Estimativa de anisotropia local através de dados de VSP das ondas qP

Ellen Gomes*[1], Ivan Pšenčík[2] e Xuyao Zheng[2], [1]UFPa, Belém, Brasil, [2]IG AC, Praga, Rep. Tcheca.

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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

Inversion scheme for the determination of anisotropy in a vicinity of a receiver situated in a borehole from the data obtained during a multiazimuth multiple-source offset VSP experiment is studied. The data consist of vertical components of slowness vectors and of polarization vectors of direct and reflected qP waves. We analyze the effects of choice of a reference medium and of the wave normal on the results of inversion. We also study sensitivity of the inversion scheme to the number and orientation of profiles, to the number of sources along the profiles and to the number and type of waves considered. Study of the stability of the inversion scheme indicates which parameters of the medium can be recovered reliably and which cannot.

Introdução

Neste trabalho continuamos com a análise feita por Zheng & Pšenčík (2002) onde a anisotropia local foi estimada para meios anisotrópicos arbitrários em experimentos de VSP multiazimutal e com múltiplas fontes a partir da relação linear entre os parâmetros de anisotropia fraca (parâmetros WA) do meio e os vetores de vagarosidade e polarização de ondas do tipo qP. Este esquema não depende da inhomogeneidade do meio acima do receptor como também não depende da forma do poço.

Inicialmente fizemos uma breve introdução desta relação linear para em seguida fazer uma análise de sensibilidade desta formulação a geometria do levantamento. Depois são apresentadas as estimativas para dois modelos sintéticos e os resultados das estimativas dos parâmetros WA para esses dois modelos e outros modelos com diferentes graus de anisotropia são discutidos.

Fundamentos teóricos

Em todo o trabalho será usado o sistema de coordenadas cartesianas (x_1, x_2, x_3) com o eixo x_3 positivo na direção que aponta de cima para baixo. Considerando três vetores unitários perpendiculares entre si: $e_i^{(1)}, e_i^{(2)}$ e $e_i^{(3)}$, tal que este último é paralelo ao vetor **n** que é normal a frente da onda P no meio isotropico de referencia. Os vetores $e_i^{(1)}, e_i^{(2)}$ podem ser escolhidos de forma arbitrária tal que pertençam ao plano perpendicular a **n**. Uma escolha prática é dada por Pšenčík & Gajewski (1998) como sendo:

$$\mathbf{e}^{(1)} = D^{-1}(n_1 n_3, n_2 n_3, n_3^2 - 1),\ \mathbf{e}^{(2)} = D^{-1}(-n_2, n_1, 0) \text{ e } \mathbf{e}^{(3)} = \mathbf{n}, \quad (1)$$

em que

$$D = \sqrt{n_1^2 + n_2^2}\,. \quad (2)$$

O vetor de vagarosidade ($\mathbf{s}^0$) no meio de referência é dado por:

$$s_i^0 = \alpha^{-1} n_i\,, \quad (3)$$

em que α é a velocidade da onda P no meio de referência. Sejam ξ, ζ e η os comprimentos das projeções do vetor de vagarosidade $\mathbf{s}^0$ no meio de referência nas direções de x_1, x_2 e x_3 respectivamente e estes podem ser escritos como:

$$\xi = n_1/\alpha\,; \quad \zeta = n_2/\alpha\,; \quad \eta = n_3/\alpha\,. \quad (4)$$

Para aproximações de primeira ordem, o vetor de vagarosidade de uma onda qP que se propaga em um meio perturbado qualquer está relacionado com o vetor de vagarosidade no meio de referência por (ver Zheng & Pšenčík , 2002) :

$$\mathbf{s} = \mathbf{s}^0 + (\Delta\xi, \Delta\zeta, \Delta\eta) = (\xi + \Delta\xi)\mathbf{i} + (\zeta + \Delta\zeta)\mathbf{j} + (\eta + \Delta\eta)\mathbf{k}\,, \quad (5)$$

em que $\Delta\eta$, $\Delta\xi$ e $\Delta\zeta$ são perturbações de primeira ordem de ξ, ζ e η respectivamente, **i**, **j** e **k** são vetores unitários nas direções x_1, x_2 e x_3 respectivamente. Os vetores de vagarosidade **s** e polarização **g** de uma onda qP que se propaga em um meio anisotrópico qualquer estão relacionados linearmente com os parâmetros WA deste meio. Através dessas equações Zheng & Pšenčík (2002) acharam:

$$B_{K3} = (\alpha^2 - \beta^2)\left[\, g_i\, e_i^{(K)} - \alpha\,\Delta\xi\, e_1^{(K)} - \alpha\,\Delta\zeta\, e_2^{(K)} - \alpha\,\Delta\eta\, e_3^{(K)}\,\right],$$
$$B_{33} = \alpha^2\left(1 - \alpha^2 c^{-2}\right). \quad (6)$$

em que K = 1 ou 2, α e β são as velocidades das ondas P e S respectivamente no meio de referência, c^{-2} é o quadrado de vagarosidade e g_i é a i-ézima componente do vetor de polarização normalizado e as funções B_{K3} e B_{33} são elementos da matriz de fraca anisotropia (WA matriz) dada por:

$$B_{mn} = a_{ijkl} e_i^{(m)} e_j^{(3)} e_i^{(3)} e_\kappa^{(n)} - c_0^2 \delta_{mn}\,. \quad (7)$$

A relação entre parâmetros WA e os parâmetros elásticos do meio pode ser visto em Zheng & Pšenčík (2002). Para que as equações (6) podem ser utilizadas é necessário ter o conhecimento prévio de todas as componentes do vetor de vagarosidade e do vetor de polarização. Para o caso de levantamentos com geofone de três componentes a determinação de todo o vetor de polarização não é o problema, no entanto, em casos mais comuns só se tem conhecimento da componente vertical do vetor de vagarosidade. É necessário fazer algumas suposições para que as outras componentes do vetor de vagarosidade sejam determinadas. Neste trabalho estamos interessados em meios mais gerais possível, desta forma as estimativas serão feitas supondo que apenas a componente vertical do vetor de vagarosidade é conhecida e as outras componentes são eliminadas das

equações (6) e desse modo estas equações se reduzem ao unico equacao:

$$D\,(\alpha^2 - \beta^2)^{-1} B_{13} - \frac{1}{2}\,\alpha^{-1}\eta\, B_{33} = D\, g_i e_j^{(1)} + \alpha\,\Delta\eta\,. \quad (8)$$

Uma discussão mais detalhada sobre como a existência de uma os mais componentes do vetor de vagarosidade afeta a equação (6) ver Zheng & Pšenčík (2002). A equação (8) pode ser escrita na forma matricial:

$$\mathbf{A}\,\mathbf{p} = \mathbf{y}. \quad (9)$$

Em que: y é o vetor das observações formado pelo lado direito de (8), **A** é a matriz formada pelo lado esquerdo de (8) a menos dos parâmetros WA que estão arrumados no vetor **p** na forma:

$$\begin{aligned} &p_1 = \varepsilon_x \quad p_2 = \varepsilon_y \quad p_3 = \varepsilon_z \\ &p_4 = \delta_x \quad p_5 = \delta_y \quad p_6 = \delta_z \\ &p_7 = \chi_x \quad p_8 = \chi_y \quad p_9 = \chi_z\,. \\ &p_{10} = \varepsilon_{15} \quad p_{11} = \varepsilon_{16} \quad p_{12} = \varepsilon_{24} \\ &p_{13} = \varepsilon_{26} \quad p_{14} = \varepsilon_{34} \quad p_{15} = \varepsilon_{35} \end{aligned} \quad (10)$$

A relação entre os parâmetros WA e os parâmetros elásticos do meio pode ser vista em Zheng & Pšenčík (2002). Para se estimar **p** é necessário que toda a matriz **A**, que depende das velocidades das ondas P e S e do vetor frente de onda **n** no meio de referência, seja conhecida. O vetor normal à frente de onda P pode ser escolhido de três formas diferentes:

- **n** determinado geometricamente.
- **n** calculado supondo conhecido o meio de referência. Neste caso é necessário fazer o traçamento de raio no meio de referência. Essa escolha trás custos computacionais.
- **n** paralelo ao vetor de polarização observado (**n**//**g**). Essa escolha será tanto melhor à medida que o meio for fracamente anisotrópico. Neste caso $g_i e_j = 0$ e o primeiro termo à direita de (8) desaparece.

Existem várias maneiras de se determinar às velocidades das ondas P e S no meio de referência. No decorrer deste trabalho será mostrada uma maneira de se estimar estas velocidades. A seguir é feita uma análise de sensibilidade da equação (8). Para esta análise a velocidade da onda P no meio de referência foi escolhida arbitrariamente e a velocidade da onda S foi determinada segundo a relação de Poisson. Uma vez que a análise de sensibilidade deve ser independente do meio utilizado e função apenas da geometria do levantamento, optou-se por determinar **n** de forma geométrica. Testes mostraram, no entanto que a sensibilidade independe da escolha feita para **n** e este foi especificado por: **n** = (cosφ senϑ, senφ senϑ, cos ϑ) em que φ é o ângulo azimutal e ϑ o ângulo que a frente de onda faz com o eixo vertical ($0 \le \varphi \le 2\pi$, $0 \le \vartheta \le \pi$). Assim **A** é função das velocidades das ondas P e S meio de referência e da geometria do levantamento (ângulos φ e θ). Quanto a influência da escolha de **n** nas estimativas dos parâmetros WA no decorrer deste trabalho foi feita uma análise da sensibilidade das estimativas obtidas a partir de (8) para as três escolhas do vetor normal a frente de onda no meio de referência apresentadas acima.

Análise de sensibilidade

É usada a configuração de VSP mostrada na Figura 1. O poço está situado na origem do sistema de coordenadas com o receptor em seu interior situado a uma profundidade de 0,4 km. Considera-se perfis com 18 fontes (nove em cada lado do poço) espaçadas regularmente por 0,1 km. A primeira fonte está a uma distância de 0,9 km do poço. A análise de sensibilidade foi feita considerando-se várias geometrias e em cada uma delas foi determinada a matriz de sensibilidade **A** em seguir através de SVD foi calculado sua matriz de resolução, $\mathbf{R} = \mathbf{V}_r\,\mathbf{V}_r^t$ (Menke, 1984), em que **V** é a matriz cujas colunas são auto vetores de **A**, o subscrito r refere-se ao posto efetivo da matriz **A** e o sobrescrito ‘ refere-se a transposta. Consideramos que matrizes bem condicionadas apresentam número de condição da ordem de ate 10^3, portanto quando o número de condição da matriz **A** tinha pelo menos uma ordem superior a esse valor aplicamos o fator de corte 0,01 absoluto para determinar o posto efetivo desta matriz.

Foram feitos testes com vários perfis e diferentes ângulos entre eles. Verificou-se que para um único perfil tem-se que apenas cinco parâmetros podem ser obtidos. São eles ε_x, ε_z, δ_x, ε_{15} e ε_{35} se o perfil é paralelo ao eixo x_1 ou ε_y, ε_z, δ_y, ε_{24} e ε_{34} se o perfil é paralelo ao eixo x_2. Para dois perfis foram testadas várias combinações entre as direções dos perfis e a melhor combinação é a formada pelas direções $\varphi = 0^0$ e $\varphi = 90^0$. Nestas direções nove parâmetros podem ser obtidos. Para perfis aos eixos x_1 e x_2, são eles: ε_x, ε_y, ε_z, δ_x, δ_y, ε_{15}, ε_{24}, ε_{34} e ε_{35}. Para três perfis foram testadas várias combinações entre as direções dos perfis e a melhor combinação é a formada pelas direções $\varphi = 0^0$, $\varphi = 45^0$ e $\varphi = 90^0$. Nestas direções dez parâmetros mais uma combinação podem ser obtidos. Os parâmetros são: ε_x, ε_y, ε_z, δ_x, δ_y, χ_z, ε_{15}, ε_{24}, ε_{34} e ε_{35} e a combinação é ($\chi_x + \chi_y$). Para quatro perfis foram testadas várias combinações entre as direções dos perfis e a melhor combinação é a formada pelas direções $\varphi = 0^0$, $\varphi = 45^0$, $\varphi = 90^0$ e $\varphi = 135^0$. Nestas direções treze parâmetros mais uma combinação podem ser obtidos. Os parâmetros são: ε_x, ε_y, ε_z, δ_x, δ_y, δ_z, χ_x, χ_y, χ_z, ε_{15}, ε_{24}, ε_{34} e ε_{35}. e a combinação é ($\varepsilon_{16} + \varepsilon_{26}$). Para cinco perfis todos os parâmetros que aparecem na equação (8) (15 parâmetros) podem ser obtidos quaisquer que sejam as direções escolhidas com tanto que estas direções sejam linearmente independentes. Foi testada também resolução dos parâmetros em relação à escolha das velocidades das ondas P e S no meio de referência. Concluiu-se que a resolução dos parâmetros é insensível às velocidades no meio de referencia. De acordo com essa análise sabe-se que parâmetros podem ser recuperados a partir da geometria do levantamento utilizada. No entanto para verificar se um parâmetro é bem estimado é necessário além da análise de resolução uma análise da estabilidade do mesmo, isto é, verificar a partir da inversão da equação (8) como as estimativas dos parâmetros WA se comportam em presença de ruído nos dados observados.

Análise de estabilidade

Uma das formas de se determinar à velocidade da onda P no meio de referencia é através da expressão:

$$\alpha = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \frac{g_z^{(i)}}{s_z^{(i)}}\,. \quad (11)$$

A velocidade da onda S é dada por $\beta = \alpha/\sqrt{3}$ de acordo com a razão de Poisson. O sobrescrito z refere-se a

terceira componente de um vetor, N é o número de observações. Desta forma a velocidade da onda P no meio de referência é dada pela a razão entre a terceira componente do vetor de polarização e a terceira componente do vetor de vagarosidade observados ponderada pelo número de observações. Os parâmetros WA foram estimados a partir da inversão por mínimos quadrados de (8) a partir de dados de VSP multiazimutal com múltiplas fontes. A estabilidade das estimativas foi analisada de duas formas: Primeiramente através da determinação e análise da matriz de covariância das estimativas e a seguir através de simulações numéricas que consistiram em estimar os parâmetros WA de um conjunto de simulações contaminadas com ruído e foi então calculada a média e o desvio padrão de cada estimativa. As observações exatas foram geradas a partir dos modelos sintéticos com o uso do pacote ANRAY modificado (Gajewski & Pšenčík, 1990). A seguir são mostrados os resultados obtidos para modelos sintéticos. No primeiro os dados são medidos em cinco perfis. No segundo modelo os dados são medidos em apenas um perfil. Todos os modelos são formados por dois meios e à origem das coordenadas está situado no poço conforme mostra a Figura 1. São utilizados dados de ondas qP diretas e refletidas. Na simulação numérica foi gerado um conjunto de cem simulações contaminadas com diferentes ruídos, cujo desvio padrão do ruído variava de 1% a 50% do maior valor da combinação $Dg_i e_i^{(1)} + \alpha\,\Delta\eta$ (parte direita de (8)). Para cada nível de ruído considerado o conjunto de cem simulações foi então utilizado na inversão de (8) e foi então calculada a média e desvio padrão das estimativas. Além de ter-se determinado a matriz de covariância das estimativas. Quanto a escolha do vetor frente de onda optou-se por determinar n como sendo paralelo ao vetor de polarização no meio perturbado. Desta forma $g_i e_i^{(1)} = 0$ e as escolhas feitas para os valores do meio de referência são apenas baseados nos dados observados.

O primeiro modelo apresenta 9 fontes em cada lado do poço com distribuição regular de 0,1 km em 5 perfis que estão separados por ângulos azimutais de $\varphi = 0^0$, $\varphi = 30^0$, $\varphi = 60^0$, $\varphi = 120^0$ e $\varphi = 150^0$ na superfície do modelo. O receptor está a uma profundidade de 0.4 km em relação à superfície. O modelo é formado dois meios o meio incidente é um meio triclínico cujo tensor elástico normalizado pela densidade A_{ijkl} na superfície é dado por

$$\begin{bmatrix} 23{,}65 & 6{,}33 & 6{,}03 & -0{,}20 & 0{,}47 & 0{,}23 \\ & 23{,}12 & 6{,}00 & -0{,}79 & 0{,}10 & 0{,}23 \\ & & 20{,}92 & -0{,}68 & 0{,}39 & 0{,}02 \\ & & & 8{,}04 & 0{,}05 & 0{,}16 \\ & & & & 8{,}09 & -0{,}29 \\ & & & & & 8{,}53 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Esse tensor elástico varia com a profundidade e é dado por $a_{ijkl} = A_{ijkl}\,(1+0{,}25z)$. O meio subjacente é um isotrópico. Esses meios estão separados por uma interface que está a 2km da superfície. Pretende-se estimar a partir da inversão de (8) a anisotropia do meio. A velocidade da onda P e da onda S do meio de referência encontrado segundo (11) é de α = 4,7km/s e β = 2,77km/s respectivamente. Na Tabela 1 são mostrados para os parâmetros WA seus valores exatos calculados no receptor, os valores estimados, o desvio padrão dessas estimativas, os parâmetros elásticos exatos e seus valores estimados obtidos a partir das estimativas de WA para um nível de ruído de 10%. De acordo com esta tabela se verifica que os cinco parâmetros ε_z, ε_{15}, ε_{24}, ε_{34} e ε_{35} são bem estimados, pois seus respectivos desvios padrão são iguais ou inferiores a 10% de seus valores estimados. Os demais parâmetros são instáveis. Seus desvios padrão são superiores a 10% de seus valores estimados. Esse resultado se mantém à medida que o nível de ruído aumenta. Logo para este modelo as estimativas dos parâmetros ε_z, ε_{15}, ε_{24}, ε_{34} e ε_{35} são boas para níveis de ruído moderado e apesar dos 15 parâmetros WA que aparecem em (8) apresentarem resolução total para a geometria de cinco perfis apenas cinco parâmetros podem ser bem estimados.

O segundo modelo é formado por dois meios da mesma forma que no modelo 1. A configuração deste modelo é igual a utilizada em Horne e Leaney (2000). Tem-se 228 fontes distribuídas em 2.5km em ambos os lados do poço em apenas um perfil paralelo ao eixo x_1. Estas fontes estão espaçadas irregularmente a uma distância média de 0,025km. O receptor está situado a 1,63 km de profundidade. O meio de incidência é um meio ortorrombico rotacionado cujo tensor elástico normalizado pela densidade A_{ijkl} na superfície é dado por

$$\begin{bmatrix} 12{,}00 & 4{,}00 & 4{,}00 & 0{,}00 & 0{,}00 & 0{,}00 \\ & 10{,}00 & 4{,}00 & 0{,}00 & 0{,}00 & 0{,}00 \\ & & 8{,}00 & 0{,}00 & -0{,}15 & 0{,}00 \\ & & & 3{,}00 & 0{,}00 & 0{,}00 \\ & & & & 3{,}00 & 0{,}00 \\ & & & & & 5{,}00 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Este tensor elástico varia com a profundidade e essa variação é dada por $a_{ijkl} = A_{ijkl}\,(1+0{,}1z)$.O meio subjacente é um isotrópico situado a 2km da superfície. Como neste modelo tem-se dados em apenas um perfil, fazendo $n_2 = 0$, podemos reescrever (8) na forma:

$$\left| n_1 \right| (\alpha^2 - \beta^2)^{-1} B_{13} - \frac{1}{2}\alpha^{-1} n_3 B_{33} = \left| n_1 \right| g_i e_j^{(1)} + \alpha\,\Delta\eta \quad (14)$$

Da mesma forma que no modelo 1 a partir da inversão de (14) é estimada a anisotropia do meio de incidência próximo ao receptor, no entanto de acordo com a análise de sensibilidade para apenas um perfil só cinco parâmetros podem ser recuperados. Neste modelo fizemos a estimativa dos parâmetros WA um pouco diferente do que foi feito no modelo 1. Iremos fazer a inversão considerando três casos distintos como Gomes et al. (2003). No primeiro caso não fizemos suposição alguma sobre o meio a ser invertido, ou seja, o meio é um anisotrópico arbitrário. Desta forma podemos estimar os valores de ε_x, ε_z, δ_x, ε_{15} e ε_{35}. Esse experimento e chamado de ANI. No segundo caso supomos que o meio a ser invertido é um meio TIV. Assim apenas os parâmetros ε_x, ε_z, δ_x podem ser estimados e esse experimento e chamado de TIV. Por fim no terceiro caso supomos que o meio a ser invertido é um isotrópico e, portanto apenas o parâmetro ε_z pode ser estimado e esse experimento e chamado de ISO. As velocidades das ondas P e S no meio de referência determinadas

segundo a relação (11) foram de α = 2,99 km/s e β = 1,76km/s respectivamente. Na Tabela 2 são mostrados para os parâmetros WA seus valores exatos calculados no receptor, os valores estimados e seus desvios padrão, os valores exatos dos parâmetros elásticos e na ultima coluna dessa tabela tem-se uma faixa onde se pode encontrar uma estimativa dos parâmetros elásticos. Esta faixa foi construída segundo o desvio padrão das estimativas de WA e é uma outra forma de mostrar a variação da estimativa. Estes resultados são apresentados para os três casos ANI, TIV e ISO respectivamente para um nível de ruído de 30%. De acordo com a Tabela 2 pode concluir seguinte: No experimento ANI vemos que as estimativas dos parâmetros ε_z e ε_{35} são estáveis, pois apresentam desvio padrão menor que 10% do valor estimado para um nível de ruído de 30%, além da estimativa apresentar boa resolução (mais que 80% do valor exato). O parâmetro ε_{15} apresenta estimativa menor que seu desvio padrão, sugerindo assim que esse parâmetro seja nulo o que de fato é comprovado pelo seu valor exato. Já os parâmetros ε_x e δ_x apesar de serem estáveis para este modelo (desvio padrão menor que 10%) pode-se verificar que não apresentam boa resolução. A resolução de ε_x está em trono de pouco mais 64% de seu valor exato e a resolução de δ_x é de 70% de seu valor exato. A baixa resolução destes parâmetros já era esperada de acordo com a análise de sensibilidade já apresentada. Logo concluímos, que para o caso ANI os parâmetros ε_z e ε_{35} são bem estimados, ε_{15} é nulo e ε_x e δ_x são mal estimados. No experimento TIV, da mesma forma que para o caso ANI o parâmetro ε_z é estável, pois seu desvio padrão é menor que 10% do valor estimado para um nível de ruído de 30% além de apresentar boa resolução (97%). Apesar das estimativas dos parâmetros ε_x δ_x serem estáveis para este modelo, essas estimativas não apresentam boa resolução. Logo concluímos que para o caso TIV ε_x e δ_x são mal estimados. No experimento ISO o desvio padrão da estimativa do parâmetro ε_z é um pouco maior (em trono de 13% do valor estimado para o nível de ruído de 30%) que os desvios padrão desse mesmo parâmetro nos dois casos anteriores (ANI e TIV), mais ainda assim o parâmetro é estável, no entanto agora a resolução está em torno de apenas 10% do valor exato do parâmetro, logo concluímos que para o caso ISO o parâmetro ε_z é mal estimado. Apesar dos três casos ANI, TIV e ISO apresentarem ajustes muito próximos 8,38E-03, 1,31E-02 e 1,68E-02 respectivamente de acordo com os resultados da Tabela 2 o meio estimado não parece ser um TIV ou isotrópico uma vez que apesar do parâmetro ε_{15} ter estimativa igual a zero o parâmetro ε_{35} é bem estimado e sua estimativa é não nula. Este resultado está de acordo com o F-teste (Press et al, 1996) feito para os três casos ANI, TIV e ISO e verifica-se pelos resultados que os parâmetros WA são mais bem estimados no experimento ANI. Ainda de acordo com a Tabela 2 é interessante verificar que as estimativas para ε_z no experimento ANI e TIV são muito próximas já no experimento ISO a estimativa está bastante diferente. Na Figura2 é mostrada a componente vertical da vagarosidade (s/km) versus o ângulo que o vetor de polarização forma com o eixo vertical (em graus) como em Horne & Leaney (2000). Nesta figura os dados sintéticos estão contaminados com 10% de ruído (em vermelho) e o resultado da inversão para o caso ANI (em azul). Verifica-se que a relação entre a componente vertical do vetor de vagarosidade e o ângulo que a polarização faz com o eixo vertical obedecem a um trende. Quando foram plotados também na Figura 2 os resultados obtidos da inversão para os casos TIV e ISO verificou-se que não é fácil notar diferenças entre os três tipos de inversão nesta figura e, portanto, e não se pode concluir nada sobre qual o melhor experimento apenas da figura. Na Figura 3 estamos plotando a razão entre as componentes verticais da vagarosidade e polarização multiplicada pela velocidade da onda P no meio de referência versus o ângulo que o vetor de polarização forma com o eixo vertical (em graus) como em Zheng & Pšenčík (2002). Os dados sintéticos são mostrados em vermelho, o resultados da inversão para o caso ANI está em azul, para o caso TIV em preto e para o caso ISO está em margenta. Por esta figura verifica-se que o resultado da inversão para o caso ANI está mais próximo dos dados observados que os resultados das inversões para os casos TIV e ISO, pode-se concluir que o meio estimado não é TIV e nem ISO, mais não podemos determinar que meio tem-se como no experimento de dados reais Gomes et al (2003). Isto se deve ao fato de só temos dados medidos em um perfil e, portanto só se pode estimar três parâmetros ε_z, ε_{15} e ε_{35} do meio para se conhecer mais sobre este modelo precisamos de dados em mais que um perfil. Esses resultados se mantêm para um nível de até 50% de ruído.

Escolha do vetor frente de onda n

De acordo com os resultados para cada uma das três possíveis escolhas do vetor frente de onda, é verificado que os parâmetros que são bem estimados não apresentam diferenças significativas (a seguir é discutido o significado de "diferenças significativas") para cada uma das escolhas do vetor frente de onda, mesmo para meios com inhomogeneidade considerável (meios em que o tensor elástico da superfície difere de 50% do tensor elástico da base). Assim foi estudada a máxima inclinação de um vetor frente de onda arbitrário em relação ao vetor normal à frente de onda no meio de referência tal que as estimativas dos parâmetros elásticos ainda fossem aceitáveis. A seguir a sensibilidade das estimativas à escolha do vetor frente de onda P no meio de referência**.**

Primeiramente foi escolhido arbitrariamente um vetor **n**′ que forma um ângulo Ψ com o vetor normal a frente de onda no meio de referência **n** (Figura 4). Em seguida variou-se o ângulo Ψ . Para cada valor desse ângulo foi determinado um novo vetor **n**′. Por fim foram feitas as estimativas dos parâmetros WA para cada **n**′. Essas estimativas foram comparadas com as estimativas dos parâmetros WA obtidas quando o vetor frente de onda escolhido era **n**. A comparação foi feita apenas para os parâmetros que eram bem estimados ou seja, p_3, p_{10}, p_{12}, p_{14} e p_{15} (ver (10)).Consideramos que a diferença entre as essas duas estimativas eram aceitável quando apresentavam um valor menor que 10% do valor estimado de WA obtido fazendo a escolha do vetor frente de onda direto do meio de referência.

Foram feitas análises das estimativas dos parâmetros WA em diferentes modelos sintéticos homogêneos,

heterogêneos e com diferentes níveis de anisotropia e de ruído. Verificou-se que o tamanho do cone de validade (valor máximo de Ψ) depende só anisotropia do meio, ou seja, quando menor o grau de anisotropia maior é o cone de validade e quanto maior for o grau de anisotropia (maior que 10%) menor é o cone de validade. O valor de Ψ é em média 10^0 para meio com fraca anisotropia. Foi encontrado para meios com grau de anisotropia em torno de 21% o valor de apenas 1^0 para Ψ. Desta forma podemos concluir que para meios com fraca anisotropia as estimativas são insensíveis a escolha do vetor normal a frente de onda no meio de referência.

Outros testes

Foram feitos testes com outros modelos sintéticos considerando os seguintes fatores:

- Modelos homogêneos e inhomogêneos com diferentes anisotropias.
- Diferentes níveis de ruído
- Quanto ao número de perfis, foram considerados dois casos: dados em apenas um perfil e dados em cinco perfis.
- Foram feitas estimativas com o vetor frente de onda calculado das três maneiras acima citadas.
- Foram considerados três tipos de dados: dados com apenas ondas diretas qP, dados com apenas ondas refletidas qP e dados com ambos os tipos.

Em todos os modelos estudados foi aplicado o fator de corte o valor absoluto de 0.01 a matriz **A** a ser invertida. Os resultados obtidos foram: Considerando dados de onda direta e onda refletida tem-se que para modelos com fraca anisotropia, em torno de ≤10% homogêneos ou heterogêneos e dados medidos em cinco perfis apenas os parâmetros ε_z, ε_{15}, ε_{24}, ε_{34} e ε_{35} são bem estimados para níveis de ruído moderado (até 20%). Para modelos com fraca anisotropia mais dados medidos em apenas um perfil só os parâmetros ε_z, ε_{15}, e ε_{35} são bem estimados para o mesmo nível de ruído. Esses resultados são válidos independentes do grau de complexidade entre fonte e receptor. Considerando-se apenas dados de onda direta ou apenas dados de ondas refletidas o resultado obtido não foi diferente dos resultados obtidos na inversão conjunta de dados de onda direta e onda refletida.O que é na inversão conjunta é que se tem estabilidade maior nos parâmetros bem estimados. Para meios com anisotropia forte (anisotropias iguais ou maiores que 20%) as estimativas obtidas a partir de (8) perdem a validade. A forma de se escolher o vetor **n** não afeta os resultados acima mencionados e em todos os modelos com fraca anisotropia foram calculados os ângulos entre o vetor **n** no meio de referência e o vetor **n** calculado geometricamente e paralelo ao vetor de polarização. Verificou-se que em média esses ângulos não eram maiores que 5^0.

Conclusão

Foi feita uma análise do esquema de inversão que determina localmente os parâmetros de um meio anisotrópico. Um estudo detalhado da sensibilidade e estabilidade do esquema indica que somente alguns parâmetros do meio podem ser estimados. Isto depende do número e orientação dos perfis usados, do número de fontes ao longo desses perfis e do tipo de onda usada na inversão. A análise também mostra que não é possível distinguir qual tipo de anisotropia o meio possui, no entanto, se tivermos dois ou mais modelos que expliquem o meio a ser estimado podemos determinar qual deles melhor se a justa ao meio a ser estimado. Por fim é feito um estudo dos efeitos da escolha do meio de referência e do vetor unitário normal à frente de onda e é mostrado que os resultados são pouco sensíveis e essa escolha para um meio fracamente anisotrópico.

Agradecimentos

Agradecemos ao projeto CTPETRO-FINEP/ PETROBRAS /FADESP/UFPA, ao consórcio SW3D e ao projeto GA AV ČR n^0 A3012309 pelo suporte financeiro. Aos professores Jessé Carvalho Costa, João Batista Corrêa da Silva e Sláva Růžek pelas discussões de importantes neste trabalho.

Referencias

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

Gomes, E., Zheng, X., Pšenčík, I., Horne, S. and Leaney, S., 2003. Local determination of weak anisotropy parameters from a walkaway VSP qP-wave data in the Java Sea region. Studia geoph.et geod., 47, submitted.

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

Menke, W., 1984. Geophysical data analysis: Discrete inverse theory. Academic Press, New York.

Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A. and Vetterling, W.T.,1986. Numerical recipes. Cambridge University Press, Cambridge.

Pšenčík, I. and Gajewski, D., 1998. Polarization, phase velocity and NMO velocity of qP waves in arbitrary weakly anisotropic media. Geophysics, 63, 1754-1766.

Zheng, X. and Pšenčík, I., 2002. Local determination of weak anisotropy parameters from qP-wave slowness and particle motion measurements. PAGEOPH, 159, 1881-1905.

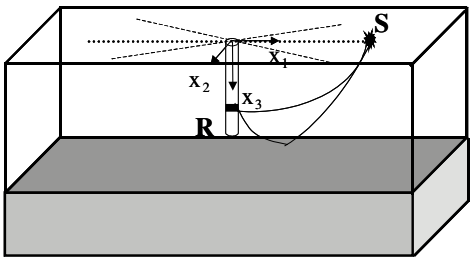

Figura 1 – Desenho do experimento em VSP. Fontes localizadas na superfície em três perfis (linha pontilhada), são representadas as ondas diretas e refletidas que partem da fonte (S) para o receptor (R).

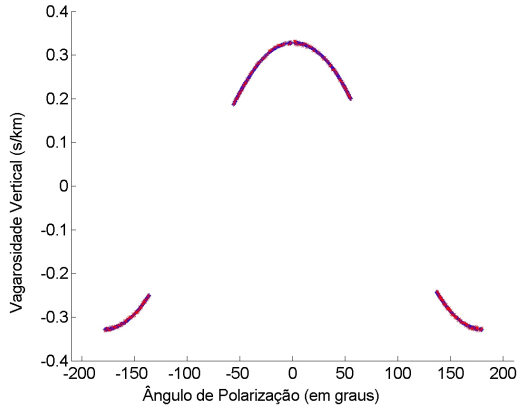

Figura 2- Dados sintéticos contaminados com ruído de 30%em vermelho e ajuste obtido para o caso ANI em azul.

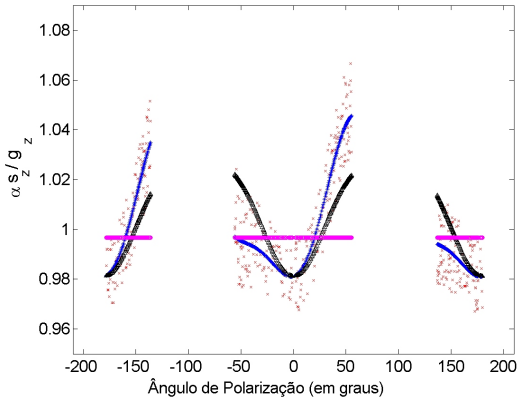

Figura 3- Figura mostra melhor ajuste para caso ANI (em azul). Os dados observados contaminados com ruído de 30%(vermelho), resultado da inversão obtido para o caso TIV (preto), e para o caso ISO (margenta).

.

Tabela1 – Valores exatos e estimados de parâmetros WA, dos parâmetros elásticos normalizados pela densidade e o desvio padrão das estimativas.

WA	Exato	Estim.	Desv. pad.	Par . elast	Exato	Estim
ε_x	7,8E-2	5,9E-2	1,3E-2	A_{11}	25,54	24,7
ε_y	6,5E-2	5,3E-2	1,6E-2	A_{22}	24,97	24,5
ε_z	1,1E-2	7,7E-3	1,0E-3	A_{33}	22,59	22,5
δ_x	8,5E-2	6,1E-2	2,0E-2	$A_{13}+2A_{55}$	23,99	23,5
δ_y	7,8E-2	6,3E-2	2,3E-2	$A_{23}+2A_{44}$	23,84	23,5
δ_z	0,1	0,1	2,6E-2	$A_{12}+2A_{66}$	25,26	24,6
χ_x	-3,8E-2	-3,6E-2	5,7E-3	$A_{14}+2A_{56}$	-0,85	-0,8
χ_y	2,0E-2	1,8E-2	4,8E-3	$A_{25}+2A_{46}$	0,45	0,4
χ_z	5,8E-3	4,2E-5	1,1E-2	$A_{36}+2A_{45}$	0,13	9E-4
ε_{15}	2,3E-2	2,1E-2	2,2E-3	A_{15}	0,50	0,5
ε_{16}	1,1E-2	5,8E-3	7,5E-3	A_{16}	0,25	0,1
ε_{24}	-3,8E-2	-3,6E-2	3,7E-3	A_{24}	-0,85	-0,8
ε_{26}	1,1E-2	5,7E-3	7,5E-3	A_{26}	0,25	0,1
ε_{34}	-3,3E-2	-3,0E-2	1,1E-3	A_{34}	-0,74	-0,7
ε_{35}	1,9E-2	1,8E-2	9,3E-4	A_{35}	0,43	0,4

Tabela 2- Valores exatos e estimados de parâmetros WA, parâmetros elásticos normalizados pela densidade, desvio padrão das estimativas de WA e variação dos parâmetros elásticos.

WA	Exato	Estim.	Desv. pad.	Par. elast	Exato	Var
ANI						
ε_x	0,28	0,17	9,5E-3	A_{11}	13,96	[11,86 12,20]
ε_z	0,02	1,90E-2	8,4E-4	A_{33}	9,3	[9,26 9,29]
δ_x	0,30	0,2	1,6E-2	$A_{13}+2A_{55}$	11,63	[10,74 11,03]
ε_{15}	0,00	1,7E-3	4,9E-3	A_{15}	0,00	[-0,03 0,06]
ε_{35}	-0,02	-1,63E-2	1,2E-3	A_{35}	-0,17	[-0,16 –0,13
TIV						
ε_x	0,28	0,17	9,5E-3	A_{11}	13,96	[11,78 12,12]
ε_z	0,02	1,87E-2	8,4E-4	A_{33}	9,3	[9,26 9,29]
δ_x	0,30	0,21	1,6E-2	$A_{13}+2A_{55}$	11,63	[10,67 10,96]
ISO						
ε_z	0,02	3,30E-3	4,6E-4	A_{33}	9,3	[9,00 8,99]