, showing AVO anomalies of class IV.

### Introdução

A modelagem AVO é realizada por meio da integração das propriedades sísmicas e petrofísicas da rocha com o intuito de obter a variação do coeficiente de reflexão com o ângulo de incidência (AVA) para um determinado meio. A modelagem AVO/AVA contribui significativamente na interpretação de dados sísmicos. Ela tem caráter multidisciplinar, que reforça o processo da caracterização do reservatório e reduz o risco na exploração de hidrocarbonetos. (Li et al., 2007).

O objetivo desse trabalho é identificar a presença de hidrocarbonetos no reservatório do Campo de Namorado por meio de modelagem AVO. Com este intuito, realizaram-se modelagens AVO sintéticas 2D, por meio de dados extraídos de perfis do poço 3NA04RJ, em que foram considerados dois tipos de fluidos saturando a rocha reservatório: óleo e água. Os atributos sísmicos foram representados graficamente em diagramas de dispersão cruzada, para verificar a possível existência de “anomalia AVO”.

### Indicadores AVO

Na condução da modelagem AVO foi utilizada a aproximação de Aki & Richards (1980) para obter o coeficiente de reflexão

$$R(\theta) \sim A + B \sin^2(\theta) + C \sin^4(\theta) \quad (1)$$

onde  $R$  é o coeficiente de reflexão em função da variação do ângulo de incidência  $\theta$ , com  $A$ ,  $B$  e  $C$  de acordo com as equações (2), (3) e (4), respectivamente:

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta Vp}{(Vp)} + \frac{\Delta \rho}{(\rho)} \right); \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{2} \frac{\Delta Vp}{(Vp)} - 2 \left( \frac{(Vs)}{(Vp)} \right)^2 \left( 2 \frac{\Delta Vs}{(Vs)} + \frac{\Delta \rho}{(\rho)} \right); \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{2} \frac{\Delta Vp}{(Vp)}; \quad (4)$$

onde  $\Delta Vp = (Vp_2 - Vp_1)$  é a variação na velocidade da onda compressional na interface,

$(Vp) = \left[ (Vp_2 + Vp_1) / 2 \right]$  é a média da velocidade da onda compressional na interface,  $\Delta \rho = (\rho_2 - \rho_1)$  é a

variação da densidade na interface,  $(\rho) = \left[ \frac{\rho_2 + \rho_1}{2} \right]$  é a

média da densidade na interface,  $\Delta Vs = (Vs_2 - Vs_1)$  é a

variação na velocidade da onda cisalhante na interface,  $(Vs) = \left[ \frac{Vs_2 + Vs_1}{2} \right]$  é a

média da velocidade da onda cisalhante na interface. As quantidades  $Vp_1$ ,  $Vs_1$ ,  $\rho_1$  e  $Vp_2$ ,  $Vs_2$ ,  $\rho_2$  são as propriedades do meio na primeira e na segunda camada, respectivamente. O termo  $A$  é conhecido por intercepto e o termo  $B$  por gradiente.

Os valores de  $Vp$  e  $\rho$  foram obtidos por meio dos perfis de DT e RHOB, respectivamente. Os valores de  $Vs$  foram determinados de dois modos distintos, dada a heterogeneidade dos litotipos presentes. No primeiro modo, foram utilizadas duas relações empíricas para  $Vs$  em função de  $Vp$ , conforme sugeridas por Castagna et al. (1985, 1993), para os litotipos folhelho e calcário, uma vez que não foram encontradas localmente relações para os mesmos. As equações (5) e (6) apresentam as relações empíricas para o folhelho e para o calcário,

$$Vs = 0,8621 Vp - 1,1724; \quad (5)$$

$$Vs = -0,5509 Vp^2 + 1,0168 Vp - 1,0305; \quad (6)$$

onde  $Vp$  e  $Vs$  estão em quilômetros por segundo (km/s).

No segundo modo, foram utilizadas as relações **Vp – Vs** determinadas por Vasquez (2000) as quais são apropriadas para estudos sísmicos, uma vez que foram estimadas a baixas frequências, via substituição de fluidos para o arenito reservatório. As equações (7) e (8) mostram essas relações para o arenito saturado em óleo e para o arenito saturado em água,

$$Vs_{(óleo)} = 0,44 Vp_{(óleo)} + 546,92 ; \quad (7)$$

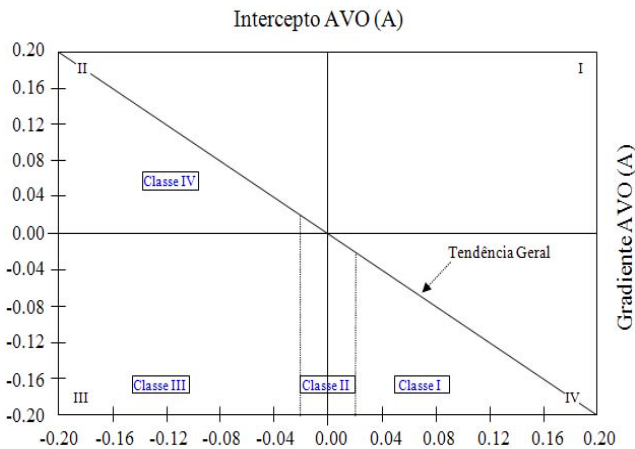
$$Vs_{(água)} = 0,52 Vp_{(água)} + 167,72 . \quad (8)$$

onde **Vp** e **Vs** estão em metros por segundo (m/s).

Classe	Impedância Relativa	Quadrante	A	B	Resposta AVO
I	Maior que a unidade anterior	IV	+	-	Diminui
II	Próxima da unidade anterior	II, III ou IV	+ ou -	-	Aumenta ou diminui
III	Menor que a unidade anterior	III	-	-	Aumenta
IV	Menor que a unidade anterior	IV	-	+	Diminui

A interpretação AVO é facilitada pelo gráfico de dispersão cruzada dos atributos intercepto (**A**) e gradiente (**B**). Rutherford e Williams (1989) definiram três classes distintas de anomalias AVO em arenitos com gás, são elas as classes I, II e III. Castagna et al. (1997) propuseram a classe IV de anomalia AVO. Na Tabela 1 encontra-se o resumo do comportamento AVO para as classes I, II, III e IV e na Figura 1 é mostrada a disposição dessas em gráfico de dispersão cruzada A versus B.

**Tabela 1:** Resumo do comportamento AVO para as várias classes de areia com gás. (fonte: Castagna et al., 1997).

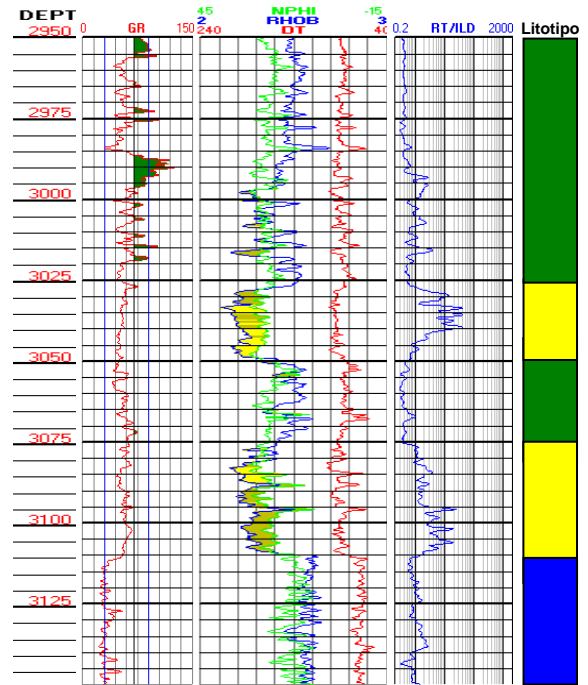


**Figura 1:** Classificação de Rutherford e Williams (1989) para areia com gás modificada por Castagna et al. (1997). Adaptado de Castagna et al. (1997).

**Resultados**

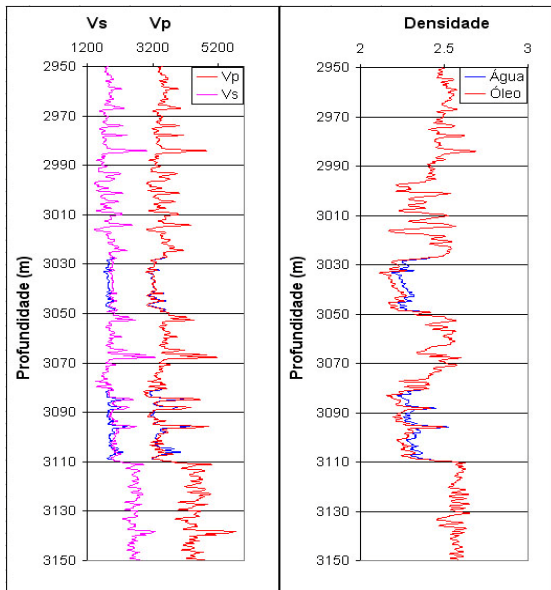
Os principais litotipos presentes no poço foram agrupados em três eletrofácies: 1) *Arenito reservatório*: possuem excelente qualidade de rocha reservatório, como pode ser conferido através do perfil ILD; 2) *Sedimentos Finos*: são inclusos nesses sedimentos folhelhos e margas. Como o folhelho é o sedimento mais comum, ele foi adotado para conduzir a modelagem AVO; 3) *Calcário*: delimita a base do reservatório.

Na Figura 2 são exibidos os perfis GR, RHOB, NPHI, DT e ILD e a interpretação: arenito reservatório, folhelho e calcário, para o poço 3NA04RJ.



**Figura 2:** Interpretação simplificada dos perfis do poço 3NA04RJ. As cores verde, amarela e azul na coluna à direita representam os litotipos folhelho, arenito e calcário, respectivamente.

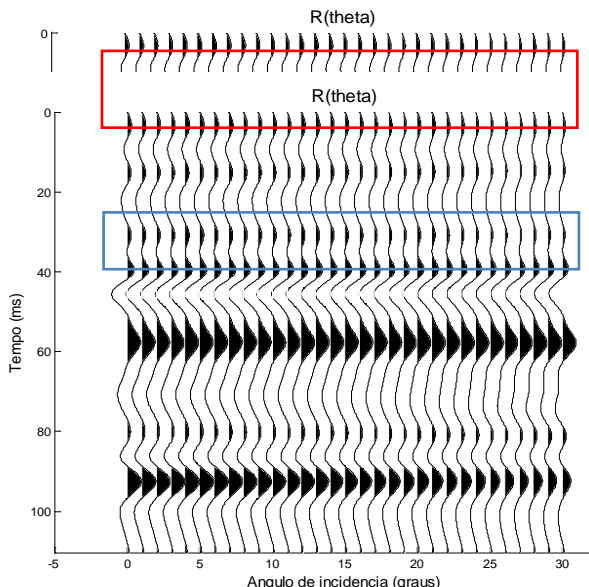
Os resultados obtidos para **Vp**, **Vs** e **ρ** para o arenito saturado em óleo (80%) e para o arenito saturado em água (100%) são mostrados na Figura 3.



**Figura 3:** Propriedades sísmicas da rocha: **Vp** (m/s), **Vs** (m/s) e densidade ( $g/cm^3$ ) em função da profundidade (m) obtidas via substituição de fluídos para água. As flexas indicam os intervalos de arenito saturado com óleo (em vermelho) e arenito saturado com água (em azul).

Os valores obtidos de **Vp** e  $\rho$  para o arenito saturado com água estão de acordo com o esperado, uma vez que substituindo o fluído óleo por água no reservatório aumentam os valores dessas propriedades. Os valores obtidos para **Vs** apresentam uma redução quando o óleo é substituído pela água no arenito. Esse comportamento difere do apresentado por **Vp**, e está bem marcado nos perfis.

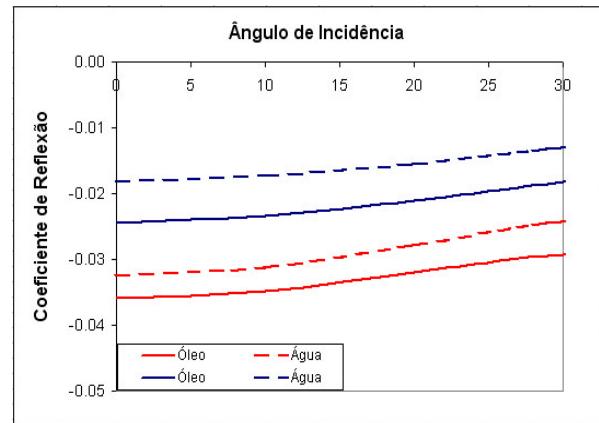
A Figura 4 corresponde à modelagem AVO sintética 2D, para o arenito saturado com água e para o arenito saturado com óleo, gerada com base na aproximação de Aki & Richards (1980). Nos intervalos de tempo de 44 a 60 ms e de 82 a 95 ms, as amplitudes negativas marcam o topo e as amplitudes positivas marcam a base do reservatório. Ao comparar essas amplitudes entre si nas modelagens AVO, observa-se que na modelagem do arenito saturado com óleo estas possuem magnitude maior.



**Figura 4:** Modelagem AVO sintética 2D gerada a partir da aproximação de Aki & Richards (1980). Acima foi considerado intervalos de arenito saturado com água e abaixo foi considerado o arenito saturado com óleo. O retângulo vermelho delimita a zona de óleo e o retângulo azul a zona de transição óleo/água no reservatório.

A análise AVO de ambas as modelagens revelam uma diminuição na magnitude da amplitude com o incremento do ângulo de incidência tanto para a zona de óleo quanto para a zona de transição óleo/água no reservatório.

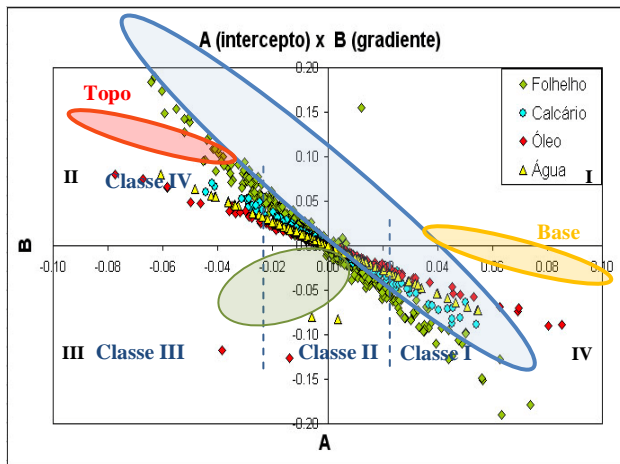
A Figura 5, destaca que a diferença do coeficiente de reflexão para o arenito saturado com óleo e o arenito saturado com água é muito pequena. Isso ocorre porque a diferença dos valores das propriedades sísmicas na água e no óleo são muito sutis. Além disso, o fato da rocha estar consolidada contribui para esse comportamento da onda sísmica. Observa-se ainda que os valores de coeficiente de reflexão encontram-se no intervalo correspondente à classe III e IV de “anomalia AVO” (abaixo de -0.02), definidas por Rutherford e Williams (1989) e modificadas por Castagna et al. (1997). Como o coeficiente de reflexão aumenta com o incremento do ângulo de incidência, a “anomalia AVO” corresponde à classe IV. A análise da modelagem AVO corrobora para essa classificação, uma vez que a magnitude da amplitude diminui com o incremento do ângulo de incidência.



**Figura 5:** Coeficiente de reflexão em função do incremento do ângulo de incidência. Notar que o coeficiente de reflexão aumenta com o incremento do ângulo de incidência. As linhas em vermelho e azul correspondem respectivamente à zona de óleo e de transição óleo/água.

A tendência geral representada no diagrama de dispersão cruzada Intercepto versus Gradiente (Figura 6) corresponde ao folhelho. Além deste litotipo, estão representadas as tendências do calcário e do arenito. A análise desse diagrama foi realizada com base nos desvios dos pontos plotados em relação à tendência geral. Os pontos deslocados abaixo (quadrante II) e acima (quadrante IV) dessa tendência são indicativos, respectivamente de topo e base do reservatório. Os

quatro pontos deslocados abaixo da tendência geral (quadrantes III e IV) indicam mudança litológica. Por esta análise, a presença de hidrocarbonetos foi identificada pela classe IV de “anomalia AVO”, devido aos desvios dos pontos plotados em relação à tendência geral correspondentes ao topo e a base do reservatório.



**Figura 6:** Diagrama de dispersão cruzada com a interpretação dos atributos **A** (Intercepto) x **B** (gradiente). A elipse azul agrupa os pontos correspondentes a tendência geral; as elipses vermelha e amarela agrupam os pontos correspondentes ao topo e a base do reservatório, respectivamente; e a elipse verde agrupa os pontos indicativos de mudança litológica.

## Conclusões

A substituição de óleo por água no arenito reservatório *in situ* provocou alterações nos valores das propriedades sísmicas da rocha. Isto possibilita o estudo do efeito desses dois fluidos na resposta AVO tanto pela modelagem AVO quanto pelo diagrama de dispersão cruzada. Comparando as modelagens para o arenito saturado com óleo e para o arenito saturado com água, foi possível distinguir aquela com óleo presente, devido às amplitudes com valores mais negativos para a zona de óleo.

O estudo da modelagem AVO juntamente com o diagrama de dispersão cruzada aponta para a classe IV de anomalia AVO como indicadora da presença de óleo no arenito reservatório. A modelagem AVO revelou que a magnitude da amplitude diminui com o incremento do ângulo de incidência. Enquanto que o diagrama possibilitou identificar a ocorrência de mudança litológica e a presença de óleo.

Por fim, conclui-se que a modelagem AVO conduzida para o poço 3NA04RJ conseguiu identificar as anomalias devido à presença de óleo no arenito reservatório, possibilitando assim, sua classificação. Por meio deste estudo, percebeu-se a importância de aliar a modelagem AVO com os diagramas de dispersão cruzada, para melhor definir a classe de anomalia AVO,

especialmente por se tratar de dois fluidos, cujo efeito nas propriedades sísmicas é pouco distinto.

## Agradecimentos

Ao apoio financeiro e aos dados cedidos pelo Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Biocombustíveis e Gás Natural (ANP – PRH15)

## Referências

- AKI, K. and RICHARDS P. G. 1980. Quantitative seismology – Theory and Methods. São Francisco: W. H. FREEMAN and CO.
- CASTAGNA, J. P.; SWAN, H. W. 1997. Principles of AVA crossplotting. The Leading Edge, v. 04, p. 337–342.
- LI, Y.; DOWNTON, J., XU, Y. Practical aspects of AVO modeling. The Leading Edge, p. 295-311, 2007.
- RUTHERFORD, S. R.; WILLIAMS, R. H. 1989. Amplitude-versus-offset variations in gas sands: Geophysics, v. 54, p. 680–688.
- VASQUEZ, G.F. 2000. Comportamento Viscoelástico do Arenito Namorado e suas Relações com Atributos Faciológicos. Dissertação de mestrado, UNICAMP, p. 153-154.