



Será a anisotropia superposta?

Leo Kirchhof Santos^a, Jessica P. Henriques^a, Jose J. S. de Figueiredo^{a,b}, Crislene Silva^a and Icaro Coutinho^a.

^aUFPA, Faculdade de Geofísica, Laboratório de Petrofísica e Física das Rochas—Dr. Om Prakash Verma, Belém, PA, Brasil.

^bInstituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Geofísica do Petróleo (INCT-GP), Brazil

Copyright 2016, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Ouro Preto, 25 a 27 de outubro de 2016. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

Downscaled laboratory experiments for physical modeling of cracked/fractured media have worked as a great alternative for understanding the effect of anisotropy in hydrocarbon reservoirs and in the crustal and mantle seismology. The main goal of this work was to experimentally verify the behavior of S-wave in a synthetic rock with four regions, each region having different crack densities (1.6%, 2.6%, 4.0% and 4.5%). The fractures of this sample were simulated by penny-shaped rubber inclusions in a homogeneous isotropic matrix made with cement. For this proposal, we carried out S-wave ultrasonic measurements in each region of the sample and in the direction that comprises all the regions. It was observed that the γ parameter for the four region comprised correspond to the summation of the γ parameter for the four regions isolated.

Introdução

Devido à complexidade existente nas rochas anisotrópicas, tanto na subsuperfície quanto no manto e na crosta superior, modelos de aproximação numéricas e físicas vêm sendo usados como uma importante ferramenta para entender fenômenos anisotrópicos nestas formações [Crampin, 1984a; Shearer, 1988; Crampin, 1986b]. Porém, na maioria das vezes, modelos numéricos mostram problemas de dispersões numéricas em modelos de fissuras e fraturas [Coates and Schoenberg, 1995; Zhang, 2005]. O que usualmente é feito é a troca das fissuras e fraturas por um meio efetivo que os efeitos destas fraturas individuais não podem ser estudados [Saenger and Shapiro, 2002]. Usando modelagem física o resultado não possui ambiguidade numérica, desde que as fissuras e fraturas possam ser simuladas fisicamente por materiais que tem modulo de cisalhamento muito baixo (ex: discos de borrachas ou espaços vazios) com diferentes características físicas [Assad et al. 1992, 1996, 2005; Rathore et al., 1995; Tillotson et al., 2011; Stewart et al., 2013].

Modelagem anisotrópica através de experimentos físicos em escala reduzida é uma alternativa pra entender melhor como um meio fraturado se comporta quando uma onda elástica se propaga nele. Esta alternativa é aceita porque

no laboratório as condições de medidas são semelhantes as presentes no campo [De Figueiredo et al., 2013]. Muitos trabalhos recentes enfatizam a importância da modelagem física para meios anisotrópicos na geofísica de exploração. Assad et al. [1992, 1996] construiu amostras anisotrópicas feitas com inclusões de borracha no formato de discos com diferentes densidades de fissuras e o parâmetro de Thomsen (γ), previsto pelo modelo de meio efetivo de Hudson [1981], é valido para meios fraturadas com densidade de fissura menor que 7%. Baseados a mesma metodologia desenvolvida por Assad et al [1992] para construir amostras anisotrópicas, De Figueiredo et al. [2012] e Santos et al. [2015] construíram amostras anisotrópicas com fissuras em formato de tiras posicionadas em diferentes orientações. Eles mostraram a importância da birrefringência da onda S para estimar a orientação preferencial de fissuras em um meio com diferentes orientações.

Rathore et al [1995] desenvolveu um modelo físico notável. Usando medidas de onda P e S em amostras anisotrópicas sem saturação feitas com fissuras elipsoidais em uma matriz feita de areia e epóxi, eles testaram, experimentalmente, os modelos de meios fissurados propostos por Hudson [1980,1981] e Thomsen [1995]. A metodologia desenvolvida por Rathore et al. [1995] para construir amostras anisotrópicas foi usada por outros autores [Tillotson et al., 2012, 2013; Amalokwu, et al., 2015] para validar outras teorias ou investigar diferentes fenômenos relacionados a propagação de ondas elásticas em meios fraturados. Vale ressaltar que em todos estes trabalhos é garantido que o tamanho da onda é bem maior que as dimensões individuais das fissuras e da separação entre elas, o que é a base para qualquer teoria de meio efetivo.

Para este trabalho, nós construímos uma amostra retangular com quatro regiões com diferentes densidades de fissura (1,5%, 3%, 4,5% e 6%). As inclusões foram simuladas fisicamente com discos de borracha. Efetuamos medidas ultrassônicas nas quatro regiões individualmente e na amostra por inteiro com o intuito de encontrar uma relação entre os parâmetros anisotrópicos de cada região e da amostra inteira. Nossas comparações foram realizadas em termos do parâmetro γ .

Procedimento experimental

A construção da amostra, assim como as medidas ultrassônicas, ocorreu no Laboratório de Petrofísica e Física de Rochas - Dr.Om Prakash Verma (LPRP), na Universidade Federal do Pará, Brasil. Em condições controladas, uma amostra com matriz isotrópica com

inclusões de borracha em formato de discos foi construída (**Figura 1**).

Em uma peça retangular de vidro que serviu como molde para a amostra sintética, cujas dimensões são 20cm x 6cm x 4cm, a mistura que produziu a matriz isotrópica, formada por uma mistura de água e cimento, foi despejada camada por camada. A cada camada de matriz despejada no molde, uma camada de fissuras foi colocada de forma alinhada em cada uma das quatro regiões, denominadas R1, R2, R3 e R4. A quantidade de inclusões dispostas em cada camada em cada uma das regiões foi, respectivamente, 7, 13, 20 e 27. Esse procedimento foi repetido até que a amostra tivesse seis camadas no total, sendo cinco delas com inclusões. Essa diferença do número de inclusões por região definiu a diferença de densidade de fissuras entre cada uma delas, a qual foi definida a partir da seguinte definição:

$$e_c = \frac{N\pi r^2 h_l}{V}, \quad (1)$$

onde N é o número total de inclusões, r é o raio das inclusões, h_l é a espessura das inclusões (abertura da fissura) e V é o volume da região fissurada. A densidade de fissura em cada uma das quatro regiões é, respectivamente, 1,6%, 2,6%, 4% e 4,5%

Nós realizamos as medidas ultrassônicas utilizando o *Ultrasonic Research System* com a técnica de transmissão de pulso. A taxa de amostragem para as medidas em cada uma das quatro regiões foi de 0,1 μ s e 0,2 μ s para a direção que engloba as quatro regiões. As medidas foram realizadas utilizando transdutores de onda S com frequência de 1MHz. Esses transdutores possuem um atraso intrínseco (Δt_{delay}) de 0,14 μ s que foi levado em consideração quando ocorreu a estimativa da velocidade da onda S, tanto para a rápida (V_{s1}):

$$V_{s1} = \frac{L_s}{t_{s1} - \Delta t_{delay}}, \quad (2)$$

quando para a lenta (V_{s2}):

$$V_{s2} = \frac{L_s}{t_{s2} - \Delta t_{delay}}, \quad (3)$$

onde L_s é a dimensão na qual a medida esta sendo feita e t_s é o tempo de chegada da onda.

O parâmetro γ foi definido a partir da definição de Thomsen [1984]:

$$\gamma = \frac{V_{s1}^2 - V_{s2}^2}{2V_{s2}^2}. \quad (4)$$

As medidas ultrassônicas de onda S foram realizadas na direção X (**Figura 1-d**) de cada uma das quatro regiões, e na direção Y (**Figura 1-c**), que engloba todas as regiões presentes na amostra. Na direção Y, com o objetivo de testar a reciprocidade das velocidades e do parâmetro γ na amostra, a medida foi feita primeiramente na direção R1-R4 e depois na direção R4-R1.

Tabela 1. Informações sobre a amostra.

Regiões	e_c (%)	V_{s1} (m/s)	V_{s2} (m/s)	γ (%)
R1	1,60	2676,43	2616,68	2,31
R2	2,6	2779,32	2656,82	4,72
R3	4	2711,9	2553,76	6,38
R4	4,5	2793,18	2559,35	9,55
Amostra (direção R1-->R4)	12.7	2472,36	2044,68	23,10
Amostra (direção R4-->R1)	12.7	2469,92	2044,26	22,99

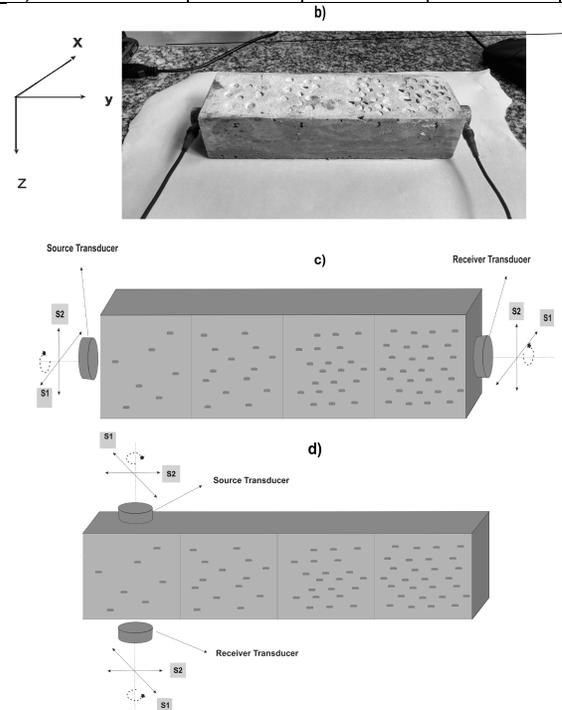


Figura 1. Imagem (a) da amostra real sendo construída e (b) do diagrama esquemático para medidas em y e (c) do esquete para medidas em z.

Resultados e discussões

A partir da estimativa do tempo de chegada das ondas S1 e S2, tanto para as quatro regiões quanto para os dois sentidos da direção Y (Figura 2), foi possível estimar tanto as velocidades de onda S nessas regiões, quanto os parâmetros. O tempo de chegada das ondas em cada um dos casos é mostrado nas Figuras 2-a e 2-b. As setas vermelhas representam o tempo de chegada das ondas S1 enquanto as azuis representam o tempo de chegada das ondas S2.

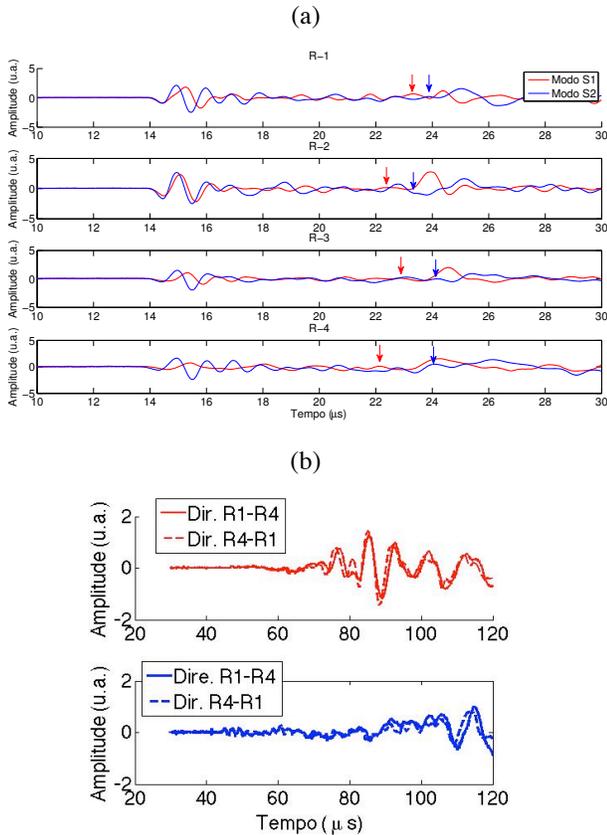


Figura 2. Tempo de chegada das ondas S1 e S2 (a) as quatro regiões (R-1 à R-4) e (b) os dois sentidos da direção Y. As setas vermelhas representam a chegada das ondas S1 e as azuis as chegadas das ondas S2.

A Figura 3 mostra as velocidades das ondas S1 e S2 em função da densidade de fissuras. A Figura 4 mostra o comportamento crescente do parâmetro anisotrópico γ em função da densidade de fissuras.

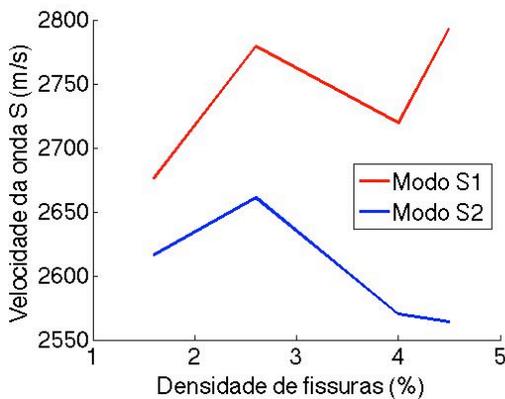


Figura 3. Velocidades das ondas S1 e S2 para as regiões R-1, R-2, R-3 e R-4 em função de suas densidades de fissura.

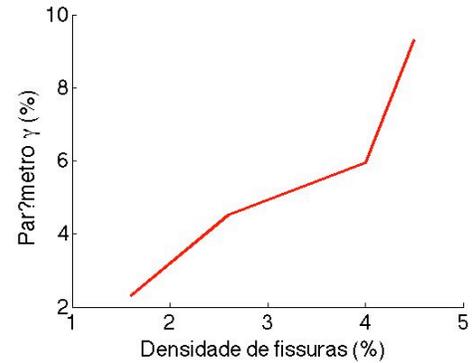


Figura 4. Parâmetro anisotrópico γ das regiões R-1, R-2, R-3 e R-4 em função de suas densidades de fissura.

A Tabela 1 mostra as velocidades de onda S1 e S2 e os parâmetros associados a cada direção de medida, tanto nas regiões que vão de R1 à R4, quanto nos dois sentidos da direção Y. Como é visto na tabela e nas Figuras 2 e 3, as velocidades dos parâmetros tem, em geral, um padrão esperado, com valores aumentando com o aumento da densidade de fissura, com exceção da velocidade da onda S1 para a região R-3 e da velocidade de onda S2 para a região R-2, que apresentam valores anômalos, fazendo com os gráficos não sejam totalmente lineares, apesar de apresentarem um padrão bem definido. Isso pode ter sido causado por erro de medida intrínseco do transdutor ou pelo fato de a parede da amostra não estar totalmente bem homogênea e lixada.

Adicionalmente, os dados dispostos na tabela mostram que os valores de velocidade e de nos dois sentidos da direção Y possuem valores muito próximos, com uma diferença mínima entre eles. Isso mostra que a estimativa de velocidade nos dois sentidos fornece o mesmo resultado, o que é chamado de reciprocidade. Além disso, é observado que o valor de estimado para nas duas direções de Y são muito próximos da soma dos valores de de cada uma das regiões. A soma desses valores vale é 22.96%, o que equivale a um erro quase nulo se comparado com os valores para os dois sentidos de Y.

Conclusões

A análise dos dados mostrou que as velocidades das ondas S1 e S2 assim como o parâmetro γ para as regiões aumenta de acordo com aumento da densidades de fissura. Além disso, foi mostrado que, no caso dessa amostra sintética, que possui quatro regiões com densidades de fissuras distintas, a estimativa das velocidades e do parâmetro de Thomsen independe da direção em que a onda se propaga. Isso mostra-nos que o princípio da reciprocidade no tempo de trânsito também funciona no meio fortemente anisotrópico. Embora nos resultados mostrem-nos que isso não é válido para amplitude. Foi mostrado também que, nesse caso, que o parâmetro γ correspondente a direção que abrange todas as regiões é equivalente ao somatório dos γ de cada região individual. Em trabalhos futuros, é ideal que esse

tipo de análise seja feita em um número maior de amostras sintéticas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a PET-GEOFÍSICA-CAPES, CNPq (número de concessão: 459063/2014-6) e PROPESP-UFPA pelo suporte financeiro.

Referências

- Amalokwu, K., Mark Chapman, Angus I. Best, Jeremy Sothcott, Timothy A. Minshull and Xiang-Yang Li. (2015), Experimental observation of water saturation effects on shear wave splitting in synthetic rock with fractures aligned at oblique angles, *Geophysical Journal International*, 200, 17-24.
- Assad, J. M. (2005), The effect of orthorhombic anisotropy and its implication for oil recovery and reservoir exploitation, *Geophys. Prospect.*, 53, 121–129.
- Assad, J. M., R. H. Tatham, and J. A. McDonald (1992), A physical model study of microcrack-induced anisotropy, *Geophysics*, 57, 1562–1570.
- Assad, J. M., J. A. McDonald, R. H. Tatham, and Kusky, T. M. (1996), Elastic wave propagation in a medium containing oriented inclusions with a changing aspect ratio: A physical model study, *Geophys. J. Int.*, 125(1), 163–172.
- Coates, R. T and Schoenberg M. (1995), Finite-difference modeling of faults and fractures. *Geophysics*, v. 60, p.1514–1526.
- Crampin, S. (1984a), An introduction to wave propagation in anisotropic media. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 76, 17-28.
- Crampin, S. (1984b), Effective anisotropic elastic constants for wave propagation through cracked solids. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 76, 135-145.
- Crampin, S., McGonigle, R., and Ando, M. (1986). Extensive-dilatancy anisotropy beneath Mount Hood, Oregon and the effect of aspect ratio on seismic velocities through aligned cracks. *Journal Geophys. Res.* 91, 12,703-12,710.
- De Figueiredo, J. J. S., J. Schleicher, R. R. Stewart and N. Dyaour (2012), Estimating fracture orientation from elastic-wave propagation. *Journal of geophysical research*, v. 117, p. 1-13.
- De Figueiredo, J. J. S., J. Schleicher, R. R. Stewart, N. Dyaour, O. Omoboya, R. Wiley and A. William (2013), Shear wave anisotropy from aligned inclusions: ultrasonic frequency dependence of velocity and attenuation. *Geophys. J. Int.*, v. 193, p. 475–488.
- Hudson, J. A. (1981), Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, v. 64, p. 133-150.
- Hudson, J. A. and Liu, E. (1999), Effective elastic properties of heavily faulted structures. *Geophysics*, v. 64, n. 2, p.479-489.
- Rathore, J. S, Fjaer, E., Holt and R. M., Renlie, L. (1995), P- and S- wave anisotropy of a synthetic sandstone with controlled crack geometry. *Geophys. Prospect.*, v. 43, p. 711–728.
- Saenger, E. H. and Shapiro, S. A. (2002), Effective velocities in fractured media: a numerical study using the rotated staggered finite-difference grid. *Geophysical Prospecting*, v. 50, p.183–194.
- Santos, L. K., J.J.S. de Figueiredo, Bode Omoboya, Jörg Schleicher, Robert R. Stewart, Dyaour N. (2015), On the source-frequency dependence of fracture-orientation estimates from shear-wave transmission experiments. *Journal of Applied Geophysics*, v. 114, p.81-100.
- Thomsen, L. (1986), Weak elastic anisotropy. *Geophys.*, v. 51, p. 1954–1966.
- Thomsen, L. (1995), Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock. *Geophysical Prospecting* 43, 805–829.
- Tillotson, P., Chapman, M., Best, A.I., Sothcott, J., McCann, C., Shangxu, W. and Li, X. (2011), Observations of fluid - dependent shear-wave splitting in synthetic porous rocks with aligned penny-shaped fractures, *Geophys. Prospect.*, 59(1), 111–119.
- Tillotson, P., J. Sothcott, A. I. Best, M. Chapman, and X.-Y. Li (2012), Experimental verification of the fracture density and shear-wave splitting relationship using synthetic silica cemented sandstones with a controlled fracture geometry, *Geophys. Prospect.*, 60, 516–525.
- Zhang, J. (2005) . Elastic wave modeling in fractured media with an explicit approach, *Geophysics*, 70, T75–T85.