



Verificação experimental do modelo efetivo de Hudson/Liu para meios fortemente fraturados

Leo K. Santos (Faculdade de Geofísica-UFPA & José J. S. de Figueiredo (Faculdade de Geofísica-UFPA e INCT-GP)

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation during the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15th 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

The knowledge about properties of subsurface, including cracking characteristics, are extremely important in the context of seismic exploration of anisotropic reservoir. One way of studying the waves behavior for different geological contexts is through the use of effective medium theories. A large number of effective theories have been proposed to study the influence of the geological medium by seismic wave investigation. These models, however, need a calibration in order to define their limitations. This process can be performed through physical modelling. This present work was done an attempt to calibrate a theoretical model (heavily fractured model from Hudson/Liu) simulating a medium containing crack planes. For this to be done, eight physical synthetic fractured sandstones were built. The anisotropic Thomsen parameter γ were estimated through ultrasonic procedure. The results show that the theoretical model for low crack density has a good fit with experimental values of S-wave velocities as well as γ parameter for crack densities up to 8%.

Introduction

O conhecimento das propriedades físicas, petrofísicas e geométricas de rochas, fraturas e fissuras em subsuperfície é muito importante na geofísica de exploração, sobretudo no processo de exploração de hidrocarbonetos. Por exemplo, em certos reservatórios, a produção de hidrocarbonetos é estritamente controlada por fissuras ou planos de fraturas. Nesses casos, faz-se extremamente necessário o conhecimento das características do fissuramento que existe nessas regiões antes do processo de perfuração. Desta forma, ondas sísmicas elásticas podem ser usadas como ferramentas que fornece informações sobre a subsuperfície, incluindo informações sobre densidade de fissura e razão de aspecto. Devido a necessidade de se entender melhor os reservatórios fraturados, investigações relacionadas a meios anisotrópicos têm recebido cada vez mais atenção por parte da indústria petrolífera

O estudo da influência de diferentes propriedades de subsuperfície no comportamento das ondas sísmicas é o processo chamado de modelagem sísmica. Este procedimento serve, por exemplo, para se fazer

comparações com dados reais e para se testar novos filtros e metodologias para melhora da qualidade do dado sísmico. Uma maneira de se realizar a modelagem sísmica é utilizando modelagem numérica, processo no qual se modela uma resposta sísmica a partir da propagação de ondas com a utilização de algum método numérico ou a partir de traçamento de raios. A modelagem numérica pressupõe um modelo geológico vinculado a premissas mais básicas sobre o tipo de propagação de ondas. Neste caso, pode-se trabalhar com modelos para meios acústicos, elásticos, viscoelásticos, poroelásticos e até mesmo sismo-elétricos (Carcione et al., 2002; Nakagawa and Schoenberg, 2007; Schakel et al., 2011; Vavryuk, 2008). Além disso, deve-se fornecer dados numéricos sobre os parâmetros que conFiguram o meio de acordo com o modelo escolhido, de modo que ao final o modelo seja o mais realista possível.

Outra forma de se analisar de que forma fraturas e suas propriedades afetam a propagação da onda sísmica é a partir da utilização de modelos teóricos, chamados também de teorias de meios efetivos. (Hudson, 1981) propôs uma das mais usadas teorias de meios efetivos, a qual prediz o comportamento da onda para meios contendo fissuras em formato "Penny-Shape", com a limitação de ser válida apenas para meios com baixa concentração de fissuras e baixas razões de aspecto. (Nishizawa, 1982) propôs um modelo para o comportamento de ondas sísmicas em um meio anisotrópico livre de restrições quanto a densidade de fissura e razão de aspecto. Um ponto importante sobre as teorias de meios efetivos é que elas requerem medidas em laboratório para que sejam calibradas. Isso é feito para que se encontrem possíveis limitações nos modelos ou mesmo para que se estenda o modelo para outras situações geológicas. Uma maneira de se realizar esta calibração é a partir da utilização de modelagem física. Este processo consiste na reprodução em escala reduzida de uma dada situação geológica, com parâmetros geológicas controlados, como quantidade de fissuras, espessura das fissuras, etc. A partir da análise das propriedades deste modelo, como velocidade e parâmetros anisotrópicos, estimadas a através de medidas sísmicas ultrassônicas, faz-se a comparação com as propriedades calculadas a partir de um dado modelo teórico.

Neste trabalho busca-se testar os resultados do modelo I proposto por Hudson and Liu, 1999, que simula o comportamento da onda sísmica para meios com planos de fissuras paralelos e baixa densidade de fissura. Este teste é feito a partir da comparação de resultados do modelo teórico com resultados encontrados a partir de medidas ultrassônicas em amostras fissuradas sintéticas. É analisada a influência da densidade de fissura e da razão entre o raio médio das fissuras existentes e o espaçamento

de cada plano de fissura no parâmetro de Thomsen γ , na componente do tensor de rigidez C_{44} e na velocidade da onda S_2 . Além disso, tenta-se definir para quais situações o modelo teórico prevê o comportamento da onda sísmica.

Modelo teórico de Hudson/Liu

O modelo de meio efetivo proposto por Hudson and Liu (1999) descreve o comportamento da onda sísmica em um meio altamente fraturado. Eles propuseram uma teoria descrevendo o comportamento efetivo de rochas fraturadas contendo um conjunto de fissuras paralelas. Estas falhas são modeladas matematicamente de duas formas distintas: o modelo 1 é descrito como uma distribuição planar de fissuras circulares (Figura 1a), enquanto o modelo 2 é representado por uma distribuição planar de contatos (Figura 1b). Além disso, o modelo proposto ainda pressupõe a substituição dos modelos 1 e 2 por uma camada equivalente, de abertura constante (Figura 1c). A Figura 1 mostra os modelos proposto por Hudson and Liu (1999) para representar efetivamente meios fissurados/fraturados.

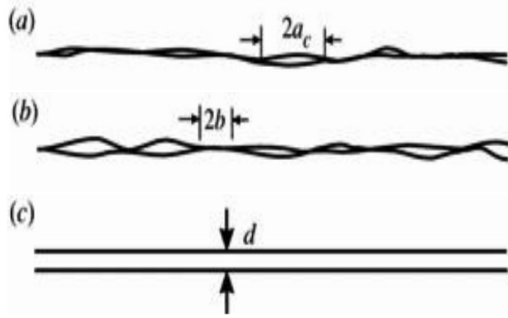


Figure 1: Esboço ilustrativo dos modelos teóricos propostos por Hudson and Liu, 1999

No presente trabalho é analisado o modelo 1, que representa o comportamento de uma onda sísmica para um meio fracamente fissurado. No caso deste modelo efetivo, a densidade de fissura é controlada pela número de fissuras que compõem cada camada, pela razão de aspecto das fissuras e pelo número de camadas existentes. O modelo teórico prevê o comportamento da onda sísmica a partir do cálculo dos coeficientes do tensor de rigidez. Estes componentes são dadas por:

$$C_{11} = C_{22} = \lambda + 2\mu,$$

$$C_{33} = (\lambda + 2\mu)/(1 + E_N),$$

$$C_{13} = C_{23} = \lambda/(1 + E_N),$$

$$C_{44} = C_{55} = \mu/(1 + E_T),$$

$$C_{12} = \lambda,$$

$$C_{66} = \mu,$$

onde os termos E_N e E_T são dados por:

$$E_N = \left(\frac{v^s a^3}{H} \right) \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\mu} \right) U_{33} \left\{ 1 + (v^s a^2)^{3/2} U_{33} \pi (1 - \beta^2 / \alpha^2) \right\}, \quad (1)$$

e

$$E_T = \left(\frac{v^s a^3}{H} \right) U_{11} \left\{ 1 + ((v^s a^2)^{3/2} U_{11} \frac{\pi}{4} (3 - 2\beta^2 \alpha^2)) \right\}, \quad (2)$$

onde a é o raio das fissuras, v^s é o número de densidade de fissura em cada plano, H é o espaçamento entre cada plano, e μ e λ são os parâmetros de Lamè para a matriz isotrópica. A densidade de fissura geral é dada por $\varepsilon = v a^3 = v^2 a^3 / H$ e a área relativa de fissuramento é $r = v^s \pi a^2$.

Para rochas secas, ou seja, fissuras preenchidas por ar, os valores U_{11} e U_{33} são dados por:

$$U_{11} = \frac{16}{3} \left(\frac{\lambda + 2\mu}{3\lambda + 4\mu} \right), \quad (3)$$

e

$$U_{33} = \frac{4}{3} \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \right). \quad (4)$$

Procedimento Experimental

Todo o procedimento experimental realizado para este trabalho, desde a confecção das amostras sintéticas, até as medidas ultrassônicas, foi realizado no laboratório Om Prakash Verma, na Universidade Federal do Pará. Os procedimentos descritos a seguir correspondem a produção de arenitos fissurados.

Preparação das amostras sintéticas

O objetivo da modelagem física realizada neste trabalho foi reproduzir arenitos sintéticos apresentando planos de fissura com diferentes geometrias. As amostras foram feitas simulando arenitos e foram produzidas utilizando-se cimento e areia, com proporções pré-definidas de 65% para a areia e 35% para o cimento. Para uma boa seleção dos grãos, a areia foi peneirada antes de ser misturada ao cimento. Esta mistura entre cimento e areia, quando acrescida de água, dá origem à matriz isotrópica das amostras. O processo de produção de fissuras, por sua vez, foi realizada baseado no trabalho de Santos et al (2017), no qual é utilizado pequenos discos de material A como base para a reprodução de fissuras no formato "Penny-Shaped".

Ao todo foram confeccionadas sete amostras, sendo seis delas fissuradas e uma isotrópica (sem fissura). Cada amostra fissurada possui diferentes características, tanto no diâmetro de cada fissura, quanto na quantidade delas. Isso resulta em amostras sintéticas com diferentes densidades de fissura. As características das fissuras em cada modelo confeccionado neste trabalho estão indicadas na tabela 1. Nela, o termo indicado pela letra h representa o espaçamento entre os planos de fissuras nos modelos. Este valor é fixo para todos e igual a 5 milímetros.

Procedimento de aquisição de ondas sísmicas

As medidas ultrassônicas tiveram por objetivo estimar as velocidades de ondas S para todas as amostras fissuradas

Table 1: Informações sobre o fissuramento de cada modelo

Amostra	Fissuras por camada	Diâmetro das fissuras (cm)	Razão $\frac{\text{raio}}{h}$
hd-1	24	0.6	0,6
hd-2	12	0.6	0,6
hd-3	4	0.6	0,6
hd-4	9	0.3	0,3
hd-5	20	0.3	0,3
hd-6	6	0.3	0,3
Iso	-	-	-

Table 2: Valores estimados de velocidade e parâmetro anisotrópico γ para cada modelo

Amostra	V_{S1} (m/s)	V_{S2} (m/s)	γ %
hd-1	1870	1611	17,2
hd-2	1853	1686	10,3
hd-3	1878	1786	5,22
hd-4	1840	1796	2,46
hd-5	1865	1736	7,66
hd-6	1829	1792	2,09
Iso	1866	1866	0

produzidas. A estimativa de velocidade das ondas foi realizada a partir do processo de transmissão utilizando transdutores ultrassônicos, um amplificador de sinais e um condicionador de sinais (Figura 2). A velocidade para cada tipo de onda foi estimada a partir do tempo de trânsito entre dois transdutores, um agindo como a fonte e outro como receptor, dispostos em diferentes sentidos dos modelos cúbicos. As velocidades foram medidas na direção longitudinal X das amostras, com taxa de amostra de $10\mu s$. O processo de transmissão foi realizado utilizando-se um transdutor de onda S com frequência pico de 500 KHz. O transdutor tem um atraso intrínscio na chegada das ondas que é retirado quando se estima o tempo de trânsito.

Além da velocidade de onda S dos modelos sintéticos, foi também estimado para cada um o parâmetro de Thomsen γ . Este parâmetro descreve a influência do meio fissurado na propagação de onda S (Thomsen, 1986) e é relacionado às velocidades dos dois modos de vibração da onda S, S_1 e S_2 . Neste trabalho calcularemos o parâmetro γ a partir da seguinte equação:

$$\gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{S1}^2}{V_{S2}^2} - 1 \right), \quad (5)$$

onde $C_{66} = \rho V_{S1}^2$, $C_{44} = \rho V_{S2}^2$ são os coeficientes elásticos associados a onda S em um meio anisotrópico, ρ é a densidade do meio, e V_{S1} e V_{S2} são as velocidades dos dois modos de vibração da onda S.

Reescrevendo a equação 5 em função dos tempos de trânsito associados aos dois modos de vibração (t_{S1} e t_{S2}), obtemos:

$$\gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{t_{S2}}{t_{S1}} - 1 \right). \quad (6)$$

As velocidades de ondas S_1 e S_2 e o parâmetro γ estimados para cada modelo são mostradas na tabela 2.

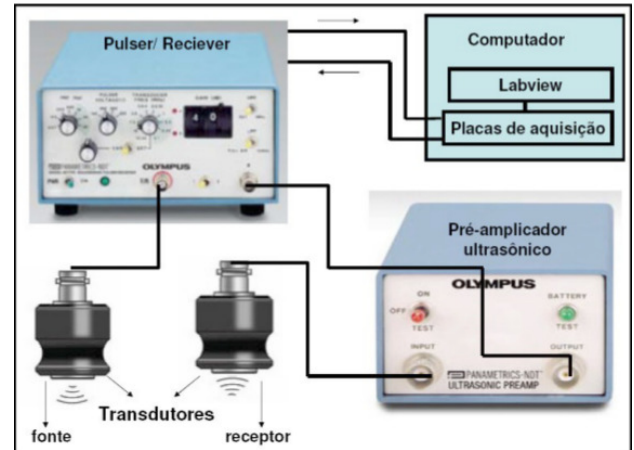


Figure 2: Aparato ultrassônico utilizado nos experimentos do LPFR.

Resultados

Nesta seção, falaremos apenas dos resultados relacionado a propagação da onda S. A Figura 3 representa a variação da velocidade de onda S_2 em função da densidade de fissura das amostras para em que a razão entre o raio médio das fissuras e o espaçamento entre os planos de fissuras é igual a 0,3. A reta contínua azul representa as velocidades calculadas utilizando-se o modelo teórico e pontos vermelhos representam o valor de velocidade estimado para cada modelo. A Figura mostra um ajuste relativamente bom para as densidades de fissuras maiores, porém, para o menor valor de densidade de fissura, o ajuste não é satisfatório.

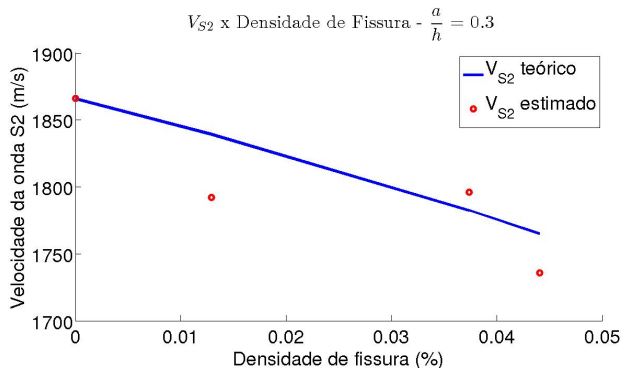


Figure 3: Comparação entre as velocidades de onda S_2 calculada a partir do modelo teórico e a estimada a partir das amostras sintéticas para o caso em que a razão entre raio da fissura e espaçamento entre as camadas é 0.3

Por sua vez, a análise da Figura 4 mostra que a curva de velocidade calculada a partir do modelo teórico tem um excelente ajuste para as velocidades referentes as densidades de fissura de 3,8% e 7,7%. Quando a densidade de fissura atinge o valor de 19,6% o valor de velocidade estimado pela teoria diverge bastante daquele estimado a partir da amostra sintética.

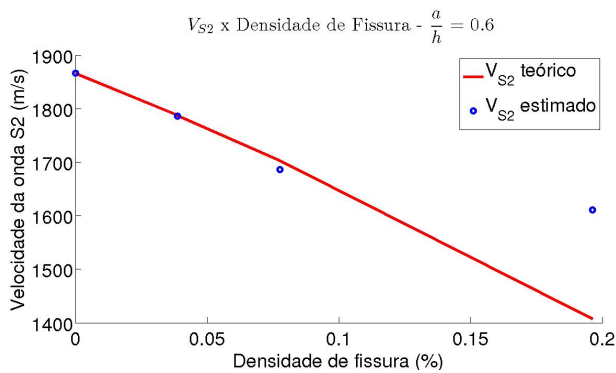


Figure 4: Comparação entre as velocidades de onda S_2 calculada a partir do modelo teórico e a estimada a partir das amostras sintéticas para o caso em que a razão entre raio da fissura e espaçamento entre as camadas é 0.6

Na Figura 5 vê-se um ajuste razoável entre o γ calculado e o estimado. Para o menor valor de densidade de fissura (2%) é visível um bom ajuste, enquanto que para os valores com densidades um pouco maiores o ajuste se distancia um pouco do excelente, mas ainda assim são muito bons.

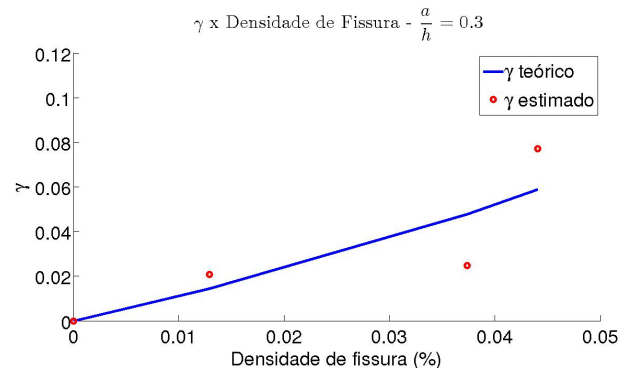


Figure 5: Comparação entre o parâmetro γ calculado a partir do modelo teórico e o estimado a partir das amostras sintéticas para o caso em que a razão entre raio da fissura e espaçamento entre as camadas é 0.3

Assim como na curva de velocidade, a Figura 6 mostra um excelente ajuste entre o parâmetro γ calculado pelo modelo e o estimado pelas amostras sintéticas para os valores de densidade de fissura até 7,7%. Para o valor de 19,6% o ajuste não é satisfatório.

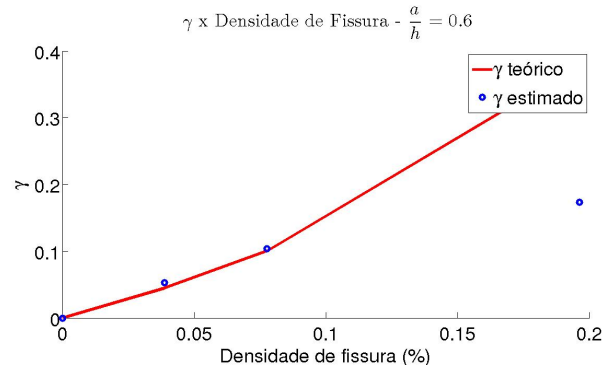


Figure 6: Comparação entre o parâmetro γ calculado a partir do modelo teórico e o estimado a partir das amostras sintéticas para o caso em que a razão entre raio da fissura e espaçamento entre as camadas é 0.6

Conclusões

A análise dos resultados, representados pelos gráficos mostrados nas Figuras 3 a 6, forneceu um boa previsão quanto a utilização do modelo teórico para meios apresentando planos de fissuras paralelos. Foi visível que, para o caso em que a razão entre o raio das fissuras e o espaçamento entre os planos é igual a 0,6, o ajuste se dá de forma quase perfeita quando as densidades de fissura indo até 7,7%, tanto para a velocidade de onda S_2 quanto para γ . No entanto, para o valor de densidade de fissura igual a 19,6% o ajuste é muito ruim. Esse comportamento faz sentido considerando que o modelo teórico estudado é válido para meios com baixa densidade de fissura. Essa análise nos leva a crer que o valor limite de densidade de fissura para o qual este modelo fornece um valor confiável

de velocidade de onda S_2 e γ se dá em algum ponto entre os valores 7,7% e 19,6% de densidade de fissura. Para o caso em que a razão entre o raio das fissuras e o espaçamento entre os planos é igual a 0,3, o ajuste da velocidade e do γ calculados em relação aos valores estimados se deram também de forma satisfatória. Como os valores de densidade de fissura para esta situação não foram grandes, não foi possível se definir um possível valor limite para o qual o ajuste é satisfatório.

Portanto, conclui-se que:

- 1) para uma razão entre raio das fissuras e espaçamento entre os planos igual a 0,6, o modelo teórico prediz de uma forma extremamente confiável os valores de velocidade de onda S_2 e γ para densidades de fissura até 7,7%;
- 2) para o caso em que a razão é 0,3 o ajuste se dá também de forma confiável, apesar de não ter sido possível definir-se o valor limite em que a este ajuste é satisfatório.

Agradecimentos

The authors would like to thank CAPES, INCT-GP and CNPq (Grant No.: 4590653/2014-6 and Grant No.: CNPQ 140174/2016-8) from Brazil and the graduate program at Federal University of Pará for the financial support in this research.

Referências

- Carcione, J. M., Herman, G. C., and ten Kroode, A. P. E., 2002, Seismic modeling: Geophysics, Vol. 67, No. 4, p1304-1325.
- Hudson, J. A., 1981, Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks. : Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, Vol. 1, No. 1, p133-150.
- Hudson, J. A. and Liu, E., 1999, Effective elastic properties of heavily faulted structures: Geophysics, Vol. 64, No. 2, p479.
- Nakagawa, S. and Schoenberg, M. A., 2007, Poroelastic modeling of seismic boundary conditions across a fracture: Journal of the Acoustical Society of America, vol.39, p831-847.
- Nishizawa, O., 1982, Seismic velocity anisotropy in a medium containing oriented cracks? transversely isotropic case: Journal of Physical Earth, Vol. 30, p331-347.
- Schakel, M. D., Smeulders, D. M. J., Slob, E. C., and Heller, H. K. J., 2011, Seismoelectric interface response: Experimental results and forward model: Geophysics, vol.76, No.4, p N29-N36.
- Vavryuk, V., 2008, Real ray tracing in anisotropic viscoelastic media: Geophysical Journal International, Vol. 175, p617-626.