



Influência cinemática da anisotropia monoclinica na birrefringência da onda cisalhante devido à substituição de fluidos.

Bruno Henrique de Moura Martins*, Georadar; Fredy Alex Villaorduña Artola, Schlumberger-Mexico; Wilson Mouzer Figueiró, CPGG-IGEO-UFBA; Carlos da Silva Claudino, Georadar.

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th 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 some kinematics behaviors caused by the anisotropy in seismic responses due to the substitution of fluids in fractured porous medium. A comparative analysis of the kinematics response was carried out taking into consideration monoclinic symmetry (generated by two systems of vertical fractures forming an angle different from 90°). The analysis focus on the effects caused by the birefringence related to the propagation of the shear waves in anisotropic medium. Such effects refer to the travel time of those waves that are affected by the sets of characteristic fractures defined by the monoclinic symmetry and by the kind of saturating fluid. The results obtained through the modeling, allowed deducing the special effects caused by the arrangement of fractures for each fluid considered. The most important observation was the sensitivity of the birefringence of the S wave to the substitution of fluids for anisotropic arrangements with oblique symmetry axis. The results showed that the birefringence presents sensitivity to the kind of fluid found in the medium, confirmed by observations of data real seismic reported in the specialized literature.

Resumo

Este trabalho apresenta comportamentos cinemáticos, causados por anisotropia, presentes em respostas sísmicas devido à substituição de fluidos em meios porosos fraturados. Uma análise comparativa da resposta cinemática foi realizada levando-se em consideração a simetria monoclinica (gerada por dois sistemas de fraturas verticais não perpendiculares). O foco da análise está nos efeitos causados pela birrefringência relativa à propagação em ondas cisalhantes em meios anisotrópicos. Tais efeitos se referem ao tempo de trânsito daquelas ondas que são afetadas pelo conjunto de características de fraturas definidas pela simetria monoclinica e pelo tipo de fluido que satura o meio. Os resultados obtidos através da modelagem, revela efeitos especiais causados pelos diferentes arranjos de fraturas para cada fluido considerado. A mais importante observação foi a sensibilidade da birrefringência da onda S à substituição de fluidos para arranjos anisotrópicos com eixo de simetria oblíquo. Tal resultado mostrou que

a birrefringência é sensível ao tipo de fluido encontrado no meio, o que é confirmado pela observação de dados sísmicos reais reportado pela literatura especializada.

Introdução

Levando-se em consideração que na sísmica 4D faz-se necessário que sejam feitos estudos de viabilidade, pode-se aplicar a técnica da modelagem sísmica anisotrópica (*time-lapse*) para afirma-se quanto à viabilidade técnica de um projeto. O objetivo desses estudos é a avaliação das possibilidades de detecção de variações nos atributos sísmicos (velocidades e tempo de trânsito das ondas cisalhantes), no contexto de um reservatório, estabelecendo e discutindo os aspectos mais relevantes na propagação de ondas em meios elasticamente anisotrópicos, como o posicionamento das fraturas, usando ferramentas baseadas na teoria do raio, com ênfase na modelagem das respostas sísmicas de meios que apresentam anisotropia induzida pela presença de sistema de fraturas.

Estudos de viabilidade são realizados utilizando-se as equações clássicas de Gassmann (1951), onde as substituições de fluidos são feitas sob a hipótese de que os meios são porosos e isotrópicos, porém nos meios porosos e anisotrópicos, faz-se necessário novas abordagens para a técnica de substituição de fluidos, principalmente se a anisotropia for induzida por sistemas de fraturas.

A partir das teorias de Thomsen (1995) e Cardona (2003), a técnica moderna de substituição de fluidos em meios porosos e anisotrópicos pode fornecer os mais diferentes resultados nas respostas sísmicas dependendo da influência do tipo de fluido encontrado no meio. O interesse neste trabalho é centralizado nos efeitos cinemáticos provocados pela substituição de fluidos nesses meios afetados por fraturas, onde de acordo com a característica de cada fluido e simetria, pode-se obter resultados interessantes com a ocorrência do fenômeno da birrefringência da onda cisalhante. Foram considerados os efeitos da anisotropia na birrefringência da onda cisalhante em função do mecanismo de substituição de fluidos para: água, óleo médio, e gás, provocadas em relação à variação no tempo de trânsito das ondas $qS1$ e $qS2$.

Metodologia

Utilizou-se um modelo sísmico para geração dos dados, representando um reservatório: sintético, poroso, anisotrópico e homogêneo representado pelas seguintes dimensões geométricas: superfície de observação de 950m x 950m, com seção e profundidade de 1000m.

Considerando-se toda a extensão do reservatório e para uma maior e melhor geração dos dados de aquisições sísmicas (que nos permite avaliar os efeitos causados pelas fraturas que compõem o meio), tornam-se necessárias mudanças na direção da linha de aquisição, onde aplicou-se 5 variações no azimute (Figura 1). Avaliou-se, nos ensaios, os resultados dos efeitos da birrefringência devido à substituição de fluidos para água, óleo médio, e gás em meios com anisotropia monoclínica.

Substituição de fluidos

Considera-se a substituição de fluidos como um dos principais fatores na modelagem dos atributos sísmicos. As primeiras idéias surgiram com os trabalhos de Gassmann (1951) que aplicam a teoria de substituição de fluidos às baixas frequências. Neste trabalho usam-se as teorias de Gassmann (em meios isotrópicos) e as teorias de Thomsen (1995) e Cardona (2003) aplicadas aos meios anisotrópicos. As equações de Gassmann permitem estimar o efeito da saturação dos fluidos sobre o módulo de incompressibilidade da rocha reservatório, procedendo à substituição em meios isotrópicos, através das equações:

$$\kappa_{sat} = \kappa_d + \Delta\kappa_d, \quad (1)$$

$$\Delta\kappa_d = \frac{\kappa_0 \left(1 - \frac{\kappa_d}{\kappa_0}\right)^2}{1 - \phi - \frac{\kappa_d}{\kappa_0} + \phi \frac{\kappa_0}{\kappa_f}}, \quad (2)$$

e

$$\mu_{sat} = \mu_d. \quad (3)$$

Onde κ_{sat} , κ_d , κ_0 , e κ_f são, respectivamente, o módulo de incompressibilidade: da rocha saturada, da rocha seca, da matriz mineral (quartzo), e do fluido que satura a rocha; $\Delta\kappa_d$ é o incremento do módulo de incompressibilidade como resultado da saturação de fluido em uma rocha seca; μ_{sat} , e μ_d são, respectivamente, o módulo de rigidez (ou cisalhante): da rocha saturada e da rocha seca; e ϕ é a porosidade do meio subjacente (*background*). Para utilizar as fórmulas de Gassmann, torna-se necessário o cálculo de alguns parâmetros pertinentes à substituição de fluidos, tais como:

1. Módulo de incompressibilidade da rocha seca:

$$\kappa_d = (1 - D\phi)^2 \cdot \kappa_0 \quad (4)$$

onde D é o fator de correlação entre a porosidade e o módulo de incompressibilidade. Seu valor para arenitos limpos é: 1,523;

2. Densidade da rocha seca, Han & Batzle (2004):

$$\rho_d = 2,65 \cdot (1 - \phi_b); \quad (5)$$

3. Velocidade S empírica para arenitos limpos, de acordo com Han (1986):

$$V_s = 4,05 - 5,85 \cdot \phi; \quad (6)$$

4. Módulo cisalhante da rocha seca:

$$\mu_d = V_s^2 \cdot \rho_d. \quad (7)$$

A teoria de Thomsen e Cardona para substituição considera o equilíbrio de pressão do fluido entre as fraturas hidráulicamente conectadas e os poros não fraturados. Utilizou-se esta teoria para o cálculo dos meios anisotrópicos saturados, calculando as equações que caracterizam o meio efetivo de complacência, dado por:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E_s} + Z_N^S - \frac{v_s}{E_s} - \frac{v_s}{E_s} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_s}{E_s} & \frac{1}{E_s} - \frac{v_s}{E_s} & 0 & 0 \\ -\frac{v_s}{E_s} & -\frac{v_s}{E_s} & \frac{1}{E_s} & 0 \\ & & \frac{1}{\mu} & 0 \\ & & & \frac{1}{\mu} + Z_T^S & 0 \\ & & & & \frac{1}{\mu} + Z_T^S \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde: E_s , v_s , e μ são, da rocha saturada, seu módulo de Young, sua razão de Poisson, e seu módulo cisalhante, respectivamente; e Z_N^S é o elemento de complacência normal de fraturas para meios saturados, dado por:

$$Z_N^S = Z_N^d \left(1 - \frac{\kappa_f}{\kappa_0}\right) \cdot D_{cp}. \quad (9)$$

O elemento de complacência tangencial (ou cisalhante), Z_T^S , de fraturas para meios saturados é dado por:

$$Z_T^S = Z_T^d, \quad (10)$$

onde:

$$Z_T^d = \frac{16}{3} \cdot \frac{1}{\mu_d} \cdot \left(\frac{1 - v_d}{2 - v_d}\right) \eta_c, \quad (11)$$

$$Z_N^d = \frac{16}{3} \cdot \frac{1}{E_d} \cdot (1 - v_d^2) \eta_c, \quad (12)$$

$$D_{CP} = \frac{1}{1 - \frac{\kappa_f}{\kappa_0} + \frac{\kappa_f}{\phi_b + \phi_c} \left(\frac{1}{\kappa_d} - \frac{1}{\kappa_0} + Z_N^d\right)}, \quad (13)$$

sendo D_{CP} o fator de influência do fluido; Z_N^d e Z_T^d são, respectivamente, os elementos de complacência normal

e cisalhante de fraturas do meio seco; η_c é a densidade de fraturas; e ϕ_b e ϕ_c são, respectivamente, as porosidades do meio subjacente e de fraturas. Segundo Nichols et al. (1989) calculando-se a inversa da matriz (8) obtém-se a matriz de rigidez efetiva do meio saturado.

Dados utilizados nos ensaios

De acordo com Bruno et al. (2007), alguns parâmetros foram seguidos para desenvolvimento deste trabalho, como: densidade de fraturas = 0,05; porosidade de fraturas = 1% e 3%; porosidade do *background* = 15%; módulo de incompressibilidade da matriz mineral = 36,5 GPa; módulos de incompressibilidade de densidades usuais da água, óleo médio e gás.

Modelagem

Para a modelagem dos dados sísmicos em meios isotrópicos e anisotrópicos e cálculo dos dados sintéticos de tempos de trânsito das ondas, utilizou-se o *software* Anray (2002), programa baseado na teoria do raio. A utilização do Anray nos fornece os tempos de trânsito para a propagação das ondas cisalhantes qS1 e qS2, onde através destes tempos pode-se elaborar os gráficos relacionando o índice de variação temporal, ΔT , com a razão *offset*/profundidade (1000 m), sendo que nos experimentos realizados a profundidade é mantida constante em 1000 m, pois são consideradas apenas as reflexões ocorridas na base do reservatório. Temos que ΔT é expresso pela seguinte relação:

$$\Delta T = \frac{TqS_1 - TqS_2}{TqS_1}, \quad (14)$$

onde TqS1 e TqS2, são, respectivamente, os tempos de trânsitos da onda cisalhante lenta e da rápida.

Resultados

Os resultados apresentados foram obtidos a partir da modelagem dos efeitos cinemáticos induzidos pela substituição de fluidos em meios porosos e anisotrópicos, sendo a birrefringência da onda cisalhante o objetivo principal deste estudo. Os gráficos mostram a relação do índice de variação de tempo em função da razão *offset*/profundidade (1000m). A partir desses gráficos pode-se perceber os efeitos causados pelas fraturas características de cada meio e pela substituição de fluidos.

O modelo monoclinico utilizado é baseado a partir do ortorrômbico, mostrado em Bruno et al. (2007), com rotação de 75° ao redor do eixo Z do sistema de fraturas com densidade 0,05. Mediante este procedimento obtemos o modelo com dois sistemas de fraturas formando um ângulo entre si de 15°. Devido ao ângulo ser relativamente pequeno, a sensibilidade do índice de variação com a razão *offset*/profundidade maior que 0,3, é também pequena na direção do azimute paralelo ao sistema de fraturas de maior densidade. Esta sensibilidade diminui até se tornar nula quando a direção

do azimute é ortogonal à direção do sistema de fraturas de maior densidade, isto é bem demonstrado nas Figuras 2 a 6. Nesta simetria as curvas apresentam as mesmas tendências quando se modifica o azimute, conforme Figuras acima citadas. A diferença no índice de variação de tempo entre os fluidos se mostrou um pouco menor, comparando-se com a simetria HTI, Bruno et al. (2007), onde as curvas dos fluidos apresentam tendências mais próximas.

A Figura 2 mostra que os valores estão muito próximos, fazendo com que as curvas apresentem uma menor dispersão. A simetria monoclinica, apesar de ser constituída por dois conjuntos de fraturas que se cruzam formando um ângulo de 15°, necessita novas análises para comprovação dos reais efeitos da substituição de fluidos e influência do módulo de incompressibilidade dos fluidos em meios anisotrópicos, considerando as curvas de avaliação para o índice de variação x *offset*/profundidade.

Conclusões

Na simetria monoclinica, como também apresentado em Bruno et al. (2007) para os casos das simetrias HTI e ortorrômbica, os valores iniciais do índice de variação partem do mesmo ponto, isto é: a birrefringência da onda cisalhante é insensível aos tipos de fluidos para valores relativamente pequenos (0,0 a 0,3) da razão *offset*/profundidade. Pode-se atribuir este fato devido a birrefringência da onda S, nessas simetrias, não depender da complacência normal de fraturas, mas somente da complacência cisalhante.

Para o modelo monoclinico estudado, onde os sistemas de fraturas se cruzam formando um ângulo de 15°, nota-se uma fraca sensibilidade do índice de variação ao tipo de fluido, isso se deve ao pequeno ângulo estudado e espera-se que para maiores ângulos entre as fraturas esta sensibilidade apresente resultados mais relevantes.

Com os resultados apresentados, pode-se concluir que este trabalho tem importância para a indústria, por fornecer informações úteis à detecção do posicionamento de fraturas, assim como dos tipos de fluidos presentes nos reservatórios.

Agradecimentos

Agradecemos ao CPGG-UFBA e à CAPES pelo apoio financeiro.

Referências

- Anray; 2002. Ray trace seismic modeling software. Version 3.02, SW3D Consortium, CD-ROM, Charles University, Prague.
- Martins, B.H.M.; Villaorduña Artola, F.A.; Figueiró, W.M. & Claudino, C.S.; 2007. Efeitos na birrefringência da onda cisalhante devido à substituição de fluidos em meios anisotrópicos. 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil.
- Cardona, R.; 2003. Two theories for fluid substitution in porous rock with aligned cracks. CWP-370 Report, CSM.

Gassmann, F.; 1951. Über die Elastizität Poroser Medien. Vier. Der Natur. Gesellschaft, 96, 1–23.

Han, D.; 1986. Effects of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments. PhD Tesis, Stanford University.

Han, D. & Batzle, M.; 2004. Gassmann's equation and fluid-saturation effects on seismic velocities. Geophysics, 69(2): 398-405.

Nichols, D.; Muir, F. & Schoenberg, M.; 1989. Elastic properties of rocks with multiple sets of fractures. In: Expanded Abstract, 59th Annual International Meeting, SEG.

Thomsen, L.; 1995. Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock. Geophysics Prospecting.

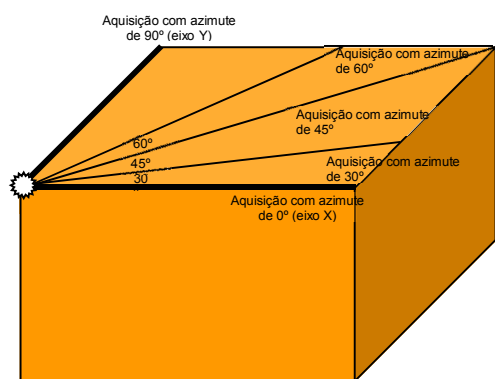


Figura 1: Esquema do modelo de aquisição para azimutes de 0°, 30°, 45°, 60° e 90°.

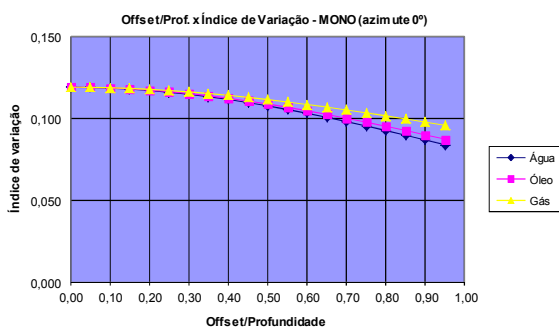


Figura 2. Efeitos da substituição de fluidos na birrefringência. Simetria monoclinica. Azimute de 0°

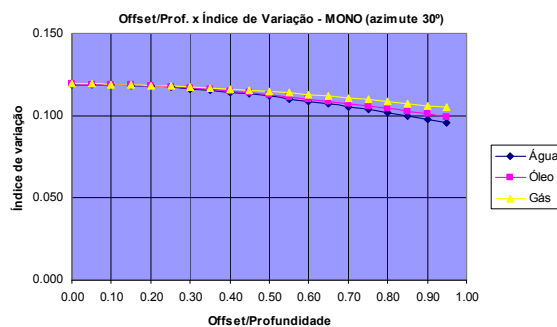


Figura 3: Efeitos da substituição de fluidos na birrefringência. Simetria monoclinica. Azimute de 30°.

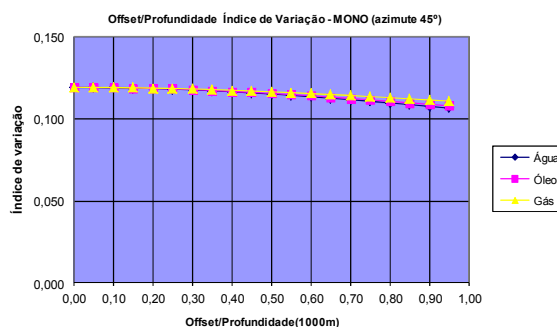


Figura 4: Efeitos da substituição de fluidos na birrefringência. Simetria monoclinica. Azimute de 45°.

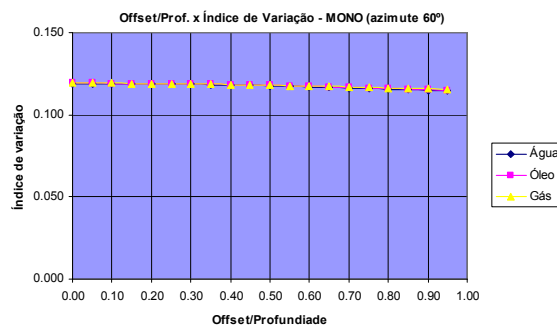


Figura 5: Efeitos da substituição de fluidos na birrefringência. Simetria monoclinica. Azimute de 60°.

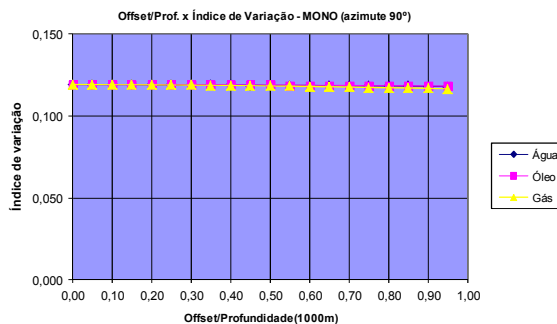


Figura 6: Efeitos da substituição de fluidos sobre a birrefringência. Simetria monoclinica. Azimute de 90°