



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOFÍSICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

RAIZA DE NAZARÉ ASSUNÇÃO MACAMBIRA

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ESQUEMA DE INVERSÃO  
DE DADOS DE ONDA  $qP$  EM EXPERIMENTOS DE VSP  
WALKAWAY MULTIAZIMUTAL**

BELÉM  
2010

RAIZA DE NAZARÉ ASSUNÇÃO MACAMBIRA

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ESQUEMA DE INVERSÃO  
DE DADOS DE ONDA qP EM EXPERIMENTOS DE VSP  
WALKAWAY MULTIAZIMUTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará para obtenção do título de Graduado em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Sísmicos  
Orientador: Ellen N. S. Gomes

BELÉM  
2010

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

---

M114a Macambira, Raiza de Nazaré Assunção

Análise de sensibilidade do esquema de inversão de dados de onda qP em experimentos de VSP walkaway multiazimutal / Raiza de Nazaré Assunção Macambira; Orientador: Ellen de Nazaré Souza Gomes – 2010

35 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Quarto Período de 2010.

1. Inversão (Geofísica). 2. Anisotropia local. 3. Parâmetros de fraca anisotropia. 4. Dados de VSP walkaway multiazimutal. I. Gomes, Ellen de Nazaré Souza, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 20° ed.: 550

---

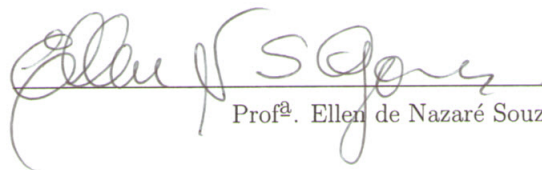
RAIZA DE NAZARÉ ASSUNÇÃO MACAMBIRA

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ESQUEMA DE INVERSÃO  
DE DADOS DE ONDA qP EM EXPERIMENTOS DE VSP  
WALKAWAY MULTIAZIMUTAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Faculdade de Geofísica do Instituto de  
Geociências da Universidade Federal do Pará  
em cumprimento as exigências para obtenção  
do título de Bacharel em Geofísica.

Data de Aprovação: 29/12/2010

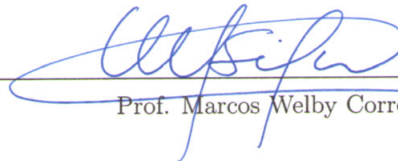
Banca Examinadora:



Prof<sup>ª</sup>. Ellen de Nazaré Souza Gomes - (Orientador)

Doutora em Geofísica

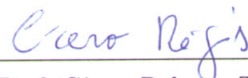
Universidade Federal do Pará



Prof. Marcos Welby Correa da Silva - (Membro)

Doutor em Geofísica

Universidade Federal do Pará



Prof. Cícero Roberto Teixeira Régis - (Membro)

Doutor em Geofísica

Universidade Federal do Pará

”Tudo posso naquele que me fortalece!”

## AGRADECIMENTOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso é uma produção literária que serve para concluir 4 anos na UFPA sendo universitária do curso de graduação em Geofísica, o qual tenho muito orgulho de ter feito e estar concluindo com muita luta e muito amor.

Mas para esta conquista tive ajuda de nosso Deus pai todo poderoso, que me proporcionou muitos momentos de alegria e nos meus momentos de fraqueza, deu-me forças. Agradeço muito à minha maravilhosa família: meus avós (Benedita e José), minha mãe (Cristiane), minha irmã (Lucia), minhas tias (Tia Ana, Tia Elaine, Tia Mirian e Tia Mariza), meus tios (Tio Sidney, Tio Paulo, Tio Marco e Tio César), minhas primas (em especial Lais e Marcela), meus primos e ao meu padrasto (Paulo) por estarem comigo estes 4 anos me dando apoio, forças, alegrias e esperança, para terminar esta etapa tão importante em minha vida. Ao Gerson Carlos, meu namorado, que esteve ao meu lado nos dois últimos anos mais difíceis do curso. Me deu muitos conselhos e apoio nos momentos de desespero devido à sua experiência acadêmica além do incentivo para obter esta conquista. À minha orientadora, Ellen Gomes, que foi uma mãezona, sempre se importando, ajudando em tudo que eu precisava, me dando conselhos nos momentos difíceis. Além de me ajudar muito no decorrer do desenvolvimento deste TCC. Agradeço muito à Deus por ter colocado esta pessoa maravilhosa em minha vida para me dar suporte para alcançar meu objetivo de me tornar graduada em Geofísica. Tenho muito o que agradecer aos meus amigos de classe: Isabela, Gabriela, Adriano, João, Jorlivan, Diogo, Raphael, Boris e à todos os outros que eram da turma e por motivos pessoais não puderam continuar (amiga Rose) o curso ou que irão se formar no próximo ano (amigo Wilber). Com estes amigos tive muitos momentos de alegria, principalmente nas viagens de campo e muitos momentos de desespero, nas provas e nos trabalhos mais complicados. Agradeço à Faculdade de Geofísica, em especial aos professores de Geofísica e da Geologia que me ajudaram, principalmente tirando as minhas dúvidas. Obrigada ao Tio Servolo e à Tia Rogéria pelos conselhos e pela disposição em me ajudar nos muitos momentos que precisei (pelo apoio e pelos conselhos para que eu conseguisse ir para Denver-EUA) e meu chefe Hilton, pela força, compreensão quando tive que dar uma dedicação maior ao meu curso, além de agradecer à todos do departamento financeiro da UFPA que me deram apoio para finalizar meu curso. Por fim, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - pelo apoio financeiro, e ao INCT-GP.

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo do esquema de inversão que determina a anisotropia local na vizinhança de um receptor situado em um poço a partir de dados de VSP walkaway multiazimutal. Os dados constituem-se das componentes verticais do vetor de vazarosidade e do vetor de polarização de ondas qP diretas e refletidas. A inversão é feita a partir de uma aproximação de primeira ordem em torno de um meio isotrópico de referência que estabelece uma relação linear entre os parâmetros fracamente anisotrópicos (parâmetros WA) e as componentes verticais dos vetores de vazarosidade e de polarização. É apresentada uma análise da sensibilidade dessa formulação ao número de fontes distribuídas por perfil, em seguida é feita uma discussão sobre a escolha dos parâmetros do meio isotrópico de referência.

**Palavras Chaves:** Inversão (Geofísica). Anisotropia local. Parâmetros de fraca anisotropia. Dados de VSP Walkaway multiazimutal.

## ABSTRACT

This Senior Research Project will show a research about an inversion scheme to determine local anisotropy in the vicinity of receiver located in a borehole through data from a walkaway multi-azimuthal VSP experiment. The data are the vertical components of the slowness vector and of the polarization vector of the direct and reflected qP waves. The inversion is made through approximate first-order around an isotropic medium of reference establishing a linear expression between weak anisotropy parameters (parameters WA) and the vertical components of slowness and polarization vector. Then is presented an analysis of sensitivity this formulation about the number of sources organized by profile, then is made an analysis about the choice of parameters of the isotropic medium of reference.

**keywords:** Inversion (Geophysics). Local Anisotropy. Weak anisotropy parameters. Data of Walkaway Multi-azimuthal VSP.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 Na Figura da esquerda (a), o meio é formado por fraturas planas horizontais. Em regime quase estático este meio se comporta efetivamente como um meio anisotrópico TIV. Na Figura da direita (b) o meio é formado por fraturas planas inclinadas. Em regime quase estático este meio se comporta efetivamente como um meio anisotrópico TI. As propriedades físicas em um mesmo plano não mudam em rotações em relação ao eixo de simetria. . . . 16
- Figura 2.2 Desenho do experimento em VSP walkaway multiazimutal, em que as fontes (F) estão distribuídas em perfis na superfície e os receptores (R) estão no poço. A origem das coordenadas está situada na cabeça do poço, com eixo z positivo de cima para baixo. A configuração em superfície pode ser vista de cima na ampliação. Há dois meios separados por uma interface, sendo o primeiro meio anisotrópico arbitrário (branco) e o segundo é um meio isotrópico (vermelho). E a direção de propagação da onda direta é a linha azul, tanto a que segue da fonte para o receptor como a que segue para a interface, e a onda convertida está especificada pela linha vermelha, a qual segue da interface em direção ao receptor. . . . 19
- Figura 3.1 Matriz de resolução dos parâmetros WA para medidas ao longo de um perfil. Apenas cinco parâmetros tem resolução. . . . . 23
- Figura 3.2 Matriz de resolução dos parâmetros WA para medidas ao longo de dois perfis. Recupera-se 9 parâmetros. . . . . 23
- Figura 3.3 Matriz de resolução dos parâmetros WA para medidas ao longo de três perfis. Com esta configuração 10 parâmetros têm resolução. . . . . 24
- Figura 3.4 Matriz de resolução dos parâmetros WA para medidas ao longo de quatro perfis. Com esta configuração 13 parâmetros são resolvidos. . . . . 24
- Figura 3.5 Matriz de resolução dos parâmetros WA para medidas ao longo de cinco perfis. Os 15 parâmetros WA tem resolução total. . . . . 25
- Figura 4.1 Para o receptor 1: a)Estereograma do quadrado da velocidade de fase obtida dos parâmetros WA exatos. b)Estereograma do quadrado da velocidade de fase obtida dos parâmetros WA estimados considerando a velocidade  $\alpha$  estimada da fórmula (4.2). c) Erro percentual absoluto entre (a) e (b). d)Estereograma do quadrado da velocidade de fase obtida

dos parâmetros WA estimados considerando a velocidade $\alpha$ estimada da fórmula (4.3). e) Erro percentual absoluto entre (a) e (d). . . . .	30
Figura 4.2 Para o receptor 1, estimativa dos parâmetros WA, considerando $\alpha$ estimada de (4.2), e variação dessas estimativas para quatro diferentes níveis de ruído. . . . .	31
Figura 4.3 Para o receptor 1, estimativa dos parâmetros WA, considerando $\alpha$ estimada de (4.3), e variação dessas estimativas para quatro diferentes níveis de ruído. . . . .	31
Figura 4.4 Para o receptor 13: a)Estereograma do quadrado da velocidade de fase obtida dos parâmetros WA exatos. b)Estereograma do quadrado da velocidade de fase obtida dos parâmetros WA estimados considerando a velocidade $\alpha$ estimada da fórmula (4.2). c) Erro percentual absoluto entre (a) e (b). d)Estereograma do quadrado da velocidade de fase obtida dos parâmetros WA estimados considerando a velocidade $\alpha$ estimada da fórmula (4.3). e) Erro percentual absoluto entre (a) e (d). . . . .	33
Figura 4.5 Para o receptor 13, estimativa dos parâmetros WA, considerando $\alpha$ estimada de (4.2), e variação dessas estimativas para quatro diferentes níveis de ruído. . . . .	33
Figura 4.6 Para o receptor 13, estimativa dos parâmetros WA, considerando $\alpha$ estimada de (4.3), e variação dessas estimativas para quatro diferentes níveis de ruído. . . . .	34

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

SÍMBOLO / ABREVIATURA	DESCRIÇÃO
$B_{mn}$	Matriz de fraca anisotropia
$\alpha$ e $\beta$	Velocidades das ondas P e S, respectivamente, no meio de referência
qP	Sigla para onda <i>quasi</i> -P. Onda P que se propaga no meio anisotrópico
$g_k$	Vetor de polarização
$s_k$	Vetor vagarosidade de uma onda qP no meio anisotrópico
$s_k^o$	Vetor vagarosidade de uma onda P no meio isotrópico de referência
$n_k$	Vetor normal à frente de onda P no meio isotrópico de referência
$\xi$	Projeção do vetor vagarosidade $s_k^o$ na direção do eixo $x_1$
$\zeta$	Projeção do vetor vagarosidade $s_k^o$ na direção do eixo $x_2$
$\eta$	Projeção do vetor vagarosidade $s_k^o$ na direção do eixo $x_3$
$c$	Módulo da velocidade de propagação da onda na subsuperfície (velocidade de fase)
$c_0$	Módulo da velocidade de propagação da onda na subsuperfície (velocidade de fase) no meio isotrópico de referência
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
TIH	Meio transversalmente isotrópico com eixo de simetria horizontal
WA	Sigla em inglês para fraca anisotropia (Weak Anisotropy)
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ $\chi_x, \chi_y, \chi_z$ $\varepsilon_{15}, \varepsilon_{16}, \varepsilon_{24}$ $\varepsilon_{26}, \varepsilon_{34}, \varepsilon_{35}$	Parâmetros fracamente anisotrópicos ou parâmetros WA
$A_{ij}$	Parâmetros Elásticos
M	Matriz de sensibilidade

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>15</b>
2.1	MEIOS ANISOTRÓPICOS E ISOTRÓPICOS	15
2.2	RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS $W_A$ E OS DADOS DE VAGAROSIDADE E POLARIZAÇÃO DE UMA ONDA qP EM EXPERIMENTOS DE VSP	16
<b>3</b>	<b>PROBLEMA DIRETO</b>	<b>20</b>
3.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	21
<b>4</b>	<b>PROBLEMA INVERSO</b>	<b>26</b>
4.1	PARÂMETROS DO MEIO ISOTRÓPICO DE REFERÊNCIA	26
4.1.1	Escolha do vetor frente de onda $P$ , $n_k$	26
4.1.2	Escolha das velocidades das ondas $P$ e $S$	27
4.1.3	Testes numéricos	28
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>35</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>36</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Reservatórios de hidrocarbonetos apresentam-se na maioria das vezes em meios fraturados. Estes meios em regime quase estático, meios com pouca influência de forças externas devido à tectônica por exemplo, comportam-se como meios efetivamente anisotrópicos. Desta forma, o estudo de meios anisotrópicos é de grande importância para a indústria de prospecção. A relação entre os parâmetros de fraca anisotropia (parâmetros WA) e os dados de vagarosidade e polarização considerando ondas qP e qS é complexa. Para o caso de ondas qP, é apresentada em Zheng e Pšenčík (2002) uma aproximação para relação complexa entre os parâmetros de fraca anisotropia (parâmetros WA) e os dados de vagarosidade e polarização considerando ondas qP em torno de um meio isotrópico de referência. Posteriormente, foi feita uma análise desta formulação, considerando dados em apenas um perfil (GOMES et al., 2004). Outros aspectos deste esquema de inversão como nível de ruído, tipo de anisotropia e tipo de onda qP são apresentados em Barreto (2010).

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, é apresentada uma análise de sensibilidade desta aproximação linear considerando experimentos de VSP wakaway multiazimutal, em que as fontes estão distribuídas em vários perfis. Uma análise da resolução dos parâmetros é mostrada. Em seguida, uma análise das escolhas do meio isotrópico de referência é apresentada. Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no capítulo 2 é apresentada a formulação teórica dos problemas direto e inverso; no capítulo 3, uma análise da resolução dos parâmetros a partir do esquema de inversão considerando dados medidos em vários perfis é apresentada, através desta análise é determinado que parâmetros poderão ser resolvidos; no capítulo 4 é feita uma análise da escolha dos parâmetros do meio isotrópico de referência e no capítulo 5 são apresentadas as conclusões.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo são apresentados os fundamentos para a estimativa dos parâmetros fracamente elásticos (parâmetros WA) utilizando dados de polarização e vagarosidade de onda qP em experimentos de VSP walkaway multiazimutal. Uma vez que esta relação é de análise complexa, é então utilizada uma aproximação de primeira ordem em torno de um meio isotrópico de referência, sendo portanto, válida apenas para meios fracamente anisotrópicos.

### 2.1 MEIOS ANISOTRÓPICOS E ISOTRÓPICOS

Um meio perfeitamente elástico é descrito por um tensor de quarta ordem chamado tensor de rigidez elástica,  $C_{ijkl}$ . Se as componentes ou todo o tensor elástico, variam por rotação, o meio é dito anisotrópico, caso contrário o meio é isotrópico. Meios que apresentam características geológicas tais como fraturas orientadas ou meios com camadas finamente extratificadas comportam-se, em regime quase estático, como meios anisotrópicos. Meios que apresente especificamente essas características geológicas, são ditos meios anisotrópicos TI (meios transversalmente isotrópicos, cujo eixo de simetria tem uma certa inclinação em relação a vertical). Nesses meios as propriedades físicas em um plano não mudam para rotações em torno do eixo de simetria. Na Figura 2.1(a), é mostrado um meio com fraturas horizontais que se comporta efetivamente como um meio anisotrópico TIV (meio transversalmente isotrópico com eixo de simetria vertical). As propriedades físicas do meio não mudam para rotações em torno deste eixo de simetria no mesmo plano. Na Figura 2.1(b) é apresentado um meio com fraturas, cujo eixo de simetria apresenta uma inclinação  $\varphi$  em relação a vertical. Esse meio comporta-se efetivamente como um meio anisotrópico TI.

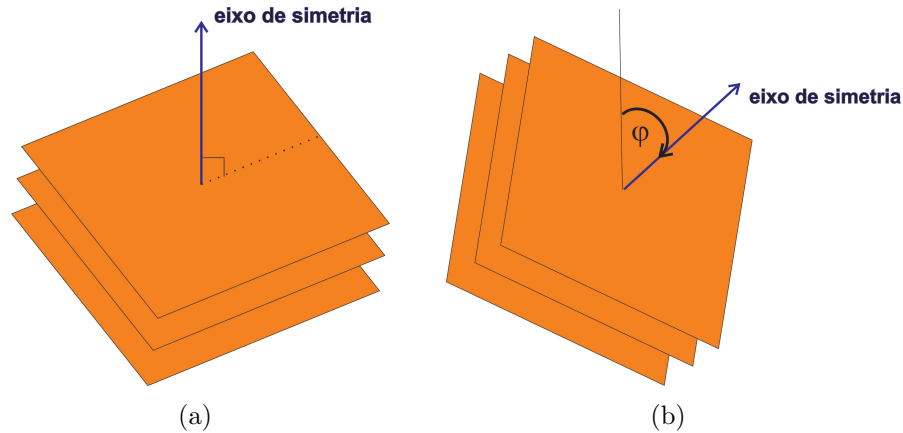


Figura 2.1: Na Figura da esquerda (a), o meio é formado por fraturas planas horizontais. Em regime quase estático este meio se comporta efetivamente como um meio anisotrópico TIV. Na Figura da direita (b) o meio é formado por fraturas planas inclinadas. Em regime quase estático este meio se comporta efetivamente como um meio anisotrópico TI. As propriedades físicas em um mesmo plano não mudam em rotações em relação ao eixo de simetria.

## 2.2 RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS WA E OS DADOS DE VAGAROSIDADE E POLARIZAÇÃO DE UMA ONDA qP EM EXPERIMENTOS DE VSP

Durante todo este trabalho adotamos a notação indicial para representar vetores e matrizes. A orientação positiva de  $x_3$  é no sentido do interior da Terra. Considere três vetores unitários perpendiculares entre si:  $e_i^{(1)}$ ,  $e_i^{(2)}$  e  $e_i^{(3)}$ , tal que este último é paralelo ao vetor normal ( $n_k$ , em que  $k = 1, 2, 3$ ) à frente de onda P em um meio isotrópico de referência. Os vetores  $e_i^{(1)}$  e  $e_i^{(2)}$  podem ser escolhidos de forma arbitrária tal que pertençam ao plano perpendicular a  $n_k$ . Uma escolha prática é dada por Pšenčík e Gajewski (1998) como sendo:

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

Em que

$$D = \sqrt{n_1^2 + n_2^2}, \quad n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 = 1 \quad (2.1)$$

Desta forma, o vetor de vagarosidade no meio de referência ( $s^0$ ) é dado por:

$$s_k^0 = \alpha^{-1} n_k \quad (2.2)$$

em que  $\alpha$  é a velocidade da onda P no meio isotrópico de referência e o subscrito  $k$  refere-se à  $k$ -ésima componente do vetor. Sejam  $\xi, \zeta$  e  $\eta$  os comprimentos das projeções do vetor vagarosidade ( $s^0$ ) no meio de referência nas direções dos eixos  $x_1, x_2$  e  $x_3$  respectivamente. Estes podem ser escritos como:

$$\xi = \frac{n_1}{\alpha} \quad \zeta = \frac{n_2}{\alpha} \quad \eta = \frac{n_3}{\alpha} \quad (2.3)$$

Para aproximações de primeira ordem, o vetor vagarosidade de uma onda qP que se propaga em um meio qualquer está relacionado com o vetor vagarosidade no meio isotrópico de referência (ZHENG; PŠENČÍK, 2002) por:

$$s = s^0 + (\Delta\xi, \Delta\zeta, \Delta\eta) = (\xi + \Delta\xi) \hat{e}_1 + (\zeta + \Delta\zeta) \hat{e}_2 + (\eta + \Delta\eta) \hat{e}_3, \quad (2.4)$$

em que  $\Delta\xi, \Delta\zeta$  e  $\Delta\eta$  são perturbações de primeira ordem de  $\xi, \zeta$  e  $\eta$ , respectivamente, e  $\hat{e}_1, \hat{e}_2$  e  $\hat{e}_3$  são vetores unitários nas direções  $x_1, x_2$  e  $x_3$ , respectivamente. Os vetores de vagarosidade,  $s_k$ , e de polarização,  $g_k$ , de uma onda qP que se propaga em um meio anisotrópico qualquer estão relacionados linearmente com os parâmetros WA do meio através das seguintes equações (ZHENG; PŠENČÍK, 2002):

$$B_{m3} = (\alpha^2 - \beta^2) (g_k e_k^{(m)} - \alpha \Delta\xi e_1^{(m)} - \alpha \Delta\zeta e_2^{(m)} - \alpha \Delta\eta e_3^{(m)}); B_{33} = \alpha^2 (1 - \alpha^2 c^{-2}) \quad (2.5)$$

em que  $m = 1$  ou  $2$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  são as velocidades das ondas P e S, respectivamente, no meio isotrópico de referência,  $c^{-2}$  é o módulo do vetor vagarosidade  $s_k$ ,  $g_k$  é a  $k$ -ésima componente do vetor de polarização normalizado e as funções  $B_{m3}$  e  $B_{33}$  são elementos da matriz de fraca anisotropia, calculados pela equação:

$$B_{mn} = a_{ijkl} e_i^{(m)} e_j^{(3)} e_l^{(3)} e_k^{(n)} - c_0^2 \delta_{mn}, \quad (2.6)$$

sendo  $a_{ijkl}$  os parâmetros elásticos normalizados pela densidade ( $i, j, k, l=1, 2, 3$ );  $c_0$ , a velocidade de fase no meio isotrópico de referência;  $\delta_{mn}$ , a função Delta de Kronecker. Para ondas P,  $c_0 = \alpha$ . As matrizes WA são funções dos parâmetros fracamente anisotrópicos,

das velocidades das ondas P e S e do vetor normal à frente de onda no meio isotrópico de referência dadas por:

$$\begin{aligned}
B_{13} = & \alpha^2 D^{-1} \{ 2\epsilon_z n_3^5 + n_3^4 (\epsilon_{34} n_2 + \epsilon_{35} n_1) + n_3^3 (\delta_x n_1^2 + \delta_y n_2^2 + 2\chi_z n_1 n_2 - 2\epsilon_z) \\
& + n_3^2 [ (4\chi_x - 3\epsilon_{34}) n_1^2 n_2 + (4\chi_y - 3\epsilon_{35}) n_1 n_2^2 + (4\epsilon_{15} - 3\epsilon_{35}) n_1^3 + (4\epsilon_{24} \\
& - 3\epsilon_{34}) n_2^3 ] + n_3 [ (2\delta_z - \delta_x - \delta_y) n_1^2 n_2^2 + 2(2\epsilon_{16} - \chi_z) n_1^3 n_2 + (2\epsilon_{26} - \chi_z) \\
& n_1 n_2^3 + (2\epsilon_x - \delta_x) n_1^4 + (2\epsilon_y - \delta_y) n_2^4 ] - \chi_x n_1^2 n_2 - \chi_y n_1 n_2^2 - \epsilon_{15} n_1^3 - \epsilon_{24} n_2^3 \}, \quad (2.7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{23} = & \alpha^2 D^{-1} \{ n_3^3 (\epsilon_{34} n_1 - \epsilon_{35} n_2) + n_3^2 [ (\delta_x + \delta_y) n_1 n_2 + \chi_z n_1^2 - \chi_z n_2 ] \\
& + n_3 [ (2\chi_y - 3\epsilon_{15}) n_1^2 n_2 - (2\chi_x - 3\epsilon_{24}) n_1 n_2^2 + \chi_x n_1^3 - \chi_y n_2^2 ] \\
& + (\delta_z - 2\epsilon_x) n_1^3 n_2 + (\epsilon_y - 2\delta_z) n_1 n_2^3 + 3(\epsilon_{26} - \epsilon_{16}) n_1^2 n_2^2 + \epsilon_{16} \\
& n_1^4 - \epsilon_{26} n_2^4 \}, \quad (2.8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{33} = & 2\alpha^2 \{ \epsilon_z n_3^4 + 2n_3^3 (\epsilon_{34} n_2 + \epsilon_{35} n_1) + n_3^2 (\delta_x n_1^2 + \delta_y n_2^2 + 2\chi_z n_1 n_2) \\
& 2n_3 (\chi_x n_1^2 n_2 + \chi_y n_1 n_2^2 + \epsilon_{15} n_1^3 + \epsilon_{24} n_2^3) + \epsilon_x n_1^4 + \delta_z n_1^2 n_2^2 + \epsilon_y n_2^4 \\
& + 2\epsilon_{16} n_1^3 n_2 + 2\epsilon_{26} n_1 n_2^3 \}. \quad (2.9)
\end{aligned}$$

Ao todo, quinze parâmetros WA descrevem a propagação de onda do tipo qP. Para que a equação (2.5) possa ser utilizada é necessário ter o conhecimento prévio de todas as componentes dos vetores de vazarosidade e polarização do meio anisotrópico. Para levantamentos com geofones de três componentes, a determinação de todo o vetor de polarização não é o problema. O problema está na determinação das componentes do vetor de vazarosidade, pois em casos mais comuns só se tem conhecimento da componente vertical. É, então, necessário fazer algumas suposições sobre o meio para que as componentes horizontais da vazarosidade sejam determinadas. Neste trabalho estamos interessados em meios mais gerais possíveis. Desta forma, o esquema de inversão considera que apenas a componente vertical da vazarosidade é conhecida, e assim as outras componentes da vazarosidade são eliminadas das equações (2.5), que resulta na seguinte equação (ZHENG; PŠENČÍK, 2002):

$$D (\alpha^2 - \beta^2)^{-1} B_{13} - \frac{1}{2} \alpha^{-1} \eta B_{33} = D g_k e_k^{(1)} + \alpha \Delta \eta \quad (2.10)$$

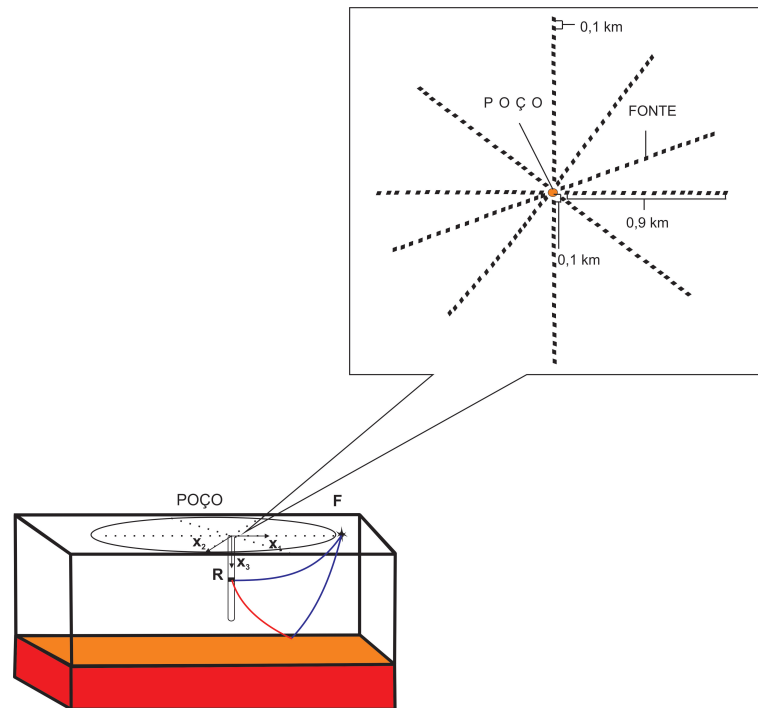


Figura 2.2: Desenho do experimento em VSP walkaway multiazimutal, em que as fontes (F) estão distribuídas em perfis na superfície e os receptores (R) estão no poço. A origem das coordenadas está situada na cabeça do poço, com eixo z positivo de cima para baixo. A configuração em superfície pode ser vista de cima na ampliação. Há dois meios separados por uma interface, sendo o primeiro meio anisotrópico arbitrário (branco) e o segundo é um meio isotrópico (vermelho). E a direção de propagação da onda direta é a linha azul, tanto a que segue da fonte para o receptor como a que segue para a interface, e a onda convertida está especificada pela linha vermelha, a qual segue da interface em direção ao receptor.

Para uma discussão mais detalhada sobre como a existência de uma os mais componentes do vetor vagarosidade afeta a equação (2.5), ver Zheng e Pšenčík (2002). Durante todo o trabalho, o esquema de inversão será discutido para dados medidos em experimentos de VSP walkaway multiazimutal (ver Figura 2.2). As fontes estão na superfície distribuídas regularmente em perfis. Os receptores estão no poço. São utilizadas ondas qP diretas e refletidas. No próximo capítulo serão discutidos o problema direto, através da equação que relaciona os parâmetros WA com dados observados e os parâmetros do meio de referência, e posteriormente o problema inverso.

### 3 PROBLEMA DIRETO

A equação (2.10) pode ser escrita na forma matricial:

$$\mathbf{M}\mathbf{w} = \mathbf{y}, \quad (3.1)$$

em que: o vetor  $\mathbf{w}$  é chamado vetor dos parâmetros, possui dimensão  $N_{par}$  e é constituído pelos parâmetros WA, no caso de ondas qP,  $N_{par} = 15$  é dado por:

$$\begin{aligned} p_1 &= \varepsilon_x & p_2 &= \varepsilon_y & p_3 &= \varepsilon_z \\ p_4 &= \delta_x & p_5 &= \delta_y & p_6 &= \delta_z \\ p_7 &= \chi_x & p_8 &= \chi_y & p_9 &= \chi_z \\ p_{10} &= \varepsilon_{15} & p_{11} &= \varepsilon_{16} & p_{12} &= \varepsilon_{24} \\ p_{13} &= \varepsilon_{26} & p_{14} &= \varepsilon_{34} & p_{15} &= \varepsilon_{35} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Estes parâmetros WA estão relacionados com os parâmetros elásticos por:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{A_{11} - \alpha^2}{2\alpha^2}, & \epsilon_y &= \frac{A_{22} - \alpha^2}{2\alpha^2}, & \epsilon_z &= \frac{A_{33} - \alpha^2}{2\alpha^2}, \\ \delta_x &= \frac{A_{13} + 2A_{55} - \alpha^2}{\alpha^2}, & \delta_y &= \frac{A_{23} + 2A_{44} - \alpha^2}{\alpha^2}, & \delta_z &= \frac{A_{12} + 2A_{66} - \alpha^2}{\alpha^2}, \\ \chi_x &= \frac{A_{14} + 2A_{56}}{\alpha^2}, & \chi_y &= \frac{A_{25} + 2A_{46}}{\alpha^2}, & \chi_z &= \frac{A_{36} + 2A_{45}}{\alpha^2}, \\ \epsilon_{15} &= \frac{A_{15}}{\alpha^2}, & \epsilon_{16} &= \frac{A_{16}}{\alpha^2}, & \epsilon_{24} &= \frac{A_{24}}{\alpha^2}, \\ \epsilon_{26} &= \frac{A_{26}}{\alpha^2}, & \epsilon_{34} &= \frac{A_{34}}{\alpha^2}, & \epsilon_{35} &= \frac{A_{35}}{\alpha^2}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Os parâmetros elásticos  $A_{ij}$  estão ponderados pela densidade. O vetor  $\mathbf{y}$  na equação (3.1) é o vetor de observações de dimensão  $N_{obs}$  (número de observações), formado pelo lado direito da equação (2.10). A matriz  $\mathbf{M}$  é a matriz de sensibilidade no meio, formada pelo lado esquerdo de (2.10) a menos dos parâmetros WA. Essa matriz tem dimensão  $N_{obs} \times N_{par}$  e depende dos parâmetros do meio isotrópico de referência e da geometria de aquisição. Uma vez que o sucesso do esquema de inversão depende da sensibilidade da matriz  $\mathbf{M} = \mathbf{M}(\alpha, \beta, \mathbf{n})$ , é apresentado um estudo da sensibilidade de matriz no que se refere a geometria de aquisição.

### 3.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para essa análise, foi considerada a configuração de VSP walkaway multiazimutal mostrada esquematicamente na Figura 2.2, com a seguinte geometria: um único receptor está situado no poço a uma profundidade de 0,4 km. Na superfície, foram usados no máximo 5 perfis com 18 fontes cada perfil, distribuídas simetricamente em relação a cabeça do poço. A distância da fonte mais próxima do poço é de 0,1 km, o espaçamento entre as fontes é de 0,1 km. Assim, a fonte mais distante do poço está situada a 0,9 km. A interseção do poço com a superfície terrestre define a origem do sistema de coordenadas cartesiano com  $x_3$  positivo apontando de cima para baixo, vê figura 2.2.

A sensibilidade da matriz  $\mathbf{M}$  foi estudada para variações nas velocidades  $\alpha$  e  $\beta$  no meio isotrópico de referência, para variações na orientação e número de perfis com variação de fontes por perfil. O vetor normal á frente de onda P ( $\mathbf{n}$ ) no meio isotrópico de referência é determinado como um vetor unitário na direção fonte - receptor. A escolha deste vetor não depende dos dados observados e é função apenas da geometria do levantamento. Outras especificações de  $\mathbf{n}$  são discutidas ao longo desse trabalho. Usando a decomposição SVD, para cada matriz de sensibilidade, calculamos a matriz de resolução (MENKE, 1984):

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}_r \mathbf{V}_r^T. \quad (3.4)$$

Sendo  $\mathbf{V}$  uma matriz quadrada de ordem  $N_{par}$ , cujas colunas são formadas por autovetores de  $\mathbf{M}\mathbf{M}^T$ . O subscrito T está relacionado com a operação de transposição e o subscrito r varia de 1 até o posto efetivo da matriz de sensibilidade  $\mathbf{M}$ . O parâmetro é dito resolvido totalmente quando a componente principal da matriz  $\mathbf{R}$  correspondente a posição do parâmetro for igual a 1. Pela análise da fórmula para a velocidade de fase da onda P (PŠENČÍK; GAJEWSKI, 1998), estamos aptos a estimar quantos parâmetros WA podem ser obtidos de acordo com o número de perfis considerados. Chamamos esta análise de sensibilidade de conservativa. A palavra "conservativa" é usada para diferenciar esse tipo de análise da análise de sensibilidade que é feita a partir da estimativa dos parâmetros em presença de ruído nos dados observados. A análise conservativa apenas indica quais parâmetros não podem ser estimados pela configuração escolhida na aquisição. Durante a análise de sensibilidade conservativa, se descobriu que a recuperação dos parâmetros WA é praticamente independente da forma escolhida para o cálculo dos parâmetros do meio isotrópico de referência, velocidades das ondas P e S e o vetor  $\mathbf{n}$ . Nos testes realizados foi considerado que o número de condição da matriz  $\mathbf{M}$  era de no máximo  $10^{-2}$ . Chegamos às seguintes conclusões:

- Para medidas ao longo de um único perfil apenas cinco parâmetros poderão ser obtidos. Se o perfil é paralelo ao eixo  $x_1$  recupera-se  $\varepsilon_x, \varepsilon_z, \delta_x, \varepsilon_{15}, \varepsilon_{35}$ , mas se for paralelo a  $x_2$  recupera-se  $\varepsilon_y, \varepsilon_z, \delta_y, \varepsilon_{24}, \varepsilon_{34}$ . A matriz de resolução é mostrada na Figura 3.1, apenas cinco parâmetros poderão ser estimados a partir da inversão de dados medidos em apenas um perfil.
- Para medidas ao longo de dois perfis, o melhor resultado é obtido para perfis perpendiculares, como  $\varphi = 0^\circ$  e  $\varphi = 90^\circ$ , deste modo nove parâmetros possuem resolução total, são eles:  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \delta_x, \delta_y, \varepsilon_{15}, \varepsilon_{24}, \varepsilon_{34}$  e  $\varepsilon_{35}$ , e o resto dos parâmetros têm resolução nula. A matriz de resolução é mostrada na Figura 3.2, apenas nove parâmetros poderão ser estimados a partir da inversão de dados medidos em dois perfis.
- Para medidas ao longo de três perfis a melhor combinação é a formada pelas direções  $\varphi = 0^\circ, \varphi = 45^\circ$  e  $\varphi = 90^\circ$ . Dez parâmetros tiveram resolução total, foram eles:  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \delta_x, \delta_y, \chi_z, \varepsilon_{15}, \varepsilon_{24}, \varepsilon_{34}$  e  $\varepsilon_{35}$ . Os demais parâmetros tiveram menos de 60% de resolução. A matriz de resolução é mostrada na Figura 3.3, apenas dez parâmetros tem resolução total para dados medidos em três perfis.
- Para medidas ao longo de quatro perfis a melhor combinação é a formada pelas direções:  $\varphi = 0^\circ, \varphi = 45^\circ, \varphi = 90^\circ$  e  $\varphi = 135^\circ$ . Deste modo treze parâmetros tiveram resolução total:  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \delta_x, \delta_y, \delta_z, \chi_x, \chi_y, \chi_z, \varepsilon_{15}, \varepsilon_{24}, \varepsilon_{34}$  e  $\varepsilon_{35}$ . Os demais parâmetros possuem resolução menor que 60%, ver matriz resolução na Figura 3.4.
- E conseguimos recuperar todos os 15 parâmetros quando fizemos medidas ao longo de 5 perfis, e o melhor é que os parâmetros poderão ser obtidos quaisquer que sejam as direções escolhidas desde que não sejam paralelas, ver matriz de resolução na Figura 3.5.
- Usando os mesmos parâmetros deste experimento foram feitas medidas considerando 5 perfis e diminuindo o número de fontes entre o poço, concluiu-se que com apenas 6 fontes por perfil, ou seja, 3 fontes de cada lado do poço, pode-se obter o mesmo resultado anterior.

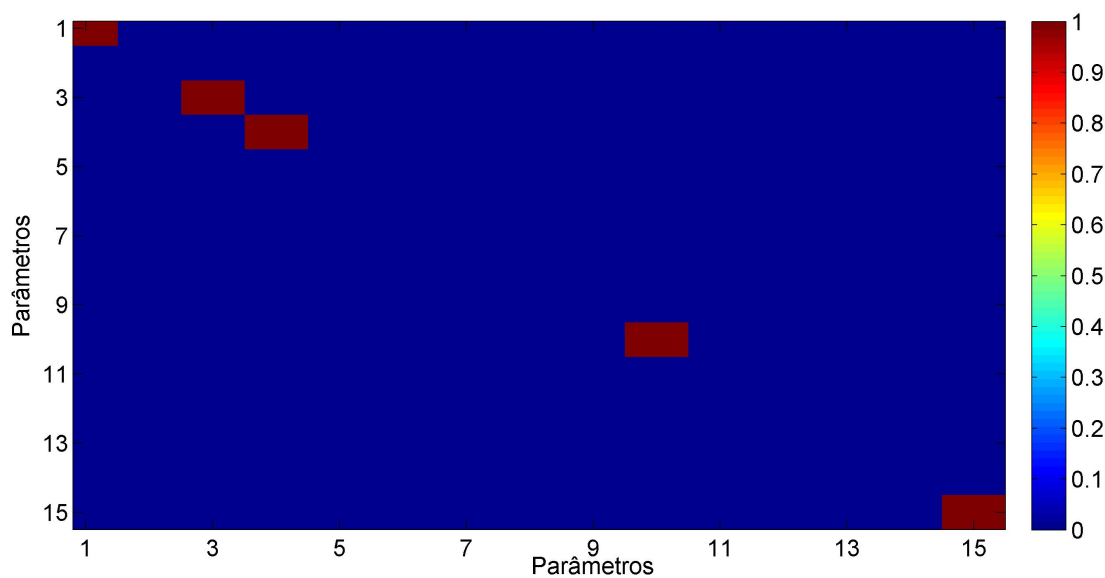


Figura 3.1: Matriz de resolução dos parâmetros WA para medidas ao longo de um perfil. Apenas cinco parâmetros tem resolução.

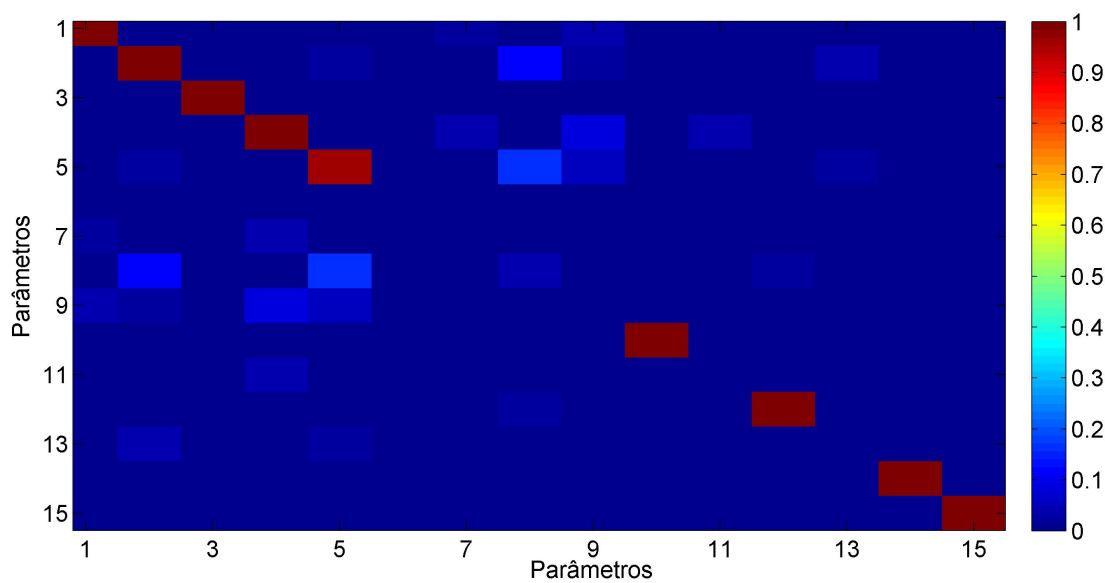


Figura 3.2: Matriz de resolução dos parâmetros WA para medidas ao longo de dois perfis. Recupera-se 9 parâmetros.

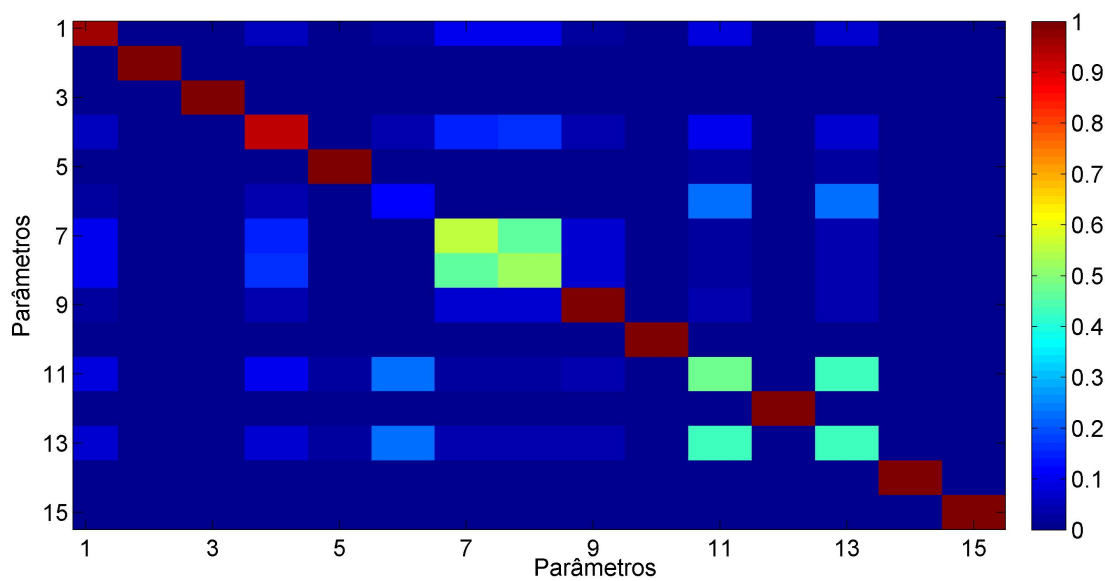


Figura 3.3: Matriz de resolução dos parâmetros WA para medidas ao longo de três perfis. Com esta configuração 10 parâmetros têm resolução.

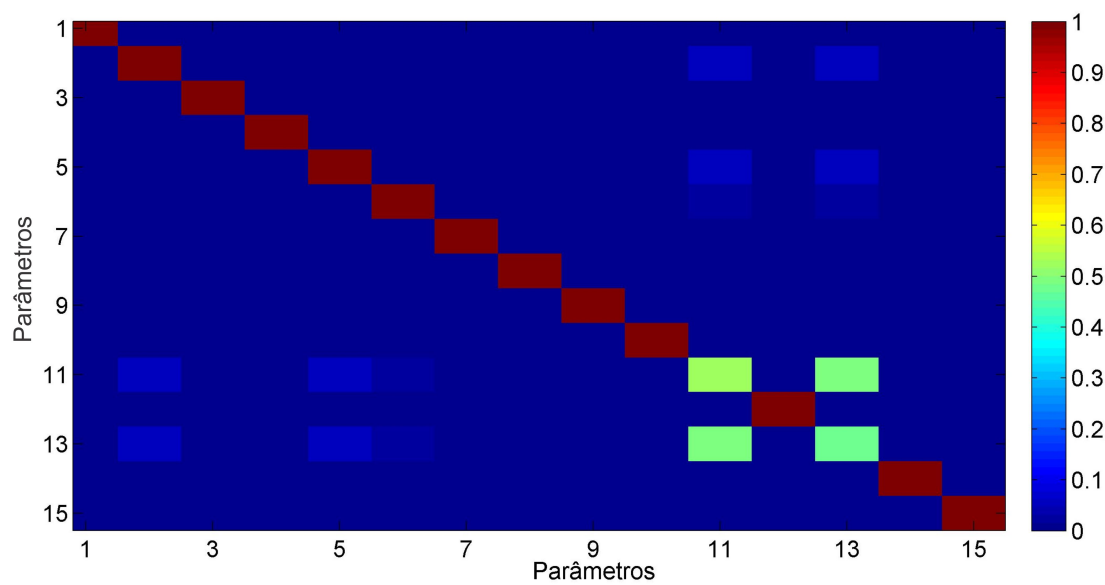


Figura 3.4: Matriz de resolução dos parâmetros WA para medidas ao longo de quatro perfis. Com esta configuração 13 parâmetros são resolvidos.

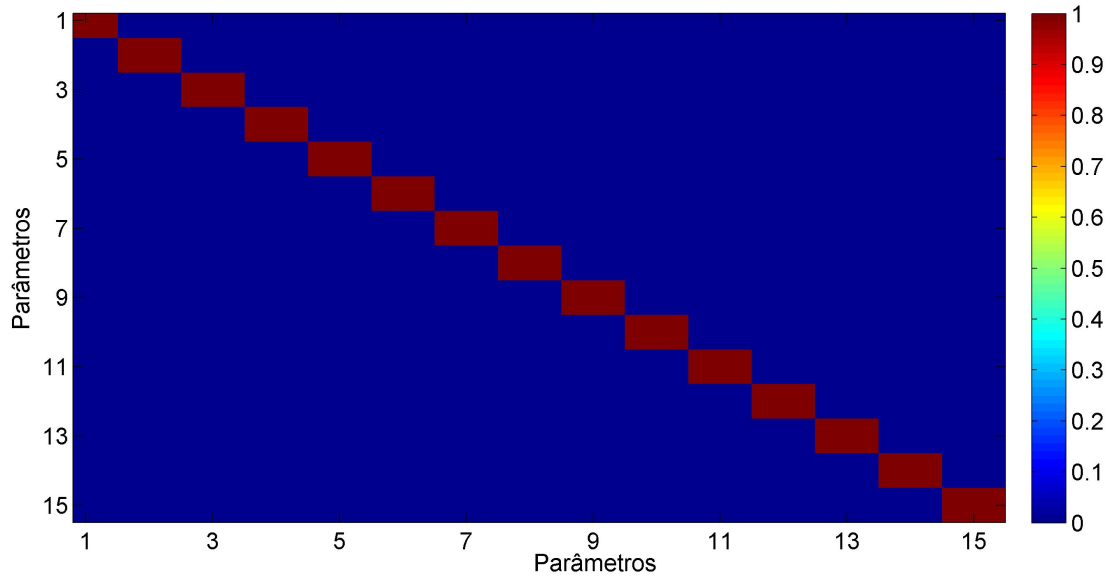


Figura 3.5: Matriz de resolução dos parâmetros WA para medidas ao longo de cinco perfis. Os 15 parâmetros WA tem resolução total.

Nas Figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 os eixos estão numerados de acordo com a equação (3.2).

De acordo com as Figuras 3.1 e 3.2, verifica-se que para configurações de até dois perfis, vários dos 15 parâmetros não possuem resolução. Já para as configurações de três e quatro perfis, os 15 parâmetros apresentam resolução total ou parcial. Ainda de acordo com o mapa de cores da Figura 3.3, a resolução dos parâmetros 7,  $\chi_x$ , e 8,  $\chi_y$ , e a resolução dos parâmetros 11,  $\epsilon_{24}$ , e 13,  $\epsilon_{26}$ , estão relacionados. De acordo com o mapa de cores da Figura 3.4, apenas os parâmetros 11,  $\epsilon_{24}$ , e 13,  $\epsilon_{26}$ , estão relacionados

Conforme a análise apresentada acima, só é possível indicar quais parâmetros WA poderão ser recuperados a partir da geometria do levantamento. Só é possível dizer quais parâmetros são bem estimados ou não, através da análise de como as estimativas, obtidas de dados com diferentes níveis de ruído, se comportam.

## 4 PROBLEMA INVERSO

Os parâmetros WA podem ser estimados a partir de (3.1), determinando-se que valores do vetor  $w_j$  minimizam a função:

$$\Phi = \left\| \sum_{i=1}^{N_{obs}} (y_i - M_{ij} \tilde{w}_j) \right\|_2. \quad (4.1)$$

em que o subscrito 2 refere-se a norma euclidiana,  $j = 1, \dots, N_{par}$  e o vetor  $\tilde{w}_j$  é constituído das estimativas dos parâmetros WA. Para estas estimativas é necessário que toda a matriz  $M_{ij}(\alpha, \beta, n_k)$  seja conhecida e, portanto, é necessário que os parâmetros do meio isotrópico de referência (velocidades das ondas P e S e  $n_k$ , vetor normal à frente de onda P) sejam conhecidos. Existem várias maneiras de se determinar esses parâmetros, que serão discutidas a seguir.

### 4.1 PARÂMETROS DO MEIO ISOTRÓPICO DE REFERÊNCIA

Há várias formas de se escolher os parâmetros do meio isotrópico de referência. Iremos discutir as vantagens e desvantagens dessas escolhas.

#### 4.1.1 Escolha do vetor frente de onda P, $n_k$

O vetor normal à frente de onda P pode ser escolhido de três formas diferentes de acordo com alguns pressupostos:

- $n_k$  determinado geometricamente. Para esta escolha do vetor  $n_k$ , faz-se o pressuposto de que o meio é homogêneo. Para meios heterogêneos faz-se uma aproximação por raio reto. Quanto maior for o grau de heterogeneidade pior será a aproximação.
- $n_k$  calculado supondo conhecido o meio de referência. Faz-se o pressuposto de que o meio de referência é conhecido e neste caso é necessário fazer o traçamento de raio no meio de referência. Essa escolha traz custos computacionais.

- $n_k$  paralelo ao vetor de polarização observado ( $n_k // g_k$ ). Faz-se o pressuposto de que o meio é fracamente anisotrópico e então o vetor de polarização no meio a ser estimado é resultante de uma pequena perturbação no vetor  $n_k$ . Essa escolha será tanto melhor á medida que o meio for fracamente anisotrópico. Neste caso  $g_k e_k^{(1)} = 0$  e o primeiro termo a direita de (2.10) desaparece.

### 4.1.2 Escolha das velocidades das ondas P e S

Uma possibilidade de como estimar a velocidade  $\alpha$  para ondas P no meio isotrópico de referência a partir dos valores observados é dada pela relação:

$$\alpha p_3^{(i)} = g_3^{(i)}, \quad (4.2)$$

em que  $p_3^{(i)}$  e  $g_3^{(i)}$  são, respectivamente, as componentes verticais dos vetores de vagarosidade e polarização gerados pela  $i$ -ésima observação. A velocidade  $\alpha$  no meio de referência pode então ser estimada a partir da inversão da equação (4.2) por mínimos quadrados para o número total de observações,  $N_{obs}$ . Em Zheng e Pšenčík (2002), há outra maneira proposta para estimativa de  $\alpha$ , através da fórmula:

$$\alpha = \frac{1}{N_{obs}} \sum_{i=1}^{N_{obs}} \frac{g_3^{(i)}}{p_3^{(i)}} \quad (4.3)$$

Através da equação acima, a velocidade  $\alpha$  é determinada a partir do somatório da razão entre as componentes verticais dos vetores de polarização e de vagarosidade gerados pela  $i$ -ésima observação, ponderada pelo número de observações ( $N_{obs}$ ). Para o cálculo da velocidade  $\beta$  podemos usar a razão de Poisson, como segue abaixo:

$$\beta = \alpha / \sqrt{3}. \quad (4.4)$$

Para determinar a performance das estimativas dos parâmetros WA, foram realizadas inversões em que as duas possíveis escolhas de  $\alpha$  equação (4.2) e (4.3) foram usadas. O vetor normal à frente de onda P no meio isotrópico de referência foi escolhido paralelo ao vetor de polarização observada. Os resultados são apresentados a seguir.

### 4.1.3 Testes numéricos

Os dados de polarização e vagarosidade foram gerados sinteticamente através do pacote de traçamento de raio ANRAY (GAJEWSKI; PŠENČÍK, 1990). Estes dados foram calculados em um modelo com dimensões de 5 km x 5 km x 5km, formado por dois meios. O meio incidente é anisotrópico e era originalmente um meio TIV (meio isotrópico com simetria vertical). No topo os parâmetros normalizados pela densidade eram:  $A_{11} = A_{22} = 15.71$ ,  $A_{33} = 13.39$ ,  $A_{12} = 5.05$ ,  $A_{13} = A_{23} = 4.46$ ,  $A_{44} = A_{55} = 4.98$  e  $A_{66} = 5.33$ . O eixo de simetria foi rotacionado de  $\theta = 80^\circ$  em relação ao eixo  $x_2$  e posteriormente de  $\varphi = 25^\circ$  rotacionado em relação ao eixo  $x_3$ . Na base, que está a uma profundidade de 5 km, os parâmetros elásticos normalizados pela densidade eram:  $A_{11} = A_{22} = 35.348$ ,  $A_{33} = 30.128$ ,  $A_{12} = 11.363$ ,  $A_{13} = A_{23} = 10.035$ ,  $A_{44} = A_{55} = 11.205$  e  $A_{66} = 11.99$ . O eixo de simetria foi rotacionado de  $\theta = 90^\circ$  em relação ao eixo  $x_2$ , o modelo na base é um TIH (meio isotrópico com simetria horizontal). O meio subjacente é um isotrópico, cujas velocidades da onda P e S, normalizadas pela densidade, são respectivamente  $\alpha = 4,00$  km/s e  $\beta = 2,35$ .

Os dados foram adquiridos em experimentos de VSP walkaway multiazimutal com 18 fontes distribuídas ao longo de 5 perfis regularmente espaçados na superfície (melhor configuração para a estimativa dos parâmetros WA, (BARRETO, 2010)). As fontes estão espaçadas de 0,1 km, e estão distribuídas ao longo de 0,9 km em ambos os lados do poço. Os dados de polarização e vagarosidade foram calculados para 13 receptores, estão espaçados de 0,05, no interior do poço. A origem do sistema de coordenadas é o poço. Na inversão foram utilizados dados de ondas qP diretas e refletidas. O receptor mais raso está a 0.1km. A seguir são apresentados os testes numéricos para o receptor mais raso (0,1 km de profundidade) e o receptor mais profundo (0,7 km de profundidade).

A estabilidade das estimativas foi analisada através de simulações numéricas. Cada dado de polarização e vagarosidade obtido a partir do pacote ANRAY foi contaminado com ruído gaussiano gerado por 100 diferentes sementes e utilizando cada uma das 100 observações geradas, foram estimados os parâmetros WA e a velocidade  $\alpha$ . Por fim, a média e o desvio padrão destas estimativas foram calculadas. Na inversão não foram usados estabilizadores, uma vez que a matriz de sensibilidade era bem condicionada (da ordem de  $10^2$ ).

Nas Figuras 4.1 e 4.4 são mostrados estereogramas do quadrado da velocidade de fase calculada a partir de uma fórmula de primeira ordem (PŠENČÍK; FARRA, 2005). Nas Figuras 4.2, 4.3, 4.5 e 4.6 é mostrada uma análise do comportamento das estimativas dos parâmetros WA, para as duas maneiras de calcular  $\alpha$ , na presença de quatro diferentes níveis de ruído. De acordo com o nível de ruído nos dados de vagarosidade e polarização nas ondas qP direta e refletida foram classificados da seguinte forma:

- Ruído 1 - Para as ondas qP diretas: a componente vertical da vagarosidade foi contaminada com ruído cujo desvio padrão era de 5% do valor observado e a polarização foi contaminada com um ruído que modificava a direção de polarização de até 1°. Para as ondas qP refletidas: a componente vertical da vagarosidade foi contaminada com ruído cujo desvio padrão era de 10% do valor observado e a polarização foi contaminada com um ruído que modificava a direção de polarização de até 2°. Nas Figuras 4.2, 4.3, 4.5 e 4.6 este nível de ruído é representado pela letra (a).
- Ruído 2 -Para as ondas qP diretas: a componente vertical da vagarosidade foi contaminada com ruído cujo desvio padrão era de 5% do valor observado e a polarização foi contaminada com um ruído que modificava a direção de polarização de até 2°. Para as ondas qP refletidas: a componente vertical da vagarosidade foi contaminada com ruído cujo desvio padrão era de 10% do valor observado e a polarização foi contaminada com um ruído que modificava a direção de polarização de até 4°. Nas Figuras 4.2, 4.3, 4.5 e 4.6 este nível de ruído é representado pela letra (b).
- Ruído 3 -Para as ondas qP diretas: a componente vertical da vagarosidade foi contaminada com ruído cujo desvio padrão era de 10% do valor observado e a polarização foi contaminada com um ruído que modificava a direção de polarização de até 1°. Para as ondas qP refletidas: a componente vertical da vagarosidade foi contaminada com ruído cujo desvio padrão era de 20% do valor observado e a polarização foi contaminada com um ruído que modificava a direção de polarização de até 2°. Nas Figuras 4.2, 4.3, 4.5 e 4.6 este nível de ruído é representado pela letra (c).
- Ruído 4 -Para as ondas qP diretas: a componente vertical da vagarosidade foi contaminada com ruído cujo desvio padrão era de 10% do valor observado e a polarização foi contaminada com um ruído que modificava a direção de polarização de até 2°. Para as ondas qP refletidas: a componente vertical da vagarosidade foi contaminada com ruído cujo desvio padrão era de 20% do valor observado e a polarização foi contaminada com um ruído que modificava a direção de polarização de até 4°. Nas Figuras 4.2, 4.3, 4.5 e 4.6 este nível de ruído é representado pela letra (d).

### Resultados para o Receptor 1

O estereograma do quadrado da velocidade de fase foi calculado: a partir dos parâmetros WA exatos, Figura 4.1 (a), a partir dos parâmetros WA estimados considerando a velocidade  $\alpha$  estimada de (4.2), Figura 4.1 (b), a partir dos parâmetros WA estimados considerando  $\alpha$

calculada da média em (4.3), Figura 4.1 (d), e os erros percentuais absolutos: para Figura 4.1 (b), Figura 4.1 (c), e para Figura 4.1 (d), Figura 4.1 (e). De acordo com a Figura 4.1, tem-se que as melhores estimativas dos parâmetros WA acontecem quando a velocidade da onda P no meio de referência ( $\alpha$ ), é estimada da função (4.2). O erro é inferior a 3%. A variação das estimativas para os quatro níveis de ruído nas Figuras 4.2,  $\alpha$  calculado da função (4.2) e 4.3,  $\alpha$  calculado da função (4.3), verifica-se que para pequenos níveis de ruído as duas estimativas de  $\alpha$  geram praticamente a mesma variação, no entanto a medida que o nível de ruído aumenta, as estimativas obtidas usando  $\alpha$  da função (4.3) oscilam mais.

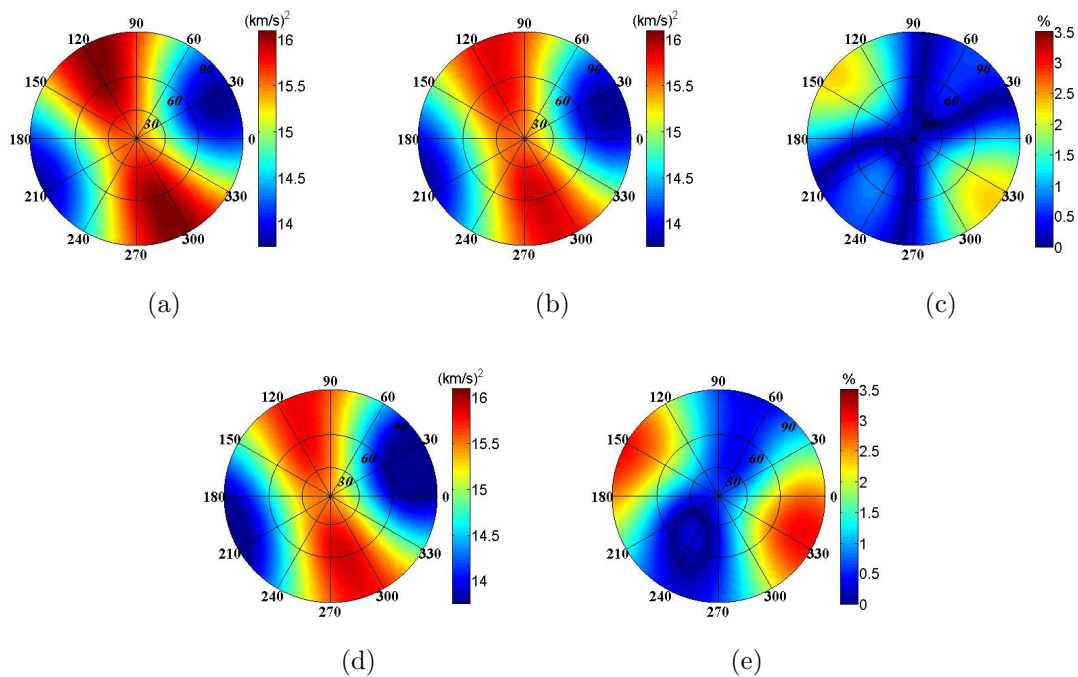


Figura 4.1: Para o receptor 1: a)Estereograma do quadrado da velocidade de fase obtida dos parâmetros WA exatos. b)Estereograma do quadrado da velocidade de fase obtida dos parâmetros WA estimados considerando a velocidade  $\alpha$  estimada da fórmula (4.2). c) Erro percentual absoluto entre (a) e (b). d)Estereograma do quadrado da velocidade de fase obtida dos parâmetros WA estimados considerando a velocidade  $\alpha$  estimada da fórmula (4.3). e) Erro percentual absoluto entre (a) e (d).

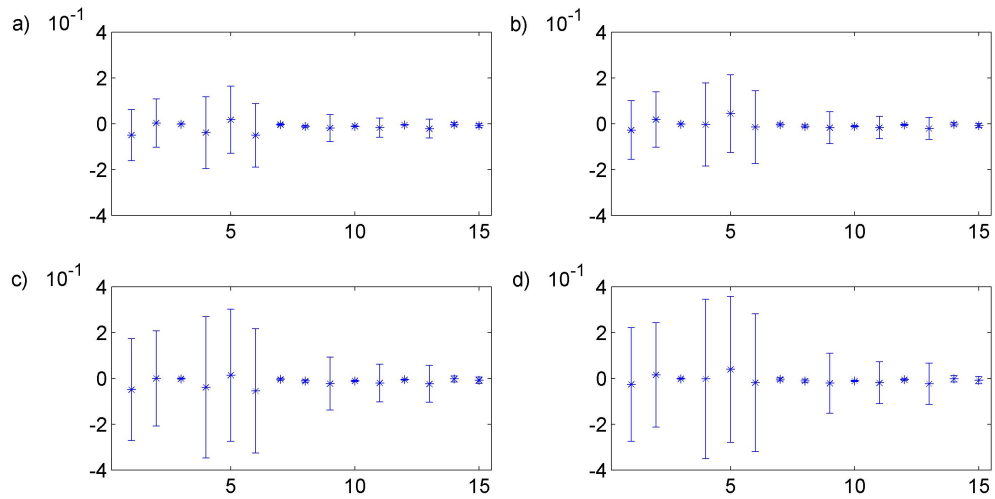


Figura 4.2: Para o receptor 1, estimativa dos parâmetros WA, considerando  $\alpha$  estimada de (4.2), e variação dessas estimativas para quatro diferentes níveis de ruído.

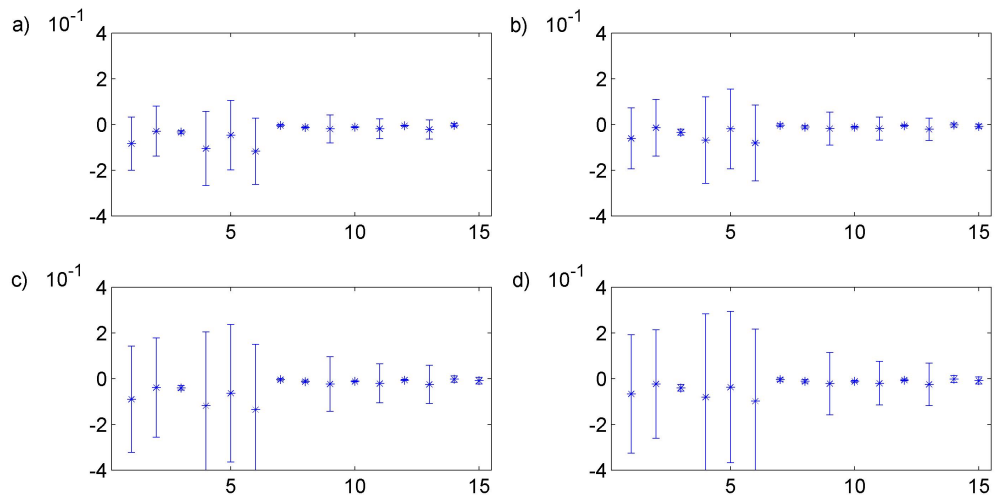


Figura 4.3: Para o receptor 1, estimativa dos parâmetros WA, considerando  $\alpha$  estimada de (4.3), e variação dessas estimativas para quatro diferentes níveis de ruído.

### Resultados para o Receptor 13

O receptor 13 tem maior área de iluminação e portanto, espera-se que as estimativas dos parâmetros WA sejam melhores, ver Barreto (2010). O estereograma do quadrado da velocidade de fase foi calculado: a partir dos parâmetros WA exatos, Figura 4.4 (a), a partir dos parâmetros WA estimados considerando a velocidade  $\alpha$  estimada de (4.2), Figura 4.4 (b), a partir dos parâmetros WA estimados considerando  $\alpha$  calculado da média em (4.3), Figura 4.4 (d), e os erros percentuais absolutos: para Figura 4.4 (b), Figura 4.4 (c), e para Figura 4.4 (d), Figura 4.4 (e). De acordo com as Figuras 4.4, verifica-se que as estimativas dos parâmetros WA para as duas maneiras de se estimar a velocidade da onda P no meio de referência ( $\alpha$ ), (4.2) e (4.3), são muito próximas, diferente dos resultados encontrados para o receptor 1. No entanto, pode-se verificar nas direções  $60^\circ - 240^\circ$ ,  $0^\circ - 330^\circ$  e  $150^\circ - 180^\circ$ , Figuras 4.4 (c) e (e), que as estimativas são ligeiramente melhores para  $\alpha$  estimado da equação (4.2). A variação das estimativas para os quatro níveis de ruído nas Figuras 4.5,  $\alpha$  calculado da função (4.2) e 4.6,  $\alpha$  calculado da função (4.3), verifica-se que para pequenos níveis de ruído as duas estimativas de  $\alpha$  geram praticamente a mesma variação, no entanto a medida que o nível de ruído aumenta, as estimativas obtidas usando  $\alpha$  da função (4.3) oscilam mais.

Dos testes apresentados acima, verifica-se que as estimativas dos parâmetros WA a partir da velocidade  $\alpha$  estimada da equação (4.2) é melhor, que quando  $\alpha$  é calculado da média dada pela equação (4.3). Esse resultado é confirmado para testes nos outros receptores e com outros modelos.

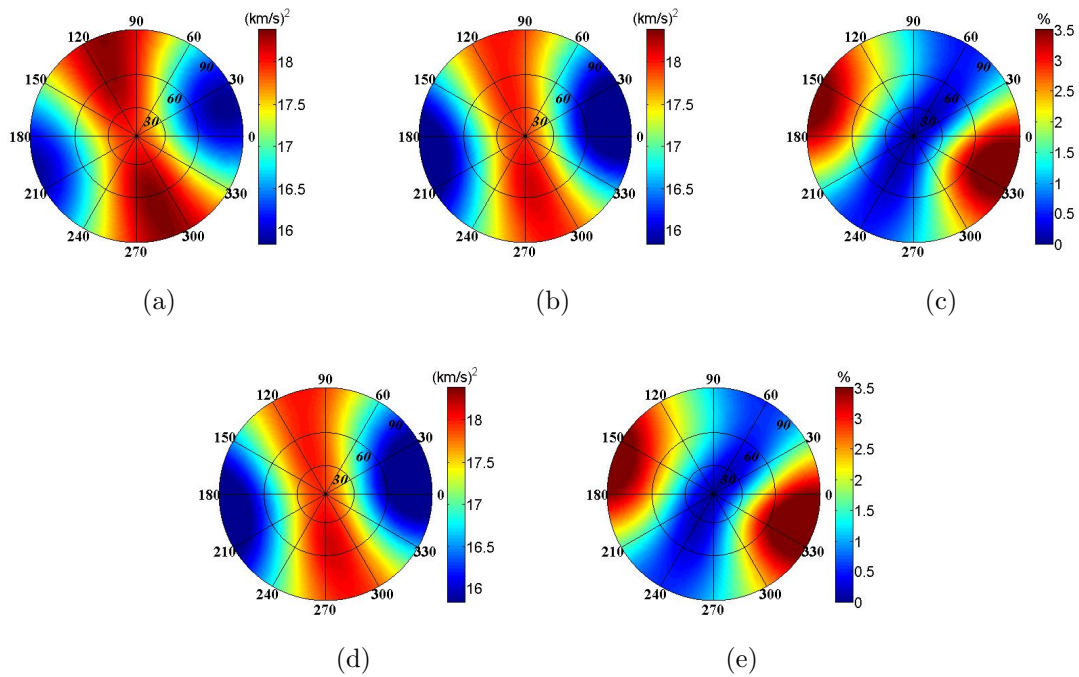


Figura 4.4: Para o receptor 13: a)Estereograma do quadrado da velocidade de fase obtida dos parâmetros WA exatos. b)Estereograma do quadrado da velocidade de fase obtida dos parâmetros WA estimados considerando a velocidade  $\alpha$  estimada da fórmula (4.2). c) Erro percentual absoluto entre (a) e (b). d)Estereograma do quadrado da velocidade de fase obtida dos parâmetros WA estimados considerando a velocidade  $\alpha$  estimada da fórmula (4.3). e) Erro percentual absoluto entre (a) e (d).

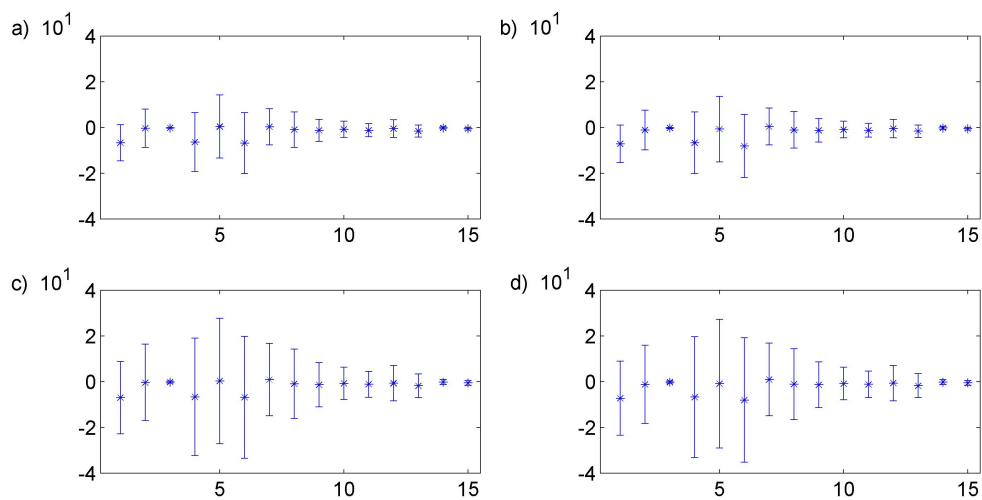


Figura 4.5: Para o receptor 13, estimativa dos parâmetros WA, considerando  $\alpha$  estimada de (4.2), e variação dessas estimativas para quatro diferentes níveis de ruído.

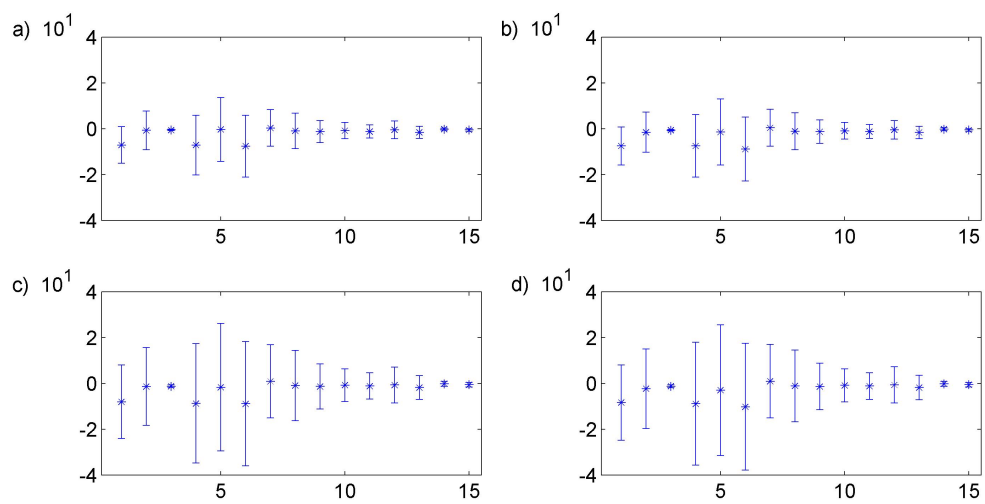


Figura 4.6: Para o receptor 13, estimativa dos parâmetros WA, considerando  $\alpha$  estimada de (4.3), e variação dessas estimativas para quatro diferentes níveis de ruído.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma análise do esquema de inversão de dados de vagarosidade e polarização de ondas qP obtidos de experimentos VSP walkaway multiazimutal para estimativa de anisotropia local. A resolução das estimativas dos parâmetros WA são analisadas para dados obtidos em um, dois, três, quatro e cinco perfis. Essa análise é feita através da matriz de resolução (ver Menke (1984)). A relação entre os dados de vagarosidade e polarização e os parâmetros de fraca anisotropia WA é de análise complexa e o esquema de inversão tratado neste trabalho é uma aproximação de primeira ordem em torno de um meio isotrópico de referência. As possíveis escolhas para os parâmetros do meio isotrópico de referência foram analisadas e fatores como tempo computacional, informação a priori e estabilidade das estimativas dos parâmetros WA foram consideradas.

Por fim, dentre os tópicos analisados, como tempo computacional, meio fracamente anisotrópico (única informação a priori), resolução e estabilidade das estimativas dos parâmetros WA, concluímos que a melhor escolha para os parâmetros do meio isotrópico de referência é: o vetor normal à frente de onda P,  $n_k$ , paralelo à polarização observada, velocidade  $\alpha$  estimada da equação (4.2), velocidade  $\beta$  da relação (4.4) e dados obtidos em cinco perfis regularmente espaçados.

## REFERÊNCIAS

- BARRETO, A. C. *Inversão de dados de onda qP em VSP multiazimutal para a estimativa de anisotropia local*. [S.l.]: Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Geofísica, Universidade Federal do Pará., 2010.
- GAJEWSKI, D.; PŠENČÍK, I. Vertical seismic profile synthetics by dynamic ray tracing in laterally varying layered anisotropic structures. *J. Geophys. Res.*, v. 67, n. 1, p. 300–306, 1990.
- GOMES, E. et al. Local determination of weak anisotropy parameters from a walkaway vsp qp- wave data in the java sea region. *Studia geoph.et geod.*, v. 48, p. 215–231, 2004.
- MENKE, W. *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*. [S.l.]: Academic Pres, 1984.
- PŠENČÍK, I.; FARRA, V. First-order ray tracing for qp waves in inhomogeneous weakly anisotropic media. *Geophysics*, v. 70, p. D65–D75, 2005.
- PŠENČÍK, I.; GAJEWSKI, D. Polarization, phase velocity and nmo velocity of qp waves in arbitrary weakly anisotropic media. *Geophysics*, v. 63, p. 1754–1766, 1998.
- ZHENG, X.; PŠENČÍK, I. Local determination of weak anisotropy parameters from qp-wave slowness and particle motion measurements. *Pure and Applied Geophysics*, v. 159, p. 1881–1905, 2002.