

Estimativa da orientação do eixo de simetria de um meio TI a partir de dados de onda P em experimentos de VSP Walkaway

Ellen de Nazaré Souza Gomes, CPGf/UFPA, Belém, Brasil

Saulo da Costa e Silva, Halliburton Serviços Ltda, Rio de Janeiro, Brasil

Ivan Pšenčík, Geophysical Institute AS CR, Prague, Czech Republic

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 11th 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 11th 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

A reliable description of seismic anisotropy in the overburden is necessary for accurate seismic imaging, reflection amplitude analysis, and the correction of borehole sonic logs. A walkaway VSP provides an opportunity of local determination of anisotropy parameters in the overburden from recorded polarization vectors and vertical components of slowness vectors. On synthetic examples, we study quality of the estimates of the local transverse isotropy (TI) and of the orientation of its symmetry axis, from P-wave data recorded along a single line of the walkaway VSP. We study sensitivity of the estimates to the used type of the wave (direct, reflected or both), to the varying level of noise applied separately to each component of recorded direct and reflected waves and sensitivity to other parameters.

Introdução

Os reservatórios de hidrocarbonetos são, em geral, encontrados em meios naturalmente fraturados e a orientação das fraturas determina a direção preferencial de permeabilidade do reservatório. Meios que possuem fraturas paralelas em regime quase estático apresentam comportamento efetivamente anisotrópico (Hudson, 1982, Schoenberg & Sayers, 1995). Aliado às novas técnicas de aquisição de dados em 3-C (três componentes), modelos que incorporam anisotropia têm sido empregados em experimentos de VSP walkaway, onde utiliza-se as medidas de polarização e vagarosidade para a caracterização de reservatórios fraturados (Horne & Leaney, 2000). Este trabalho tem como objetivo estimar a orientação de fratura de um meio a partir dos dados de polarização e vagarosidade de ondas P em levantamentos VSP walkaway em um perfil. Considera-se que um conjunto de fraturas orientado é representado efetivamente por um meio TI (transversalmente isotrópico) e a estimativa da orientação de fratura consiste então em estimar a orientação do eixo de simetria do meio.

Metodologia

O vetor de polarização, g_i , e a componente vertical do vetor de vagarosidade, s_3 , de uma onda P gerada em experimentos de VSP walkaway em um perfil estão relacionados com os parâmetros fracamente anisotrópicos (parâmetros WA) de um meio anisotrópico arbitrário através da equação:

$$|n_1| \left(\alpha^2 - \beta^2 \right)^{-1} B_{13} - \frac{1}{2} \alpha^{-1} \eta B_{33} = |n_1| g_i e_i^{(1)} + \alpha \Delta \eta \quad (1)$$

Em que α e β são as velocidades das ondas P e S respectivamente, no meio isotrópico de referência; $\Delta \eta$ é a diferença entre a componente vertical do vetor de vagarosidade da onda P no meio fracamente anisotrópico e a componente vertical do vetor de vagarosidade da onda P no meio isotrópico de referência, $\Delta \eta = s_3 - s_3^{(iso)}$, com $s_3^{(iso)} = n_3 / \alpha$ (mais detalhes em Zheng & Pšenčík, 2002, e Gomes et al., 2004); n_i é a i -ésima componente do vetor unitário normal à frente de onda P no meio de referência, \mathbf{n} , e $e_i^{(1)}$ é um vetor unitário perpendicular a \mathbf{n} . Estes dois vetores estão situados em um plano contendo o poço e as fontes. As quantidades B_{k3} , ($k = 1, 3$), são elementos da matriz de fraca anisotropia que depende linearmente dos parâmetros WA e dos parâmetros do meio de referência ($\alpha, \beta, \mathbf{n}$), (Gomes et al., 2004).

Apenas cinco parâmetros WA estão presentes nesse tipo de experimento para onda P, são eles: $\varepsilon_x, \varepsilon_z, \delta_x, \varepsilon_{15}$ e ε_{35} . Estes parâmetros estão relacionados com os parâmetros elásticos normalizados pela densidade (A_{ij}) por:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{A_{11} - \alpha^2}{2\alpha^2}, & \varepsilon_z &= \frac{A_{33} - \alpha^2}{2\alpha^2}, \\ \delta_x &= \frac{A_{13} + 2A_{55} - \alpha^2}{\alpha^2}, & & \\ \varepsilon_{15} &= \frac{A_{15}}{\alpha^2}, & \varepsilon_{35} &= \frac{A_{35}}{\alpha^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

O sistema de equações (1) pode ser escrita na forma matricial:

$$Y_i^{obs} = M_{ij} P_j, \quad i = 1, \dots, N_{obs} \quad \text{e} \quad j = 1, \dots, N_{par}. \quad (3)$$

N_{obs} refere-se ao número de observações, N_{par} refere-se ao número de parâmetros; na equação (2), $N_{par} = 5$. Y_i^{obs} é a i -ésima componente do vetor das observações; M_{ij} , a matriz formada pelo lado esquerdo de (1) a menos dos parâmetros WA que estão arrumados no vetor P_j na forma:

$$P_1 = \varepsilon_x \quad P_2 = \varepsilon_z \quad P_3 = \delta_x \quad P_4 = \varepsilon_{15} \quad P_5 = \varepsilon_{35}. \quad (4)$$

As estimativas dos parâmetros WA, \tilde{P}_j , são os valores que minimizam a função objetivo:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{N_{obs}} \left(Y_i^{obs} - M_{ij} \tilde{P}_j \right)^2, \quad (5)$$

Para os testes apresentados, não foram utilizados estabilizadores na inversão, uma vez que o número de condição encontrado foi da ordem de aproximadamente 10^{-2} . Para se estimar os valores que minimizam a função objetivo (5), é necessário o conhecimento da matriz $M_{ij}(\alpha, \beta, \mathbf{n})$, e para tal, precisa-se dos parâmetros do meio isotrópico de referência. Existem várias formas de se obter tais parâmetros e são discutidos em Gomes, 2003 e Gomes et al., 2004. Neste trabalho, a velocidade da onda P no meio isotrópico de referência, α , é estimada através da equação:

$$s_3^{(i)} = \alpha^{-1} g_3^{(i)} \quad (6)$$

Em que $s_3^{(i)}$ e $g_3^{(i)}$ são terceiras componentes da i -ésima observação dos vetores de vagariedade e polarização, respectivamente. Pode-se então estimar α a partir das equações (6) para $i = 1, \dots, N_{obs}$ por mínimos quadrados. A velocidade da onda S, β , foi calculada através da relação $\beta^2 = \alpha^2/3$ e o vetor \mathbf{n} foi escolhido paralelo ao vetor de polarização do meio anisotrópico (\mathbf{n}/g), o que é uma aproximação razoável considerando-se meios fracamente anisotrópicos. Com isso o lado direito da equação (1) resume-se a $\alpha \Delta \eta$, pois $g_i e_i^{(1)} = 0$.

Para a caracterização de orientação das fraturas usando as estimativas dos parâmetros WA, obtida da inversão dos dados de VSP walkaway com ondas P, pressupõe-se que:

- Um conjunto de fraturas orientado comporta-se efetivamente como um meio TI com eixo de simetria perpendicular ao plano de fratura.
- A linha que contém os dados medidos tem azimute zero.
- Em sistema de coordenadas x'_i , no qual o eixo de simetria é paralelo x'_3 , assumimos que $A'_{11} > A'_{33}$.

O ângulo θ , que o eixo de simetria faz com o sentido positivo de eixo x_1 , e dado pela relação:

$$\tan 2\theta = \frac{2(A_{15} + A_{35})}{A_{11} - A_{33}}. \quad (7)$$

O ângulo θ pode então ser obtido a partir da relação (7), após a estimativa dos parâmetros WA, exceto por uma ambiguidade: os ângulos 2θ e $2\theta + \pi$ têm a mesma tangente. Esta ambiguidade pode ser resolvida se informação geológica, por exemplo, $A'_{11} > A'_{33}$, for adicionada.

Na próxima seção são apresentados testes numéricos onde são estimados os ângulos de giro do eixo de simetria de meios TI. Os dados utilizados são de ondas P diretas e refletidas calculados através do software ANRAY (Gajewski & Pšenčík, 1990). A estabilidade das estimativas dos parâmetros WA e de θ (orientação do eixo de simetria) é calculada da seguinte forma: foi gerado um conjunto de 100 simulações contaminadas com diferentes níveis de ruído; isto é, as terceiras

componentes do vetor de vagariedade e os vetores de polarização foram aplicados ruídos de forma separada. Cada observação foi contaminada com ruído aleatório cujo desvio padrão não excedeu um valor percentual escolhido da própria observação. Os dados de onda refletida foram contaminados com o dobro do ruído de dados de onda direta. No caso da polarização, esse ruído modifica aleatoriamente a direção de polarização de alguns graus. Cada conjunto de 100 simulações contaminado com diferentes níveis de ruído foi utilizado na inversão do sistema de equações (1) e, então, calculou-se a média e desvio padrão amostral das estimativas dos parâmetros WA. A partir dessas estimativas os parâmetros elásticos foram estimados e, em seguida, a orientação do eixo de simetria do meio TI também foi estimada. A estabilidade dessa estimativa é calculada da mesma forma que para os parâmetros WA.

Testes Numéricos

A estimativa da orientação do eixo de simetria depende de vários fatores como: distribuição e número das fontes, grau de anisotropia e nível de ruído. Nesta seção, são apresentados testes para um conjunto de dados gerados sinteticamente em um modelo formado por um meio incidente, homogêneo e fracamente TI e um meio subjacente abaixo da superfície refletora. O meio incidente é inicialmente um meio TIV (transversalmente isotrópico com eixo de simetria vertical), as velocidades as ondas P e S no meio isotrópico de referência são $\alpha = 2,14 \text{ km/s}$ e $\beta = 1,39 \text{ km/s}$ respectivamente. O meio foi rotacionado tal que $\theta = 28^\circ$. Os parâmetros elásticos ¹ normalizados pela densidade, A_{ij} , em km^2/s^2 , são dados por:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 5,14 & 2,04 & 1,98 & 0 & -0,5 & 0 \\ & 6,59 & 1,86 & 0 & 0,13 & 0 \\ & & 6,27 & 0 & -0,33 & 0 \\ & & & 2,29 & 0 & -0,2 \\ & & & & 1,79 & 0 \\ & & & & & 2,03 \end{bmatrix} \quad (8)$$

O meio subjacente é homogêneo, isotrópico com velocidades das ondas P e S $\alpha = 4,77 \text{ km/s}$ e $\beta = 2,77 \text{ km/s}$, respectivamente.

Os dados de vagariedade e polarização de onda P foram medidos em levantamento de VSP Walkaway, com 240 fontes distribuídas regularmente em um perfil de aproximadamente 12km na superfície e espaçadas de 50m. O geofone está situado dentro do poço a uma profundidade de 3,212 km, ver Figura 1. O ruído foi aplicado aos dados da seguinte forma: para ondas diretas, os dados da terceira componente da vagariedade da onda P foram contaminados com ruído aleatório, cujo desvio padrão não excedeu um valor percentual do valor da componente. Os vetores de polarização foram contaminados com ruído que muda a direção de polarização aleatoriamente de até um dado ângulo. Para as ondas refletidas, os dados da terceira componente da vagariedade foi contaminado com ruído aleatório com desvio padrão que não excedeu ao dobro do valor percentual aplicado as ondas diretas. Os dados de polarização foram contaminados com ruído que muda a direção de polarização aleatoriamente de até o dobro do ângulo aplicado as ondas diretas.

¹Já na notação reduzida (Helbig, 1994)

Na Tabela 1, são apresentados para os parâmetros A_{ij} , o valor exato, as estimativas médias além de seu desvio padrão amostral, para o seguinte nível de ruído: Para ondas diretas, os dados da terceira componente da vagarosidade foram contaminados com ruído aleatório que não excedeu 5% do valor da componente. Os dados de polarização foram contaminados com ruído que mudou a direção de polarização de até 1° . Para as ondas refletidas foram aplicados o dobro do ruído das ondas diretas. De acordo com a Tabela 1 o parâmetro A_{11} , necessário para a estimativa da orientação do eixo de simetria, apresenta grande variação quando comparado com a variação dos outros parâmetros. Em seguida a orientação do eixo de simetria foi calculado. A estimativa média da orientação do eixo de simetria e sua variação amostral são apresentados na primeira linha da Tabela 2. Ainda na Tabela 2, são apresentados para este mesmo modelo, resultados de diferentes testes. Considerando que o nível de ruído nas ondas P diretas e refletidas são iguais e definidos por: dados de vagarosidade contaminados com ruído aleatório cujo desvio padrão não excedeu 5% da vagarosidade. Dados de polarização contaminados com ruído que muda a direção de polarização aleatoriamente de até 2° (segunda linha da Tabela 2). Apenas dados de onda P direta com o mesmo nível de ruído do teste anterior (terceira linha da Tabela 2) e por fim, ainda na Tabela 2, na quarta linha tem-se os resultados para ruído diferente nas ondas P diretas e refletidas (como nos dados utilizados para gerar os resultados da Tabela 1), mas partindo do pressuposto que o parâmetro A_{11} é conhecido. De acordo com esses resultados pode-se concluir que:

- A orientação do eixo de simetria, θ , é bem estimada (estamos considerando como 'bem estimada', valores, cujas variações são de até 5° no valor de θ) para níveis de ruído de até 5% na vagarosidade de ondas diretas, 10% na vagarosidade de ondas refletidas e ruído na polarização de até 3° nos dados de inversão conjunta.
- Caso os dados sejam contaminados com o mesmo nível de ruído na inversão conjunta, a estimativa de θ melhora consideravelmente, comparada com a estimativa obtida da inversão conjunta dos dados ou mesmo só com a inversão com dados de ondas diretas.
- O parâmetro A_{11} , necessário para a estimativa de θ , é bastante sensível à presença de ruído nos dados.

De acordo com as conclusões acima, uma análise e busca de outras maneiras de se determinar A_{11} é fundamental para a estimativa de θ .

Testes complementares

Foram feitos testes com outros modelos em que a orientação do eixo de simetria foi estimada considerando diferentes fatores:

- Tamanho do perfil nos levantamentos VSP;
- Modelos com diferentes graus de anisotropia;
- Inversão com dados de ondas diretas e inversão conjunta dos dados de ondas diretas e refletidas.

Os resultados obtidos foram:

-Tamanho do perfil nos levantamentos VSP

Em ICDP Newsletter (2000) é mostrado que em levantamentos de VSP walkaway, as fontes podem ser distribuídas em distâncias que vão de 6km a até 14km com o poço situado no meio. Considerando o modelo sintético apresentado anteriormente, foram realizados alguns testes para verificar a influência do comprimento do perfil na estimativa da orientação do eixo de simetria. As fontes foram regularmente espaçadas de 50 metros com o poço situado no centro do perfil, foram consideradas: Fontes distribuídas em ambos os lados do poço num perfil de 1)14km, 2) 12km, 3) 10km, 4) 8km, 5) 6km. As estimativas de θ foram feitas considerando dados da inversão com onda direta e dos dados da inversão conjunta. Os resultados obtidos foram:

- Considerando a inversão utilizando apenas ondas diretas, θ é bem estimado para os níveis de ruído de até 5% do valor da vagarosidade e para mudanças de direção de até 4° nos dados de polarização, considerando as geometrias de 1), 2), 3) e 4). Para a geometria 5), os resultados só são satisfatórios para o nível de ruído de até 5% do valor da vagarosidade e para mudanças de direção de até 1° nos dados de polarização.
- Considerando a inversão utilizando os dados de ondas diretas e refletidas, θ é bem estimado para o nível de ruído de até 5% do valor da vagarosidade de ondas diretas e de até 10% do valor da vagarosidade de ondas refletidas. As mudanças de direção do vetor de polarização de até 1° para ondas diretas e até 3° para ondas refletidas, nas geometrias 1), 2) e 3). A partir de levantamentos com a geometria 4), a estimativa fica comprometida.

É importante lembrar que se procurou realizar simulações o mais próximo possível do encontrado em levantamentos reais, isso implica que a razão sinal ruído nos dados de onda refletida deve ser menor que nos dados de onda direta, tal como acontece em levantamentos reais. Quando os testes eram feitos considerando o mesmo nível de ruído tanto nos dados de onda direta quanto nos de onda refletida, a orientação do eixo de simetria é bem estimada considerando-se ruído de até 5% nos dados de vagarosidade e ruído nos dados de polarização que modifica a direção desta em até 3° . Assim podemos concluir que para perfis de até 8km o ângulo θ é bem estimado. Em perfis menores, a estimativa fica muito comprometida.

-Modelos com diferentes graus de anisotropia

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para a estimativa da orientação do eixo de simetria a partir da relação entre os dados de vagarosidade e polarização de ondas P e os parâmetros WA. A relação apresentada é uma aproximação de primeira ordem e considera que o meio anisotrópico é uma fraca perturbação de um meio isotrópico. Entretanto, verificamos que, em testes com anisotropia moderada foram encontrados resultados satisfatórios para a estimativa de θ . A metodologia não é

válida para meios com anisotropia forte ².

-Inversão com dados de ondas diretas e inversão conjunta dos dados de ondas diretas e refletidas

A estimativa da orientação do eixo de simetria usando apenas dados de onda direta perde resolução e estabilidade quando comparada à estimativa da inversão conjunta, desde que a razão sinal-ruído seja boa tanto para ondas refletidas quanto para ondas diretas. A estimativa feita apenas com dados de onda refletida é mais pobre quando comparada com a inversão de ondas diretas, não se pode esquecer que esse resultado depende fortemente da relação sinal-ruído nos dados de onda direta e refletida.

Conclusão

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para a estimativa da orientação do eixo de simetria de meio TI a partir da relação linear entre os parâmetros WA do meio e dados de vagarosidade e polarização de ondas P em experimentos de VSP walkaway. Foi feita uma análise dessa estimativa considerando fatores como: tipo de onda, nível de ruído, grau de anisotropia e tamanho dos perfis. Para a inversão utilizando apenas dados de onda P diretas, conclui-se que:

- A orientação do eixo de simetria, θ , é bem estimada para níveis de ruído de até 5% na vagarosidade e ruído na polarização de até 4°;
- A estimativa é mais sensível à presença de ruído nos dados de vagarosidade que nos dados de polarização, em ambos os esquemas de inversão;
- O parâmetro A_{11} , necessário para a estimativa de θ , é bastante sensível à presença de ruído nos dados;
- Considerando o pressuposto de que o parâmetro A_{11} é conhecido, a orientação do eixo de simetria de um meio TI é bem estimado para níveis de ruído de até 20% nos dados de vagarosidade e até 15° nos dados de polarização;
- A orientação do eixo de simetria é bem estimada considerando os níveis de ruído de até 5% nos dados de vagarosidade e até 4° na polarização para perfis de até 8km, com as fontes espaçadas regularmente de 50 metros e poço no centro do perfil.

Para a inversão utilizando dados de onda P direta e refletida, conclui-se que:

- A orientação do eixo de simetria, θ , é bem estimada para níveis de ruído de até 5% na vagarosidade de ondas diretas, 10% na vagarosidade de ondas refletidas e ruído na polarização de até 3° nos dados de inversão conjunta;

²Estamos considerando o grau de anisotropia de acordo com os parâmetros WA. Assumimos que grau de anisotropia é dado por $\varepsilon = \varepsilon_x * 100\%$. Assim, um meio com anisotropia fraca é dado por $0\% < \varepsilon < 10\%$, anisotropia moderada é dado por $10\% < \varepsilon < 20\%$ e um meio com anisotropia forte por $\varepsilon > 20\%$

- A estimativa de θ é mais sensível ao nível de ruído nos dados de vagarosidade que de polarização;
- O parâmetro A_{11} , necessário para a estimativa de θ , é bastante sensível à presença de ruído nos dados;
- Considerando o pressuposto de que o parâmetro A_{11} é conhecido, a orientação do eixo de simetria é bem estimado para níveis de ruído de até 5% nos dados de vagarosidade em ondas diretas, 10% nos dados de vagarosidade em ondas refletidas e 4° nos dados de polarização em ondas diretas e 15° nos dados de polarização em ondas refletidas;
- Se na inversão conjunta os dados são contaminados com o mesmo nível de ruído, a estimativa de θ melhora, comparada à estimativa obtida da inversão conjunta dos dados se contaminados com níveis diferentes de ruído dos dados de onda refletida;
- A orientação do eixo de simetria é bem estimado considerando os níveis de ruído de 5% nos dados de vagarosidade em ondas diretas, 10% nos dados de vagarosidade em refletidas e 1° nos dados de polarização direta e 3° nos dados de polarização refletida para perfis de até 10km, com as fontes espaçadas regularmente de 50 metros e poço no centro do perfil.

A metodologia apresentada neste trabalho possui algumas limitações, que se devem principalmente à utilização de dados em apenas um perfil. Com o objetivo de reduzir essas limitações, tem-se como próximas etapas deste trabalho:

- Utilização na estimativa da orientação do eixo de simetria em dados de onda P medidos em experimentos de VSP em perfis multiazimutais;
- Tentativa de usar os dados de onda S tanto diretas quanto refletidas.

Agradecimentos

Agradecemos a Universidade Federal do Pará, ao consórcio SW3D, ao projeto GACR 205/08/0332 e CNPq pelo suporte financeiro e ao convênio UFPA/ANP/PRH-06 pela bolsa concedida ao aluno Saulo da Costa e Silva.

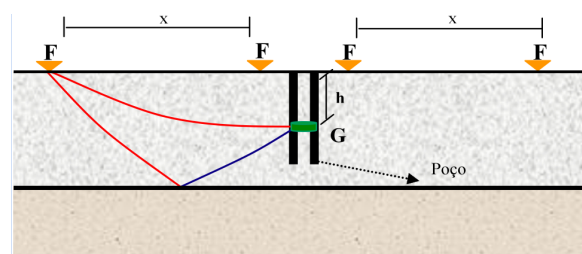


Figure 1: Geometria do levantamento VSP Walkaway utilizado nos testes apresentados. As fontes estão distribuídas em perfil na superfície regularmente espaçadas em ambos os lados do poço. O geofone está situado a uma profundidade h no interior do poço. As ondas P diretas são representadas pelas curvas em vermelho e as ondas refletidas pela curva em azul.

Parâmetro Elástico	Valor Exato	Estimativa Média	Valor Amostral
A_{11}	5,14	5,27	13,5%
A_{33}	6,27	6,24	1,3%
$A_{13} + 2A_{55}$	5,56	5,64	8,5%
A_{15}	-0,5	-0,64	1,6%
A_{35}	-0,33	-0,39	7,5%

Tabela1. Estimativa média dos parâmetros elásticos e sua variação amostral obtidos a partir da inversão dos dados de onda P direta e refletida.

Dados invertidos	Estimativa média de θ	Desvio padrão amostral
Ondas P diretas e refletidas com nível de ruído diferente	32,94°	6,18°
Ondas P diretas e refletidas mesmo com nível de ruído	30,2°	0,66°
Ondas P diretas	32,89°	4,52°
A_{11} fixo	30,83°	3,66°

Tabela2. Estimativa da orientação do eixo de simetria, considerando quatro diferentes dados. O valor exato de θ é de 28°.

Referências Bibliográficas

Gajewski, D. & Pšenčík, I., 1990. Vertical seismic profile synthetics by dynamic ray tracing in laterally varying layered anisotropic structures. *J. Geophys. Res.*, 95, 11301-11315.

Gomes, E. N. S., 2003. Estimativa de parâmetros elásticos em meios anisotrópicos. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação de Geofísica. Universidade Federal do Pará - UFPA.

Gomes, E. N. S., Zheng, X., Pšenčík, I., Horne, S. A., Leaney, W. S., 2004. Local determination of weak anisotropy parameters from a walkaway VSP P-wave data in the Java sea region. *Stud. Geophys. Geod.*, 48, 215-231.

Helbig, K., 1994. Foundations of Anisotropy for Exploration Seismics. Oxford, Pergamon. Handbook of Geophysical Exploration, 22.

Horne, S. A. & Leaney, W. S., 2000. Polarization and slowness component inversion for TI anisotropy. *Geophysical Prospecting*, 48, 779-788.

Hudson, J. A., 1982. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 64: 133-150.

ICDP Newsletter, Abril, 2000. International Continental Scientific Drilling Program, v. 2.

Schoenberg, M. & Sayers, C. M., 1995. Seismic Anisotropy of Fractures: Geophysics, Soc. of Expl. Geophys., 60: 204-211.

Zheng, X. & Pšenčík, I., 2002. Local determination of weak anisotropy parameters from P-wave slowness and particle motion measurements. *Pure and Applied Geophysics*, 159, 1881-1905.