



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE DE UM ESQUEMA DE INVERSÃO PARA
ESTIMATIVA DE ANISOTROPIA LOCAL A PARTIR DE
DADOS DE VSP**

Adriano César Rodrigues Barreto

BELÉM
2012

Adriano César Rodrigues Barreto

**ANÁLISE DE UM ESQUEMA DE INVERSÃO PARA
ESTIMATIVA DE ANISOTROPIA LOCAL A PARTIR DE
DADOS DE VSP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em cumprimento as exigências para obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Sísmicos

Orientadora: Ellen de Nazaré Souza Gomes

BELÉM
2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

B273a Barreto, Adriano César Rodrigues

Análise de um esquema de inversão para estimativa de anisotropia local a partir de dados de VSP / Adriano César Rodrigues Barreto; Orientador: Ellen de Nazaré Souza Gomes – 2012
49 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2012.

1. Geofísica. 2. Anisotropia local. 3. VSP multiazimutal. 4. inversão linear. I. Gomes, Ellen de Nazaré Souza, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 22° ed.: 551.22

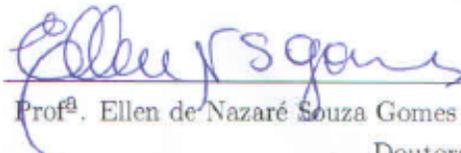
Adriano César Rodrigues Barreto

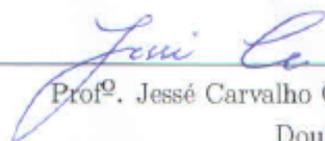
**ANÁLISE DE UM ESQUEMA DE INVERSÃO PARA
ESTIMATIVA DE ANISOTROPIA LOCAL A PARTIR DE
DADOS DE VSP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em cumprimento as exigências para obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Data de Aprovação: 18/05/2012

Banca Examinadora:


Prof^ª. Ellen de Nazaré Souza Gomes – Orientadora
Doutora em Geofísica
Universidade Federal do Pará


Prof^º. Jessé Carvalho Costa – Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará


Prof^º. Amin Bassrei – Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal da Bahia

Dedico este trabalho aos meus pais, meus primeiros professores.

AGRADECIMENTOS

Tudo nessa vida é conquistado através de muito suor e esforço. Por isso, agradeço primeiramente a Deus por ter iluminado meu caminho ao longo de toda minha vida e ter me mostrado o caminho certo a seguir, proporcionando muitos momentos de vitória iguais a este.

Agradeço minha mãe, Rita, pelos incontáveis puxões de orelha e infinitos gestos de amor e carinho e a meu pai, Barreto, pela enorme paciência que tinha ao me ensinar tabuada e pelos outros muitos ensinamentos de vida que me fizeram ser quem sou. À meu irmão André, que sempre esteve ao meu lado e quem considero um segundo pai.

Agradeço aos meus familiares, que através de muita brincadeira sempre me encorajaram. Um agradecimento especial a minha tia Socorro por suas aulas de reforço muito importantes no início de minha vida estudantil.

Agradeço também a minha orientadora, desde a graduação, Ellen Gomes, por sua paciência infinita, seus conhecimentos e pelos seus sanduíches de pão integral importantíssimos para o desenvolvimento deste trabalho. Ao pessoal da secretaria, Benildes e Lucibela, pois graças a elas minha orientadora hoje é uma mulher boazinha.

À minha namorada, Jéssica Lia, pelas mensagens de apoio que sempre me encorajaram e me confortaram nos momentos mais difíceis. Agradeço a meus amigos, Diogo Rezende, Raiza Macambira, Renata (Furacão), Raphael Di Carlo, Boris Freimman, Gabriela Pantoja, Jorlivan, Isabela Lima, João, Wilber Stewart, Rizimar, Josafat, Marcelo (Sucasa), Alexandre Sodré, Cezar (Pato do Universo), Cristiano, Isis, Alberto, Augusto (Ursão), Isadora (Pé de pato), Érico, Celina, Aline, Carol Sena, Diogo Lopes, Fabiano Ricini, Romerson, Hugo, Ingrid, Itamara, Jéssica Pena, Dheyminson, Jonathan, Ordilei, Renilo, Wildney, Chicão, Chiquinho. Ao Andrei, pelo seu conhecimento em TEX, muito importante na elaboração deste trabalho e pelos inúmeras horas de conversas jogadas fora na sala da professora.

Por fim, ao CNPq e ao INCT-GP pelo suporte financeiro.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Símbolo	Descrição
B_{mn}	Matriz de fraca anisotropia
M	Matriz de sensibilidade
N_{obs}	Número de observações
N_{par}	Número de parâmetros WA
N_s	Número de simulações realizadas para estimar os parâmetros WA
a_{ijkl}	Tensor dos parâmetros elásticos normalizados pela densidade
α e β	Velocidades das ondas P e S, respectivamente, no meio de referência
g_i	Vetor de polarização no meio anisotrópico
p	Vetor vagarosidade de uma onda P no meio anisotrópico
p_3^{obs}	Componente vertical do vetor de vagarosidade de uma onda P observado
η	Projeção do vetor vagarosidade no meio isotrópico de referência na direção do eixo z
n	Vetor normal à frente de onda P no meio isotrópico de referência
c	Módulo da velocidade de propagação da onda na subsuperfície
VSP	Sigla em inglês para perfil sísmico vertical (Vertical Seismic Profile)

TI	Meio transversalmente isotrópico (Transverse Isotropic)
TIV	Meio transversalmente isotrópico com eixo de simetria vertical (Transverse Isotropic Vertical)
TIH	Meio transversalmente isotrópico com eixo de simetria horizontal (Transverse Isotropic Horizontal)
WA	Sigla do inglês “Weak Anisotropy” que significa fraca anisotropia

$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$

$\delta_x, \delta_y, \delta_z$

χ_x, χ_y, χ_z Parâmetros de fraca anisotropia ou parâmetros WA

$\epsilon_{15}, \epsilon_{16}, \epsilon_{24}$

$\epsilon_{26}, \epsilon_{34}, \epsilon_{35}$

APRESENTAÇÃO

Com os recentes avanços da indústria do petróleo e com aumento da dificuldade de se encontrar reservatórios de hidrocarbonetos em ambientes de geologia simples, o estudo de meios geologicamente complexos se torna a cada dia mais essencial. Esses ambientes, em sua maioria são fraturados e em regime quase estacionário comportam-se efetivamente como meios anisotrópicos (Schoenberg & Douma, 1988).

Trabalhos sobre meios anisotrópicos são relativamente recentes, Postma (1955), Thomsen (1986, 1993), Schoenberg & Douma (1988), Schoenberg & Sayers (1995). A utilização de dados de VSP multiazimutal para a estimativa de anisotropia tem sido usados em vários trabalhos como: Gajewski & Pšenčík (1990), Horne & Leaney (2000) e Zheng & Pšenčík (2002), que considerando meios fracamente anisotrópicos, apresentaram uma relação linear entre os parâmetros anisotrópicos do meio e os vetores de vagarosidade e polarização de uma onda qP medidos em VSP multiazimutal. Gomes *et al.* (2004) utiliza a metodologia apresentada em Zheng & Pšenčík (2002) aplicada a um dado da região de Java. Mais recentemente, Rusmanugroho & McMechan (2012) utilizaram dados de ondas P e S em experimentos de VSP para estudar a sensibilidade das estimativas em meios anisotrópicos homogêneos.

Neste trabalho é feita uma análise da estimativa local dos parâmetros anisotrópicos em torno do poço, a partir de dados de onda P medidos em experimentos de VSP multiazimutal. Este trabalho é apresentado na forma de artigo, de acordo com as novas regras do Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará. Assim, a forma escrita da dissertação possui um texto de apresentação e um capítulo, que consiste do trabalho a ser submetido a Revista Brasileira de Geofísica (RBGf).

ANÁLISE DE UM ESQUEMA DE INVERSÃO PARA ESTIMATIVA DE ANISOTROPIA LOCAL A PARTIR DE DADOS DE VSP

ABSTRACT. Inversion scheme for the determination of arbitrary in a vicinity of a receiver situated inside a borehole from the data obtained during a multi-offset multi-azimuthal VSP experiment is studied. The data consist of vertical components of the slowness vector and all components of the polarization vector of P waves direct and reflected. The inversion is made from a first order approximation around an reference arbitrary isotropic medium, that does the relation between the data of slowness and polarization of P waves parameters and the weakly anisotropic medium (WA parameters). This inversion scheme applies to arbitrary anisotropy medium, provided that the anisotropy is weak and independent of downhole type (vertical, horizontal or inclined). The results show that reversing is sensitive to the number and orientation of the profiles of sources that are distributed on the surface. An analysis of the design of an experiment and discussion about the choice of parameters of the reference isotropic medium are presented. Within the realistic assumptions about the level of noise is possible to estimate the phase velocity for a limited angular aperture around the well.

Keywords: Anisotropy, multi-azimuth VSP, linear inversion.

ANALYSIS OF AN INVERSION SCHEME TO ESTIMATE THE LOCAL ANISOTROPY FROM VSP DATA

RESUMO. É estudado o esquema de inversão linear para a determinação de anisotropia em torno de um receptor situado no interior do poço a partir de dados de VSP multiazimutal. O dado consiste da componente vertical do vetor de vagarosidade e do vetor de polarização de ondas P diretas e refletidas medidos no receptor. A inversão é feita a partir de uma aproximação de primeira ordem, em torno de um meio isotrópico de referência arbitrário, da relação entre os dados de vagarosidade e polarização de onda P e os parâmetros fracamente anisotrópicos do meio (parâmetros WA). Esse esquema de inversão vale para meios com anisotropia arbitrária, desde que o grau de anisotropia seja fraca e independe do tipo de poço (vertical, horizontal ou inclinado).

Os resultados mostram que a inversão é sensível ao número e a orientação dos perfis na superfície onde estão distribuídas as fontes. Uma análise do desenho de experimento e uma discussão sobre a escolha dos parâmetros do meio isotrópico de referência são apresentados. Dentro dos pressupostos realísticos sobre o nível de ruído, é possível estimar a velocidade de fase para uma abertura angular limitada em torno do poço.

Palavras Chave: Geofísica, Anisotropia local, VSP multiazimutal, inversão linear.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
METODOLOGIA	13
MATRIZ DE SENSIBILIDADE	15
Análise de sensibilidade	16
Configuração do experimento e os modelos anisotrópicos.....	21
PROBLEMA INVERSO	24
Determinação dos parâmetros do meio de referência	25
Determinação das velocidades das ondas P e S no meio isotrópico de referência	25
Determinação do vetor n normal à frente de onda P no meio isotrópico de referência	26
EXPERIMENTOS NUMÉRICOS	27
O dado observado	27
Apresentação dos resultados	27
Resultados	28
CONCLUSÃO	41
APÊNDICE A – MATRIZ DE SENSIBILIDADE DE ONDA P.....	43
AGRADECIMENTOS.....	44
REFERÊNCIAS	44
LISTA DE FIGURAS	46

INTRODUÇÃO

A maioria dos reservatórios de hidrocarbonetos são fraturados e em regime quase estático se comportam como meios efetivamente anisotrópicos (Schoenberg & Douma, 1988). Através da estimativa dos parâmetros de anisotropia podem ser obtidas informações como por exemplo, a direção preferencial de fluxo, informação importante para melhor aproveitamento do reservatório.

A estimativa de anisotropia através da inversão de dados de VSP (Vertical Seismic Profile) tem sido objeto de estudo recente: Horne & Leaney (2000), Zheng & Pšenčík (2002), Gomes *et al.* (2004) e Rusmanugroho & McMechan (2012). Estes trabalhos basicamente se diferenciam quanto a metodologia empregada.

Neste trabalho, a sensibilidade e estabilidade das estimativas de parâmetros anisotrópicos foram estudadas a partir da inversão de dados de ondas P geradas em um experimento de VSP walkaway multiazimutal.

A inversão é baseada em uma aproximação linear (Zheng & Pšenčík, 2002), em torno de um meio isotrópico de referência, que relaciona os parâmetros de fraca anisotropia (Farra & Pšenčík, 2003) do meio na vizinhança de um receptor, com as componentes verticais do vetor de vazarosidade e o vetor de polarização. Esses dados são gerados por fontes distribuídas na superfície da Terra e são registrados em receptores situados no poço.

Este esquema de inversão não depende da estrutura do meio acima do receptor (homogêneo ou heterogêneo), do tipo de anisotropia ou da forma do poço (que pode ser curvado, reto, vertical ou inclinado). Além disso, o esquema utiliza um meio isotrópico de referência arbitrário.

Nos testes realizados, foram utilizados dados sintéticos de ondas P diretas e refletidas. Os dados foram gerados pelo pacote de traçamento de raios ANRAY (Gajewski & Pšenčík, 1990).

Este trabalho é uma extensão do apresentado em Zheng & Pšenčík (2002) (no qual apenas dados de ondas P direta são utilizados) e apresenta uma análise similar a abordada em Rusmanugroho & McMechan (2012), diferindo quanto a metodologia e o tipo de onda utilizada.

Neste trabalho, é apresentada uma análise de sensibilidade do esquema de inversão a geometria do levantamento, é discutida a escolha dos parâmetros do meio isotrópico de referência e são realizados testes numéricos para analisar a estabilidade das estimativas dos parâmetros anisotrópicos. A partir das estimativas dos parâmetros WA, foi calculada a velocidade de fase. De acordo

com os resultados desses testes, a velocidade de fase é bem estimada para um cone de 30° entorno do receptor no interior do poço. Esta informação é útil para a construção de modelos de velocidade a serem utilizados no imageamento sísmico, onde a velocidade vertical é difícil de ser estimada a partir de dados de superfície.

Ao longo do trabalho, a notação matricial e vetorializada são utilizadas. Matrizes são representadas por letras maiúsculas e vetores por letras minúsculas, ambas, em negrito. A convenção da soma de Einstein é usada em todo o texto. As exceções a estas regras serão indicadas explicitamente.

METODOLOGIA

Considere um sistema cartesiano (x, y, z) , com eixo z tendo sentido positivo apontando para baixo. Para a determinação dos parâmetros WA em um receptor situado em um poço vertical, utiliza-se a Eq. (1) de Gomes *et al.* (2004) (ver também Eq. (22) de Zheng & Pšenčík, 2002):

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

em que

$$D = \sqrt{n_1^2 + n_2^2} \quad e \quad \eta = \alpha^{-1} n_3. \quad (2)$$

Os símbolos α e β denotam as velocidades das ondas P e S, respectivamente, no meio isotrópico de referência. As seguintes quantidades são definidas para cada par fonte-receptor: o vetor $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$ em (1) e (2) é o vetor unitário normal à frente de onda P no meio isotrópico de referência; o vetor $\mathbf{e}^{(1)}$ em (1) é um vetor unitário perpendicular a \mathbf{n} . Os vetores $\mathbf{e}^{(1)}$ e $\mathbf{n} = \mathbf{e}^{(3)}$ estão confinados no plano vertical contendo o perfil considerado. Eles pertencem ao conjunto vetorial $\mathbf{e}^{(1)}$, $\mathbf{e}^{(2)}$ e $\mathbf{e}^{(3)}$ no meio de referência, que é escolhido da seguinte maneira (Pšenčík & Gajewski, 1998):

$$\begin{aligned} \mathbf{e}^{(1)} &= D^{-1}(n_1 n_3, n_2 n_3, n_3^2 - 1), \\ \mathbf{e}^{(2)} &= D^{-1}(-n_2, n_1, 0), \\ \mathbf{e}^{(3)} &= (n_1, n_2, n_3). \end{aligned} \quad (3)$$

As quantidades \mathbf{g} e $\Delta\eta = p_3^{obs} - \eta$, na Eq. (1), são os dados observados e consistem no vetor de polarização e a diferença entre as componentes verticais do vetor de vagarosidade observado e do vetor de vagarosidade no meio isotrópico de referência, respectivamente.

Ainda na Eq. (1), os símbolos B_{mn} , com $m, n = 1, 2, 3$, representam matrizes de fraca anisotropia projetadas na direção dos vetores $\mathbf{e}^{(k)}$, de acordo com a seguinte relação:

$$B_{mn} = a_{ijkl} e_i^{(m)} e_j^{(3)} e_l^{(3)} e_k^{(n)} - \alpha^2 \delta_{mn}. \quad (4)$$

Na Eq. (4), a_{ijkl} é o tensor dos parâmetros elásticos normalizados pela densidade ¹, com $i, j, k, l = 1, 2, 3$. Os elementos deste tensor se relacionam com os parâmetros WA a serem estimados (ver seção de Matriz de sensibilidade, relação (9)). Os elementos B_{13} e B_{33} na Eq. (1), para um meio anisotrópico de simetria arbitrária, podem ser escritos como se segue (ver Pšenčík & Gajewski, 1998):

$$\begin{aligned} B_{13} = \alpha^2 D^{-1} \{ & 2\varepsilon_z n_3^5 + n_3^4 (\varepsilon_{34} n_2 + \varepsilon_{35} n_1) + n_3^3 (\delta_x n_1^2 + \delta_y n_2^2 \\ & + 2\chi_z n_1 n_2 - 2\varepsilon_z) + n_3^2 [(4\chi_x - 3\varepsilon_{34}) n_1^2 n_2 + (4\chi_y - 3\varepsilon_{35}) n_1 n_2^2 \\ & + (4\varepsilon_{15} - 3\varepsilon_{35}) n_1^3 + (4\varepsilon_{24} - 3\varepsilon_{34}) n_2^3] + n_3 [(2\delta_z - \delta_x - \delta_y) n_1^2 n_2^2 \\ & + 2(2\varepsilon_{16} - \chi_z) n_1^3 n_2 + 2(2\varepsilon_{26} - \chi_z) n_1 n_2^3 + (2\varepsilon_x - \delta_x) n_1^4 \\ & + (2\varepsilon_y - \delta_y) n_2^4] - \chi_x n_1^2 n_2 - \chi_y n_1 n_2^2 - \varepsilon_{15} n_1^3 - \varepsilon_{24} n_2^3 \}, \quad (5) \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} B_{33} = 2\alpha^2 \{ & \varepsilon_z n_3^4 + 2n_3^3 (\varepsilon_{34} n_2 + \varepsilon_{35} n_1) + n_3^2 (\delta_x n_1^2 + \delta_y n_2^2 \\ & + 2\chi_z n_1 n_2) + 2n_3 (\chi_x n_1^2 n_2 + \chi_y n_1 n_2^2 + \varepsilon_{15} n_1^3 + \varepsilon_{24} n_2^3) \\ & + \varepsilon_x n_1^4 + \delta_z n_1^2 n_2^2 + \varepsilon_y n_2^4 + 2\varepsilon_{16} n_1^3 n_2 \\ & + 2\varepsilon_{26} n_1 n_2^3 \}, \quad (6) \end{aligned}$$

em que os símbolos ε_{ij} , χ_k e δ_k , com $i, j = 1, 2, 3$ e $k = x, y, z$, são os parâmetros de fraca anisotropia (conhecidos como parâmetros WA²). Vale lembrar que a Eq. (1) é independente de qualquer estrutura complexa e vale para um poço orientado arbitrariamente.

¹Neste trabalho é utilizada densidade $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$

²Ao longo do texto representaremos a dependência dos parâmetros WA de ε_{ij} , χ_k e δ_k , apenas por WA(ε_{ij})

MATRIZ DE SENSIBILIDADE

Podemos reescrever a Eq. (1) na forma matricial:

$$\mathbf{M}\mathbf{x} = \mathbf{y}, \quad (7)$$

em que o vetor \mathbf{y} é adimensional e está relacionado as observações (lado direito da Eq. (1)) para cada par fonte-receptor. Possui, portanto, número de linhas igual ao número de observações (N_{obs}). O vetor \mathbf{x} está relacionado ao número de parâmetros WA (ε) que controlam a propagação de onda P e, portanto, possui número de linhas igual ao número de parâmetros (N_{par}). O objetivo da inversão é determinar esses parâmetros invertendo a Eq. (7). Para ondas P, $N_{par} = 15$ e os elementos do vetor \mathbf{x} são:

$$\begin{aligned} x_1 &= \varepsilon_x, & x_2 &= \varepsilon_y, & x_3 &= \varepsilon_z, \\ x_4 &= \delta_x, & x_5 &= \delta_y, & x_6 &= \delta_z, \\ x_7 &= \chi_x, & x_8 &= \chi_y, & x_9 &= \chi_z, \\ x_{10} &= \varepsilon_{15}, & x_{11} &= \varepsilon_{16}, & x_{12} &= \varepsilon_{24}, \\ x_{13} &= \varepsilon_{26}, & x_{14} &= \varepsilon_{34}, & x_{15} &= \varepsilon_{35}. \end{aligned} \quad (8)$$

Os parâmetros WA no vetor \mathbf{x} são relacionados com os parâmetros elásticos normalizados pela densidade (A_{ij}) da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{A_{11} - \alpha^2}{2\alpha^2}, & \varepsilon_y &= \frac{A_{22} - \alpha^2}{2\alpha^2}, & \varepsilon_z &= \frac{A_{33} - \alpha^2}{2\alpha^2}, \\ \delta_x &= \frac{A_{13} + 2A_{55} - \alpha^2}{\alpha^2}, & \delta_y &= \frac{A_{23} + 2A_{44} - \alpha^2}{\alpha^2}, & \delta_z &= \frac{A_{12} + 2A_{66} - \alpha^2}{\alpha^2}, \\ \chi_x &= \frac{A_{14} + 2A_{56}}{\alpha^2}, & \chi_y &= \frac{A_{25} + 2A_{46}}{\alpha^2}, & \chi_z &= \frac{A_{36} + 2A_{45}}{\alpha^2}, \\ \varepsilon_{15} &= \frac{A_{15}}{\alpha^2}, & \varepsilon_{16} &= \frac{A_{16}}{\alpha^2}, & \varepsilon_{24} &= \frac{A_{24}}{\alpha^2}, \\ \varepsilon_{26} &= \frac{A_{26}}{\alpha^2}, & \varepsilon_{34} &= \frac{A_{34}}{\alpha^2}, & \varepsilon_{35} &= \frac{A_{35}}{\alpha^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Na equação acima, α é novamente a velocidade da onda P no meio isotrópico de referência. Ainda na Eq. (7), a matriz \mathbf{M} é de ordem $N_{obs} \times N_{par}$ e é a chamada *matriz de sensibilidade* (ver Apêndice A) e $\mathbf{M} = \mathbf{M}(\alpha; \beta; \mathbf{n})$ é

formada pelo lado esquerdo da Eq. (1). A matriz de sensibilidade depende da geometria do experimento de VSP e da escolha dos parâmetros do meio de referência. Como consequência da escolha feita neste trabalho para o cálculo do vetor normal à frente de onda, a matriz \mathbf{M} também depende dos dados observados e desse modo, da anisotropia do meio estudado. Uma vez que o resultado da inversão depende das propriedades da matriz de sensibilidade \mathbf{M} a seguir é feita uma análise de sensibilidade.

Análise de sensibilidade

Nesta seção é apresentada uma análise da sensibilidade do esquema de inversão com relação a variação do número e a orientação dos perfis (ondas as fontes estão localizadas) no levantamento VSP (Fig. 3) e aos parâmetros do meio isotrópico de referência. Nesta análise, considerou-se o receptor no interior do poço a profundidade de 0,4 km. O vetor normal à frente de onda, \mathbf{n} , no meio de referência foi determinado como um vetor unitário apontando na direção fonte-receptor. Esta escolha para \mathbf{n} depende somente da configuração do experimento, não dependendo assim dos dados observados. Outras possíveis escolhas para \mathbf{n} serão discutidas ao longo deste trabalho. Através desse tipo de análise pode-se determinar, mesmo sem informações do modelo direto e sem ter realizado a inversão, que parâmetros, de acordo apenas com a geometria de aquisição utilizada, poderão ser estimados ou não.

A análise de sensibilidade é baseada na análise da matriz de resolução de modelo (Menke, 1984). A matriz de resolução determina se o dado pode ser independentemente predito ou resolvido. Considerando que existe no modelo de parâmetros um conjunto de valores exatos $\mathbf{x}^{\text{exata}}$ que resolvem:

$$\mathbf{M} \mathbf{x}^{\text{exata}} = \mathbf{y}_{\text{obs}}, \quad (10)$$

pode-se então investigar quão próximo uma estimativa particular do modelo de parâmetros $\tilde{\mathbf{x}}$ está da solução exata. Substituindo a Eq. (10) na expressão que estima os parâmetros:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{M}^{-g} \mathbf{y}_{\text{obs}} = \mathbf{M}^{-g} [\mathbf{M} \mathbf{x}^{\text{exata}}] = [\mathbf{M}^{-g} \mathbf{M}] \mathbf{x}^{\text{exata}} = \mathbf{R} \mathbf{x}^{\text{exata}}, \quad (11)$$

em que \mathbf{R} é a matriz de resolução do modelo e é de ordem N_{par} . Quanto mais próximo estiver \mathbf{R} da matriz identidade, melhor será a resolução dos

parâmetros WA. A quantidade \mathbf{M}^{-g} é o operador inverso generalizado que, para um problema de mínimos quadrados sobredeterminado é dado por:

$$\mathbf{M}^{-g} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T, \quad (12)$$

em que \mathbf{M}^T é a matriz transposta de \mathbf{M} . Aplicando a decomposição em valores singulares (*Singular Value Decomposition* - SVD) na matriz de sensibilidade \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T, \quad (13)$$

em que \mathbf{U} é uma matriz quadrada de ordem N_{obs} cujas colunas são os autovetores da matriz \mathbf{M} , $\mathbf{\Sigma}$ é a matriz diagonal de ordem $N_{obs} \times N_{par}$, cujos elementos da diagonal são os valores singulares da matriz \mathbf{M} e \mathbf{V} é uma matriz quadrada de ordem N_{par} cujas colunas são os autovalores da matriz \mathbf{M} . O símbolo T indica a operação de transposição. Substituindo a matriz \mathbf{M} decomposta em valores singulares, a matriz de resolução \mathbf{R} pode ser reescrita como:

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}_r \mathbf{V}_r^T, \quad (14)$$

em que r é o posto efetivo da matriz \mathbf{M} . O posto da matriz pode variar entre 1 e N_{par} . Essa análise que baseia-se matriz de resolução \mathbf{R} é conhecida como *análise de sensibilidade conservativa*. Através da análise conservativa verifica-se que parâmetros tem resolução total e portanto, poderão ser estimados. A fim de descobrir se de fato um parâmetro é bem estimado, é necessário fazer uma análise de estabilidade, isto é, analisar o comportamento das estimativas dos parâmetros a partir do dado observado contaminado por ruído. Tal análise é feita na seção de Experimentos Numéricos.

Inicialmente foi feita a análise de sensibilidade variando o número e a orientação dos perfis. De acordo com o número de perfis o número de condição da matriz \mathbf{M} variava. Considerou-se que o problema era bem condicionado para um número de condição de \mathbf{M} menor ou igual a 10^2 . Chegou-se aos seguintes resultados:

- a) No caso de medidas feitas ao longo de um único perfil, somente cinco parâmetros WA possuem resolução total e portanto, poderão ser estimados. Se o perfil está posicionado paralelo ao eixo x (azimute 0°), os cinco parâmetros WA são: ϵ_x , ϵ_z , δ_x , ϵ_{15} e ϵ_{35} .

- b) No caso de medidas feitas ao longo de dois perfis, o melhor resultado é obtido quando esses dois perfis são perpendiculares. Neste caso, nove parâmetros WA possuem resolução total (e poderão ser estimados). Se os perfis são especificados ao longo dos eixos x e y (azimutes 0° e 90°), os parâmetros WA recuperados são: $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \delta_x, \delta_y, \varepsilon_{15}, \varepsilon_{24}, \varepsilon_{34}$ e ε_{35} . Os demais parâmetros (seis parâmetros WA) apresentam resolução no espaço nulo.
- c) No caso de medidas realizadas ao longo de três perfis, reparou-se que a configuração ótima é obtida com perfis apresentando azimutes espaçados de 60° . Neste caso, onze parâmetros WA poderão ser estimados. Se forem escolhidos perfis tal que seus azimutes sejam $0^\circ, 60^\circ$ e 120° , os parâmetros WA com resolução total são: $\varepsilon_x, \varepsilon_z, \delta_x, \delta_y, \chi_z, \varepsilon_{15}, \varepsilon_{24}, \varepsilon_{34}$ e ε_{35} . Quanto aos demais parâmetros tem-se que: ε_y e ε_{26} apresentam resolução de aproximadamente 80%, δ_z e ε_{16} tem resolução zero (resolução no espaço nulo).
- d) No caso de medidas realizadas ao longo de quatro perfis, a configuração ótima é obtida com perfis espaçados de 45° . Neste caso, treze parâmetros WA tem resolução total. Se os perfis forem escolhidos tais que os azimutes sejam $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ e 135° , os parâmetros WA que poderão ser recuperados são: $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \delta_x, \delta_y, \delta_z, \chi_x, \chi_y, \chi_z, \varepsilon_{15}, \varepsilon_{24}, \varepsilon_{34}$ e ε_{35} . Os demais parâmetros possuem resolução menor que 60%.
- e) No caso de medidas realizadas ao longo de cinco perfis, todos os quinze parâmetros poderão ser estimados para qualquer configuração, desde que estes perfis sejam linearmente independentes. A configuração ótima é obtida com perfis espaçados de 36° .

Diminuindo o número de fontes ao longo dos perfis de dezoito para seis (três de cada lado do poço) e mantendo a fonte mais próxima a 0,1 km da cabeça do poço e a mais distante a 0,9 km, a resolução dos parâmetros não é alterada de modo significativo.

Nas Figuras a seguir é ilustrado o efeito da orientação mútua dos perfis para o caso de três perfis. Na Figura 1, é mostrada a matriz de resolução considerando os perfis com azimutes $0^\circ, 45^\circ$ e 90° , enquanto que, na Figura 2, é mostrada a matriz de resolução considerando os perfis de acordo com os azimutes descritos no item c) acima. Pode-se observar que no primeiro caso (Fig. 1) somente nove parâmetros apresentam resolução 100%. Quanto

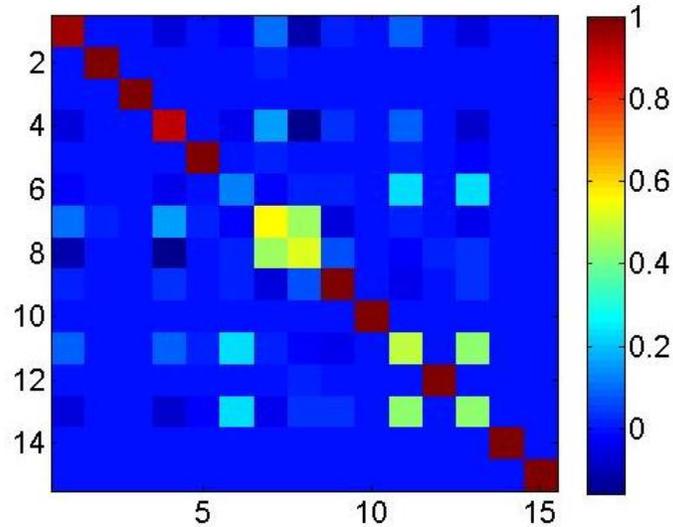


Figura 1 – Matriz de resolução para o receptor a profundidade de 0,4 km no interior do poço. Essa matriz foi obtida considerando a geometria de aquisição com fontes distribuídas em 3 perfis associados aos azimutes 0° , 45° e 90° .

aos demais parâmetros: δ_x , tem 80% de resolução, χ_y e ε_{26} , possuem por volta de 60% de resolução e δ_z tem cerca de 20% de resolução. No segundo caso (Fig. 2), onze parâmetros WA apresentam resolução 100%. Quanto aos demais parâmetros: ε_y e ε_{26} , possuem 80% de resolução e δ_z e ε_{16} possuem pouco mais 20% de resolução. Os melhores resultados são obtidos quando os perfis estão regularmente espaçados (Fig. 2).

Durante a análise de sensibilidade conservativa verificou-se que a estimativa dos parâmetros WA é independente da escolha das velocidades das ondas P e S no meio isotrópico de referência assim como da escolha do vetor normal à frente de onda, \mathbf{n} .

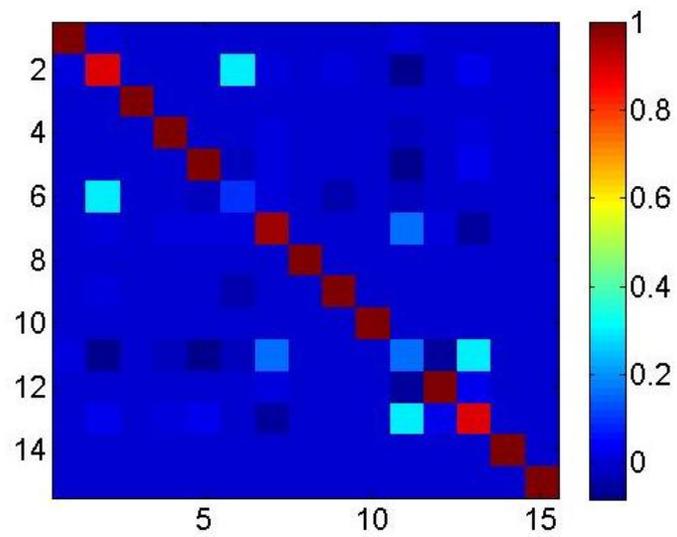


Figura 2 – Matriz de resolução para o receptor a profundidade de 0,4 km no interior do poço. Essa matriz foi obtida considerando a geometria de aquisição com fontes distribuídas em 3 perfis associados aos azimutes 0° , 60° e 120° .

Configuração do experimento e os modelos anisotrópicos

Todos os testes realizados neste trabalho utilizou a configuração de VSP multiazimutal mostrada esquematicamente na Figura 3. A intersecção do poço com a superfície representa a origem do sistema cartesiano, sendo o poço paralelo ao eixo z com sentido positivo apontando para baixo. Os eixos x e y estão situados no plano da superfície. Nos testes realizados, foram utilizados dois modelos. Em cada um deles a geometria de aquisição VSP é diferente.

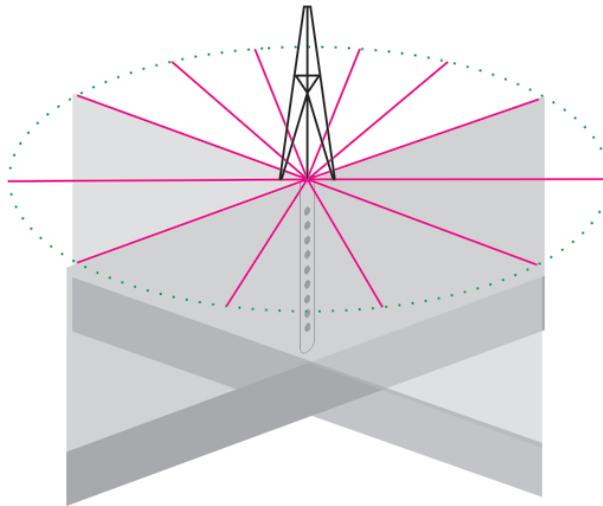


Figura 3 – Experimento de VSP multiazimutal. As fontes estão distribuídas em perfis na superfície (linhas magentas) e os receptores estão no poço. A origem das coordenadas está situada na cabeça do poço, com eixo z positivo de cima para baixo.

Na geometria de aquisição do modelo 1, foram usadas um total de 18 fontes, espaçadas regularmente de 0,1 km por perfil, com 9 fontes em cada lado do poço (Fig. 4). Existem 2 receptores de três componentes (3C) situados no interior do poço. O mais raso está a uma profundidade de 0,1 km (receptor #1) e o mais profundo a uma profundidade de 0,7 km (receptor #2).

O modelo 1 consiste em duas camadas, a primeira anisotrópica heterogênea, e a segunda camada, abaixo da primeira, isotrópica. A interface

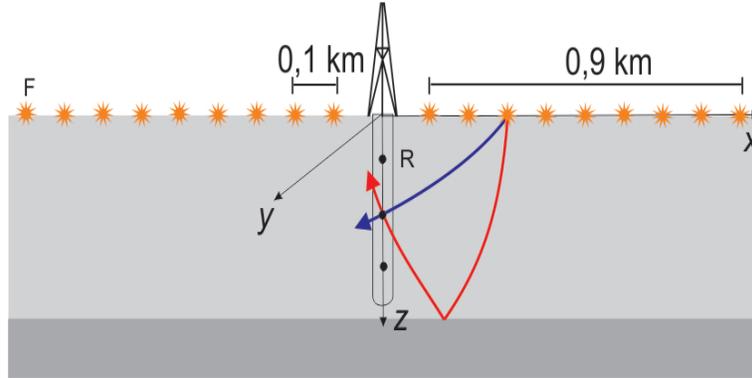


Figura 4 – Configuração utilizada no modelo 1, constituído de dois meios, o incidente é anisotrópico e o subjacente é isotrópico. As fontes (F) estão na superfície e os receptores (R) estão no poço. A onda P direta é representada pela linha azul, enquanto que a onda P refletida é representada pela linha vermelha. Estas linhas são curvadas devido ao meio ser heterogêneo.

horizontal separando os dois meios está situada a profundidade de 5 km. O meio isotrópico é caracterizado pelas velocidades das ondas P e S normalizadas pela densidade, $\alpha = 4,0$ km/s e $\beta = 2,35$ km/s, respectivamente. O meio anisotrópico é um meio TI (transversalmente isotrópico). A anisotropia da onda P é definida como $\varepsilon \times 100\%$, em que ε é máximo entre ε_x , ε_y e ε_z (Thomsen, 1986). O grau de anisotropia do meio incidente do modelo 1 é aproximadamente 8%. A distribuição dos parâmetros elásticos na camada anisotrópica é determinada pela interpolação linear vertical entre os valores destes parâmetros especificados no topo ($z = 0$ km) e na base ($z = 5$ km) da camada. Inicialmente o meio anisotrópico era um TIV cujo eixo de simetria é girado. Os parâmetros elásticos independentes, desse meio TIV normalizados pela densidade em $(\text{km/s})^2$, no topo da camada são: $A_{11} = A_{22} = 15,71$, $A_{33} = 13,39$, $A_{12} = 5,05$, $A_{13} = A_{23} = 4,46$, $A_{44} = A_{55} = 4,98$. O eixo de simetria vertical é rotacionado de 80° em torno do eixo y e em seguida de 25° em torno do eixo z . Os parâmetros elásticos independentes, desse meio TIV normalizados pela densidade em $(\text{km/s})^2$ na base da camada são: $A_{11} = A_{22} = 35,348$, $A_{33} = 30,128$, $A_{12} = 11,363$, $A_{13} = A_{23} = 10,04$, $A_{44} = A_{55} = 11,21$. Esse TIV, teve seu eixo de simetria vertical rotacionado de 90° em torno do eixo y dando origem assim a um meio TIH.

Na geometria de aquisição do modelo 2, foram utilizadas 60 fontes dis-

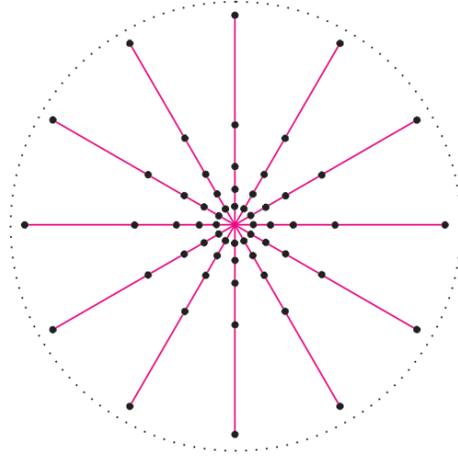


Figura 5 – Vista de cima da geometria de aquisição utilizada no modelo 2. As fontes são representadas por pontos pretos, perfis em margenta e no centro está a cabeça do poço.

tribuídas em seis perfis cujo azimutes variam de 0° a 360° com incremento de 30° (Fig. 5) e as inclinações variam de -75° a 75° com incremento de 15° . Tem-se um único receptor 3C situado no poço a uma profundidade de 0,25 km (Fig. 6). O modelo 2, é formado por duas camadas planas. A primeira camada, meio incidente, tem espessura de 1,1 km e trata-se de um meio anisotrópico triclínico homogêneo, apresentado em Rusmanugroho & McMechan (2012), cujo tensor dos parâmetros elásticos normalizados pela densidade em $(\text{km/s})^2$, é dado por:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 5,5618 & 2,1916 & 2,5979 & 0,1496 & -0,0144 & -0,3308 \\ & 5,5145 & 2,6089 & 0,2066 & -0,0081 & -0,2901 \\ & & 6,7882 & 0,2115 & -0,0134 & -0,2240 \\ & & & 1,7636 & -0,0658 & -0,0011 \\ & & & & 1,7490 & 0,0392 \\ & & & & & 1,6588 \end{bmatrix} \quad (15)$$

A segunda camada é um isotrópico de espessura de 0,9 km cujas velocidades das ondas P e S normalizadas pela densidade são calculadas pela raiz quadrada de A_{33} e A_{44} do meio incidente, respectivamente.

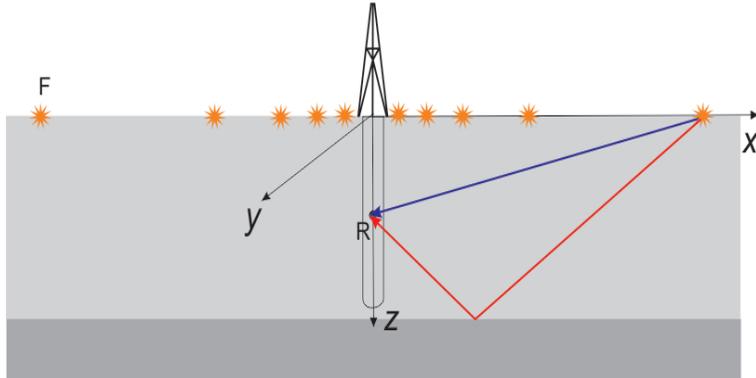


Figura 6 – Detalhe da distribuição irregular das fontes por perfil. No meio homogêneo, a onda P direta é representada pela linha reta azul, enquanto que a onda P refletida é representada pela linha reta vermelha. Note que as linhas que representam a onda direta e refletida são retas devido ao meio ser homogêneo.

PROBLEMA INVERSO

A solução da Eq. (7) pode ser obtida procurando-se o valor que minimiza a função Φ , dada pela expressão:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{N_{obs}} (y_i - M_{ij}\tilde{x}_j). \quad (16)$$

Na Eq. (16), y_i são os elementos do vetor de observação \mathbf{y} , M_{ij} , são os elementos da matriz de sensibilidade \mathbf{M} e \tilde{x}_j são as estimativas dos parâmetros WA.

Os dados “observados” usados na inversão, componente vertical do vetor de vagarosidade e vetor de polarização, foram gerados sinteticamente a partir do pacote ANRAY (Pšenčík & Gajewski, 1998). Foi utilizado SVD na inversão.

Para se analisar a estabilidade da estimativa dos parâmetros WA, os dados observados foram contaminados com ruído da seguinte forma: cada observação foi contaminada 500 vezes com ruído Gaussiano. Para cada uma das 500 observações contaminadas, foi feita a inversão e os parâmetros WA foram então estimados. Foi determinado o valor médio e o desvio padrão amostral de cada estimativa através das equações:

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{k=1}^{N_s} \tilde{x}_j^k}{N_s} \quad (17)$$

e

$$\bar{v}_j = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_s} (\tilde{x}_j^k)^2}{N_s} - [N_s (\bar{x}_j)]^2}, \quad (18)$$

em que N_s é o número de simulações numéricas ($N_s = 500$), o índice j refere-se aos parâmetros ($j = 1, \dots, 15$), \bar{x}_j e \bar{v}_j são, respectivamente, o valor médio amostral e a variação amostral da estimativa do parâmetro x_j .

Determinação dos parâmetros do meio de referência

Existem muitas maneiras alternativas para se estimar as velocidades das ondas P e S e do vetor \mathbf{n} , parâmetros do meio isotrópico de referência. É apresentado neste trabalho uma breve discussão sobre as vantagens e desvantagens de algumas dessas alternativas.

Determinação das velocidades das ondas P e S no meio isotrópico de referência

Uma alternativa para se estimar a velocidade da onda P, α , no meio de referência a partir das quantidades observadas é usar a seguinte relação:

$$\alpha p_3^{(i)} = g_3^{(i)}, \quad (19)$$

em que $p_3^{(i)}$ e $g_3^{(i)}$ são as componentes verticais dos vetores de vagariedade e polarização, respectivamente, da i -ésima observação. A velocidade α pode então ser estimada a partir da inversão da Eq. (19) por mínimos quadrados para o número total de observações, N_{obs} .

Uma outra alternativa é proposta em Zheng & Pšencík (2002), α é obtida da relação:

$$\alpha = \frac{1}{N_{obs}} \sum_{i=1}^{N_{obs}} \frac{g_3^{(i)}}{p_3^{(i)}}. \quad (20)$$

Testes numéricos usando as duas equações acima mostraram que a estimativa de α a partir da Eq. (19) é menos sensível ao ruído que contamina os dados observados do que a estimativa de α a partir da Eq. (20). Dessa forma, neste trabalho α foi estimada a partir da inversão da Eq. (19). A velocidade da onda S, β , é determinada a partir de uma relação simples assumindo que o meio de referência é um sólido de Poisson, dada por:

$$\beta = \alpha/\sqrt{3}. \quad (21)$$

Determinação do vetor \mathbf{n} normal à frente de onda P no meio isotrópico de referência

Uma possibilidade para escolha do vetor \mathbf{n} é determiná-lo como um vetor unitário que especifica a direção fonte-receptor. Esta escolha de \mathbf{n} foi chamada de geométrica. Ela funciona bem para meios homogêneos e fracamente heterogêneos. Entretanto, se a heterogeneidade for alta, sua eficiência diminui e é melhor usar uma aproximação alternativa. Uma possibilidade seria determinar o vetor \mathbf{n} pelo traçamento de raios no meio isotrópico de referência. Esta escolha requer um maior poder computacional e conhecimento a priori do meio de referência.

Por fim, outra possibilidade é considerar o vetor \mathbf{n} paralelo ao vetor de polarização observado, isto é:

$$\mathbf{n} // \mathbf{g}. \quad (22)$$

Se o meio estudado é fracamente anisotrópico, esta equação fornece bons resultados para estimativa de \mathbf{n} . Uma grande vantagem desta escolha é que ela não requer que o traçamento de raios seja realizado, diminuindo assim o custo computacional. Como consequência da relação $\mathbf{n} // \mathbf{g}$, temos $\mathbf{g} \cdot \mathbf{e}^{(1)} = 0$, o que significa que o primeiro termo no lado direito da Eq. (1) desaparece e esta equação, portanto, se torna mais simples. Nos testes realizados neste trabalho para a estimativa dos parâmetros WA, determinou-se o vetor \mathbf{n} a partir da Eq. (22). Assim, as escolhas dos parâmetros do meio de referência feitas neste trabalho são baseadas unicamente no dado observado e nenhum pressuposto sobre o meio de referência foi feito, além de considerá-lo fracamente anisotrópico.

EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

A seguir são apresentados testes numéricos através dos quais foi feita uma análise das estimativas dos parâmetros WA. Nos testes foram utilizados os dois modelos descritos na seção “Configuração do experimento e modelos anisotrópicos”.

O dado observado

O dado observado consiste da componente vertical do vetor de vagarosidade e as três componentes do vetor de polarização de ondas P diretas e refletidas medidos nos receptores no poço. O ruído foi adicionado separadamente nos vetores de vagarosidade e polarização da seguinte forma: no caso da vagarosidade, o ruído foi adicionado a sua componente vertical variando seu tamanho. No caso do vetor de polarização (que é unitário), o ruído foi adicionado as componentes do vetor, tal que o ângulo que este vetor faz com a vertical varie.

Nas ondas P diretas, o ruído adicionado a componente vertical da vagarosidade, foi de no máximo 5% e o ruído adicionado no vetor de polarização alterou sua direção na média em 1°. Nas ondas P refletidas, o ruído adicionado foi o dobro das quantidades mencionadas para ondas diretas (situação observada em dados reais).

Apresentação dos resultados

Foi analisada a precisão dos parâmetros WA obtidos na inversão dos dados sintéticos “observados” através da comparação de projeções estereográficas da aproximação de primeira ordem da velocidade de fase (Pšencík & Gajewski, 1998) determinada a partir dos parâmetros WA exatos e estimados. A fórmula de primeira ordem da velocidade de fase é dada por:

$$c(x_m, n_j) = \sqrt{\alpha^2 + B_{33}}, \quad (23)$$

em que B_{33} é a matriz dada na Eq. (6). A velocidade de fase $c(x_m, n_j)$ é função do vetor $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$ e do vetor de parâmetros \mathbf{x} (ver relação 8). São mostrados quatro tipos de projeções estereográficas: a) a velocidade de fase calculada a partir dos parâmetros WA exatos, b) a velocidade de fase

calculada a partir dos parâmetros WA estimados, c) o erro relativo entre b) e a) e d) a variação percentual da velocidade de fase. Esta última é importante para a análise de estabilidade das estimativas.

Através da análise da fórmula aproximada da velocidade de fase para ondas P, Pšenčík & Gajewski (1998), foi possível determinar quantos e quais parâmetros WA poderiam ser estimados a partir de medidas feitas em um, dois ou mais perfis.

Resultados

Inicialmente foram realizados testes, nos quais os dados utilizados na inversão foram gerados ao longo de dois, três, quatro e cinco perfis distribuídos na superfície do modelo 1. Para análise das inversões a partir dos dados gerados ao longo de um único perfil, ver Gomes *et al.* (2004). Nestes testes considerou-se as estimativas em torno de dois receptores: o receptor #1 (receptor mais raso que se situa a profundidade de 0,1 km) e o receptor #2 (mais profundo que se situa a uma profundidade de 0,7 km). Os resultados para o receptor #1, são mostrados a seguir. Os resultados do receptor #2 são apenas comentados e a exceção é a Figura 11, onde são mostrados resultados deste receptor.

A Figura 7 mostra o estereograma da velocidade de fase calculada da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos (estereograma superior esquerdo) e estimados (estereograma superior direito) para o receptor #1. Os parâmetros WA foram estimados a partir dos dados obtidos ao longo de dois perfis mutuamente perpendiculares com ângulos de 0° e 90° em relação ao eixo x . O terceiro estereograma, inferior da Figura 7, mostra a diferença percentual relativa entre estes dois estereogramas. Percebe-se que as diferenças são muito grandes. Isto porque somente nove dos quinze parâmetros possuem resolução total nesta configuração (ver item a) da seção “Análise de velocidade”). A orientação das direções mais rápida (região vermelho escuro) e a mais lenta (região em azul escuro) está distorcida de cerca de 30° . O erro relativo excede a 4% em algumas direções. Considerando o mesmo conjunto de dados para a inversão, no receptor #2, os resultados apresentam um caráter similar, entretanto a orientação das direções mais rápida e a mais lenta apresentam distorções e erros relativos menores quando comparados com os resultados do receptor #1. Isto, acredita-se, é devido a melhor iluminação do receptor #2.

A Figura 8 da mesma forma que na Figura 7, mostra o estereograma da

velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23), mas agora as estimativas dos parâmetros WA usados foram obtidos da inversão dos dados medidos em três perfis associados aos ângulos 0° , 60° e 120° . Os desvios das direções mais rápidas e mais lentas são consideravelmente menores menos que 15° . O erro relativo entre os estereogramas estimado e exato (estereograma inferior na Figura 8) foi reduzido consideravelmente. Os maiores erros estão entre 1% e 2%. Verificou-se que, como anteriormente, o receptor #2 apresenta melhores resultados para três perfis em relação aos resultados para dois perfis.

Na Figura 9, pode-se ver os resultados obtidos a partir dos dados gerados por fontes distribuídas em quatro perfis associados aos ângulos 0° , 45° , 90° e 135° . Considerando todas as direções, os resultados são melhores que os obtidos em três perfis. Os erros são de no máximo 2%, ver erros relativos das Figuras 8 e 9 (estereogramas inferiores). Os desvios das direções mais rápida e mais lenta são menores do que os resultados mostrados na Figura 8. Verifica-se ainda que para o caso de três perfis, as regiões entre as direções $120^\circ - 300^\circ$ e $150^\circ - 330^\circ$ apresentam resultados melhores que os obtidos para quatro perfis. Esse comportamento também é verificado para o caso do receptor #2, mas considerando todas as direções de propagação os resultados para quatro perfis são melhores que os resultados para três perfis.

Para dados medidos ao longo de cinco perfis, considerou-se dois casos: a) cinco perfis associados aos ângulos 0° , 30° , 60° , 120° e 150° ; b) cinco perfis regularmente distribuídos associados aos ângulos 0° , 72° , 144° , 216° e 288° . Neste caso, são mostrados os resultados de ambos os receptores, #1 (Fig. 10) e #2 (Fig. 11). Os estereogramas superiores em ambas as Figuras mostram a projeção estereográfica da velocidade de fase calculada da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos. Os estereogramas intermediários mostram a velocidade de fase calculada com os valores estimados dos parâmetros WA, à esquerda para o caso a) e à direita para o caso b). Os estereogramas inferiores em ambas as Figuras mostram a diferença percentual relativa, à esquerda para o caso a) e à direita para o caso b). Para ambos os receptores, os dados medidos em cinco perfis produzem resultados melhores do que para um número menor de perfis. Isto pode ser claramente visto nos estereogramas das diferenças relativas. Resultados ainda melhores são obtidos para perfis regularmente distribuídos na superfície (coluna à direita). Verifica-se ainda que o desvio nas direções mais lentas e mais rápidas são menores para os resultados obtidos para cinco perfis regulares comparado com os resultados obtidos para cinco perfis irregulares. Resultados iguais são obtidos para o receptor #2. É importante notar que a escala de cores na Figura 11 é ligeira-

mente diferente que a escala da Figura 10, isso se deve ao fato de que o meio é heterogêneo na direção vertical e portanto, a variação dos parâmetros aumenta com a profundidade. De uma maneira geral, verifica-se que os resultados para o receptor #2 apresentam geralmente melhor qualidade porque este receptor tem uma melhor iluminação do que o receptor #1.

Na Figura 12, são mostradas em valores percentuais, as variações da velocidade de fase em todas as direções. Essa variação foi obtida a partir da velocidade de fase calculada com a Eq. (23) utilizando os parâmetros estimados em cada uma das 500 simulações para dois perfis (Fig. 12(a)), três perfis (Fig. 12(b)), quatro perfis (Fig. 12(c)) e cinco perfis regularmente espaçados (Fig. 12(d)) utilizando as estimativas dos parâmetros WA em torno do receptor #1 obtidas nos testes utilizando o modelo 1. De acordo com esta Figura, verifica-se que todas as estimativas apresentam variações menores que 2% no cone de 30° para todas as direções. Fora desta área, as variações crescem rapidamente. Considerando que o modelo utilizado apresenta desvio da isotropia de cerca de 8%, consideramos que a velocidade de fase é mal estimada para estimativas cuja variações estão acima de 4%. Desta forma, a velocidade de fase só é bem estimada no cone de 30°. O mesmo resultado é encontrado no estereograma das variações da velocidade de fase estimada para os cinco perfis regulares no receptor #2.

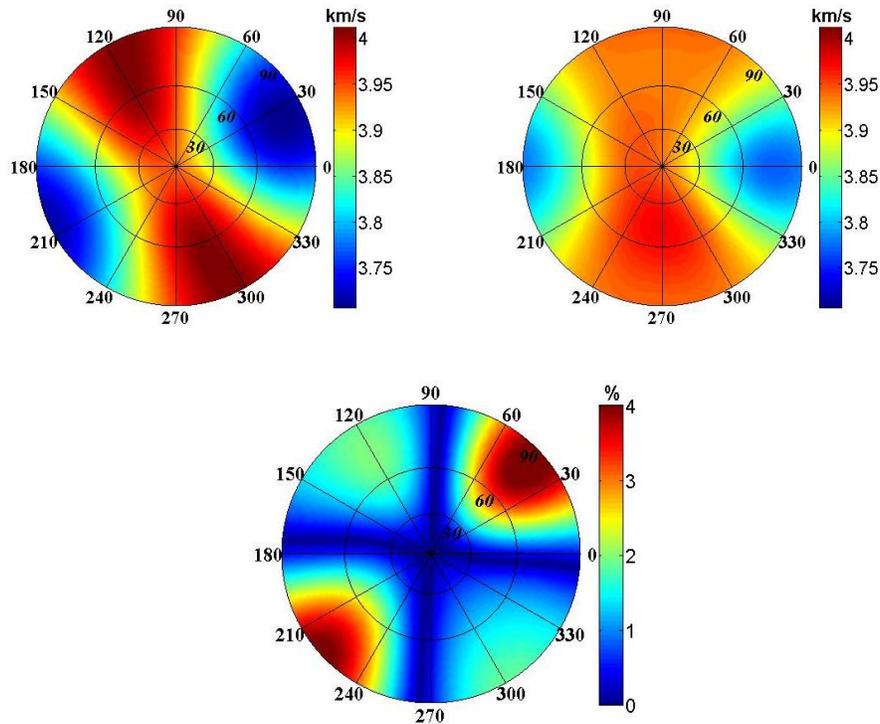


Figura 7 – Projeções estereográficas da velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos (estereograma superior esquerdo), calculada com os valores dos parâmetros WA estimados (estereograma superior direito) e a diferença relativa entre as velocidades exatas e estimadas (estereograma inferior) para o caso de medidas feitas ao longo de dois perfis perpendiculares associados aos ângulos 0° e 90° para o receptor #1 em testes utilizando o modelo 1.

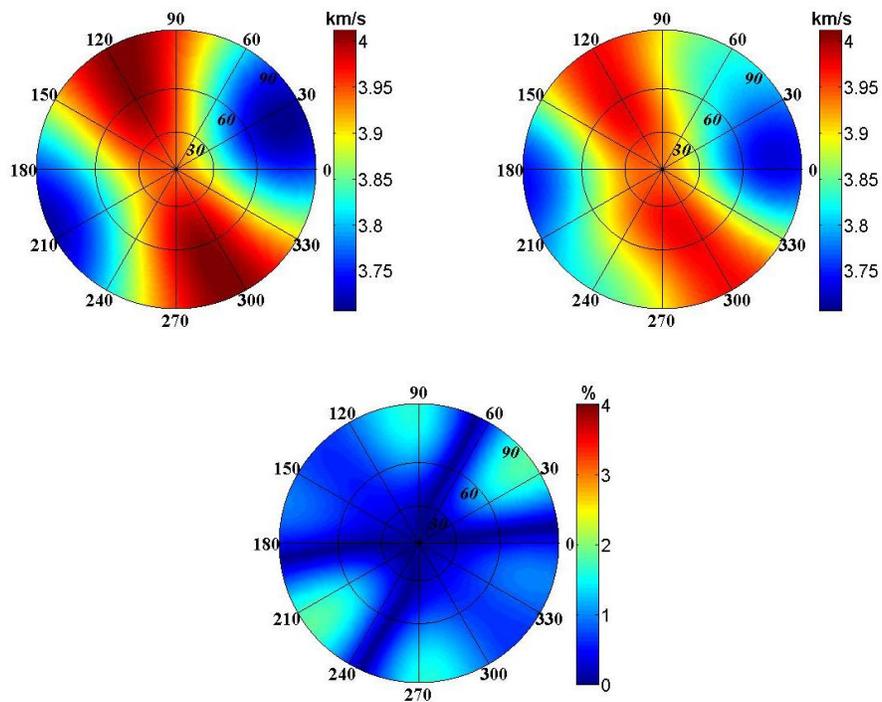


Figura 8 – Projeções estereográficas da velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos (estereograma superior esquerdo), calculada com os valores dos parâmetros WA estimados (estereograma superior direito) e a diferença relativa entre as velocidades exatas e estimadas (estereograma inferior) para o caso de medidas feitas ao longo de três perfis associados aos ângulos 0° , 60° e 120° para o receptor #1 em testes utilizando o modelo 1.

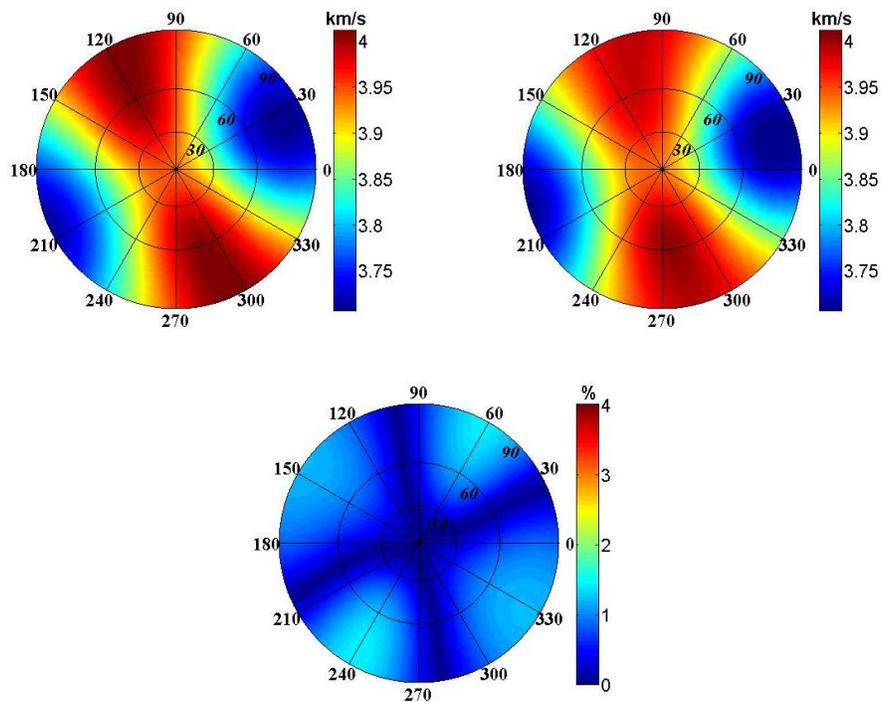


Figura 9 – Projeções estereográficas da velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos (estereograma superior esquerdo), calculada com os valores dos parâmetros WA estimados (estereograma superior direito) e a diferença relativa entre as velocidades exatas e estimadas (estereograma inferior) para o caso de medidas feitas ao longo de quatro perfis associados aos ângulos 0° , 45° , 90° e 135° para o receptor #1 em testes utilizando o modelo 1.

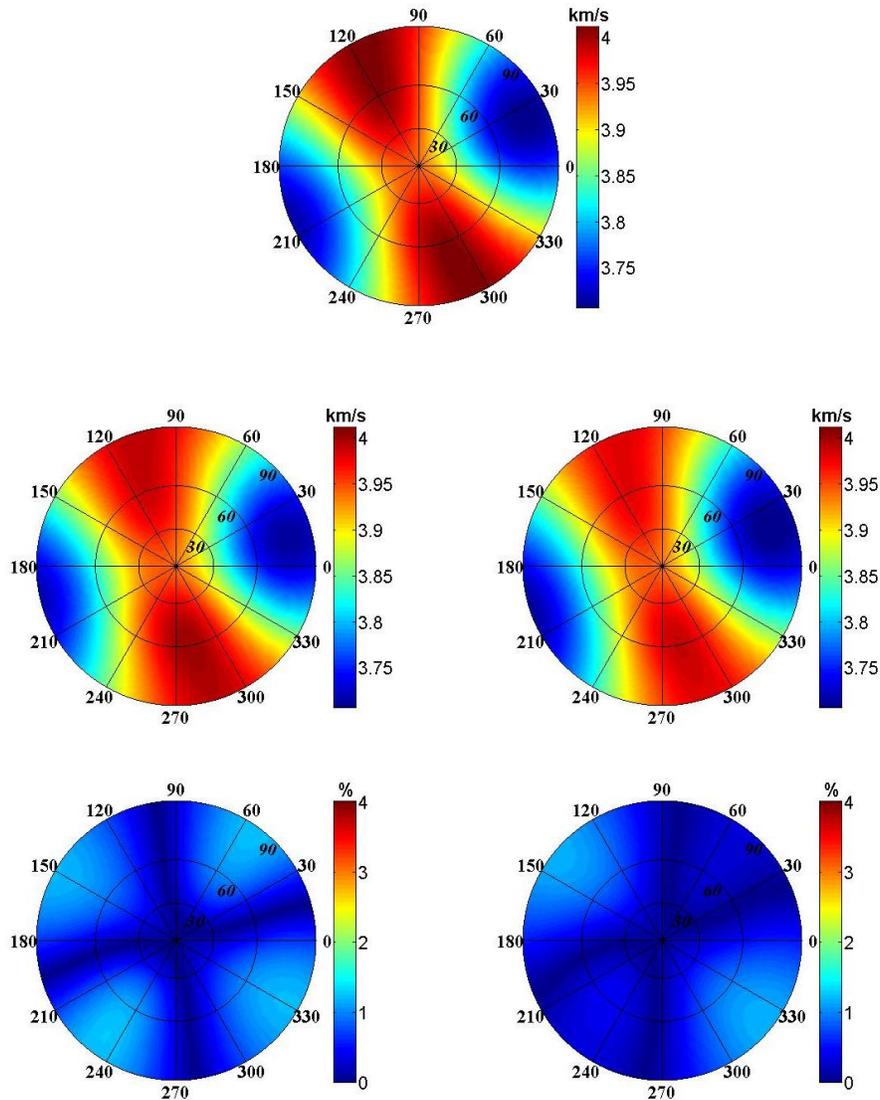


Figura 10 – Projeções estereográficas da velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos (estereograma superior), calculada com valores dos parâmetros WA estimados (estereogramas intermediários) e a diferença relativa entre as velocidades exatas e estimadas (estereogramas inferiores) para o caso de cinco perfis associados com os ângulos 0° , 30° , 60° , 120° e 150° (estereogramas à esquerda) e 0° , 72° , 144° , 216° e 288° (estereogramas à direita) para o receptor #1 em testes utilizando o modelo 1.

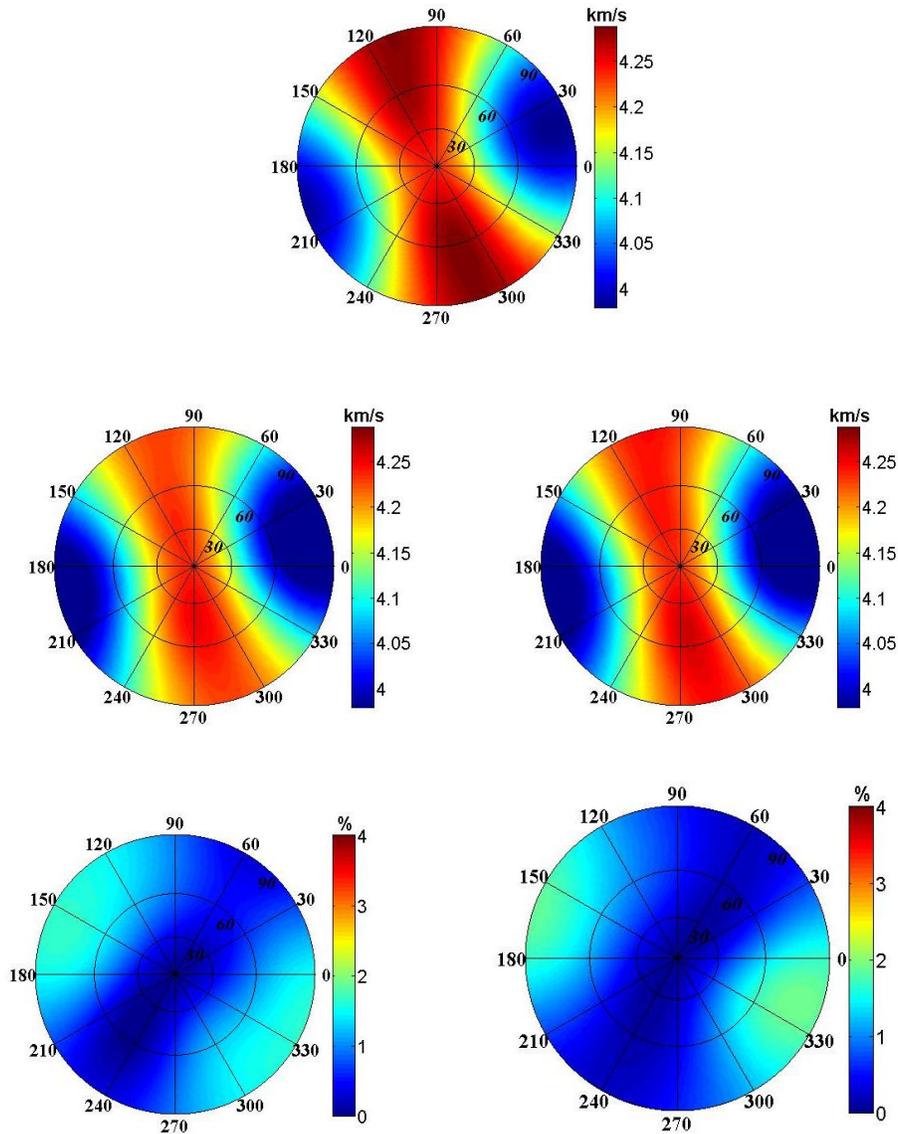


Figura 11 – Projeções estereográficas da velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos (estereograma superior), calculada com valores dos parâmetros WA estimados (estereogramas intermediários) e a diferença relativa entre as velocidades exatas e estimadas (estereogramas inferiores) para o caso de cinco perfis associados com os ângulos 0° , 30° , 60° , 120° e 150° (estereogramas à esquerda) e 0° , 72° , 144° , 216° e 288° (estereogramas à direita) para o receptor #2 em testes utilizando o modelo 1.

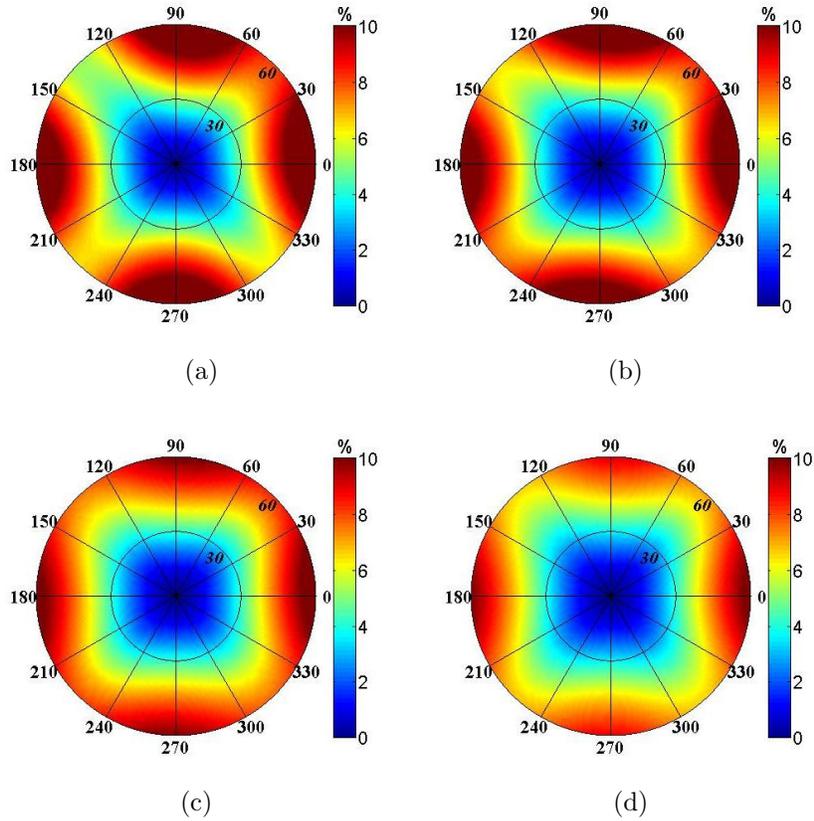


Figura 12 – Estereogramas da variação percentual da velocidade de fase em todas as direções. Essa variação foi obtida a partir da velocidade de fase calculada com a Eq. (23) utilizando os parâmetros estimados em cada uma das 500 simulações para dois (a), três (b), quatro (c) e cinco perfis (d) regularmente espaçados. As estimativas utilizadas para o cálculo das variações foram obtidas em torno do receptor #1 em testes utilizando o modelo 1.

Os testes realizados a seguir utilizam dados gerados ao longo de seis perfis regularmente espaçados de 30° na superfície do modelo 2. O objetivo de se utilizar seis perfis regularmente espaçados foi de aumentar o número de informação não redundante e além disso, simular a aquisição apresentada em Rusmanugroho & McMechan (2012).

Considerando dados de ondas P diretas e refletidas e o mesmo nível de ruído aplicado nos testes do modelo anterior, na Figura 13 é mostrada a velocidade de fase calculada da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos (estereograma superior esquerdo) e estimados (estereograma superior direito) e o erro percentual relativo (estereograma inferior) para o receptor que está a profundidade de 0,25 km. De acordo com esta Figura o erro é inferior a 3,5%. Para avaliar o quanto o ruído aplicado aos dados influencia na estimativa dos parâmetros WA e por conseguinte na velocidade de fase, a variação da velocidade de fase para as 500 simulações é mostrada na Figura 14.

De acordo com as Figuras 13 e 14, a velocidade de fase é bem estimada para uma abertura de até 30° . Assumimos o valor da variação das estimativas de no máximo de 8% como aceitável considerando que o modelo apresenta um grau de anisotropia em torno de 12%. Para aberturas maiores a variação cresce rapidamente. Este resultado é semelhante ao observado no modelo 1, ver Figura 12. Entretanto, considerando a mesma abertura, para o modelo 1 as variações são menores. Acreditamos que isto se deva ao fato de que o modelo 2 apresenta um grau de anisotropia maior e essa metodologia é válida para modelos fracamente anisotrópicos.

Em seguida, procuramos comparar os resultados obtidos com os resultados apresentados em Rusmanugroho & McMechan (2012). É importante ressaltar os seguintes pontos:

Quanto a metodologia empregada, neste trabalho a estimativa dos parâmetros foi realizada a partir de uma aproximação linear na vizinhança de um meio isotrópico de referência, enquanto que em Rusmanugroho & McMechan (2012) a inversão é baseada na fórmula de Christoffel, feita iterativamente através do algoritmo de Levenberg-Marquardt, onde um modelo inicial é atualizado a cada iteração.

Quanto ao tipo de onda utilizado na inversão, neste trabalho foram utilizados dados de ondas P diretas e refletidas, em Rusmanugroho & McMechan (2012) foram utilizados dados de ondas P e S diretas. Quanto ao número de parâmetros estimados, devido a utilização apenas de ondas do tipo P, neste trabalho só 15 dos 21 parâmetros aparecem no esquema de inversão, em Rusmanugroho & McMechan (2012) os 21 parâmetros elásticos aparecem

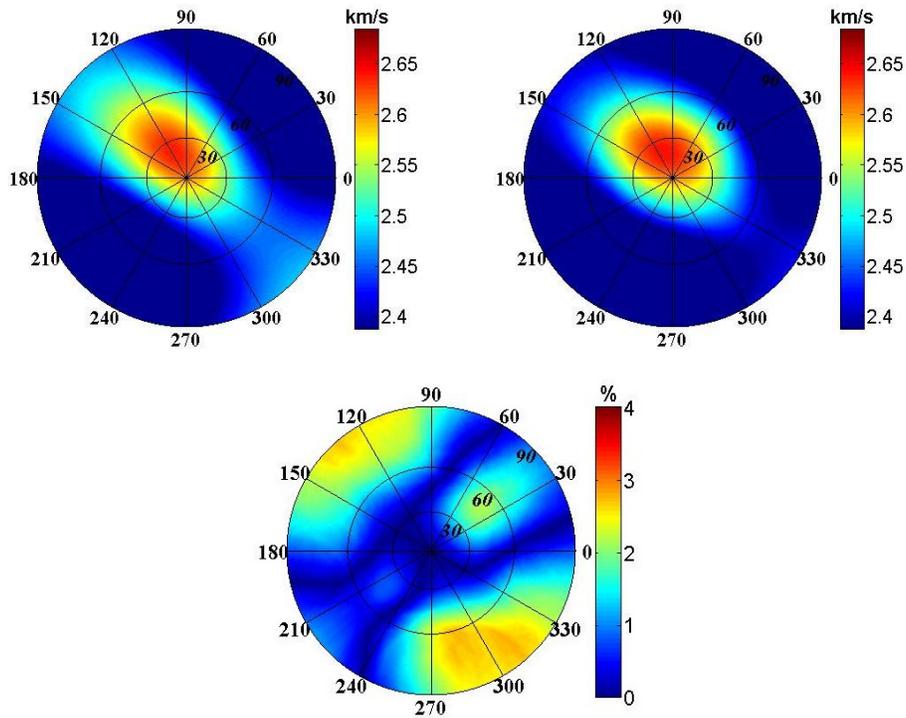


Figura 13 – Projeções estereográficas da velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos (estereograma superior esquerdo), com valores dos parâmetros WA estimados (estereograma superior direito) e a diferença relativa entre os dois estereogramas (estereograma inferior) para o caso de dados medidos em seis perfis variando de 0° a 360° com incremento de 30° . Foram utilizados dados obtidos nos testes usando o modelo 2.

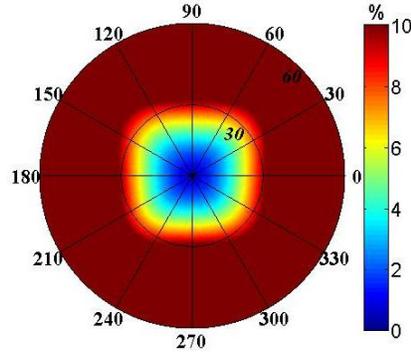


Figura 14 – Estereograma com a variação da velocidade de fase para o caso dos dados medidos em 6 perfis regularmente espaçados em testes utilizando o modelo 2.

no esquema de inversão.

Para efeito de comparação com a metodologia apresentada em Rusmanugroho & McMechan (2012), as estimativas geradas neste trabalho (Figura 15 no meio lado esquerdo) utilizaram dados adquiridos conforme a geometria de configuração aplicada em Rusmanugroho & McMechan (2012) e foram contaminados com mesmo nível de ruído, isto é, 2% nos dados da componente vertical da vagarosidade e ruído na polarização que mudava sua direção de 10° na média. Entretanto, é importante notar que diferente da metodologia apresentada em Rusmanugroho & McMechan (2012), devido a maneira como os parâmetros do meio isotrópico de referência são escolhido (ver Eq. 22), o ruído também contamina a matriz \mathbf{M} o que pode contribuir com o nível de ruído no problema. De acordo com a Figura 15, verificamos que as estimativas de Rusmanugroho & McMechan (2012) apresentam resultados melhores, entretanto, em ambas as estimativas de Rusmanugroho & McMechan (2012) há uma distorção na região de grande velocidade maior que a distorção nos resultados obtidos por nossa metodologia. Assim concluímos que para uma abertura de até 30° entorno do receptor tem-se um melhor resultado a partir da metodologia apresentada neste trabalho.

De uma maneira geral as metodologias apresentadas neste trabalho e em Rusmanugroho & McMechan (2012), obtêm-se resultados semelhantes, ainda que a metodologia empregada neste trabalho utilize menos dados (apenas dados de onda P).

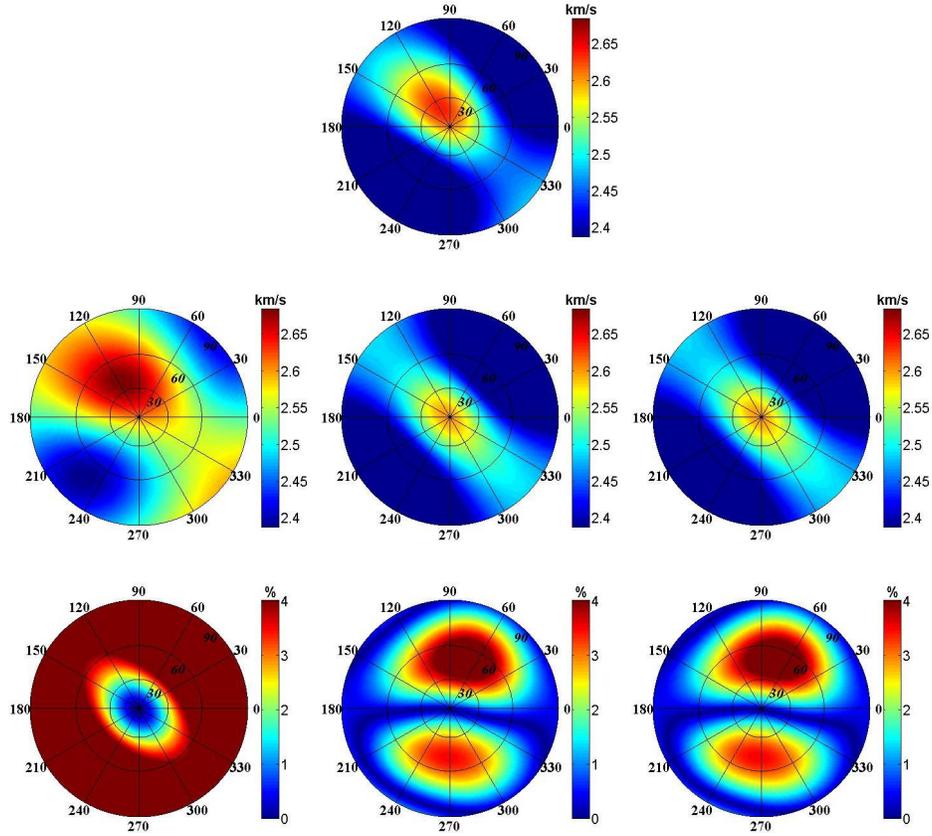


Figura 15 – Projeções estereográficas da velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos no topo, com valores dos parâmetros WA estimados no meio: a partir da metodologia apresentada neste trabalho (mais a esquerda), a partir da metodologia apresentada em Rusmanugroho & McMechan (2012) utilizando todas as componentes do vetor de vagarosidade e polarização (meio) e a partir da metodologia apresentada em Rusmanugroho & McMechan (2012) utilizando a componente vertical do vetor de vagarosidade e o vetor de polarização (esquerda). Abaixo de cada estereograma das velocidades de fase estimada, tem-se sua diferença em relação a velocidade de fase exata percentual, respectivamente. Foram utilizados dados obtidos nos testes usando o modelo 2.

CONCLUSÃO

Neste trabalho é apresentada uma análise do esquema de inversão linear que estima os parâmetros de fraca anisotropia localmente a partir dos dados da componente vertical do vetor de vagarosidade e vetor de polarização de ondas P medidas na vizinhança de um receptor situado no interior do poço, em um experimento de VSP multiazimutal. É utilizada uma aproximação de primeira ordem da relação entre os dados observados e os parâmetros anisotrópicos do meio em torno de um meio isotrópico de referência. Esta metodologia independe do tipo de poço (vertical, horizontal ou inclinado), do meio isotrópico de referência e vale para meios anisotrópicos arbitrários. Foram considerados dados de ondas P diretas e refletidas.

Foi feita uma análise de sensibilidade do esquema de inversão em relação a geometria do levantamento e verificou-se que o esquema de inversão é sensível ao número e a orientação dos perfis onde estão distribuídas as fontes. Dependendo do número e distribuição dos perfis os 15 parâmetros WA que descrevem a propagação de onda P aparecerão ou não na inversão. Para que os 15 parâmetros WA apareçam na inversão há necessidade de dados medidos em pelo menos cinco perfis independentes. É apresentada uma análise para a escolha dos parâmetros do meio isotrópico de referência. O esquema de inversão é realizado em dois estágios: a estimação dos parâmetros do meio isotrópico de referência seguido pela estimação dos parâmetros de fraca anisotropia.

Quanto a estimativa dos parâmetros do meio isotrópico de referência: os experimentos numéricos indicaram os resultados mais robustos para a estimativa da velocidade da onda P através da solução de mínimos quadrados e a escolha do vetor normal à frente de onda P, \mathbf{n} , paralelo a direção do vetor de polarização das ondas P observado no meio anisotrópico.

O esquema de inversão foi avaliado através de simulações numéricas aplicadas a dois modelos sintéticos: um TI e um triclinico. Os dados de vagarosidade e polarização foram gerados por traçamento de raios. Foi utilizado ruído gaussiano para contaminar os dados sintéticos. Verificou-se que os melhores resultados são obtidos para perfis com incremento regular.

As estimativas dos parâmetros WA foram avaliadas através do cálculo da velocidade de fase. Considerando dados medidos a partir de cinco perfis regularmente espaçados, os resultados indicam que pode-se estimar os parâmetros de fraca anisotropia e assim a velocidade de fase da onda P para uma abertura

de 30° em torno do eixo do poço. Fora desta região o erro da estimativa da velocidade de fase pode ser maior do que a diferença máxima das velocidades de fase da onda P usada para gerar o dado sintético. A estimativa da velocidade de fase ao redor do eixo vertical do poço pode fornecer uma informação para a construção do modelo de velocidade quando combinada com dados sísmicos de superfície.

Como uma próxima etapa deste trabalho, pretende-se investigar os esquemas de inversão conjunta de dados de onda P e S.

APÊNDICE A - MATRIZ DE SENSIBILIDADE DE ONDA P

A matriz de sensibilidade $M = M(\alpha; \beta; \mathbf{n})$, $N_{obs} \times N_{par}$, é formada pelo lado esquerdo da Eq.(1). Seus elementos para observação da i -ésima fonte são

$$\begin{aligned}
 M_{i1} &= n_1^4 n_3 [2C - 1] \\
 M_{i2} &= n_2^4 n_3 [2C - 1] \\
 M_{i3} &= n_3^3 [2C(n_3^3 - 1) - n_3^2] \\
 M_{i4} &= n_1^2 n_3 [C(2n_3^2 - 1) - n_3^2] \\
 M_{i5} &= n_2^2 n_3 [C(2n_3^2 - 1) - n_3^2] \\
 M_{i6} &= n_1^2 n_2^2 n_3 [2C - 1] \\
 M_{i7} &= n_1^2 n_2 [C(4n_3^2 - 1) - 2n_3^2] \\
 M_{i8} &= n_2^2 n_1 [C(4n_3^2 - 1) - 2n_3^2] \\
 M_{i9} &= n_1 n_2 n_3 [2C(2n_3^2 - 1) - n_3^2] \\
 M_{i10} &= n_1^3 [C(4n_3^2 - 1) - 2n_3^2] \\
 M_{i11} &= 2n_1^3 n_2 n_3 [2C - 1] \\
 M_{i12} &= n_2^3 [C(4n_3^2 - 1) - 2n_3^2] \\
 M_{i13} &= 2n_1 n_2^3 n_3 [2C - 1] \\
 M_{i14} &= n_2 n_3^3 [C(4n_3^2 - 3) - 2n_3^2] \\
 M_{i15} &= n_1 n_3^3 [C(4n_3^2 - 3) - 2n_3^2]
 \end{aligned} \tag{24}$$

em que

$$C = \alpha^2(\alpha^2 - \beta^2)^{-1}. \tag{25}$$

O vetor normal à frente de onda nas equações acima corresponde as observações da i -ésima fonte. Os elementos da matriz \mathbf{M} estão ordenados de acordo com a ordem dos parâmetros WA apresentados em (8).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro de projeto de edital universal e ao INCT-GP, ao professor Ivan Pšenčík pelas ideias e discussões muito importante para o desenvolvimento deste trabalho. Ao professor Amin Bassrei por contribuir com as correções deste trabalho e ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará.

REFERÊNCIAS

FARRA, V. & PŠENČÍK, I. 2003. Properties of the zero-, first- and higher-order approximations of attributes of elastic waves in weakly anisotropic media. *P. J. Acoust.Soc.Am.* pp. 114, 1366.

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

GOMES, E., ZHENG, X., PŠENČÍK, I., HORNE, S., & LEANEY, S. 2004. Local determination of weak anisotropy parameters from a walkaway VSP qP-wave data in the Java Sea region. *Stud. Geophys. Geod.* 48, 215-231.

HORNE, S. A. & 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 Pres.

POSTMA, G. W. 1955. Wave propagation in stratified medium: *Geophysics* 20, 780-806.

PŠENČÍK, I. & GAJEWSKI, D. 1998. Polarization, phase velocity and NMO velocity of qP waves in arbitrary weakly anisotropic media. *Geophysics* 63, 1754-1766.

RUSMANUGROHO, H. & McMEHAN, G. 2012. Sensitivity of estimated elastic moduli to completeness of wave type, measurement type, and illumination apertures at a receiver in multicomponent VSP data. *Geophysics* 77, 1-18.

SCHOENBERG, M. & DOUMA, J. 1988. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks. *Geophys Prosp. Eur. Assn. Geosci. Eng.*, 36, 571-590.

SCHOENBERG, M. & SAYERS, C. M. 1995. Seismic Anisotropy of Fractures: *Geophysics, Soc. of Expl. Geophys.*, 60, 204-211.

THOMSEN, L. 1983. Weak elastic anisotropic reflection: In BACKUS, M. M. (Eds). *Offset-dependent reflectivity-Theory and practice AVO analysis* Soc. Exp. Geophys. P. 103-111.

THOMSEN, L. 1986. Weak elastic anisotropy. *Geophysics* 51, 1954-1966.

ZHENG, X. & PŠENČÍK, I. 2002. Local determination of weak anisotropy parameters from qP-waves slowness and particle motion measurements. *Pure and Applied Geophysics*, 159, 1881-1905.

Lista de Figuras

- 1 Matriz de resolução para o receptor a profundidade de 0,4 km no interior do poço. Essa matriz foi obtida considerando a geometria de aquisição com fontes distribuídas em 3 perfis associados aos azimutes 0° , 45° e 90° 19
- 2 Matriz de resolução para o receptor a profundidade de 0,4 km no interior do poço. Essa matriz foi obtida considerando a geometria de aquisição com fontes distribuídas em 3 perfis associados aos azimutes 0° , 60° e 120° 20
- 3 Experimento de VSP multiazimutal. As fontes estão distribuídas em perfis na superfície (linhas magentas) e os receptores estão no poço. A origem das coordenadas está situada na cabeça do poço, com eixo z positivo de cima para baixo. . . 21
- 4 Configuração utilizada no modelo 1, constituído de dois meios, o incidente é anisotrópico e o subjacente é isotrópico. As fontes (F) estão na superfície e os receptores (R) estão no poço. A onda P direta é representada pela linha azul, enquanto que a onda P refletida é representada pela linha vermelha. Estas linhas são curvadas devido ao meio ser heterogêneo. 22
- 5 Vista de cima da geometria de aquisição utilizada no modelo 2. As fontes são representadas por pontos pretos, perfis em magenta e no centro está a cabeça do poço. 23
- 6 Detalhe da distribuição irregular das fontes por perfil. No meio homogêneo, a onda P direta é representada pela linha reta azul, enquanto que a onda P refletida é representada pela linha reta vermelha. Note que as linhas que representam a onda direta e refletida são retas devido ao meio ser homogêneo. 24
- 7 Projeções estereográficas da velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos (estereograma superior esquerdo), calculada com os valores dos parâmetros WA estimados (estereograma superior direito) e a diferença relativa entre as velocidades exatas e estimadas (estereograma inferior) para o caso de medidas feitas ao longo de dois perfis perpendiculares associados aos ângulos 0° e 90° para o receptor #1 em testes utilizando o modelo 1. 31

8	Projeções estereográficas da velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos (estereograma superior esquerdo), calculada com os valores dos parâmetros WA estimados (estereograma superior direito) e a diferença relativa entre as velocidades exatas e estimadas (estereograma inferior) para o caso de medidas feitas ao longo de três perfis associados aos ângulos 0° , 60° e 120° para o receptor #1 em testes utilizando o modelo 1.	32
9	Projeções estereográficas da velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos (estereograma superior esquerdo), calculada com os valores dos parâmetros WA estimados (estereograma superior direito) e a diferença relativa entre as velocidades exatas e estimadas (estereograma inferior) para o caso de medidas feitas ao longo de quatro perfis associados aos ângulos 0° , 45° , 90° e 135° para o receptor #1 em testes utilizando o modelo 1.	33
10	Projeções estereográficas da velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos (estereograma superior), calculada com valores dos parâmetros WA estimados (estereogramas intermediários) e a diferença relativa entre as velocidades exatas e estimadas (estereogramas inferiores) para o caso de cinco perfis associados com os ângulos 0° , 30° , 60° , 120° e 150° (estereogramas à esquerda) e 0° , 72° , 144° , 216° e 288° (estereogramas à direita) para o receptor #1 em testes utilizando o modelo 1.	34
11	Projeções estereográficas da velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos (estereograma superior), calculada com valores dos parâmetros WA estimados (estereogramas intermediários) e a diferença relativa entre as velocidades exatas e estimadas (estereogramas inferiores) para o caso de cinco perfis associados com os ângulos 0° , 30° , 60° , 120° e 150° (estereogramas à esquerda) e 0° , 72° , 144° , 216° e 288° (estereogramas à direita) para o receptor #2 em testes utilizando o modelo 1.	35

12	Estereogramas da variação percentual da velocidade de fase em todas as direções. Essa variação foi obtida a partir da velocidade de fase calculada com a Eq. (23) utilizando os parâmetros estimados em cada uma das 500 simulações para dois (a), três (b), quatro (c) e cinco perfis (d) regularmente espaçados. As estimativas utilizadas para o cálculo das variações foram obtidas em torno do receptor #1 em testes utilizando o modelo 1.	36
13	Projeções estereográficas da velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos (estereograma superior esquerdo), com valores dos parâmetros WA estimados (estereograma superior direito) e a diferença relativa entre os dois estereogramas (estereograma inferior) para o caso de dados medidos em seis perfis variando de 0° a 360° com incremento de 30°. Foram utilizados dados obtidos nos testes usando o modelo 2.	38
14	Estereograma com a variação da velocidade de fase para o caso dos dados medidos em 6 perfis regularmente espaçados em testes utilizando o modelo 2.	39
15	Projeções estereográficas da velocidade de fase calculada a partir da Eq. (23) com os parâmetros WA exatos no topo, com valores dos parâmetros WA estimados no meio: a partir da metodologia apresentada neste trabalho (mais a esquerda), a partir da metodologia apresentada em Rusmanugroho & McMechan (2012) utilizando todas as componentes do vetor de vagarosidade e polarização (meio) e a partir da metodologia apresentada em Rusmanugroho & McMechan (2012) utilizando a componente vertical do vetor de vagarosidade e o vetor de polarização (esquerda). Abaixo de cada estereograma das velocidades de fase estimada, tem-se sua diferença em relação a velocidade de fase exata percentual, respectivamente. Foram utilizados dados obtidos nos testes usando o modelo 2.	40



Sociedade Brasileira de Geofísica
Revista Brasileira de Geofísica - RBGf

DECLARAÇÃO

Declaro, para os devidos fins, que em 04/07/2012 o artigo intitulado “Análise de um esquema de inversão para estimativa de anisotropia local a partir de dados de VSP” da autoria de Ellen de Nazaré Souza Gomes, Adriano César Rodrigues Barreto, Raiza de Nazaré Assunção Macambira e Jessé Carvalho Costa, foi submetido à Revista Brasileira de Geofísica para que possa ser avaliado pelo corpo editorial visando a possível publicação.

Rio de Janeiro, 18 de julho de 2012.

Adriana Reis Xavier
Adriana Reis Xavier

Editora da Sociedade Brasileira de Geofísica