



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA

ISABELA COELHO LIMA

ASPECTOS PRÁTICOS DA ESTEREOTOMOGRAFIA

BELÉM
2011

ISABELA COELHO LIMA

ASPECTOS PRÁTICOS DA ESTEREOTOMOGRAFIA

Dissertação apresentada à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará- UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Sísmicos

Orientador: Jessé Carvalho Costa

BELÉM
2011

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

L732a Lima, Isabela Coelho

Aspectos práticos da estereotomografia / Isabela Coelho Lima;
Orientador: Jessé Carvalho Costa – 2011
85 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. Estereotomografia. 3. Modelo
de velocidade. 4. Parâmetros dos raios. 5. Traçamento de raios.
6. Ponderação dos dados. I. Costa, Jessé Carvalho, *orient.* II.
Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 20° ed.: 550

ISABELA COELHO LIMA

ASPECTOS PRÁTICOS DA ESTEREOTOMOGRAFIA

Dissertação apresentada à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará- UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geofísica

Data de Aprovação: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof. Jessé Carvalho Costa - Orientador
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Profa. Ellen de Nazaré Souza Gomes
Doutora em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. Cícero Roberto Teixeira Régis
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

BELEM
2011

Dedico este trabalho aos meus pais, Sérvulo e
Rogéria, e ao meu irmão, Victor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por tudo que Ele tem me proporcionado.

Agradeço aos meus pais, Sérvulo e Rogéria, pelo amor e pelo apoio em todos os momentos da minha vida. À minha tia Margarida por todo incentivo e por toda ajuda nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos professores Jessé Costa, Ellen Gomes e Cícero Régis pelo apoio e pelos conselhos durante toda a graduação. A todos os professores que contribuíram com a minha formação, especialmente à professora Nazaré Franco, que me apresentou à geofísica.

Agradeço a todos os amigos do curso, principalmente à Raiza Macambira e à Gabriela Pantoja pelas conversas e pelo companheirismo. À secretária Ana Paiva pela ajuda e pela paciência.

Agradeço à Agência Nacional do Petróleo pelo apoio financeiro desta pesquisa.

Finalmente, agradeço a todas aquelas pessoas que não tiveram seus nomes citados aqui, mas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Para o correto imageamento de estruturas complexas, a estimativa de um modelo de velocidade em profundidade, chamado de macromodelo, é uma etapa fundamental. Entre os vários métodos de obtenção de tal modelo, está a estereotomografia, método tomográfico robusto baseado no conceito de que eventos localmente coerentes fornecem informações sobre os modelos de velocidade. Diferentemente das técnicas tradicionais, a estereotomografia utiliza as componentes horizontais da vagarosidade como dados para inversão. Além disso, estima, adicionalmente ao modelo de velocidade, um par de segmentos de raios que se originam em um mesmo ponto em profundidade. Como todo método de inversão, a estereotomografia objetiva encontrar os parâmetros do modelo que melhor ajustam os dados observados. O problema matemático associado é não linear, e sua solução utiliza iterações lineares. A convergência do algoritmo depende fortemente do modelo inicial. Na implementação original da estereotomografia, o modelo inicial de velocidade é fornecido pelo usuário, enquanto que os parâmetros iniciais dos raios são calculados a partir da construção de um modelo homogêneo. Este trabalho estendeu o código de estereotomografia disponível ao acrescentar uma nova estratégia de obtenção dos parâmetros iniciais dos raios, os quais são calculados através do traçamento de raios em um modelo de velocidade arbitrário. Utilizando este novo código, a influência do modelo inicial na estereotomografia foi avaliada. A nova estratégia obteve ajustes satisfatórios para todos os testes. Para modelos iniciais de velocidade resultantes da conversão tempo-profundidade, a técnica implementada superou a original, produzindo melhores ajustes nos dados e melhor posicionamento dos eventos. Este trabalho também avaliou a influência da ponderação dos dados para a convergência do algoritmo. A escolha adequada dos pesos dos dados é fundamental para a obtenção de ajustes satisfatórios.

Palavras-Chave: Inversão. Estereotomografia. Modelo de velocidade. Parâmetros dos raios. Traçamento de raios. Ponderação dos dados.

ABSTRACT

The construction of a velocity-depth model is an essential step for imaging complex structures. One of the techniques used to obtain this model is stereotomography, a tomographic method based on the concept that locally coherent events provide information about velocity models. Differently from traditional tomography, stereotomography uses the horizontal components of slowness as data for inversion. Moreover, it calculates, additionally to the velocity model, a pair of ray segments that originates in the same point in depth. As any other inverse method, stereotomography aims at finding the model parameters that best fit the selected data. The mathematical problem is non-linear, and its solution is available through linear iterations. The convergence of the algorithm depends strongly on the initial model. In the original implementation of stereotomography, the initial velocity model should be given by the user, while the initial ray parameters are computed in an homogeneous model. This work extended the original algorithm by adding a new strategy for obtaining the initial ray parameters, which are calculated through ray tracing in an arbitrary velocity model. With this new source code, the influence of the initial model in stereotomography was evaluated. The new strategy produced acceptable data misfits in all tests. When using the models resulting from time-to-depth conversion, the implemented technique produced better results than the original one. This work also evaluated the influence of the data scaling on the convergence of the algorithm. The appropriate choice of scales is essential for obtaining satisfactory data misfits.

Keywords: Inversion. Stereotomography. Velocity model. Ray parameters. Ray tracing. Data scaling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 Representação do espaço de dados e de parâmetros na estereotomografia. A Figura (a) mostra os dados, a (b) mostra os parâmetros do modelo, e a (c) mostra a relação entre (a) e (b)	18
Figura 2.2 Perturbação na direção da vagarosidade	24
Figura 2.3 Perturbação na posição do ponto espalhador	25
Figura 2.4 Perturbação nos parâmetros do modelo	26
Figura 2.5 Raios em meio homogêneo	27
Figura 2.6 Primeiramente, traçamos um raio para baixo, partindo da fonte (item (a)), com a direção da vagarosidade naquele ponto. O raio é traçado até o tempo de trânsito total do evento ou até que o raio saia do modelo, como é o caso neste exemplo. Em seguida, outro raio é traçado para baixo, mas agora partindo do receptor (Figura (b)). Como os raios da fonte e do receptor descrevem um mesmo evento, a soma dos seus tempos de trânsito únicos não deve ultrapassar o valor do tempo de trânsito total. Desta forma, à medida em que avançamos o raio do receptor (linha vermelha contínua), regredimos o raio da fonte (linha vermelha pontilhada), conforme mostram os itens (c) a (f). O avanço do raio do receptor continua até que a distância entre os raios comece a aumentar ou até que a soma dos tempos de trânsito únicos seja superior ao tempo total. Neste exemplo, a distância mínima entre os raios é alcançada na Figura do item (f). As coordenadas do raio da fonte e as do raio do receptor, naquele instante, serão utilizadas para o cálculo dos parâmetros iniciais dos raios.	
29	
Figura 3.1 (a) Modelo Marmousi e (b) sua versão suavizada.	35
Figura 3.2 Tabela dos ajustes obtidos quando todos os pesos tiveram valores iguais, variando de 1 a 0,005. O retângulo azul identifica a ponderação que obteve o menor resíduo dos dados. O retângulo vermelho destaca os desvios padrão que estão dentro da faixa considerada aceitável. As células amarelas correspondem aos menores valores de desvio padrão de cada propriedade.	41
Figura 3.3 Modelos de velocidade gerados quando todos os pesos foram iguais a 1 (a), a 0,2	

(b) e a 0,05 (c)	42
Figura 3.4 Modelos dos pontos espalhadores gerados quando todos os pesos foram iguais a 1 (a), a 0,2 (b) e a 0,05 (c)	43
Figura 3.5 Tabela dos ajustes obtidos quando variamos o peso da posição, de 1 a 0,005. O retângulo azul identifica a ponderação que obteve o menor resíduo dos dados. O retângulo vermelho destaca os desvios padrão que estão dentro da faixa considerada aceitável. As células amarelas correspondem aos menores valores de desvio padrão de cada propriedade.	45
Figura 3.6 Modelos de velocidade gerados quando o peso da posição foi igual a 1 (a), a 0,09 (b) e a 0,005 (c)	46
Figura 3.7 Modelos dos pontos espalhadores gerados quando o peso da posição foi igual a 1 (a), a 0,09 (b) e a 0,005 (c)	47
Figura 3.8 Tabela dos ajustes obtidos quando variamos o peso da vagarosidade, de 1 a 0,005. O retângulo azul identifica a ponderação que obteve o menor resíduo dos dados. O retângulo vermelho destaca os desvios padrão que estão dentro da faixa considerada aceitável. As células amarelas correspondem aos menores valores de desvio padrão de cada propriedade.	49
Figura 3.9 Modelos de velocidade gerados quando o peso da vagarosidade foi igual a 1 (a), a 0,1 (b) e a 0,009 (c)	50
Figura 3.10 Modelos dos pontos espalhadores gerados quando o peso da vagarosidade foi igual a 1 (a), a 0,1 (b) e a 0,009 (c)	51
Figura 3.11 Tabela dos ajustes obtidos quando variamos o peso do tempo de trânsito, de 1 a 0,005. O retângulo azul identifica a ponderação que obteve o menor resíduo dos dados. O retângulo vermelho destaca os desvios padrão que estão dentro da faixa considerada aceitável. As células amarelas correspondem aos menores valores de desvio padrão de cada propriedade.	53
Figura 3.12 Modelos de velocidade gerados quando o peso do tempo de trânsito foi igual a 0,5 (a), a 0,03 (b) e a 0,005 (c)	54
Figura 3.13 Modelos dos pontos espalhadores gerados quando o peso do tempo de trânsito foi igual a 0,5 (a), a 0,03 (b) e a 0,005 (c)	55
Figura 3.14 (a) Modelo de velocidade gerado com a ponderação: 0,09 (posição), 0,1 (vagarosidade) e 0,03 (tempo de trânsito). (b) Modelo de velocidade gerado com a ponderação:	

0,005 (posição), 0,009 (vagarosidade) e 0,005 (tempo de trânsito)	57
Figura 3.15 (a) Modelo dos pontos espalhadores gerado com a ponderação: 0,09 (posição), 0,1 (vagarosidade) e 0,03 (tempo de trânsito). (b) Modelo dos pontos espalhadores gerado com a ponderação: 0,005 (posição), 0,009 (vagarosidade) e 0,005 (tempo de trânsito) ..	58
Figura 3.16 (a) Modelo inicial de velocidade com gradiente fraco. (b) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado com a construção de um modelo homogêneo. (c) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado através da técnica de traçamento de raios	61
Figura 3.17 Modelos de velocidade obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).	62
Figura 3.18 Modelos dos pontos espalhadores obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).	63
Figura 3.19 (a) Modelo inicial de velocidade com gradiente intermediário. (b) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado com a construção de um modelo homogêneo. (c) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado através da técnica de traçamento de raios	65
Figura 3.20 Modelos de velocidade obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).	66
Figura 3.21 Modelos dos pontos espalhadores obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).	67
Figura 3.22 (a) Modelo inicial de velocidade com gradiente forte. (b) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado com a construção de um modelo homogêneo. (c) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado através da técnica de traçamento de raios	69
Figura 3.23 Modelos de velocidade obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).	70
Figura 3.24 Modelos dos pontos espalhadores obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).	71
Figura 3.25 Tabela com os ajustes encontrados nas seções 3.3.2.1, 3.3.2.2 e 3.3.2.3	72
Figura 3.26 (a) Modelo inicial de velocidade com suavização forte. (b) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado com a construção de um modelo homogêneo. (c) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado através da técnica de traçamento de raios	74
Figura 3.27 Modelos de velocidade obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).	75

Figura 3.28 Modelos dos pontos espalhadores obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).	76
Figura 3.29 (a) Modelo inicial de velocidade com suavização média. (b) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado com a construção de um modelo homogêneo. (c) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado através da técnica de traçamento de raios	78
Figura 3.30 Modelos de velocidade obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).	79
Figura 3.31 Modelos dos pontos espalhadores obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).	80
Figura 3.32 Tabela com os ajustes encontrados nas seções 3.3.3.1 e 3.3.3.2	81

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	17
2.1	PROBLEMA INVERSO	18
2.2	CONSTRUÇÃO DO MODELO	19
2.3	TRAÇAMENTO DE RAIO	20
2.3.1	Equações do Raio	20
2.3.2	Raios Paraxiais	22
2.3.3	Condições iniciais	23
2.3.3.1	Perturbação na direção da vagarosidade	23
2.3.3.2	Perturbação no ponto espalhador	24
2.3.3.3	Perturbação nos parâmetros elásticos	25
2.4	MODELO INICIAL	25
2.5	MÉTODO DOS PROPAGADORES	29
2.6	REGULARIZAÇÃO	31
3	TESTES NUMÉRICOS	34
3.1	MARMOUSI	34
3.2	ALGORITMO DE INVERSÃO	35
3.2.1	Dados de entrada	36
3.2.2	Desenvolvimento	36
3.2.3	Dados de saída	37
3.3	AVALIAÇÃO	37
3.3.1	Ponderação dos Dados	39

3.3.1.1	Pesos iguais	39
3.3.1.2	Peso da posição	44
3.3.1.3	Peso da vagarosidade	48
3.3.1.4	Peso do tempo de trânsito	52
3.3.1.5	Escolha da ponderação	56
3.3.2	Modelo com gradiente	59
3.3.2.1	Gradiente suave	59
3.3.2.2	Gradiente intermediário	64
3.3.2.3	Gradiente forte	68
3.3.2.4	Análise dos resultados	72
3.3.3	Modelo convertido em profundidade	72
3.3.3.1	Suavização forte	73
3.3.3.2	Suavização média	77
3.3.3.3	Análise dos resultados	81
4	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

Os produtores mundiais de petróleo reconhecem que, em se tratando de explorar e explorar novas fontes de hidrocarbonetos, os dias de “petróleo fácil” são coisas do passado. As novas fronteiras para exploração, assim como as maiores esperanças de possíveis grandes descobertas, correspondem hoje a ambientes a quilômetros de distância abaixo do assoalho oceânico e com grande complexidade geológica, como é o caso do “Pré-sal” no Brasil. Estas condições extremas aumentam a dificuldade de imageamento dos reservatórios, exigindo, cada vez mais, o aperfeiçoamento das técnicas usadas no processamento dos dados sísmicos.

Reservatórios de hidrocarbonetos associados a estruturas geológicas complexas, como domos de sal, apresentam forte variação lateral de velocidade. Para o correto imageamento de tais alvos, a migração em tempo, a qual pressupõe pequena variação lateral de velocidade (na escala do lançamento sísmico), não é válida em todas as áreas do levantamento (YILMAZ, 2001). Faz-se necessária, então, a aplicação de técnicas de migração em profundidade. Para o sucesso deste processo de imageamento, isto é, para que o seu resultado seja uma boa aproximação/representação das estruturas contidas na subsuperfície, a estimativa de um modelo de velocidade em profundidade, chamado de macromodelo, é uma etapa crítica. Entre os vários métodos que visam à obtenção de tal modelo, estão os chamados métodos tomográficos, baseados na inversão de atributos cinemáticos de eventos de reflexão sísmica (COSTA et al., 2008): tempo de trânsito, inclinação ou curvatura. Um método tomográfico bastante robusto, a ser discutido neste trabalho, é a estereotomografia.

A estereotomografia baseia-se no conceito de que eventos localmente coerentes fornecem informações sobre os macromodelos de velocidade. Diferentemente da tomografia tradicional, os dados de entrada para estereotomografia incluem, além do tempo de trânsito, os seguintes atributos cinemáticos de eventos de reflexão ou difração: a posição da fonte e do receptor e as componentes horizontais da vagarosidade do evento, nas seções de tiro comum e receptor comum. O modelo estimado também difere da tomografia tradicional, a qual estima unicamente um modelo de velocidade. A estereotomografia estima, adicionalmente, um par de segmentos de raios que se originam em um mesmo ponto em profundidade. Consequentemente, os parâmetros do modelo a serem estimados incluem os parâmetros dos raios: coordenadas do ponto inicial em comum, ângulos de emergência e tempos de trânsito únicos, associados aos segmentos de raio conectando o ponto espalhador à fonte e ao receptor.

Como todo método de inversão, a estereotomografia objetiva encontrar os parâmetros do modelo que melhor ajustam os dados (eventos) observados. O problema matemático associado é não linear, e a solução discutida neste trabalho utiliza iterações lineares. A convergência do algoritmo depende fortemente do modelo inicial. O modelo de velocidade inicial deve ser fornecido pelo usuário. Os parâmetros dos raios, associados a cada evento, precisam ser estimados a partir dos dados de entrada e do modelo inicial. Na implementação original da estereotomografia, o cálculo dos parâmetros iniciais é feito em um modelo de velocidade homogêneo. Neste caso, os raios são segmentos de retas e podem ser estimados diretamente.

Neste trabalho, o código de estereotomografia disponível foi estendido através de uma nova estratégia de obtenção dos parâmetros iniciais dos raios, a qual efetua o traçamento de raios em um modelo de velocidade inicial arbitrário. Utilizando este novo código, foi avaliada a influência do modelo inicial na estereotomografia. Para modelos iniciais de velocidade resultantes da conversão tempo-profundidade, a nova estratégia superou a técnica original, ao produzir melhores ajustes nos dados e melhor posicionamento dos eventos quando comparado ao modelo correto. Adicionalmente, avaliou-se a influência da ponderação dos dados e das equações de regularização para a convergência do algoritmo. Como os parâmetros que definem o modelo não são homogêneos, a ponderação dos dados é indispensável para que se obtenha ajustes satisfatórios.

Este trabalho está dividido em quatro capítulos. No Capítulo 2, são apresentados os fundamentos teóricos da estereotomografia: seus dados, parâmetros, e a relação entre os dois. Também serão discutidos temas como: a formulação do problema inverso, a construção do modelo de velocidade, o traçamento de raios e a regularização do sistema a ser resolvido.

O capítulo 3 é reservado a questões práticas da implementação da estereotomografia e aos testes numéricos, feitos com o objetivo de demonstrar a influência da ponderação dos dados e do modelo inicial, no resultado da inversão.

A conclusão do trabalho é feita no capítulo 4 e apresenta a síntese dos resultados obtidos no capítulo 3, as inferências feitas a partir dos mesmos, além de uma breve discussão sobre as limitações e dificuldades encontradas ao longo do trabalho.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A estereotomografia (BILLETTE et al., 2003) foi inicialmente proposta como um método tomográfico robusto, para estimar macro-modelos de velocidade a partir de dados sísmicos de reflexão. Uma das grandes diferenças entre a tomografia convencional e a estereotomografia é a maneira como os dados são selecionados. Na estereotomografia, a seleção de dados (*picking*) é feita pela técnica CDR (*Controlled Directional Reception*), a qual realiza o *picking* do tempo de trânsito e das componentes da vagarosidade, nas seções de fonte e receptor comum, em eventos localmente coerentes, associando-os a eventos de difração ou reflexão ocorridos em qualquer lugar em subsuperfície. Nesse sentido, a estereotomografia supera as dificuldades associadas à seleção de dados, altamente interpretativa, usada pelas técnicas tomográficas convencionais.

A estereotomografia também difere das técnicas tradicionais por incluir, nos dados para inversão, as componentes horizontais da vagarosidade. Portanto, o espaço de dados é composto pelos seguintes parâmetros: posições da fonte e do receptor ($\mathbf{x}_f$ e $\mathbf{x}_r$), tempo de trânsito total (T_{fr}) e componentes horizontais da vagarosidade nas seções de fonte e de receptor comum (s_f e s_r). O vetor de dados será representado da seguinte forma:

$$\mathbf{d} = [(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_r, s_f, s_r, T_{fr})_n] (n = 1, 2, \dots, N), \quad (2.1)$$

em que n é o número de eventos selecionados.

Cada evento, por sua vez, é caracterizado por um par de segmentos de raio que terminam no mesmo ponto em profundidade, chamado de ponto difrator ou espalhador. Consequentemente, os parâmetros do modelo a serem estimados incluem, além do modelo de velocidade ($\mathbf{p}$), os parâmetros dos raios: coordenadas dos pontos espalhadores, $\mathbf{X}$, ângulos de emergência, θ_f e θ_r , e tempos de trânsito únicos, τ_f e τ_r , associados aos segmentos de raio conectando o ponto espalhador à fonte e ao receptor, respectivamente. O vetor com os parâmetros do modelo fica definido como:

$$\mathbf{m} = [\mathbf{p}, (\mathbf{X}, \theta_f, \theta_r, \tau_f, \tau_r)_n] (n = 1, 2, \dots, N). \quad (2.2)$$

Como em todo problema inverso, o objetivo é encontrar o vetor dos parâmetros $\mathbf{m}$ que

melhor ajuste os dados medidos, $\mathbf{d}$. Devido à não linearidade do problema, sua resolução se dá de maneira iterativa, com o auxílio da teoria da perturbação. De acordo com esta teoria, estima-se um vetor de parâmetros iniciais, perturbando-o, em seguida, com o intuito de diminuir a diferença entre os dados observados, $\mathbf{d}$, e os dados descritos pelos parâmetros do modelo, denominados de dados calculados, $\mathbf{d}^c$.

O objetivo deste capítulo é explicar as bases teóricas relacionadas à estereotomografia. Portanto, serão abordados os temas: problema inverso; construção do modelo; traçamento de raios; e regularização.

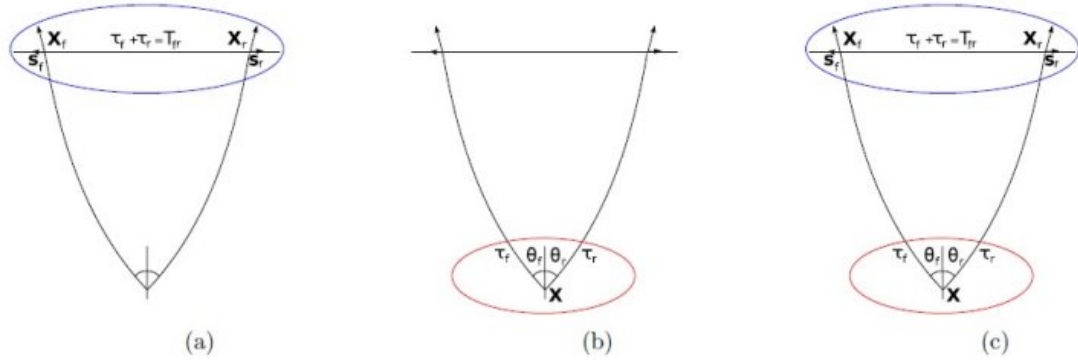


Figura 2.1: Representação do espaço de dados e de parâmetros na estereotomografia. A Figura (a) mostra os dados, a (b) mostra os parâmetros do modelo, e a (c) mostra a relação entre (a) e (b)

2.1 PROBLEMA INVERSO

O problema inverso é definido como a estimativa dos parâmetros do modelo a partir dos dados observados. Na estereotomografia, pode-se definir a relação entre os parâmetros do modelo, $\mathbf{m}$, e os dados observados, $\mathbf{d}$, como:

$$\mathbf{F}(\mathbf{m}) = \mathbf{d}, \quad (2.3)$$

em que $\mathbf{F}$ é o operador que contém a física da propagação de onda. A relação (2.3) é não-linear, e a resolução do problema, então, é feita de maneira iterativa. A fim de solucionar o problema inverso usando iterações lineares, um modelo inicial de referência, $\mathbf{m}_0$, deve ser fornecido. Neste modelo de referência, o traçamento de raio será aplicado para obtenção dos dados sintéticos ou calculados, $\mathbf{d}^c$. A diferença entre os dados observados e os calculados, $\mathbf{d} - \mathbf{d}^c$, define o desvio $\delta\mathbf{d}$ (COSTA et al., 2008). A partir dele, é possível verificar se o modelo de referência é uma boa aproximação para explicar os dados observados. Também é possível

calcular a perturbação a ser somada ao modelo de referência, para se obter melhores ajustes.

Na k -ésima iteração, o desvio $\delta \mathbf{d}_k$ é modelado, em aproximação linear, como:

$$\delta \mathbf{d}_k = D\mathbf{F}(\mathbf{m}_k)\delta \mathbf{m}_k, \quad (2.4)$$

em que $D\mathbf{F}$ corresponde à aproximação para o problema direto em torno do modelo $\mathbf{m}_k$. O operador $D\mathbf{F}$ é conhecido como derivada de Fréchet (MENKE, 1989) e consiste em uma matriz com a diferenciação dos dados em relação aos parâmetros.

A solução do sistema linear 2.4 determina um novo modelo de referência:

$$\mathbf{m}_{k+1} = \mathbf{m}_k + \delta \mathbf{m}_k. \quad (2.5)$$

O processo continua iterativamente até que a norma do desvio, $\|\delta \mathbf{d}_k\|$, seja menor do que um valor pré-estabelecido de tolerância ou até que um número máximo de iterações seja atingido. Neste trabalho, foi usada a norma L_2 .

2.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO

De posse de um modelo referência inicial $\mathbf{m}_0$, constituído de um modelo inicial de velocidade e um modelo inicial com os parâmetros dos raios, o problema inverso da estereotomografia pode ser resolvido, através da utilização da teoria da perturbação. Na prática, dois raios são propagados para cima, no modelo de velocidade inicial (a priori), a partir de um ponto inicial em comum, em profundidade ($\mathbf{X}$). A partir deste ponto, um dos raios é traçado em direção à fonte, com ângulo θ_f inicial, até um tempo de trânsito único, τ_f . O outro raio é traçado em direção ao receptor, com ângulo igual a θ_r , até um tempo τ_r . Os pontos finais dos raios correspondem às posições calculadas para a fonte e para o receptor, $\mathbf{x}_f^c$ e $\mathbf{x}_r^c$. As componentes horizontais dos parâmetros dos raios, nos pontos finais, fornecem as componentes horizontais de vagarosidade calculadas, s_f^c e s_r^c . O tempo de trânsito calculado para o evento, T_{fr}^c , é obtido, diretamente, pela soma dos tempos de trânsito únicos. Se o modelo inicial não estiver correto, as posições $\mathbf{x}_f^c$ e $\mathbf{x}_r^c$, as componentes de vagarosidade s_f^c e s_r^c , e o tempo de trânsito calculados não irão se ajustar aos dados selecionados (*picks*). Nesse caso, os desvios serão interpretados, simultaneamente, em termos de erros no modelo de velocidade ou nos parâmetros dos raios. O modelo inicial será, então, perturbado, com o objetivo de produzir dados sintéticos que se ajustam aos dados observados.

O modelo de velocidade, utilizado neste trabalho, foi construído com o quadrado da

velocidade do meio e é representado por um produto tensorial B-Splines de terceira ordem, como descrito a seguir:

$$p(x_1, x_3) = \sum_{k=1}^{N_1} \sum_{l=1}^{N_3} p^{kl} B_k(x_1) B_l(x_3), \quad (2.6)$$

em que $B_k(x_j)$ são as funções base do interpolador ao longo de x_j , N_j indica o número de nós B-splines na direção j e p^{kl} são os coeficientes de interpolação. Nas iterações, os valores dos coeficientes p^{kl} são atualizados, com o objetivo de encontrar os coeficientes que melhor ajustam os dados. Essa forma de construção do modelo de velocidade garante a continuidade, em segunda ordem, do campo de velocidade, além de permitir uma implementação eficiente do traçamento de raio (BILLETTE et al., 2003).

2.3 TRAÇAMENTO DE RAIOS

A construção de um modelo de velocidade, a partir da estereotomografia, baseia-se na teoria da perturbação aplicada a sistemas hamiltonianos (GOLDSTEIN, 1980; FARRA; MADARIAGA, 1987), a qual permite o cálculo de aproximações lineares para as observações, de acordo com as variações dos parâmetros do modelo em torno de um modelo de referência.

A subseção 2.3.1 irá apresentar os fundamentos matemáticos para o traçamento de raios. Já as subseções 2.3.2 e 2.3.3 irão discutir os aspectos envolvidos na teoria dos raios paraxiais, usada para o cálculo das perturbações no modelo.

2.3.1 Equações do Raio

A equação iconal pode ser escrita na forma:

$$\mathcal{H}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = \frac{1}{2} [p(\mathbf{x}) \mathbf{s} \cdot \mathbf{s} - 1] = 0, \quad (2.7)$$

em que $\mathcal{H}$ é denominada de Hamiltoniana, $\mathbf{x}$ é o vetor posição, $\mathbf{s}$ é o vetor vagarosidade e $p(\mathbf{x})$ é o quadrado da velocidade do meio na posição $\mathbf{x}$. Em uma aproximação assintótica, a hamiltoniana descreve o traçamento de raios em meios isotrópicos suavemente não-homogêneos (GOLDSTEIN, 1980; ČERVENÝ, 2001).

Se o valor de tempo de trânsito, τ , é conhecido em alguma fronteira, a hamiltoniana pode ajudar a estender a solução ao longo de trajetórias chamadas de raios. Para uma fonte pontual, por exemplo, localizada na posição $\mathbf{x}_f$ e com $\tau(\mathbf{x}_f) = 0$, qualquer vetor vagarosidade

da forma

$$\mathbf{s} = \frac{\hat{\mathbf{s}}}{\sqrt{p(\mathbf{x}_f)}}, \quad (2.8)$$

em que $\hat{\mathbf{s}}$ indica um vetor unitário, satisfaz a equação $\mathcal{H}(\mathbf{x}_f, \mathbf{s}) = 0$. Para que a solução seja estendida a uma vizinhança da fonte, $\mathbf{x} + d\mathbf{x}$ e $\mathbf{s} + d\mathbf{s}$, deve-se exigir que:

$$d\mathcal{H} = \nabla_{\mathbf{x}}\mathcal{H}.d\mathbf{x} + \nabla_{\mathbf{s}}\mathcal{H}.d\mathbf{s} = 0, \quad (2.9)$$

e que

$$d\tau = \nabla_{\mathbf{x}}\tau.d\mathbf{x} = \mathbf{s}.d\mathbf{x}. \quad (2.10)$$

A solução a partir da fonte pode ainda ser estendida ao longo das curvas $\mathbf{x}(\xi)$ e $\mathbf{s}(\xi)$, em que ξ indica um parâmetro que varia monotonicamente ao longo da trajetória. Neste caso, as equações acima serão reescritas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} d\mathcal{H}(\xi) &= \left[\nabla_{\mathbf{x}}\mathcal{H}.\frac{d\mathbf{x}}{d\xi} + \nabla_{\mathbf{s}}\mathcal{H}.\frac{d\mathbf{s}}{d\xi} \right] d(\xi) = 0, \\ d\tau(\xi) &= \mathbf{s}.\frac{d\mathbf{x}}{d\xi}d\xi. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Na estereotomografia, o parâmetro escolhido para ξ corresponde ao tempo de trânsito, τ . A equação do raio fica, então, definida como:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{x}}{d\tau} &= \nabla_{\mathbf{s}}\mathcal{H} \\ \frac{d\mathbf{s}}{d\tau} &= -\nabla_{\mathbf{x}}\mathcal{H} \end{aligned} \quad (2.12)$$

em que $\nabla_{\mathbf{x}}$ e $\nabla_{\mathbf{s}}$ representam o gradiente em relação aos vetores de posição $\mathbf{x}$ e de vagarosidade $\mathbf{s}$, respectivamente. As equações do sistema 2.12 também são chamadas de equações de Hamilton. O traçamento do raio é realizado a partir da resolução do sistema (2.12), especificadas as condições iniciais ($\mathbf{x}(\tau_0)$ e $\mathbf{s}(\tau_0)$) ou as condições de fronteira ($\mathbf{x}(\tau_1)$ e $\mathbf{s}(\tau_1)$) para cada raio. Neste trabalho, o raio é calculado numericamente pelo método Runge-Kutta.

2.3.2 Raios Paraxiais

A uma das grandes aplicações da Teoria da Perturbação é o traçamento de raios paraxiais. Eles propagam-se na vizinhança de um raio de referência, diferenciando-se do raio central por pequenas perturbações na posição e na vagarosidade (FARRA; MADARIAGA, 1987).

No programa da estereotomografia, os raios são traçados em um meio de referência $\mathbf{p}$, de acordo com a Hamiltoniana $\mathcal{H}(\mathbf{x}, \mathbf{s}; \mathbf{p}) = 0$. Em seguida, são calculados os raios paraxiais com nova forma da Hamiltoniana $\mathcal{H}'(\mathbf{x}', \mathbf{s}'; \mathbf{p} + \Delta\mathbf{p}) = 0$, em que os valores $\mathbf{x}'$ e $\mathbf{s}'$ representam os raios vizinhos ao raio central, no modelo com perturbação $\Delta\mathbf{p}$. Os raios paraxiais são descritos na forma:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}'(\tau) &= \mathbf{x}(\tau) + \Delta\mathbf{x}(\tau), \\ \mathbf{s}'(\tau) &= \mathbf{s}(\tau) + \Delta\mathbf{s}(\tau)\end{aligned}\tag{2.13}$$

As equações de Hamilton para a trajetória do raio, no meio de parâmetros elásticos $\mathbf{p} + \Delta\mathbf{p}$, são:

$$\begin{aligned}\frac{d\mathbf{x}'}{d\tau} &= \nabla_{\mathbf{s}'}\mathcal{H}', \\ \frac{d\mathbf{s}'}{d\tau} &= -\nabla_{\mathbf{x}'}\mathcal{H}'\end{aligned}\tag{2.14}$$

Ao expandir a Hamiltoniana $\mathcal{H}'$ em torno da trajetória no meio de referência, tem-se:

$$\begin{aligned}\mathcal{H}'(\mathbf{x}', \mathbf{s}'; \mathbf{p} + \Delta\mathbf{p}) &= \mathcal{H}(\mathbf{x}, \mathbf{s}; \mathbf{p}) + \\ &+ \nabla_{\mathbf{x}}^T\mathcal{H}\Delta\mathbf{x} + \nabla_{\mathbf{s}}^T\mathcal{H}\Delta\mathbf{s} + \nabla_{\mathbf{p}}^T\mathcal{H}\Delta\mathbf{p} + \\ &+ \frac{1}{2}[\Delta\mathbf{x}^T\nabla_{\mathbf{x}}\nabla_{\mathbf{x}}^T\mathcal{H}\Delta\mathbf{x} + 2\Delta\mathbf{x}^T\nabla_{\mathbf{x}}\nabla_{\mathbf{s}}^T\mathcal{H}\Delta\mathbf{s} + \Delta\mathbf{s}^T\nabla_{\mathbf{s}}\nabla_{\mathbf{s}}^T\mathcal{H}\Delta\mathbf{s} + \\ &+ \Delta\mathbf{x}^T\nabla_{\mathbf{x}}\nabla_{\mathbf{p}}^T\mathcal{H}\Delta\mathbf{p} + \Delta\mathbf{s}^T\nabla_{\mathbf{s}}\nabla_{\mathbf{p}}^T\mathcal{H}\Delta\mathbf{p}] + \mathcal{O}(\Delta^3).\end{aligned}\tag{2.15}$$

Avaliando as equações de Hamilton para os raios paraxiais, apenas nos termos de aproximação de primeira ordem, obtém-se:

$$\begin{aligned}
\frac{d\mathbf{x}'}{d\tau} &= \nabla_{\mathbf{s}}\mathcal{H} + \nabla_{\mathbf{s}}\nabla_{\mathbf{x}}^T\mathcal{H}\Delta\mathbf{x} + \nabla_{\mathbf{s}}\nabla_{\mathbf{s}}^T\mathcal{H}\Delta\mathbf{s} + \nabla_{\mathbf{s}}\nabla_{\mathbf{p}}^T\mathcal{H}\Delta\mathbf{p} + \mathcal{O}(\Delta^2), \\
\frac{d\mathbf{s}'}{d\tau} &= -\nabla_{\mathbf{x}}\mathcal{H} - \nabla_{\mathbf{x}}\nabla_{\mathbf{x}}^T\mathcal{H}\Delta\mathbf{x} - \nabla_{\mathbf{x}}\nabla_{\mathbf{s}}^T\mathcal{H}\Delta\mathbf{s} - \nabla_{\mathbf{x}}\nabla_{\mathbf{p}}^T\mathcal{H}\Delta\mathbf{p} - \mathcal{O}(\Delta^2).
\end{aligned} \tag{2.16}$$

A partir das equações 2.12, considerando apenas as perturbações em primeira ordem, indicadas por $\delta\mathbf{x}$, $\delta\mathbf{s}$ e $\delta\mathbf{p}$, obtém-se o sistema de equações dos raios paraxiais:

$$\frac{d}{d\tau} \begin{bmatrix} \delta\mathbf{x} \\ \delta\mathbf{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla_{\mathbf{s}}\nabla_{\mathbf{x}}^T\mathcal{H} & \nabla_{\mathbf{s}}\nabla_{\mathbf{s}}^T\mathcal{H} \\ -\nabla_{\mathbf{x}}\nabla_{\mathbf{x}}^T\mathcal{H} & -\nabla_{\mathbf{x}}\nabla_{\mathbf{s}}^T\mathcal{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\mathbf{x} \\ \delta\mathbf{s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nabla_{\mathbf{s}}\nabla_{\mathbf{p}}^T\mathcal{H}\delta\mathbf{p} \\ -\nabla_{\mathbf{x}}(\nabla_{\mathbf{p}}^T\mathcal{H}\delta\mathbf{p}) \end{bmatrix}. \tag{2.17}$$

A obtenção de aproximações lineares para a estereotomografia, em meios isotrópicos, pode ser feita através das soluções dos sistemas 2.12 e 2.17.

2.3.3 Condições iniciais

Para integrar o sistema de equações diferenciais 2.17, é necessário o estabelecimento de condições iniciais para $\delta\mathbf{x}$ e para $\delta\mathbf{s}$. A fim de se determinar as condições iniciais em um instante τ_0 , deve-se exigir que a perturbação em primeira ordem da hamiltoniana seja nula. Tal exigência garante que os raios paraxiais satisfaçam as equações de Hamilton. A integração de 2.17 é feita para cada condição inicial associada à perturbação de cada parâmetro. As condições iniciais podem ser reduzidas em três casos, como descrito a seguir.

2.3.3.1 Perturbação na direção da vagarosidade

A perturbação na direção da vagarosidade, $\delta\theta$, não implica em deslocamento do ponto espalhador, $\delta\mathbf{x}$. Neste caso, a condição para $d\mathcal{H} = 0$, para hamiltonianas arbitrárias, é igual a:

$$\nabla_{\mathbf{s}}^T\mathcal{H}\delta\mathbf{s} = 0. \tag{2.18}$$

Considerando $\mathbf{s} = s\mathbf{n}$, em que $\mathbf{n}$ é o vetor unitário na direção da vagarosidade, pode-se escrever:

$$\delta \mathbf{s} = \left(\frac{ds}{d\theta} \mathbf{n} + s \frac{d\mathbf{n}}{d\theta} \right) \delta \theta. \quad (2.19)$$

Substituindo a equação 2.19 em 2.18, obtém-se:

$$\delta \mathbf{s} = s \left(\mathbf{I} - \frac{\mathbf{n} \nabla_{\mathbf{s}}^T \mathcal{H}}{\nabla_{\mathbf{s}}^T \mathcal{H} \mathbf{n}} \right) \frac{d\mathbf{n}}{d\theta} \delta \theta \quad (2.20)$$

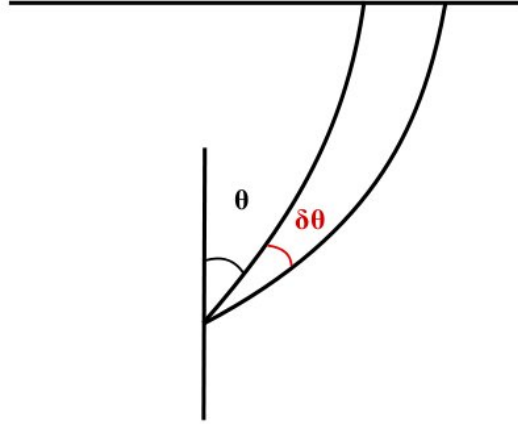


Figura 2.2: Perturbação na direção da vagarosidade

2.3.3.2 Perturbação no ponto espalhador

Considerando perturbações apenas no ponto espalhador, para que $d\mathcal{H} = 0$, a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$\nabla_{\mathbf{x}}^T \mathcal{H} \delta \mathbf{x} + \nabla_{\mathbf{s}}^T \mathcal{H} \delta \mathbf{s} = 0. \quad (2.21)$$

Este caso restringe a perturbação no vetor vagarosidade apenas ao longo do raio. Tem-se, então, que:

$$\begin{aligned} \nabla_{\mathbf{s}}^T \mathcal{H} \delta \mathbf{s} &= -\nabla_{\mathbf{x}}^T \mathcal{H} \delta \mathbf{x} \\ \delta \mathbf{s} &= -\hat{\nu} \frac{\nabla_{\mathbf{x}}^T \mathcal{H}}{\|\delta \mathbf{s}\|}, \end{aligned} \quad (2.22)$$

em que $\hat{\nu}$ é o vetor unitário ao longo do raio,

$$\hat{\nu} = \frac{\nabla_{\mathbf{s}} \mathcal{H}}{\|\delta \mathbf{s}\|}. \quad (2.23)$$

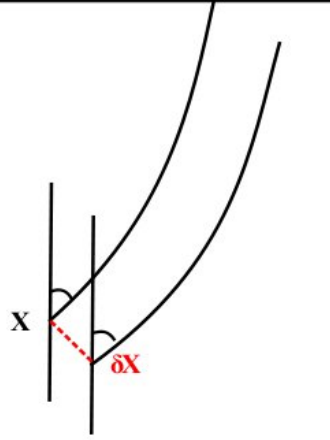


Figura 2.3: Perturbação na posição do ponto espalhador

2.3.3.3 Perturbação nos parâmetros elásticos

Com a perturbação nos parâmetros elásticos $\mathbf{p}(\mathbf{x}) + \delta \mathbf{p}$ e a condição $d\mathcal{H}$ exige-se que:

$$\nabla_{\mathbf{s}}^T \mathcal{H} \delta \mathbf{s} + \nabla_{\mathbf{p}}^T \mathcal{H} \delta \mathbf{p} = 0. \quad (2.24)$$

A equação acima vincula a perturbação da vagarosidade ao longo do raio à perturbação dos parâmetros do meio. Neste caso, temos que:

$$\delta \mathbf{s} = -\hat{\nu} \frac{\nabla_{\mathbf{p}}^T \mathcal{H} \delta \mathbf{p}}{\|\nabla_{\mathbf{s}}^T \mathcal{H}\|}, \quad (2.25)$$

em que $\hat{\nu}$ está definido em 2.23.

Com as condições iniciais mostradas acima, o sistema dos raios paraxiais 2.17 pode ser integrado ao longo de um raio no meio de referência, e as derivadas de Fréchet, em relação às perturbações no ângulo inicial do raio, na posição inicial do ponto espalhador e nos parâmetros elásticos, podem ser avaliadas numericamente.

2.4 MODELO INICIAL

Para que as condições iniciais da seção 2.3.3 sejam calculadas, necessita-se de um modelo inicial de velocidade e de parâmetros iniciais dos raios, que caracterizem os pontos espa-

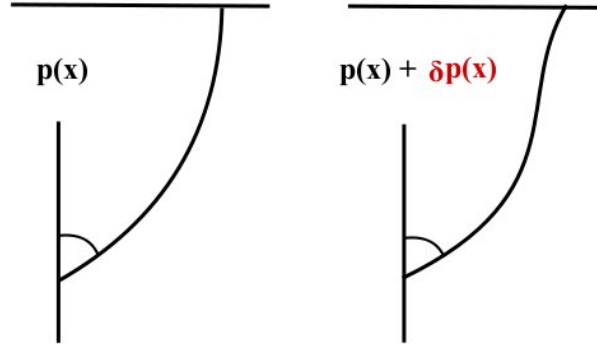


Figura 2.4: Perturbação nos parâmetros do modelo

lhadores iniciais. Na implementação original da estereotomografia, o modelo de velocidade inicial deve, sempre, ser fornecido pelo usuário, enquanto que os parâmetros iniciais dos raios são calculados pelo programa, através da criação de um modelo de velocidade homogêneo. Neste trabalho, o código de estereotomografia foi estendido, através da criação de uma nova estratégia de obtenção dos parâmetros iniciais dos raios, a qual efetua o traçamento de raios no próprio modelo inicial de velocidade. As duas estratégias estão descritas a seguir.

A estereotomografia caracteriza um evento (descrito pelas posições da fonte e do receptor, pelo tempo de trânsito total e pelas componentes horizontais da vagarosidade nas famílias fonte e receptor comum) por um par de segmentos de raios que terminam no mesmo ponto em profundidade. A opção de se obter parâmetros iniciais dos raios (também serão chamados de parâmetros dos pontos espalhadores) através da criação de um modelo de velocidade homogêneo, baseia-se no fato de que, neste meio, os raios são retos (Figura 2.5). Desta forma, de posse do valor de velocidade, o programa considera a coordenada x , do ponto espalhador, como a metade do *offset* e calcula a profundidade z , assim como os outros parâmetros dos raios, por simples trigonometria. A velocidade do modelo homogêneo depende de dois cálculos: um envolvendo o modelo de velocidade inicial e outro envolvendo os dados dos eventos, **d**. O primeiro cálculo consiste em achar a raiz quadrada da média dos quadrados das velocidades do modelo inicial, v_{ref} , como descrito a seguir:

$$vel_m = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N v_{ref}^2}{N}}. \quad (2.26)$$

O segundo cálculo é baseado no estudo de Billete et al. (2003), o qual demonstra que, para cada dado selecionado (*pick*), é possível encontrar um modelo homogêneo, com velocidade v_h , e as coordenadas do ponto espalhador que melhor ajustam os dados. No programa utilizado, a relação entre v_h e os dados selecionados é dada através da seguinte equação:

$$v_h = \left(\frac{4h}{T_{fr}} \right) \left(\frac{T_{fr} - h(s_r - s_f)}{T_{fr}(s_r - s_f) + 4hs_f s_r} \right), \quad (2.27)$$

em que $2h = (x_r - x_f)$, T_{fr} é o tempo de trânsito total, s_f é a componente de vagarosidade horizontal da fonte e s_r é a componente de vagarosidade horizontal do receptor (FOMEL, 2007). Depois de se obter a velocidade de cada evento, calcula-se a raiz quadrada da média dos quadrados das velocidades:

$$vel_d = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N v_h^2}{N}}. \quad (2.28)$$

O menor valor entre vel_m e vel_d corresponderá ao valor da velocidade no modelo homogêneo.

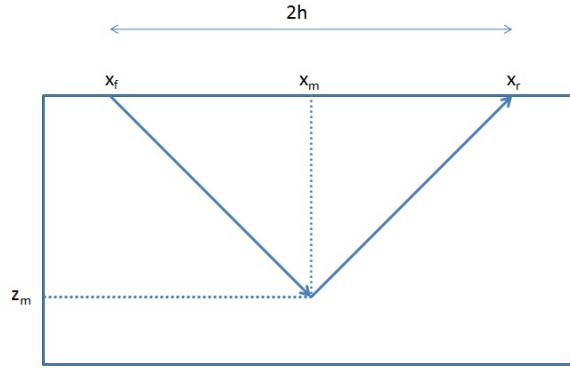


Figura 2.5: Raios em meio homogêneo

Uma das contribuições desse trabalho, para o programa de estereotomografia, foi o desenvolvimento de uma segunda estratégia para obtenção dos pontos espalhadores iniciais, utilizando o traçamento de raios. A partir da posição da fonte, inicia-se o traçamento de raio para baixo, no modelo de velocidade inicial, com a direção da vagarosidade na fonte. Considerando um incremento de tempo dt , o raio é traçado até que o número de passos temporais, n_f , multiplicado por dt , seja igual ao tempo de trânsito total do evento, ou até que o raio saia do modelo. Um outro raio, partindo do receptor, é, então, traçado para baixo, com a direção da vagarosidade naquele ponto. Como os raios da fonte e do receptor descrevem um mesmo evento, a soma dos seus tempos de trânsito únicos não deve ultrapassar o valor do tempo de trânsito total. Desta forma, cada passo avançado pelo raio do receptor, corresponde a um passo retrocedido pelo raio da fonte. A distância entre a posição no raio do receptor e a posição do raio da fonte é medida a cada passo. Como um evento é caracterizado por segmentos de raios que se encontram em profundidade, espera-se que, à medida em que avançamos o raio partindo do receptor e "regredimos" o outro raio já traçado, as distâncias

entre eles diminuam. Portanto, o avanço do raio do receptor continua até que a distância medida comece a aumentar, de um passo para o outro, ou até que o tempo total de trânsito seja atingido. Quando um dos critérios de parada for satisfeito, os parâmetros do ponto espalhador são calculados, de acordo com as seguintes equações:

$$x_m = \frac{(x_{if} + x_{ir})}{2}; \quad (2.29)$$

$$z_m = \frac{(z_{if} + z_{ir})}{2}; \quad (2.30)$$

$$\theta_f = \arctan \frac{s_x^{if}}{s_z^{if}}; \quad (2.31)$$

$$\tau_f = dt(i_f); \quad (2.32)$$

$$\theta_r = \arctan \frac{s_x^{ir}}{s_z^{ir}}; \quad (2.33)$$

$$\tau_r = dt(i_r). \quad (2.34)$$

em que x_m e z_m são as coordenadas calculadas para o ponto espalhador; x_{if} e z_{if} são as coordenadas do raio da fonte, no passo i_f ; x_{ir} e z_{ir} são as coordenadas do raio do receptor, no passo i_r ; s_j^f são as componentes j da vagarosidade no raio da fonte; s_j^r são as componentes j da vagarosidade no raio do receptor; e n_f e n_r são os número máximos de passos dados pelos dois raios traçados. O procedimento descrito acima é repetido para todos os eventos (dados observados).

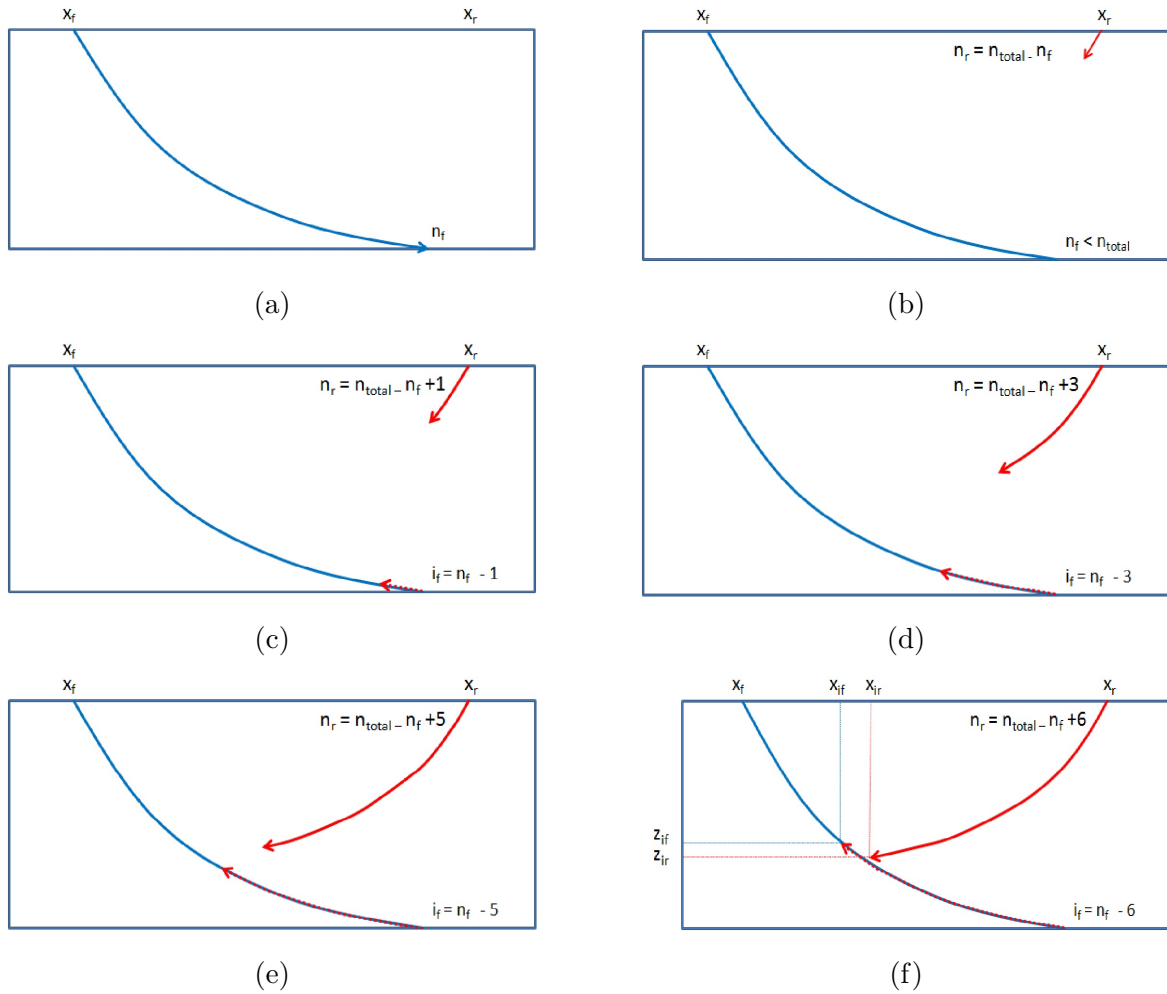


Figura 2.6: Primeiramente, traçamos um raio para baixo, partindo da fonte (item (a)), com a direção da vagarosidade naquele ponto. O raio é traçado até o tempo de trânsito total do evento ou até que o raio saia do modelo, como é o caso neste exemplo. Em seguida, outro raio é traçado para baixo, mas agora partindo do receptor (Figura (b)). Como os raios da fonte e do receptor descrevem um mesmo evento, a soma dos seus tempos de trânsito únicos não deve ultrapassar o valor do tempo de trânsito total. Desta forma, à medida em que avançamos o raio do receptor (linha vermelha contínua), regredimos o raio da fonte (linha vermelha pontilhada), conforme mostram os itens (c) a (f). O avanço do raio do receptor continua até que a distância entre os raios comece a aumentar ou até que a soma dos tempos de trânsito únicos seja superior ao tempo total. Neste exemplo, a distância mínima entre os raios é alcançada na Figura do item (f). As coordenadas do raio da fonte e as do raio do receptor, naquele instante, serão utilizadas para o cálculo dos parâmetros iniciais dos raios.

2.5 MÉTODO DOS PROPAGADORES

A resolução do sistema de equações diferenciais 2.17, a partir das condições iniciais apresentadas na seção 2.3.3, é necessária para o traçamento de raios paraxiais. Para

resolução do sistema, foi utilizado o método dos propagadores (AKI; P., 1980; ČERVENY, 2001).

Pressupondo que a trajetória do raio central é conhecida, ou seja $\mathbf{x}(\tau)$ e $\mathbf{s}(\tau)$ são conhecidos, o sistema 2.17 pode ser escrito na forma:

$$\frac{d\mathbf{y}(\tau)}{d\tau} = \mathbf{A}(\tau)\mathbf{y}(\tau) + \mathbf{f}\tau, \quad (2.35)$$

em que

$$\mathbf{y}(\tau) = \begin{bmatrix} \delta\mathbf{x} \\ \delta\mathbf{s} \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{f}(\tau) = \begin{bmatrix} \nabla_{\mathbf{s}}(\nabla_{\mathbf{p}}^T \mathcal{H} \delta\mathbf{p}) \\ -\nabla_{\mathbf{x}}(\nabla_{\mathbf{p}}^T \mathcal{H} \delta\mathbf{p}) \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

Como o sistema 2.35 é constituído de equações diferenciais ordinárias lineares, o método dos propagadores permite, a partir da condição inicial $\mathbf{y}(\tau_0) = \mathbf{y}_0$, representar a solução de 2.35, no intervalo (τ_0, τ) , na forma:

$$\mathbf{y}(\tau) = \mathbf{P}(\tau, \tau_0)\mathbf{y}_0 + \int_{\tau_0}^{\tau} \mathbf{P}(\tau, \xi)\mathbf{f}(\xi)d\xi. \quad (2.37)$$

A matriz propagadora $\mathbf{P}(\tau, \tau_0)$ satisfaz as equações do sistema 2.35 com a condição inicial

$$\mathbf{P}(\tau_0, \tau_0) = \mathbf{I}, \quad (2.38)$$

em que $\mathbf{I}$ representa a matriz identidade de ordem 4, no caso 2D, e de ordem 6, no caso 3D.

A matriz de propagação possui as seguintes propriedades:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(\tau, \tau_0) &= \mathbf{P}(\tau, \xi)\mathbf{P}(\xi, \tau_0), \\ \mathbf{P}(\tau, \tau_0) &= \mathbf{P}^{-1}(\tau_0, \tau). \end{aligned} \quad (2.39)$$

A partir das equações acima, é possível reescrever a equação 2.37 de uma maneira mais conveniente, como mostrado a seguir:

$$\mathbf{y}(\tau) = \mathbf{P}(\tau, \tau_0)\mathbf{y}_0 + \int_{\tau_0}^{\tau} \mathbf{P}(\tau, \xi)\mathbf{f}(\xi)d\xi;$$

$$\begin{aligned}
&= \mathbf{P}(\tau, \tau_0) \mathbf{y}_0 + \int_{\tau_0}^{\tau} \mathbf{P}(\tau, \tau_0) \mathbf{P}(\tau_0, \xi) \mathbf{f}(\xi) d\xi; \\
&= \mathbf{P}(\tau, \tau_0) \mathbf{y}_0 + \mathbf{P}(\tau, \tau_0) \int_{\tau_0}^{\tau} \mathbf{P}^{-1}(\xi, \tau_0) \mathbf{f}(\xi) d\xi; \\
&= \mathbf{P}(\tau, \tau_0) \left[\mathbf{y}_0 + \int_{\tau_0}^{\tau} \mathbf{P}^{-1}(\xi, \tau_0) \mathbf{f}(\xi) d\xi \right].
\end{aligned} \tag{2.40}$$

A equação 2.40 possibilita encontrar o resultado final dos raios paraxiais, em $\mathbf{y}(\tau)$, com a multiplicação entre a matriz propagadora e o termo em colchetes, o qual depende da condição inicial $\mathbf{y}_0$ e da perturbação da velocidade ao longo do raio central. Esta técnica é bastante útil para sistemas de equações diferenciais resolvidos repetidamente e sujeitos a condições iniciais diferentes. Quando a matriz propagadora $\mathbf{P}(\tau, \tau_0)$ é determinada, a solução para cada conjunto de condições iniciais pode ser encontrada, simplesmente, através de multiplicação de matrizes. Assim, $\mathbf{P}(\tau, \tau_0)$, representa uma transformação das condições iniciais $\mathbf{y}_0$ na solução $\mathbf{y}(\tau)$, em um instante arbitrário τ .

2.6 REGULARIZAÇÃO

Como os dados da estereotomografia são incompletos, informações adicionais, que levem em consideração propriedades desejáveis da solução, devem ser incorporadas ao processo de inversão. A esse processo, chamamos de regularização. As novas condições, acrescentadas à solução, impõem vínculos ao sistema linearizado (2.4), que podem ser de dois tipos: um que atua em todos os parâmetros do modelo, com o objetivo de controlar o módulo da perturbação dos parâmetros $\delta \mathbf{m}$ em cada iteração linear; e um segundo tipo que garante a suavização do modelo de velocidade, através de operadores de diferenciação espacial da velocidade.

O primeiro tipo de vínculo citado objetiva garantir a estabilidade do processo de inversão, já que, ao forçar o sistema 2.4 a utilizar pequenas perturbações em cada iteração linear, permite encontrar um mínimo da função objetivo. O segundo tipo é utilizado para assegurar a suavização da solução e atua diretamente no modelo de velocidade, sendo aplicado no sentido dos mínimos-quadrados em cada nó da malha B-spline (COSTA et al., 2008; BILLETTE et al., 2003). Existem vários tipos de suavização que visam a diversos objetivos: homogeneidade lateral, homogeneidade vertical, curvatura mínima ao longo das coordenadas cartesianas, minimização da curvatura isotrópica do modelo de velocidade e suavização ao longo dos possíveis refletores.

A construção destes vínculos necessita do cálculo das diferenciações parciais, de primeira

e de segunda ordem, do modelo de velocidade em relação às coordenadas espaciais. Essas diferenciações são calculadas na forma:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^n}{\partial x_3^n} p(x_1, x_3) &= \sum_{k=1}^{N_1} \sum_{l=1}^{N_3} p^{kl} \frac{\partial^n B_k(x_1)}{\partial x_1^n} B_l(x_3), \\ \frac{\partial^n}{\partial x_1^n} p(x_1, x_3) &= \sum_{k=1}^{N_1} \sum_{l=1}^{N_3} p^{kl} B_k(x_1) \frac{\partial^n B_l(x_3)}{\partial x_3^n}.\end{aligned}\tag{2.41}$$

Combinando todas as regularizações, obtém-se a função objetivo:

$$\begin{aligned}\Phi(\mathbf{m}; \lambda_i) &= \|\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m})\|_2^2 \\ &+ \lambda_D^2 \|(\mathbf{m} - \mathbf{m}_r)\|_2^2 + \lambda_{Lap}^2 \|(\mathbf{D}_1^2 + \mathbf{D}_3^2)(\mathbf{m} - \mathbf{m}_r)\|_2^2 \\ &+ \lambda_{C1}^2 \|\mathbf{D}_1^2(\mathbf{m} - \mathbf{m}_r)\|_2^2 + \lambda_{C3}^2 \|\mathbf{D}_3^2(\mathbf{m} - \mathbf{m}_r)\|_2^2 \\ &+ \lambda_{G1}^2 \|\mathbf{D}_1(\mathbf{m} - \mathbf{m}_r)\|_2^2 + \lambda_{G3}^2 \|\mathbf{D}_3(\mathbf{m} - \mathbf{m}_r)\|_2^2 \\ &+ \lambda_R^2 \|\mathbf{D}_R(\mathbf{m} - \mathbf{m}_r)\|_2^2,\end{aligned}\tag{2.42}$$

em que o operador $\mathbf{D}_1^{(n)}$ representa a derivada parcial de ordem n em relação à coordenada x , $\mathbf{D}_3^{(n)}$ representa a derivada parcial de ordem n em relação a z , $\mathbf{m}_r$ é um modelo de referência, e os fatores λ_i funcionam como multiplicadores de Lagrange, que ponderam as contribuições das regularizações na função objetivo. O primeiro fator λ_D age em todos os parâmetros, poderando a atualização dos mesmos. Por sua vez, os pesos λ_{Lap} , λ_{C1} , λ_{C3} , λ_{G1} e λ_{G3} determinam, respectivamente, a suavização das curvaturas isotrópicas (suavização do Laplaciano), das curvaturas em relação às direções x e z , e do gradiente em relação a x e z . Finalmente, o fator λ_R determina o grau de suavização da velocidade, ao longo do refletor em potencial.

Em cada iteração, o seguinte sistema linear é resolvido:

$$\begin{bmatrix}
D\mathbf{F}(\mathbf{m}_k) \\
\lambda_D \mathbf{I} \\
\lambda_{Lap}(\mathbf{D}_1^2 + \mathbf{D}_3^2) \\
\lambda_{C1} \mathbf{D}_1^2 \\
\lambda_{C3} \mathbf{D}_3^2 \\
\lambda_{G1} \mathbf{D}_1 \\
\lambda_{G3} \mathbf{D}_3 \\
\lambda_R \mathbf{D}_R
\end{bmatrix} \delta \mathbf{m}_k = \begin{bmatrix}
\delta \mathbf{d}_k \\
-\lambda_D(\mathbf{m}_k - \mathbf{m}_r) \\
-\lambda_{Lap}(\mathbf{D}_1^2 - \mathbf{D}_3^2)(\mathbf{m}_k - \mathbf{m}_r) \\
-\lambda_{C1} \mathbf{D}_1^2(\mathbf{m}_k - \mathbf{m}_r) \\
-\lambda_{C3} \mathbf{D}_3^2(\mathbf{m}_k - \mathbf{m}_r) \\
-\lambda_{G1} \mathbf{D}_1(\mathbf{m}_k - \mathbf{m}_r) \\
-\lambda_{G3} \mathbf{D}_3(\mathbf{m}_k - \mathbf{m}_r) \\
-\lambda_R \mathbf{D}_R(\mathbf{m}_k - \mathbf{m}_r)
\end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Neste trabalho, a solução do sistema 2.43   dada pelo método LSQR (PAIGE; SAUNDERS, 2004).

3 TESTES NUMÉRICOS

Neste capítulo, serão apresentados os aspectos práticos da implementação da estereotomografia, assim como diversos testes feitos em um conjunto de dados sintéticos (modelo Marmousi). Os testes têm como principal objetivo demonstrar a influência da ponderação dos dados e da escolha do modelo inicial, no resultado final da estereotomografia.

3.1 MARMOUSI

O conjunto de dados sintéticos Marmousi foi criado pelo Instituto Francês do Petróleo (*Institut Français du Pétrole*, IFP), com o intuito de ser usado em um workshop, no encontro da Associação Européia de Geofísicos de Exploração (*European Association of Exploration Geophysicists*, EAEG), em Copenhagem, no ano de 1990. O objetivo do workshop era fazer com que seus participantes testassem e comparassem diferentes métodos de estimativa de velocidade. Para que a avaliação das diferentes metodologias fosse possível, decidiu-se criar um conjunto complexo de dados acústicos sintéticos 2D, o conjunto Marmousi.

O modelo Marmousi foi desenvolvido de forma a ser geologicamente plausível (baseado em uma situação real) e complexo, para assegurar a presença de vários refletores, de altos mergulhos e de fortes gradientes (verticais e laterais) de velocidade. Assim, o imageamento correto e a obtenção de um bom modelo de velocidade, para esse grupo de dados, só são possíveis através de técnicas avançadas de processamento sísmico (VERSTEEG, 1994).

Baseada em um perfil da bacia de Cuanza, em Angola, e em sua história geológica, a geometria do modelo Marmousi foi gerada, a partir do *software* Sierra, contendo 160 camadas. As distribuições de velocidade e de densidade foram definidas através de gradientes verticais e horizontais, o que resultou em malhas 2-D, com dimensões de 3 km em profundidade por 9.2 km em afastamento fonte-receptor. As Figuras 3.1(a) e (b) mostram o modelo Marmousi e sua versão suavizada, respectivamente.

A aquisição dos dados foi modelada por um programa que simula uma linha sísmica, ao calcular, sucessivamente, os registros de diferentes fontes. A linha foi realizada de oeste para leste. A primeira e a última posição das fontes são iguais, respectivamente, a 3 e a 8.975 km da ponta oeste do modelo. A distância entre os tiros é de 0.025 km. As fontes, disparadas

ao mesmo tempo, consistem em 6 canhões da água, espaçados de 0.008 km, a 0.008 km de profundidade. Já o cabo com os receptores (*streamer*), a 0.012 km de profundidade, é composto por 96 grupos de hidrofones, cada grupo com 5 hidrofones espaçados de 0.004 km. O traço para cada grupo foi obtido com a soma dos traços dos 5 hidrofones. A distância entre dois grupos consecutivos é de 0.025 km, e os afastamentos fonte-receptor (*offset*) inicial e final são iguais a 0.2 km e a 2.575 km, respectivamente.

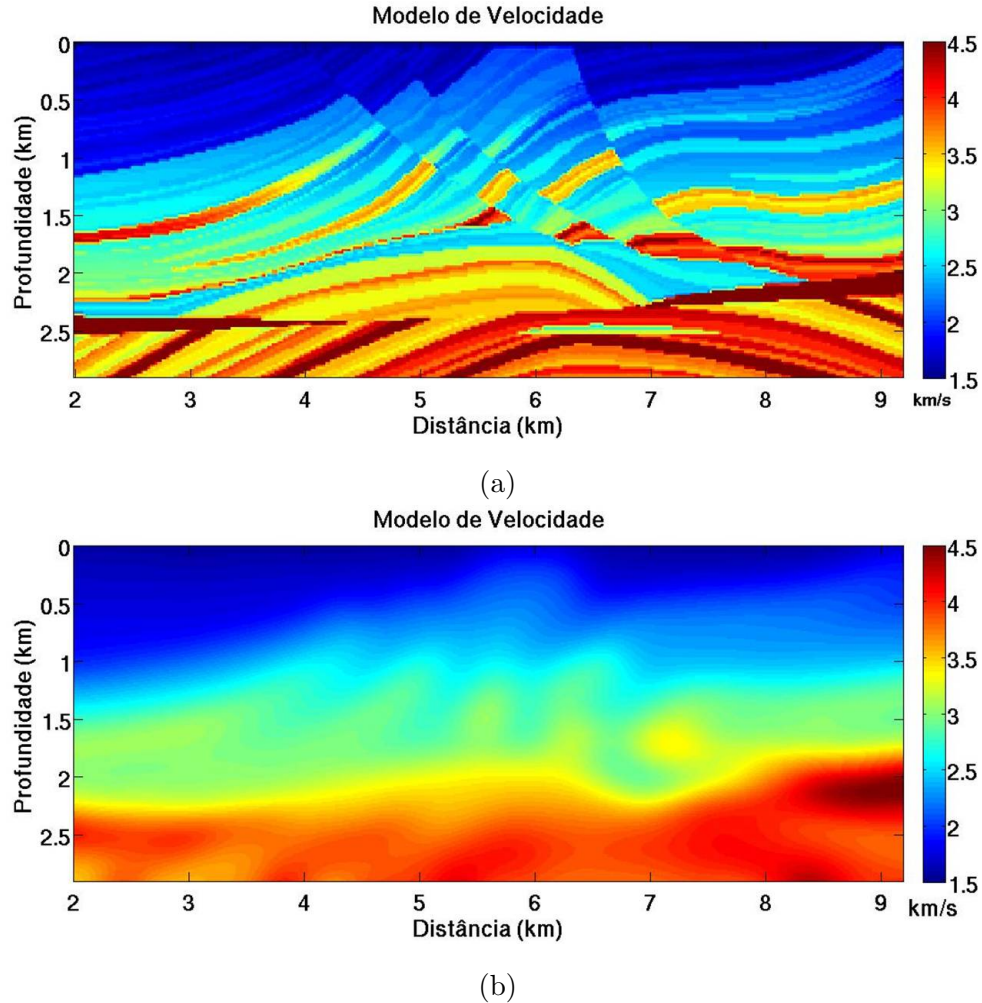


Figura 3.1: (a) Modelo Marmousi e (b) sua versão suavizada.

3.2 ALGORITMO DE INVERSÃO

Como visto anteriormente (seção 2.3), a construção de um modelo de velocidade, a partir da estereotomografia, baseia-se na teoria de raio, utilizando iterações lineares em torno de um modelo de referência. Nesta seção do capítulo 3, serão discutidos os aspectos práticos

envolvidos no programa da estereotomografia.

3.2.1 Dados de entrada

Para inicialização do programa da estereotomografia, é necessário uma série de dados de entrada (*input*). A primeira informação necessária, a ser fornecida pelo usuário, são as escalas, em relação à posição, à vagarosidade e ao tempo de trânsito total, que irão controlar o peso de cada dado nas iterações. A escolha da ponderação a ser utilizada é um ponto crítico na estereotomografia, pois tem grande influência na convergência do algoritmo, como será demonstrado na seção 3.3.1.

O segundo tipo de dados, a ser repassado para o programa, são os valores desejados para os pesos dos regularizadores. Como já discutido na seção 2.6, a regularização surge da necessidade de incorporar novas informações ao processo de inversão. Os regularizadores usados como *input* foram: (1) regularizador que pondera a atualização dos parâmetros (*damping*); (2) regularizador de curvatura isotrópica, que suaviza a curvatura ao minimizar a norma do Laplaciano do campo de velocidade; (3) regularizador do gradiente de velocidade nas direções tangente e normal ao refletor; (4) regularizador do gradiente de velocidade nas direções vertical e horizontal; e, finalmente, (5) regularizador de curvatura em relação às direções vertical e horizontal. A escolha dos pesos dos regularizadores, utilizados para implementação dos testes numéricos deste trabalho, será explicitada e justificada na seção 3.3.

Finalmente, a estereotomografia necessita, também, de arquivos de dados como entrada para o programa. O primeiro deles é o arquivo contendo as informações sobre os dados observados (equação 2.1). Os outros arquivos requeridos carregam as informações iniciais necessárias para o traçamento de raios: um arquivo deve conter as dimensões do modelo inicial de velocidade (dimensões da malha B-splines); outro deve proporcionar os valores do campo inicial de velocidade; e o último precisa armazenar as informações iniciais sobre os parâmetros dos raios (equação 2.2).

3.2.2 Desenvolvimento

Uma vez que o modelo de velocidade e os parâmetros dos raios iniciais são lidos pelo programa, é possível realizar o traçamento de raios. Para cada ponto espalhador, dois raios são traçados para cima, um em direção à fonte e outro em direção ao receptor. As trajetórias dos raios são calculadas numericamente pelo método Runge-Kutta, tomando o modelo de velocidade e os parâmetros dos raios como condições iniciais necessárias para a resolução do

sistema 2.12. É importante ressaltar que, na prática, as derivadas de Fréchet são calculadas simultaneamente ao traçamento de raios, através do método dos propagadores (seção 2.5). Ao final do traçamento de raios, obtêm-se os valores dos dados calculados e das derivadas de Fréchet para ponto final. O processo é repetido para todos os pontos espalhadores iniciais.

De posse de todos os valores finais dos dados calculados e das derivadas de Fréchet, são feitos cálculos sobre o desvio entre dados observados e calculados: obtém-se o desvio padrão relativo a diferenças na posição, na vagarosidade e no tempo de trânsito, além de ser calculado o resíduo geral entre os dados. A partir das derivadas de Fréchet e dos regularizadores, o sistema 2.43 é resolvido, a fim de se obter as perturbações, $\delta\mathbf{m}$, a serem aplicadas nos parâmetros dos raios e no modelo de velocidade, para melhor ajuste dos dados. O novo modelo de referência é caracterizado pela equação 2.5, e novos raios são, então, traçados, conforme descrito anteriormente. O processo continua até que um dos critérios de parada seja satisfeito: número máximo de iterações atingido (o número máximo adotado nesse trabalho foi de 30 iterações); variação do resíduo, entre uma iteração e outra, menor do que o valor mínimo estabelecido; ocorrência de valores de velocidade negativos.

3.2.3 Dados de saída

O resultado do processo explicitado acima pode ser avaliado através dos arquivos de saída, que contêm informações sobre: (1) os modelos de velocidade resultantes de cada iteração; (2) os parâmetros dos pontos espalhadores calculados, também, em cada iteração; (3) e o desempenho do programa no ajuste de dados. Este último consiste em um relatório contendo informações (como desvios padrão, resíduos, números de raios fora do modelo) de cada iteração e o critério de parada da estereotomografia. Caso o usuário queira reamostrar o modelo de velocidade final em uma malha mais fina, é gerado, também, um modelo de velocidade refinado.

3.3 AVALIAÇÃO

Nesta seção, serão avaliados os testes numéricos feitos com o objetivo de demonstrar a influência do modelo inicial e da ponderação dos dados, no resultado final da estereotomografia. Os dados para inversão são resultantes da seleção de 5490 eventos, no modelo sintético Marmousi, feita através de uma técnica de *picking* automático dos dados, chamada CDR (*Controlled Directional Reception*). Foram testados diferentes modelos de velocidade iniciais: (1) modelos com gradiente vertical de velocidade e (2) modelos provenientes da conversão

tempo-profundidade. Estes últimos foram gerados a partir de um programa, desenvolvido por Leandro Sadala (ex-aluno da Faculdade de Geofísica da UFPA), que converte um modelo de velocidade em tempo para um modelo de velocidade em profundidade, com três níveis de suavização possíveis: suavização fraca, média e forte. Como, ao se aplicar a suavização fraca, foi obtido um modelo de velocidade muito grosseiro, somente os modelos gerados com os dois últimos níveis de suavização foram usados nos testes. Quanto aos modelos com gradiente vertical, sua criação se deu através do desenvolvimento de um programa em MATLAB, com o qual foram gerados três modelos, com diferentes gradientes. As diferentes estratégias de obtenção dos parâmetros iniciais dos raios, descritas na seção 2.4, também foram testadas e comparadas.

A nossa implementação da estereotomografia utiliza a abordagem multigrídes, sugerida por Billete et al. (2003), baseada na observação de que *grids* (malhas) de velocidade esparsos podem causar ambiguidade na velocidade, bem como erros no posicionamento (DELPRAT-JANNAUD; LAILLY, 1993). Sendo assim, primeiramente, efetuou-se a inversão em uma malha de velocidade B-splines esparsa, com dimensões 13x11. O espaçamento entre os nós laterais foi igual a 1 km e entre os nós verticais igual a 0.5 km. Esta inversão teve como resultado um modelo de velocidade refinado que foi usado, juntamente com os parâmetros dos pontos espalhadores, como modelo inicial para uma inversão final. A malha B-splines mais densa, resultante da primeira inversão, tem dimensões 61x51, com nós espaçados de 0.2 km, lateralmente, e de 0.1 km verticalmente.

Neste trabalho, os testes serão avaliados de acordo com os melhores resultados obtidos (após as 30 iterações feitas na inversão com o modelo denso) para o modelo de velocidade, para a recuperação dos pontos espalhadores, para o resíduo e para os valores de desvio padrão de cada dado. A qualidade do modelo de velocidade foi avaliada a partir da comparação entre o modelo de saída e a versão suavizada do modelo Marmousi (Figura 3.1(b)). Quanto aos pontos espalhadores, suas coordenadas foram salvas em um arquivo de dados e plotadas juntamente com o modelo 3.1(a). Pontos espalhadores posicionados de forma a recuperar os refletores do modelo Marmousi equivalem a uma inversão bem sucedida. Finalmente, os desvios padrão de cada iteração, presentes no relatório da execução do programa, permitem avaliar o quanto o modelo estimado consegue ajustar os dados (*picks*). Adotaram-se como valores satisfatórios de desvio padrão, nas inversões com o modelo denso, valores menores que: 2 m para posição; 0.022 s/km para vagarosidade; e 1 ms para o tempo de trânsito (MELO, 2009).

A regularização utilizada foi a mesma em todos os testes e sua escolha se deu a partir do trabalho de Costa et al.(2008). Neste, a regularização que gera os melhores resultados com-

bina suavização ao longo dos refletores, com minimização da heterogeneidade lateral. Dessa forma, foram atribuídos os valores 0.025, 0.0025 e 0.005 para os pesos dos regularizadores de *damping*, de gradiente de velocidade na direção tangente ao refletor e de gradiente de velocidade na direção horizontal, respectivamente. Todos os outros regularizadores foram considerados iguais a zero.

A seção 3.3.1 irá apresentar inversões realizadas a partir de um mesmo modelo inicial de velocidade, utilizando a estratégia do modelo homogêneo para obtenção dos parâmetros iniciais do raio (ver seção 2.4), a fim de demonstrar a influência da ponderação dos dados, no resultado da estereotomografia, e de justificar a escolha dos pesos utilizados nos testes seguintes. As seções 3.3.2 e 3.3.3, por sua vez, apresentarão testes feitos com dois tipos de modelos iniciais de velocidade: modelos com gradiente vertical e modelos resultantes da conversão tempo-profundidade, respectivamente. Para cada modelo inicial de velocidade, as duas estratégias de obtenção dos parâmetros iniciais dos raios (seção 2.4) serão testadas e comparadas. O objetivo destas duas últimas seções consiste em: demonstrar como o modelo de referência inicial (modelo inicial de velocidade e parâmetros iniciais dos pontos espalhadores) interfere na qualidade do resultado da estereotomografia, e testar a nova estratégia de obtenção dos parâmetros iniciais dos raios.

3.3.1 Ponderação dos Dados

O objetivo principal desta seção é mostrar o efeito da ponderação dos dados no resultado final e justificar a escolha feita para os pesos a serem usados nas seções 3.3.2 e 3.3.3. No programa atual, os três valores de pesos, referentes à posição, à vagarosidade e ao tempo de trânsito, são introduzidos pelo usuário, como dados de entrada necessários para a execução do programa. Todos os testes apresentados nessa seção utilizaram a estratégia de construção de um modelo homogêneo para obtenção dos parâmetros iniciais dos raios (posição, ângulos de emergência e tempos de trânsito únicos). O modelo inicial de velocidade e a regularização também foram os mesmos para todos os testes, de maneira que as diferenças entre os resultados são devidas, exclusivamente, às diferenças na ponderação utilizada. A seguir, serão discutidos os resultados das inversões feitas com o modelo denso.

3.3.1.1 Pesos iguais

Primeiramente, foram avaliados os resultados de várias inversões, nas quais foram atribuídos valores iguais, para todos os pesos, variando de 1 a 0,005. Os resultados foram analisados de

acordo com os critérios de avaliação estabelecidos na seção 3.3.

Com relação ao ajuste de dados produzido (Figura 3.2), observou-se a ausência de um valor de ponderação com ajustes satisfatórios para todos os dados. Apenas o desvio padrão da vagarosidade obteve valores satisfatórios (abaixo de 0,022 s/km), quando a ponderação utilizada esteve no intervalo de 0,3 a 0,09. Entre todos os testes, os menores desvios padrão da posição, da vagarosidade e do tempo de trânsito, foram iguais a 2,48 m, 0,009 s/km e 1,05 ms, respectivamente, quando os pesos dos dados foram todos iguais a 0,2. Esta ponderação também apresentou o menor valor para o resíduo dos dados. Verificou-se não haver uma relação direta entre a diminuição do resíduo e o decrescimento dos pesos.

A qualidade dos resultados encontrados também pode ser analisada nas Figuras 3.3(a), 3.3(b) e 3.3(c). Estas contêm os modelos de velocidade resultantes de inversões com ponderações iguais a 1, a 0,2 e a 0,05, respectivamente. Os três modelos apresentados são bastante diferentes entre si, tanto em relação ao conteúdo de velocidades (a primeira Figura é a única com velocidade acima de 3,5 km/s), quanto em relação à distribuição das mesmas (a forma das diferentes zonas de velocidade não coincide nos modelos). Os modelos também diferem bastante do modelo Marmousi suavizado. O modelo de velocidade 3.3(a) apresenta uma zona da alta velocidade no canto inferior direito, e não uma camada contínua, como no modelo Marmousi. Além disso, ele não consegue reproduzir as diferentes zonas de velocidade presentes no modelo original. Já o modelo 3.3(b), apesar de ter obtido os melhores ajustes, ainda apresenta muitas limitações. Até a profundidade de 1,25 km, há uma certa semelhança com o modelo Marmousi, em termos do conteúdo de velocidades e da forma da camada de menor velocidade, no entanto o modelo obtido com a estereotomografia não apresenta valores maiores que 3,2 km/s nem consegue reproduzir sutilezas da parte superior do modelo original. Finalmente, o terceiro modelo também não apresenta as altas velocidades do modelo real e a forma das suas camadas difere da original.

As Figuras 3.4(a), 3.4(b) e 3.4(c), por sua vez, apresentam os modelos dos pontos espalhadores gerados nas inversões em que a ponderação foi igual a 1, a 0,2 e a 0,05, respectivamente. Os pontos são mostrados juntamente com o modelo Marmousi, para que se possa avaliar a qualidade na recuperação dos refletores. Na Figura 3.4(a), nota-se que os pontos espalhadores estão dispersos, dificultando a identificação de refletores. Já o modelo 3.4(b) apresenta pontos espalhadores concentrados, definindo refletores mais nítidos. Apesar de alguns refletores estarem corretamente caracterizados, como os da parte superior direita, muitos ainda não condizem com o modelo Marmousi, como ocorre, por exemplo, com os da parte esquerda do modelo, que estão posicionados acima da localização real e possuem curvatura menor do que a original. Já no terceiro modelo, apesar de ainda haver dispersão nos pontos difratores,

é possível identificar refletores com maior mergulho, em relação à horizontal, do que o modelo original e posicionados acima da sua localização no modelo Marmousi, como é caso dos refletores que estão entre 1,5 e 2,5 km de profundidade, na parte central do modelo.

Valor para todos os pesos	Resíduo dos dados	Desvios padrão		
		Posição (m)	Vagarosidade (s/km)	Tempo de Trânsito (ms)
1,000	0,0437	34,61	0,065	6,74
0,900	0,0421	33,79	0,062	6,23
0,800	0,0391	28,91	0,060	6,36
0,700	0,0360	26,42	0,056	6,15
0,600	0,0279	17,09	0,046	4,51
0,500	0,0228	13,71	0,038	3,70
0,400	0,0177	10,31	0,030	2,95
0,300	0,0107	4,86	0,019	1,91
0,200	0,0053	2,48	0,009	1,05
0,100	0,0108	5,82	0,018	2,86
0,090	0,0124	6,78	0,021	3,30
0,080	0,0145	7,96	0,025	3,85
0,070	0,0169	9,53	0,028	4,62
0,060	0,0199	11,34	0,033	5,58
0,050	0,0221	12,91	0,037	6,51
0,040	0,0265	17,73	0,042	7,97
0,030	0,0352	19,42	0,059	10,86
0,020	0,0722	25,11	0,130	16,14
0,010	0,0795	43,13	0,135	16,14
0,009	0,0805	45,69	0,136	15,97
0,008	0,0761	30,02	0,135	16,67
0,007	0,0764	31,09	0,136	16,61
0,006	0,0771	33,65	0,136	16,54
0,005	0,0775	34,97	0,136	16,42

Figura 3.2: Tabela dos ajustes obtidos quando todos os pesos tiveram valores iguais, variando de 1 a 0,005. O retângulo azul identifica a ponderação que obteve o menor resíduo dos dados. O retângulo vermelho destaca os desvios padrão que estão dentro da faixa considerada aceitável. As células amarelas correspondem aos menores valores de desvio padrão de cada propriedade.

Os testes apresentados acima comprovam a influência do valor absoluto dos pesos no resultado das inversões.

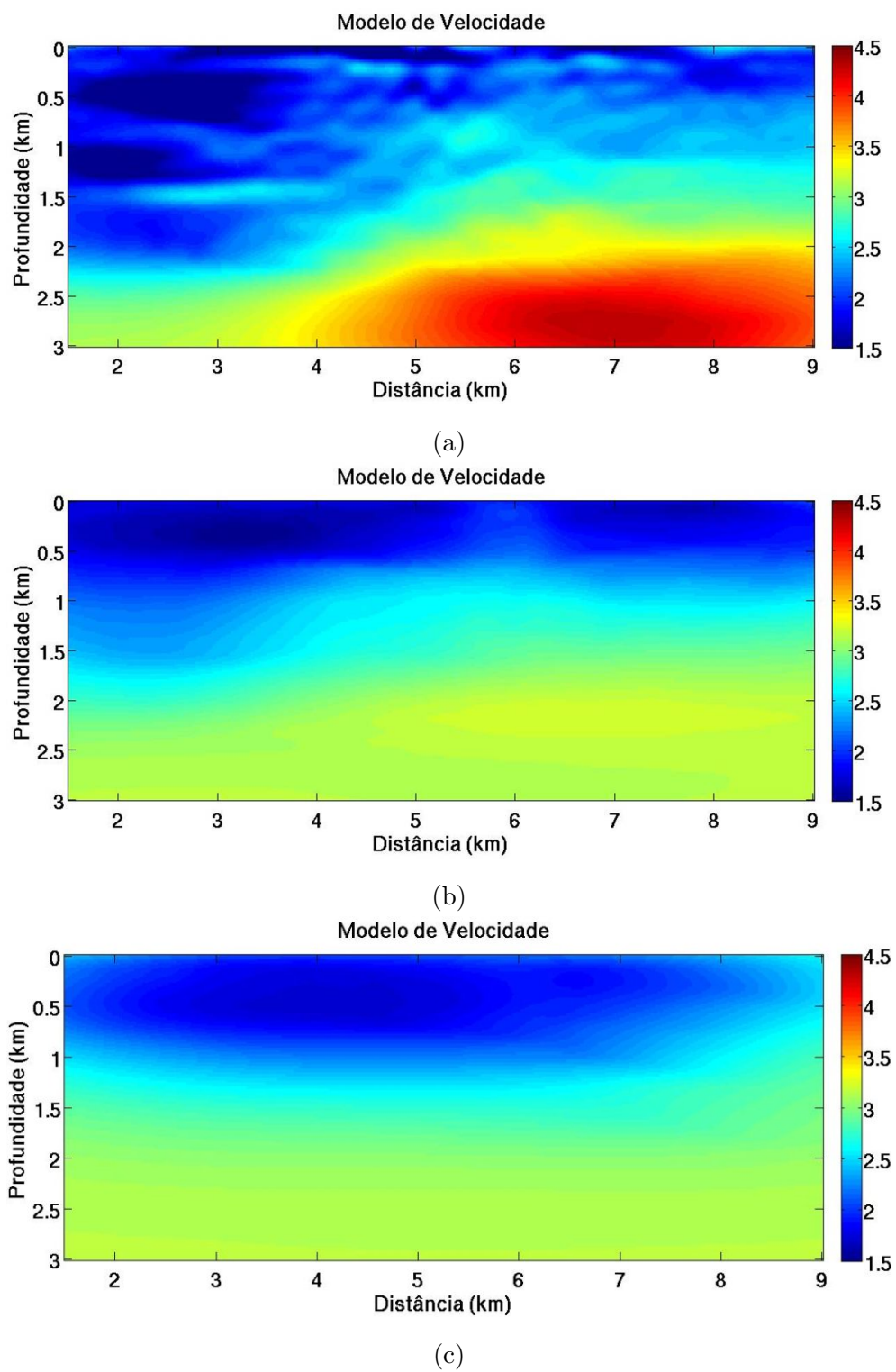
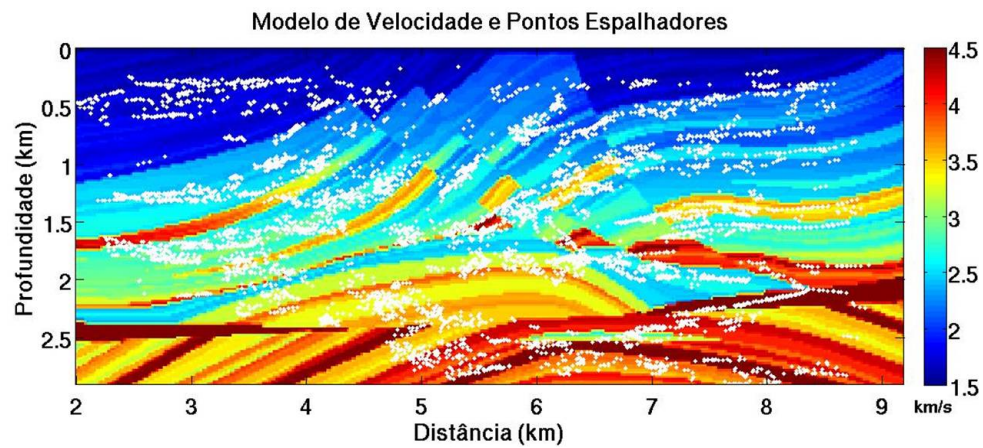
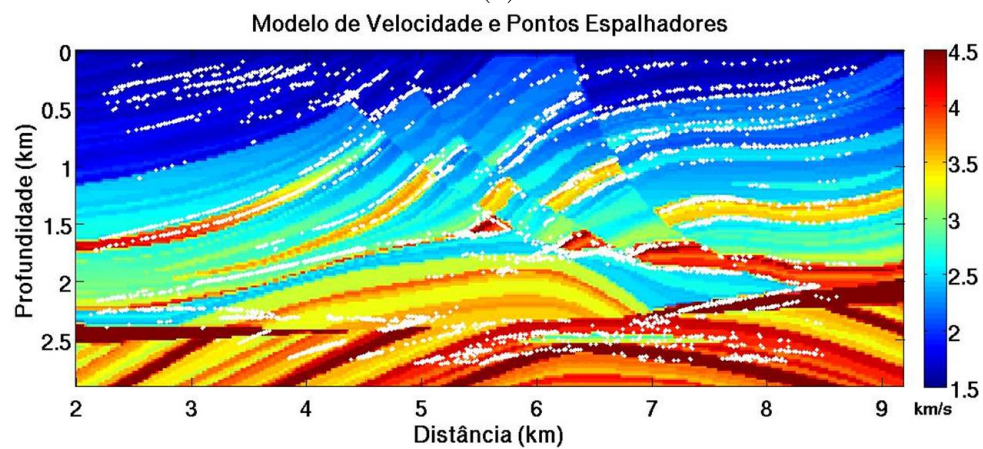


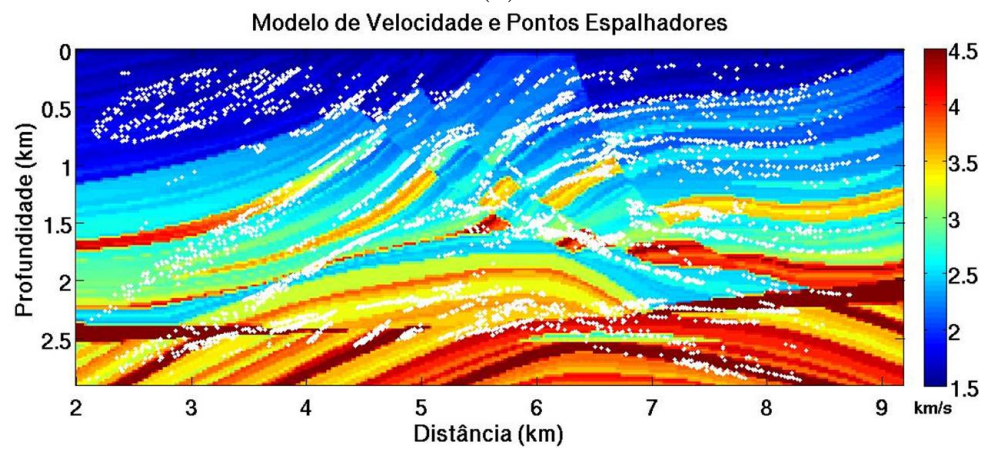
Figura 3.3: Modelos de velocidade gerados quando todos os pesos foram iguais a 1 (a), a 0,2 (b) e a 0,05 (c)



(a)



(b)



(c)

Figura 3.4: Modelos dos pontos espalhadores gerados quando todos os pesos foram iguais a 1 (a), a 0,2 (b) e a 0,05 (c)

3.3.1.2 Peso da posição

Tendo em vista os resultados dos testes anteriores, iremos adotar o valor 0,2 para os pesos referentes à vagarosidade e ao tempo de trânsito, enquanto variamos, de 1 a 0,005, o peso relativo à posição. Dessa forma, será avaliada a influência deste peso no resultado da inversão.

Para os testes desta seção, observou-se, também, a ausência de um valor de ponderação com ajustes satisfatórios para todos os dados (ver Figura 3.5). O desvio padrão da posição apresentou valores aceitáveis (menores do que 2 m) quando seu peso foi igual ou inferior a 0,1. O menor valor encontrado para este desvio foi de 0,016 m, para o menor peso utilizado, 0,005. Observou-se que quanto menor o peso adotado, menor será o valor do desvio padrão da posição. Já o desvio padrão da vagarosidade obteve valores satisfatórios quando adotamos valores iguais ou superiores a 0,02 para o peso testado. Este desvio apresentou valor mínimo igual a 0,0084 s/km, quando o peso adotado foi igual a 0,3. Quanto ao desvio padrão do tempo de trânsito, os pesos 0,3 e 0,4, assim como os superiores a 0,6, geraram valores aceitáveis para este desvio, que teve seu mínimo equivalente a 0,7 ms, quando o peso foi igual a 1. Entre todos os testes, o menor valor para o resíduo dos dados foi alcançado com a ponderação da posição igual a 0,09, a qual resultou em desvios padrão da posição, da vagarosidade e do tempo de trânsito, iguais a 0,543 m, 0,0094 s/km e 1,21 ms, respectivamente.

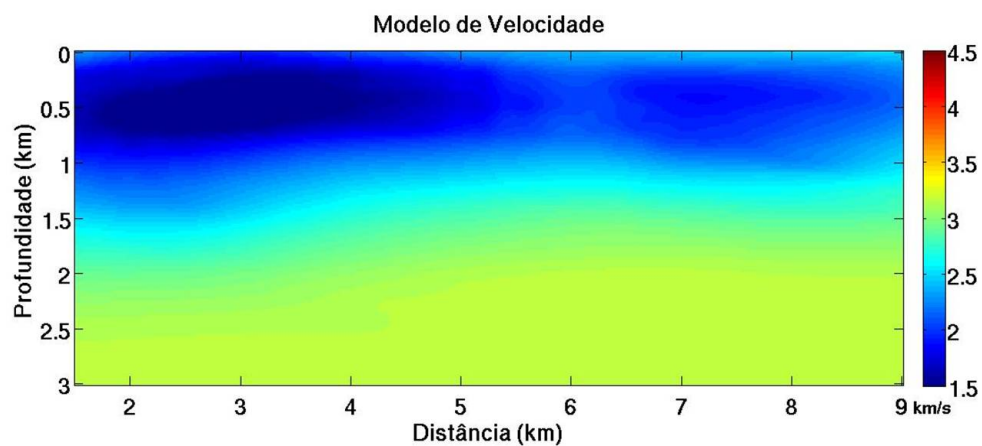
A influência do peso referente à posição, no resultado final da estereotomografia, também pode ser analisada nas Figuras 3.6(a), 3.6(b) e 3.6(c), que contêm os modelos de velocidade resultantes de inversões em que o peso da posição foi igual a 1, a 0,09 e a 0,005, respectivamente. Todos os modelos de velocidade apresentados diferem bastante entre si, principalmente na maneira em que as velocidades estão distribuídas. Comparando os modelos das inversões ao modelo Marmousi suavizado, as diferenças também são significativas, tanto pelo conteúdo de velocidades (não apresentam velocidades maiores do que 3,3km/s), quanto pela distribuição das mesmas (a forma das camadas não coincide com a forma real). É válido ressaltar, no entanto, que o modelo 3.6(b), resultante da inversão com melhor ajuste, apresenta certa semelhança com o modelo original, até 1,25 km de profundidade, em relação aos valores de velocidade e ao formato da camada de menor velocidade.

As Figuras 3.7(a), 3.7(b) e 3.7(c) apresentam os modelos dos pontos espalhadores gerados nas inversões em que a ponderação da posição foi igual a 1, a 0,09 e a 0,005, respectivamente. Analisando estas Figuras, é possível perceber que, no primeiro modelo 3.7(a), há uma grande dificuldade em delinear os refletores, devido à significativa dispersão dos pontos. No entanto, em certos locais, é possível ter uma idéia da forma e da posição de alguns refletores, que, na

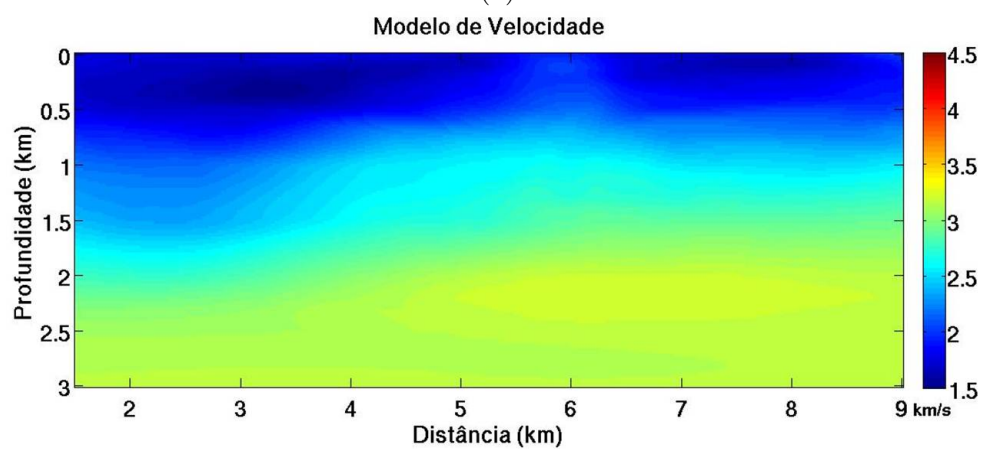
grande maioria, diferem das características dos refletores reais, como acontece, por exemplo, no lado esquerdo do modelo, em que alguns refletores têm inclinação menor do que a real (em relação à horizontal) e estão localizados acima de suas posições no modelo Marmousi. Já na Figura 3.7(b), nota-se que os pontos difratores estão mais coesos do que no modelo anterior e conseguem reproduzir grande parte dos refletores originais. Ainda há certa dificuldade, no entanto, em posicionar corretamente alguns refletores, como, por exemplo, os do lado esquerdo do modelo. Finalmente, no modelo 3.7(c), só há pontos refletores até, aproximadamente, 2,2 km de profundidade. Até 1 km de profundidade, é possível identificar alguns refletores, ainda que com curvatura diferente da original. Entretanto, a partir desta profundidade, é impossível determinar com clareza os refletores.

Peso da posição	Resíduo dos dados	Desvios padrão		
		Posição (m)	Vagarosidade (s/km)	Tempo de Trânsito (ms)
1,000	0,0405	52,657	0,0142	0,70
0,900	0,0359	46,389	0,0141	0,78
0,800	0,0311	39,834	0,0144	0,86
0,700	0,0249	31,426	0,0137	0,90
0,600	0,0190	23,434	0,0127	0,98
0,500	0,0142	16,505	0,0127	1,03
0,400	0,0090	9,505	0,0101	0,94
0,300	0,0058	4,904	0,0084	0,86
0,200	0,0053	2,482	0,0093	1,05
0,100	0,0051	0,665	0,0094	1,19
0,090	0,0050	0,543	0,0094	1,21
0,080	0,0051	0,434	0,0094	1,23
0,070	0,0051	0,337	0,0095	1,25
0,060	0,0052	0,251	0,0096	1,26
0,050	0,0052	0,174	0,0096	1,26
0,040	0,0053	0,113	0,0099	1,27
0,030	0,0057	0,067	0,0106	1,30
0,020	0,0071	0,036	0,0132	1,49
0,010	0,0208	0,027	0,0388	4,02
0,009	0,0250	0,027	0,0466	4,75
0,008	0,0286	0,024	0,0534	5,18
0,007	0,0336	0,022	0,0627	5,93
0,006	0,0392	0,020	0,0733	6,75
0,005	0,0458	0,016	0,0856	7,91

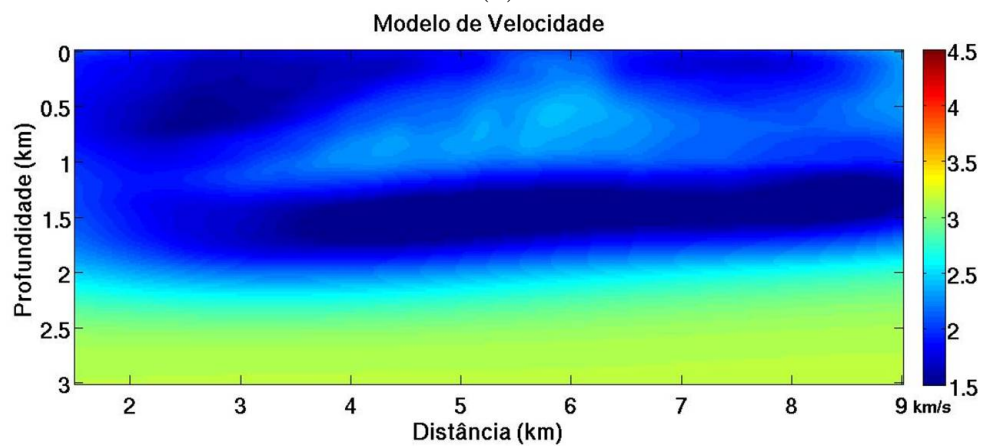
Figura 3.5: Tabela dos ajustes obtidos quando variamos o peso da posição, de 1 a 0,005. O retângulo azul identifica a ponderação que obteve o menor resíduo dos dados. O retângulo vermelho destaca os desvios padrão que estão dentro da faixa considerada aceitável. As células amarelas correspondem aos menores valores de desvio padrão de cada propriedade.



(a)

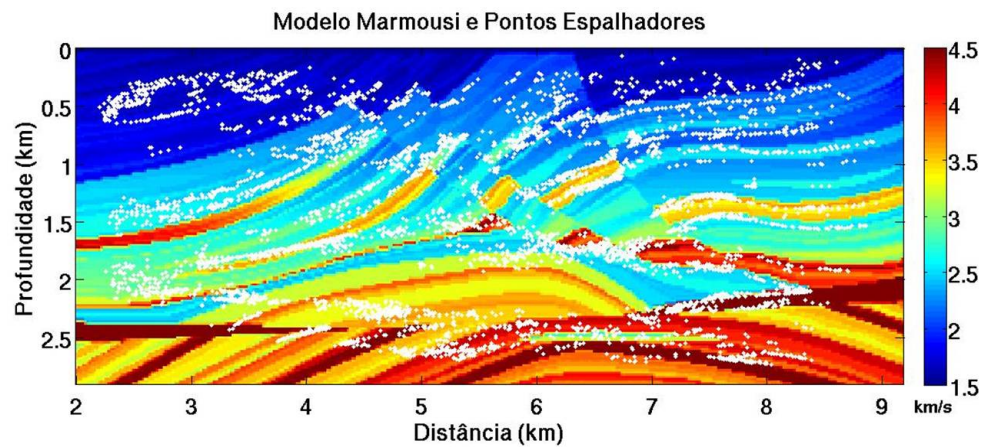


(b)

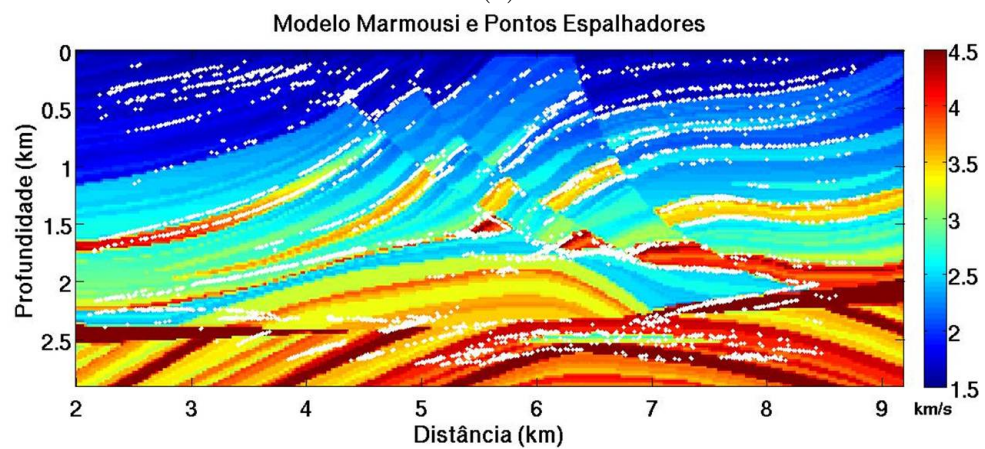


(c)

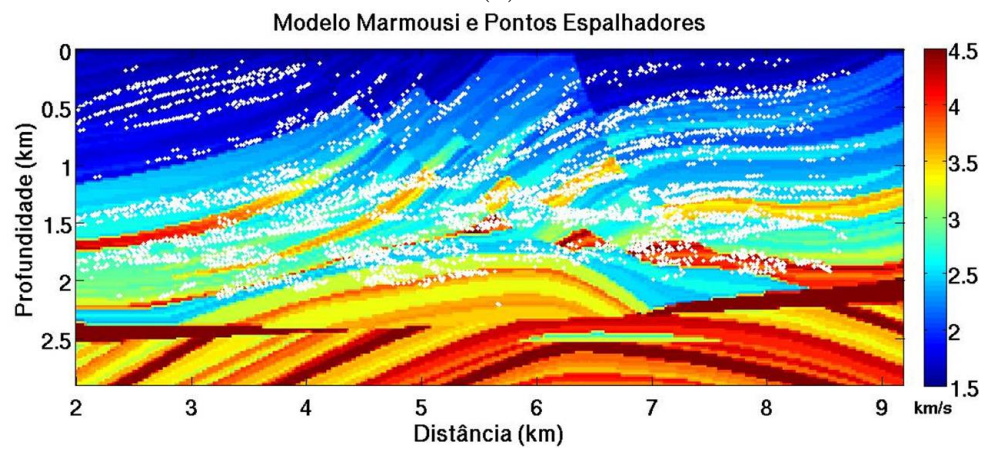
Figura 3.6: Modelos de velocidade gerados quando o peso da posição foi igual a 1 (a), a 0,09 (b) e a 0,005 (c)



(a)



(b)



(c)

Figura 3.7: Modelos dos pontos espalhadores gerados quando o peso da posição foi igual a 1 (a), a 0,09 (b) e a 0,005 (c)

3.3.1.3 Peso da vagarosidade

A fim de se demonstrar o efeito do peso da vagarosidade, no resultado da inversão, foram realizados vários testes em que o valor deste peso foi variado, de 1 a 0,005. A todos os outros pesos, atribuiu-se o valor 0,2, de forma que a diferença dos resultados são devidas, somente, à variação do peso da vagarosidade.

Entre o intervalo testado, não foi possível encontrar uma ponderação que produzisse ajustes satisfatórios para todos os dados (ver Figura 3.8). O desvio padrão da posição só teve valores aceitáveis quando o peso da vagarosidade foi igual ou superior a 0,5. O menor valor encontrado para este desvio foi de 0,76 m, para o peso equivalente a 1. Já o desvio padrão da vagarosidade obteve valores aceitáveis quando o peso utilizado foi igual ou inferior a 0,3. Este desvio apresentou seu valor mínimo igual a 0,0012 s/km, quando adotou-se o peso 0,009. O desvio padrão do tempo de trânsito só apresentou valores satisfatórios para ponderações iguais ou superiores a 0,3. Seu menor valor foi obtido para o peso 1. Entre todos os testes, o menor valor para o resíduo dos dados foi alcançado com a ponderação da vagarosidade igual a 0,1, a qual resultou em desvios padrão da posição, da vagarosidade e do tempo de trânsito, iguais a 4 m, 0,0041 s/km e 1,54 ms, respectivamente.

As Figuras 3.9 e 3.10 contêm, respectivamente, os modelos de velocidade e os modelos dos pontos espalhadores resultantes das inversões em que o peso da vagarosidade foi igual a 1 (itens (a)), 0,1 (itens (b)) e 0,009 (itens (c)), e são apresentadas com o objetivo de provar a influência da escala na inversão. O primeiro modelo de velocidade, Figura 3.9(a), tem grandes diferenças em relação aos outros dois modelos e ao Marmousi, principalmente no conteúdo de velocidades e na distribuição das mesmas. Já as principais diferenças entre os modelos 3.9(b) e 3.9(c) consistem na camada de menor velocidade, na zona com velocidade de, aproximadamente, 2,75 km/s (entre 1 e 1,5 km de profundidade), e na área e no formato das zonas das maiores velocidades, que ocorrem abaixo de 2 km de profundidade. Os dois últimos modelos discutidos apresentam semelhanças (ainda que em graus diferentes) com o modelo Marmousi suavizado até, aproximadamente, 1,75 km de profundidade. A partir desta profundidade, a grande distinção entre os modelos resultantes da inversão e modelo Marmousi, é a ausência naqueles das altas velocidades do modelo original.

A partir dos modelos de velocidade contendo os pontos espalhadores também é possível avaliar a qualidade dos resultados da inversão. Nota-se que, no primeiro modelo, 3.10(a), os pontos espalhadores estão bastante dispersos. Alguns refletores podem ser identificados, porém, a maioria não está corretamente posicionada. Já o segundo modelo apresenta pontos espalhadores mais concentrados, que reproduzem grande parte dos refletores originais. Ainda

resta alguma dificuldade, no entanto, em posicionar corretamente os refletores abaixo de 2,25 km. Finalmente, nota-se, no terceiro modelo, uma certa dispersão dos pontos difratores, mas já é possível identificar vários refletores que coincidem com os do modelo Marmousi. A representação dos refletores mais profundos, abaixo de 2,25 km, ainda é uma limitação.

Peso da vagarosidade	Resíduo dos dados	Desvios padrão		
		Posição (m)	Vagarosidade (s/km)	Tempo de Trânsito (ms)
1,000	0,0426	0,76	0,0798	0,35
0,900	0,0396	0,89	0,0740	0,42
0,800	0,0361	1,05	0,0675	0,50
0,700	0,0319	1,25	0,0596	0,60
0,600	0,0270	1,51	0,0504	0,71
0,500	0,0209	1,80	0,0389	0,83
0,400	0,0159	2,42	0,0295	0,97
0,300	0,0090	2,29	0,0164	0,91
0,200	0,0053	2,48	0,0093	1,05
0,100	0,0038	4,03	0,0041	1,54
0,090	0,0039	4,43	0,0037	1,64
0,080	0,0045	5,36	0,0035	1,91
0,070	0,0053	6,49	0,0033	2,24
0,060	0,0065	8,20	0,0030	2,78
0,050	0,0088	11,22	0,0032	3,76
0,040	0,0078	9,90	0,0031	3,20
0,030	0,0099	12,79	0,0030	4,09
0,020	0,0093	11,94	0,0033	4,20
0,010	0,0097	12,50	0,0030	4,05
0,009	0,0115	14,94	0,0012	5,23
0,008	0,0105	13,26	0,0050	4,11
0,007	0,0102	12,92	0,0046	4,78
0,006	0,0147	19,12	0,0015	6,92
0,005	0,0097	12,51	0,0032	4,17

Figura 3.8: Tabela dos ajustes obtidos quando variamos o peso da vagarosidade, de 1 a 0,005. O retângulo azul identifica a ponderação que obteve o menor resíduo dos dados. O retângulo vermelho destaca os desvios padrão que estão dentro da faixa considerada aceitável. As células amarelas correspondem aos menores valores de desvio padrão de cada propriedade.

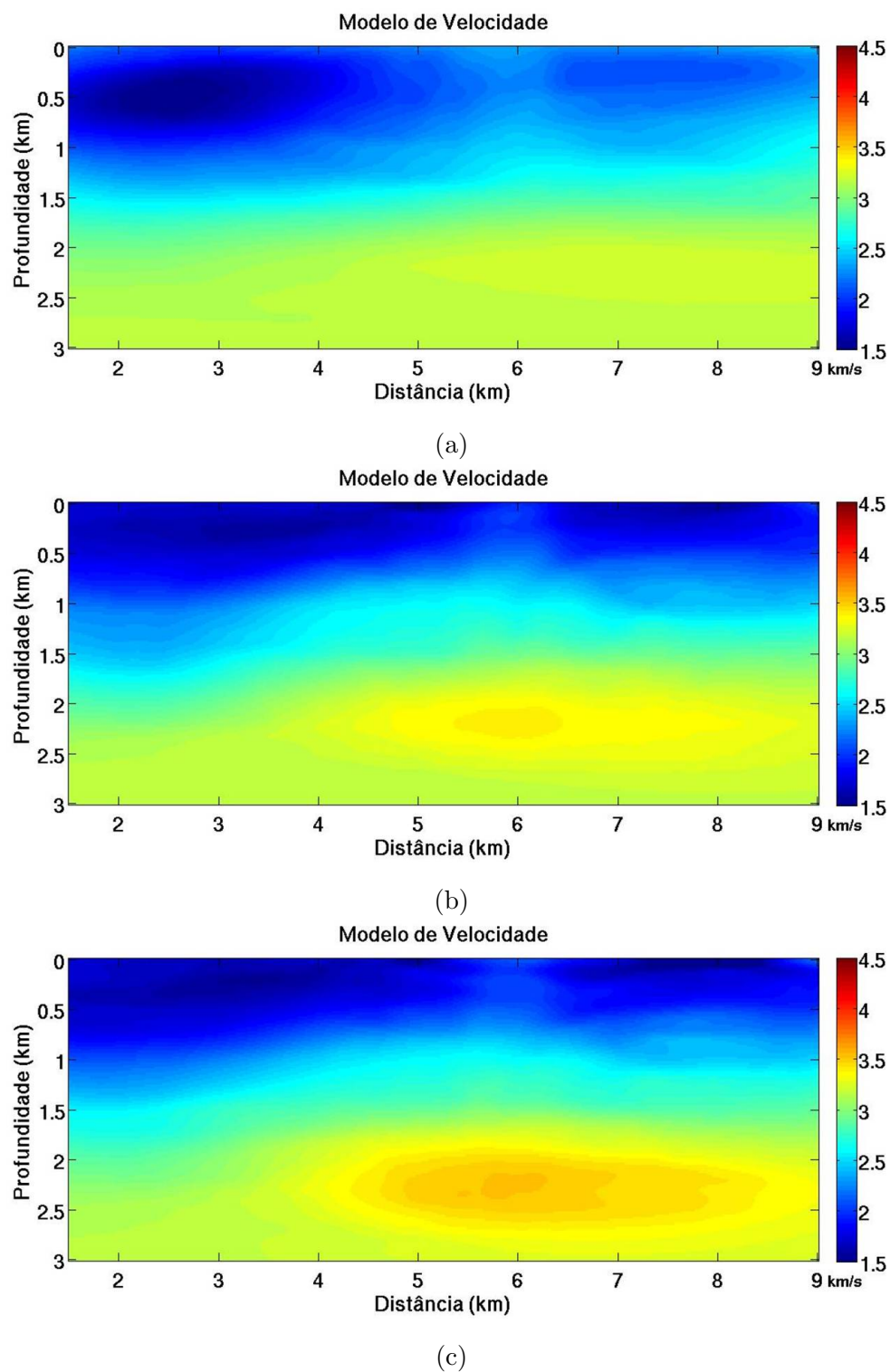
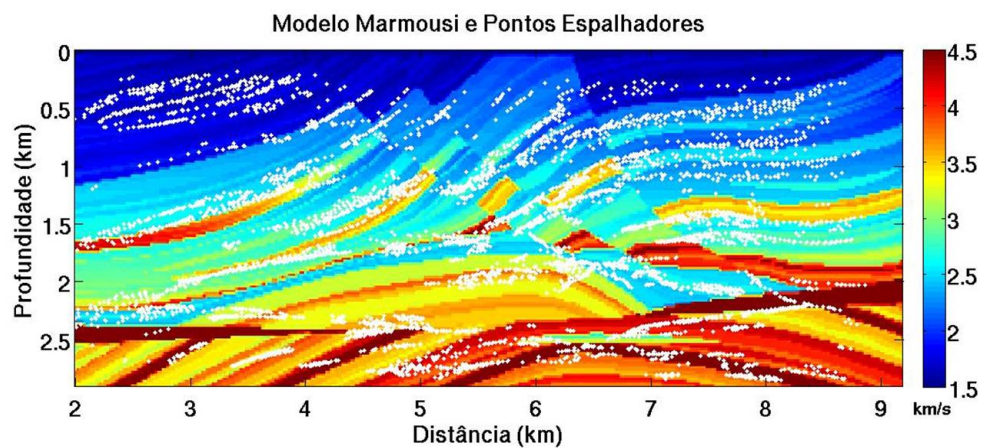
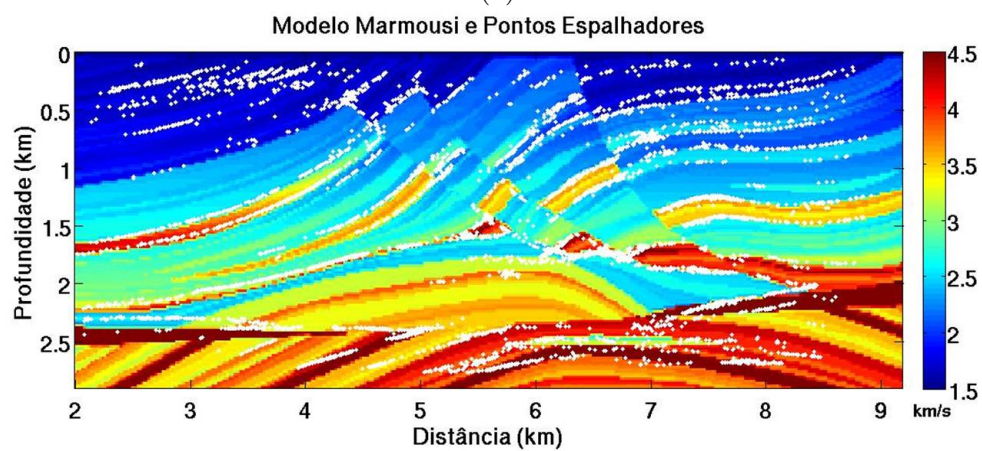


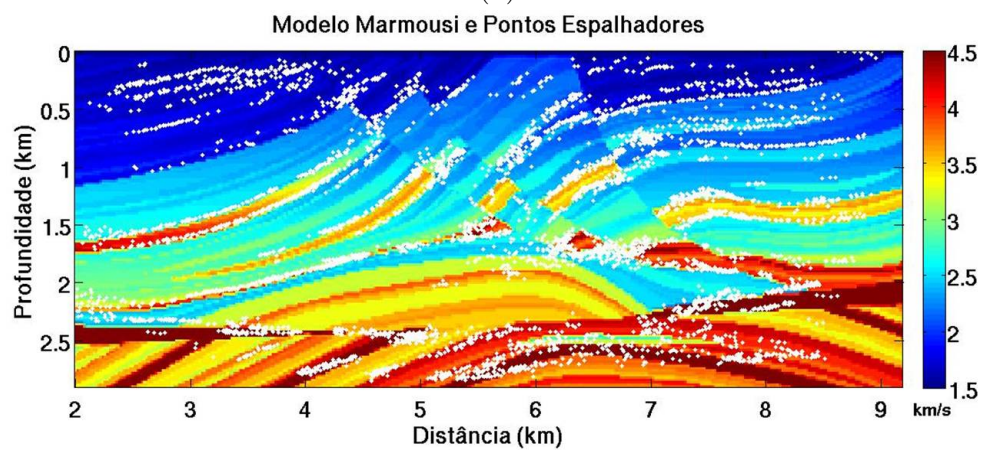
Figura 3.9: Modelos de velocidade gerados quando o peso da vagarosidade foi igual a 1 (a), a 0,1 (b) e a 0,009 (c)



(a)



(b)



(c)

Figura 3.10: Modelos dos pontos espalhadores gerados quando o peso da vagarosidade foi igual a 1 (a), a 0,1 (b) e a 0,009 (c)

3.3.1.4 Peso do tempo de trânsito

Nesta seção, será adotado o valor 0,2 para os pesos referentes à posição e à vagarosidade, enquanto variamos, de 1 a 0,005, o peso relativo ao tempo de trânsito. Avaliaremos, portanto, a influência deste peso no resultado da inversão.

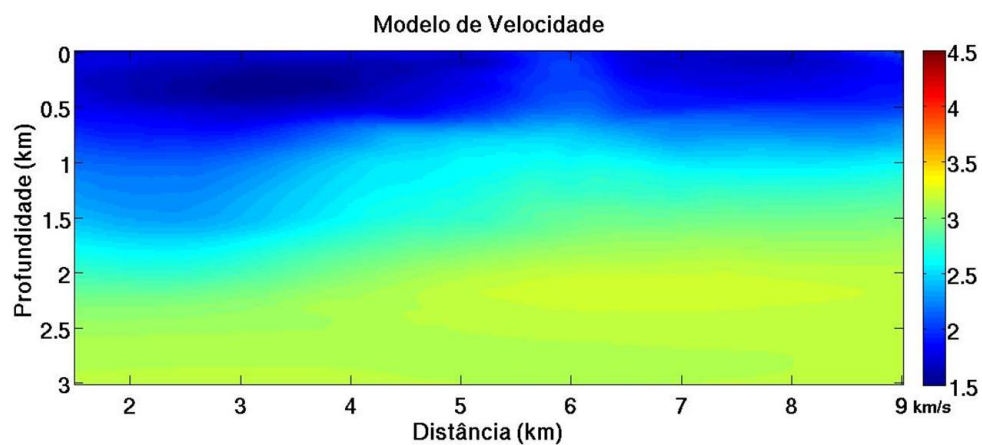
Com relação ao ajuste de dados produzido, observou-se a ausência de um valor de ponderação com ajustes satisfatórios para todos os dados (ver Figura 3.11). O desvio padrão da posição não obteve valores aceitáveis em nenhum dos testes. Seu menor valor obtido foi de 2,17 m, para o peso do tempo de trânsito igual a 0,6. O desvio padrão da vagarosidade, por sua vez, obteve valores satisfatórios quando a ponderação utilizada foi igual ou superior a 0,006. O valor mínimo obtido para esse parâmetro foi de 0,0088 s/km, para o peso de 0,5. Quanto ao desvio padrão do tempo de trânsito, valores satisfatórios foram encontrados quando a ponderação foi igual ou inferior a 0,1. O menor valor obtido para este desvio foi de 0,002 ms, para pesos entre 0,005 e 0,007. Observou-se que quanto menor o peso adotado, menor será o valor do desvio padrão do tempo de trânsito. Entre todos os testes, o menor valor para o resíduo dos dados foi alcançado quando o peso em teste foi igual a 0,04, o que resultou em desvios padrão da posição, da vagarosidade e do tempo de trânsito iguais a 2,36 m, 0,0089 s/km e 0,041 ms, respectivamente.

Os resultados das inversões em que o peso do tempo de trânsito foi igual a 0,5, a 0,04 e a 0,005, são apresentados nas Figuras 3.12 e 3.13, para exemplificar como a ponderação interfere na estereotomografia. Os modelos de velocidade 3.12(a) e 3.12(b) são bastantes parecidos entre si, porém destoam do terceiro modelo por diferenças, principalmente, na parte superior, até 1 km de profundidade. Como em casos anteriormente mostrados, todos os modelos apresentam certa semelhança, em diferentes graus, com o modelo original, até 1,5 km de profundidade. No entanto, a forma e as sutilezas das camadas, até essa profundidade, não são bem representadas, principalmente no último modelo. Além disso, os modelos resultantes da inversão não apresentam as altas velocidades do modelo Marmousi.

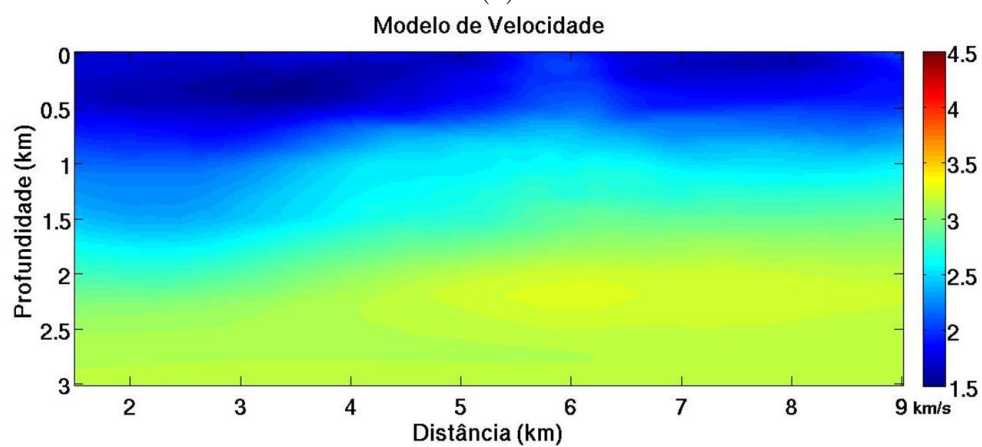
Quanto aos pontos refletores referentes a cada inversão, nota-se que os dois primeiros modelos têm muito em comum. Assim como conseguem reproduzir corretamente alguns refletores, também têm dificuldades em posicionar outros, como os do lado esquerdo do modelo, que aparecem acima das suas localizações originais. Já no último modelo apresentado, 3.13(c), é possível notar que alguns refletores da parte superior do modelo, até 1 km de profundidade, estão bem posicionados. A partir desta profundidade, no entanto, os pontos espalhadores estão dispersos, e os poucos refletores identificados encontram-se em localizações diferentes das do modelo Marmousi.

Peso do tempo de trânsito	Resíduo dos dados	Desvios padrão		
		Posição (m)	Vagarosidade (s/km)	Tempo de Trânsito (ms)
1,000	0,00841	2,26	0,0094	17,266
0,900	0,00753	2,23	0,0092	14,348
0,800	0,00676	2,26	0,0091	11,571
0,700	0,00638	2,48	0,0093	9,378
0,600	0,00573	2,17	0,0089	7,118
0,500	0,00539	2,23	0,0088	5,207
0,400	0,00530	2,29	0,0090	3,579
0,300	0,00524	2,38	0,0091	2,174
0,200	0,00531	2,48	0,0093	1,047
0,100	0,00534	2,56	0,0093	0,281
0,090	0,00531	2,54	0,0093	0,228
0,080	0,00529	2,55	0,0092	0,179
0,070	0,00526	2,51	0,0092	0,137
0,060	0,00519	2,49	0,0091	0,090
0,050	0,00516	2,42	0,0090	0,067
0,040	0,00508	2,36	0,0089	0,041
0,030	0,00512	2,40	0,0090	0,023
0,020	0,00547	2,62	0,0095	0,011
0,010	0,00847	4,67	0,0144	0,004
0,009	0,00905	5,33	0,0152	0,003
0,008	0,00964	6,15	0,0158	0,003
0,007	0,01130	7,31	0,0184	0,002
0,006	0,01353	9,47	0,0215	0,002
0,005	0,01893	12,58	0,0306	0,002

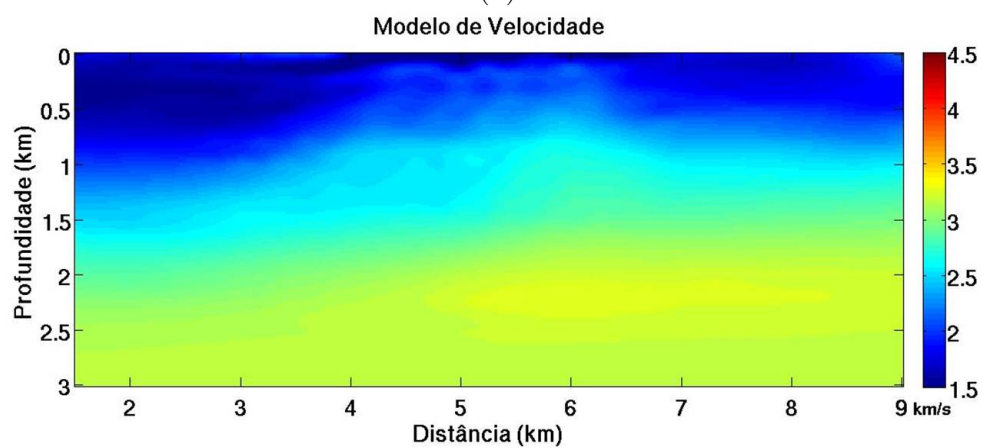
Figura 3.11: Tabela dos ajustes obtidos quando variamos o peso do tempo de trânsito, de 1 a 0,005. O retângulo azul identifica a ponderação que obteve o menor resíduo dos dados. O retângulo vermelho destaca os desvios padrão que estão dentro da faixa considerada aceitável. As células amarelas correspondem aos menores valores de desvio padrão de cada propriedade.



(a)

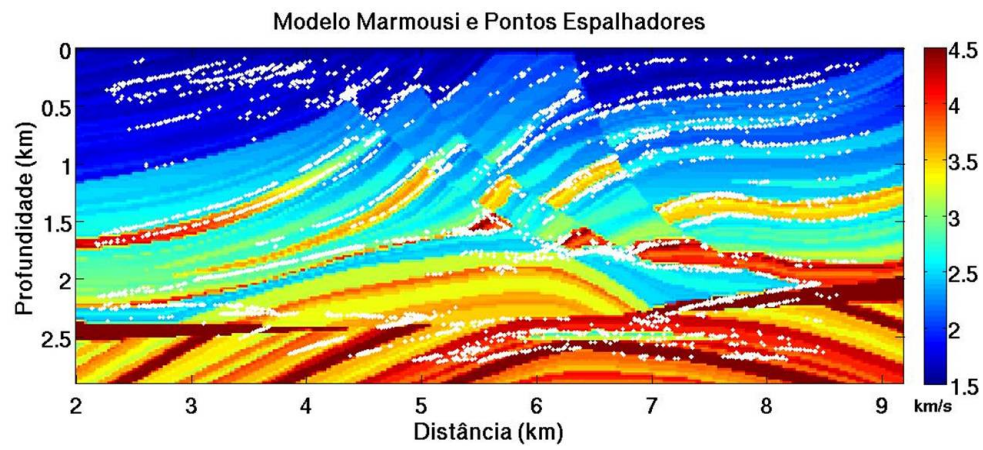


(b)

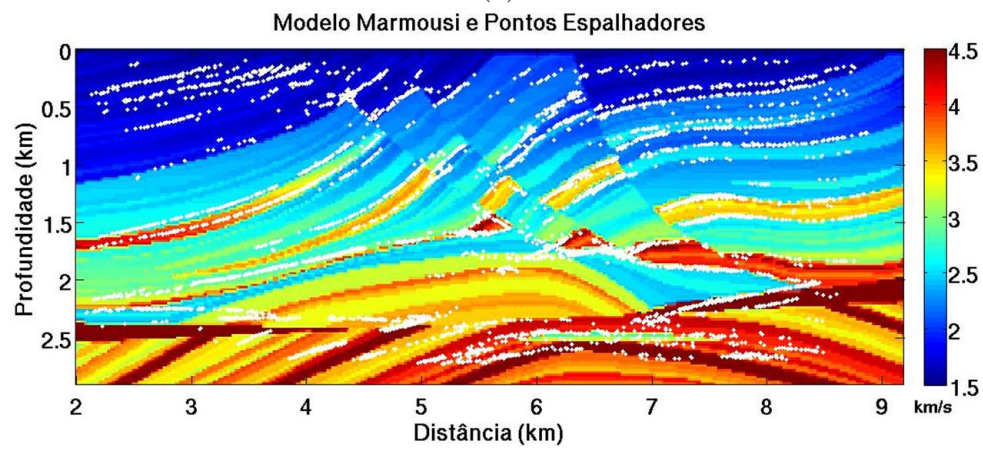


(c)

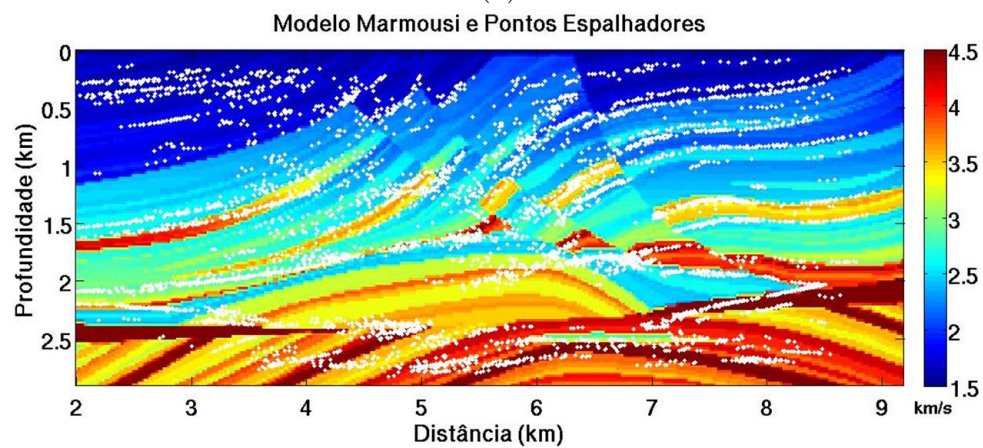
Figura 3.12: Modelos de velocidade gerados quando o peso do tempo de trânsito foi igual a 0,5 (a), a 0,03 (b) e a 0,005 (c)



(a)



(b)



(c)

Figura 3.13: Modelos dos pontos espalhadores gerados quando o peso do tempo de trânsito foi igual a 0,5 (a), a 0,03 (b) e a 0,005 (c)

3.3.1.5 Escolha da ponderação

Como nenhum dos testes acima produziu ajustes satisfatórios dos dados, novas ponderações foram testadas, baseadas nos resultados obtidos anteriormente, a fim de se obter a ponderação a ser usada nos testes do modelo inicial (seções 3.3.2 e 3.3.3). Inicialmente, adotamos os valores 0,09, 0,1 e 0,04 para os pesos relativos à posição, à vagarosidade e ao tempo de trânsito, respectivamente. Esses valores correspondem aos pesos testados nas seções 3.3.1.2 a 3.3.1.4 que obtiveram os menores resíduos dos dados. A segunda ponderação testada baseou-se nos melhores resultados individuais das seções 3.3.1.2 a 3.3.1.4, isto é, nos valores dos pesos que obtiveram os menores desvios padrão relativos à sua propriedade (por exemplo, o peso adotado para a posição será aquele que produziu o menor valor de desvio padrão da posição na seção 3.3.1.2). Desta forma, o segundo teste utilizou os valores 0,005, 0,009 e 0,005 para os pesos da posição, da vagarosidade e do tempo de trânsito, respectivamente.

Os dois testes produziram ajustes satisfatórios dos dados. A primeira ponderação gerou valores de desvio padrão iguais a 1,12 m (posição), a 0,0050 s/km (vagarosidade) e a 0,057 ms. Os modelos de velocidade e dos pontos espalhadores resultantes desta inversão estão representados nas Figuras 3.14(a) e 3.15(a). O menor resíduo dos dados foi encontrado com a segunda ponderação, a qual produziu desvios padrão iguais a 0,31 m, a 0,0031 s/km e a 0,15 ms. Os resultados desta inversão são apresentados nas Figuras 3.14(b) e 3.15(b).

Apesar da semelhança entre os dois modelos de velocidade mostrados, é possível perceber a superioridade do modelo 3.14(b) sobre o modelo 3.14(a) para representar o modelo Marmousi. Na Figura 3.14(b), até 1,5 km de profundidade, as camadas têm maior semelhança com suas formas originais, do que na Figura 3.14(a). A camada de menor velocidade e a que ocorre entre 1 e 1,5 km de profundidade, por exemplo, estão melhor representadas.

Analisando os modelos com os pontos espalhadores, percebe-se que a qualidade de recuperação dos refletores é maior no modelo 3.15(b) do que no modelo 3.15(a), principalmente para profundidades maiores do que 2 km.

Levando em consideração a superioridade no ajuste dos dados e na recuperação do modelo de velocidade e dos refletores, os testes das seções 3.3.2 e 3.3.3 adotaram os valores 0,005, 0,009 e 0,005 para as escalas da posição, da vagarosidade e do tempo de trânsito, respectivamente.

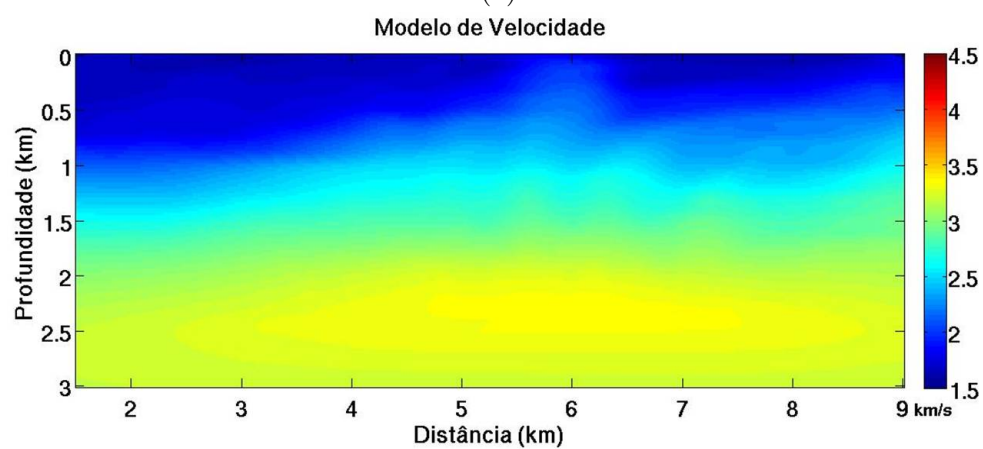
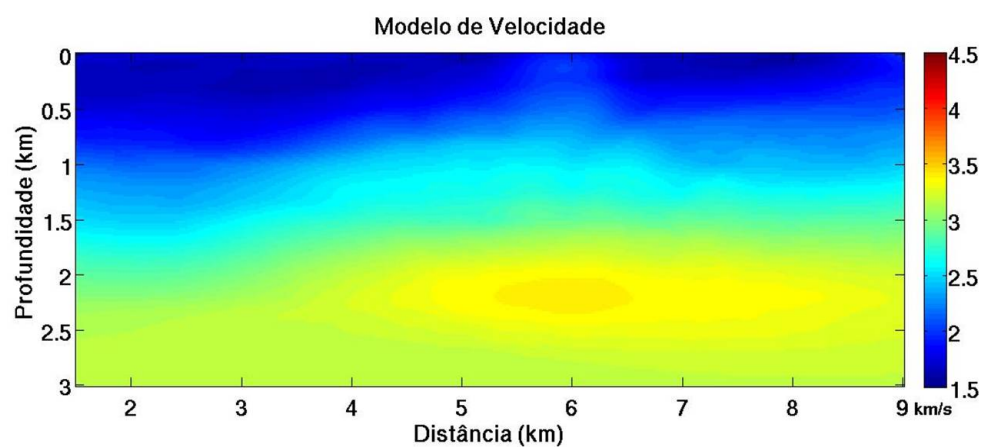


Figura 3.14: (a) Modelo de velocidade gerado com a ponderação: 0,09 (posição), 0,1 (vagarosidade) e 0,03 (tempo de trânsito). (b) Modelo de velocidade gerado com a ponderação: 0,005 (posição), 0,009 (vagarosidade) e 0,005 (tempo de trânsito)

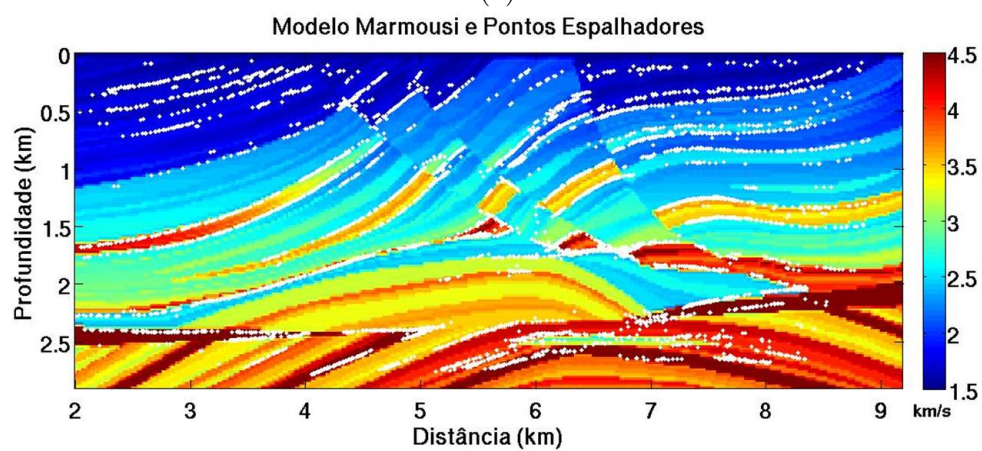
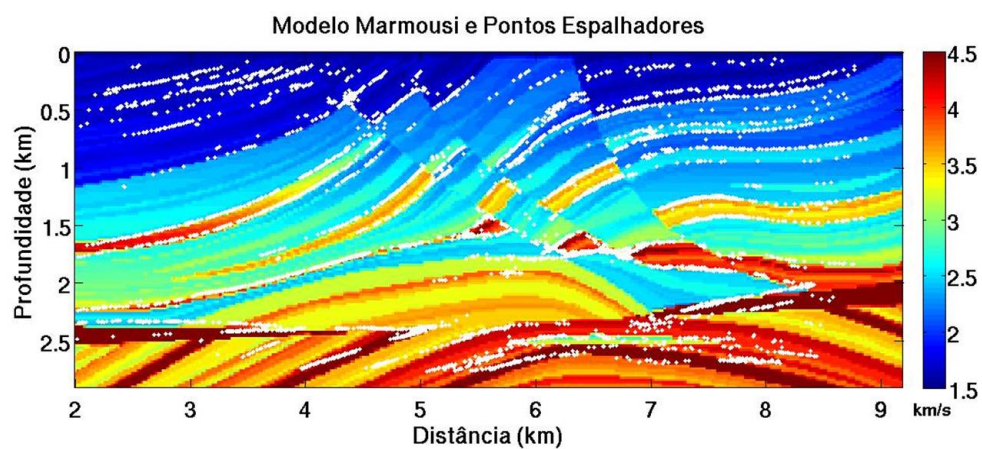


Figura 3.15: (a) Modelo dos pontos espalhadores gerado com a ponderação: 0,09 (posição), 0,1 (vagarosidade) e 0,03 (tempo de trânsito). (b) Modelo dos pontos espalhadores gerado com a ponderação: 0,005 (posição), 0,009 (vagarosidade) e 0,005 (tempo de trânsito)

3.3.2 Modelo com gradiente

As seções 3.3.2 e 3.3.3 têm como objetivo demonstrar como o modelo de referência (tanto o modelo inicial de velocidade, quanto os parâmetros iniciais dos raios) interfere na qualidade do resultado da estereotomografia. Nesta seção, serão apresentados os resultados de inversões feitas com 3 modelos iniciais de velocidade, com diferentes gradientes verticais: suave, médio e forte. Seus resultados serão discutidos nas seções 3.3.2.1, 3.3.2.2 e 3.3.2.3, respectivamente. Para cada modelo inicial de velocidade, as duas técnicas de obtenção dos parâmetros iniciais dos raios (seção 2.4) também serão testadas e comparadas.

3.3.2.1 Gradiente suave

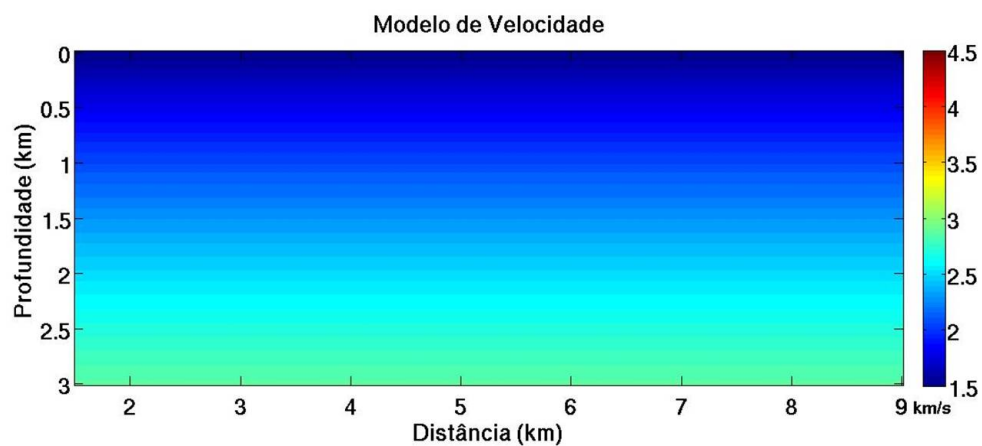
O modelo inicial de velocidade, usado nesta seção, está representado na Figura 3.16(a) e seus valores de velocidade variam de 1,5 km/s, na superfície, a, aproximadamente, 2,87 km/s, a 3 km de profundidade. As Figuras 3.16(b) e 3.16(c) apresentam os modelos iniciais dos pontos espalhadores, gerados a partir das estratégias do modelo homogêneo e do traçamento de raios, respectivamente. Os melhores resultados da inversão utilizando a primeira técnica de obtenção do modelo inicial estão representados nas Figuras 3.17(a) e 3.18(a). As Figuras 3.17(b) e 3.18(b), por sua vez, são resultantes da inversão utilizando a estratégia de traçamento de raios.

Quanto ao ajuste de dados, ambas as estratégias obtiveram valores satisfatórios para os desvios padrão. O melhor resultado (menor resíduo) foi obtido quando se utilizou do traçamento de raios, para achar os parâmetros iniciais dos pontos espalhadores. Para este caso, os desvios padrão da posição, da vagarosidade e do tempo de trânsito foram iguais a 0,326 m, a 0,0034 s/km e a 0,155 ms, respectivamente. Já os desvios padrão encontrados com a utilização da primeira técnica foram equivalentes a 0,323 m, a 0,0036 s/km e a 0,154 ms.

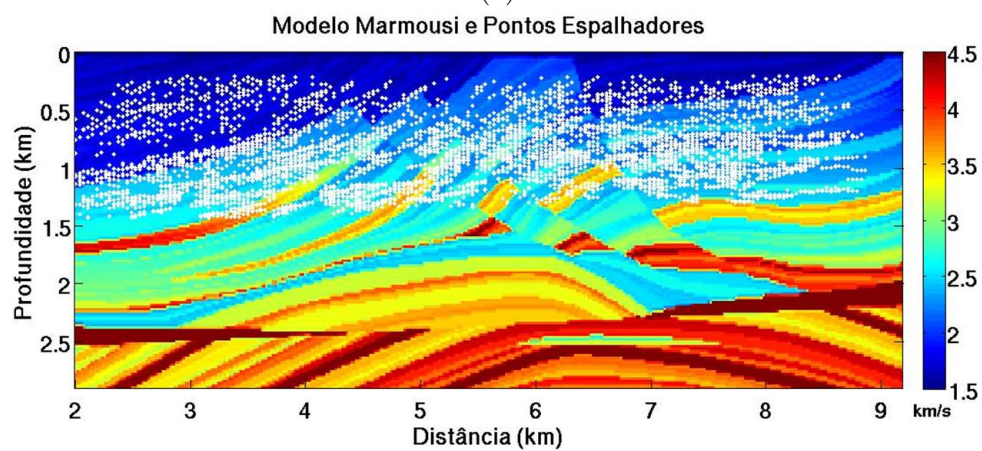
Comparando os modelos de velocidade 3.17(a) e 3.17(b) entre si, percebe-se que, até 2,25 km de profundidade, eles são extremamente parecidos. Abaixo de 2,25 km, entretanto, os modelos diferem entre si pela presença, no primeiro modelo, de uma zona de baixa velocidade. Se compararmos, agora, as Figuras 3.17(a) e 3.17(b) com o modelo Marmousi suavizado, veremos que as limitações e semelhanças dos dois modelos, em relação ao modelo original, são praticamente as mesmas. Tanto o modelo 3.17(a) quanto o 3.17(b) são similares ao modelo Marmousi, até, aproximadamente, a profundidade de 1,75 km. Nesta área, porém, os modelos estimados não reproduzem exatamente a variação lateral de velocidade, observada

entre 1 e 1,5 km de profundidade, no modelo original. A partir de 1,75 km de profundidade, os dois modelos gerados com a estereotomografia diferem do modelo Marmousi, por não apresentarem as altas velocidades do modelo original.

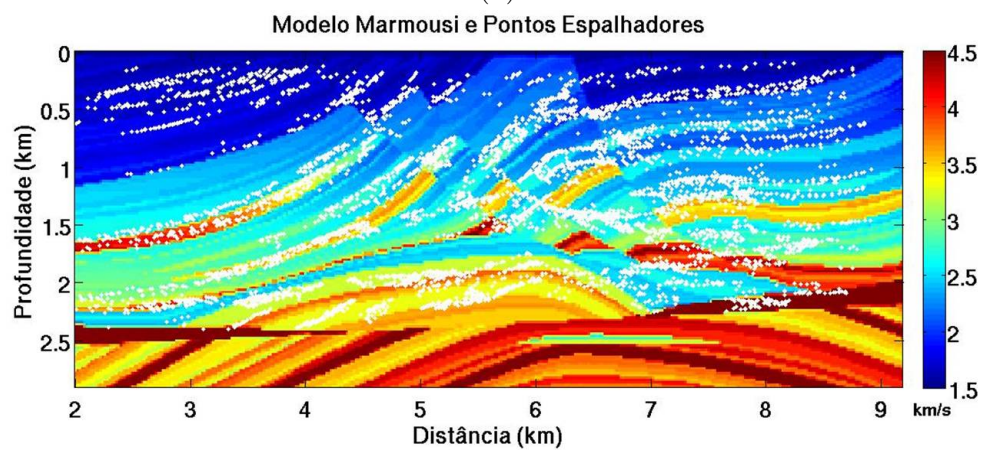
Quanto aos pontos espalhadores das Figuras 3.18(a) e 3.18(b), é possível afirmar que, até 2,25 km de profundidade, as duas estratégias resultaram em modelos praticamente idênticos, em que a maioria dos refletores coincide com o modelo original. A partir desta profundidade, nota-se uma ligeira superioridade do modelo 3.18(b) em posicionar corretamente alguns refletores, como os da parte esquerda do modelo.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.16: (a) Modelo inicial de velocidade com gradiente fraco. (b) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado com a construção de um modelo homogêneo. (c) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado através da técnica de traçamento de raios

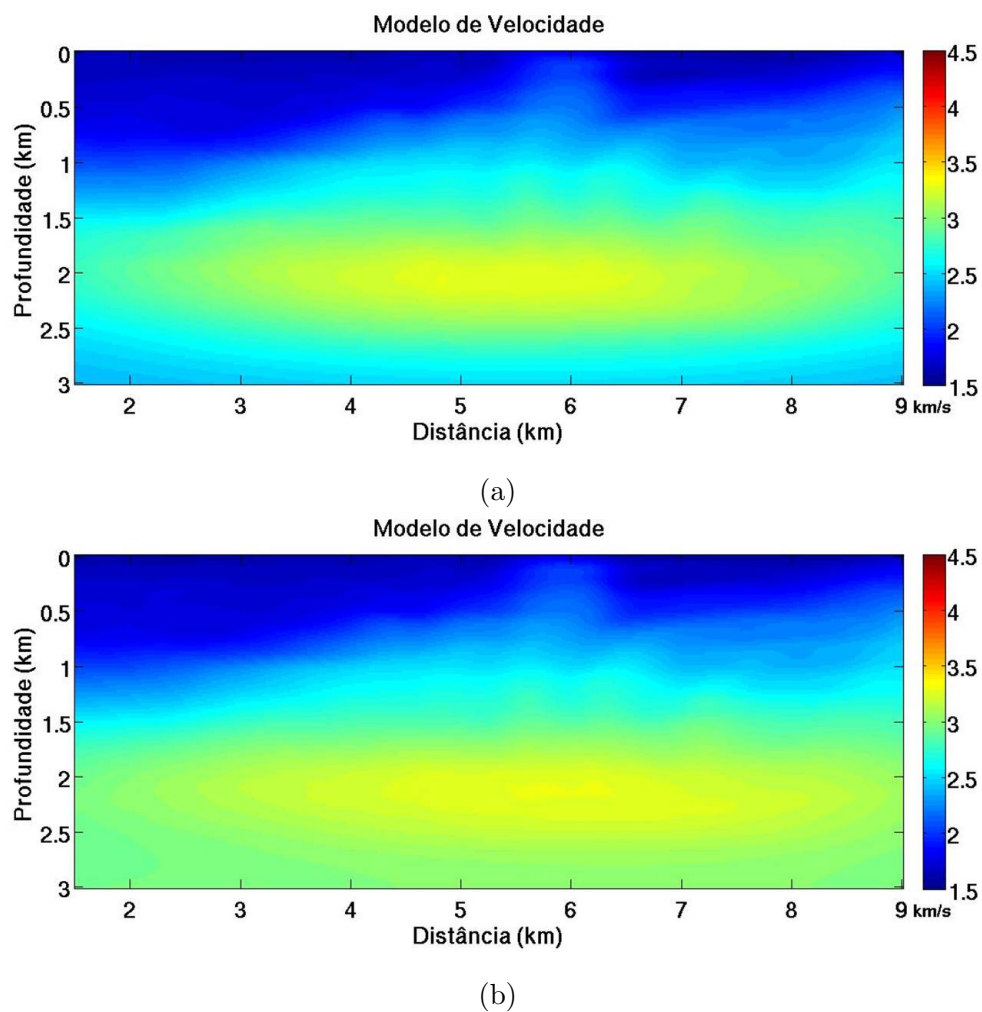
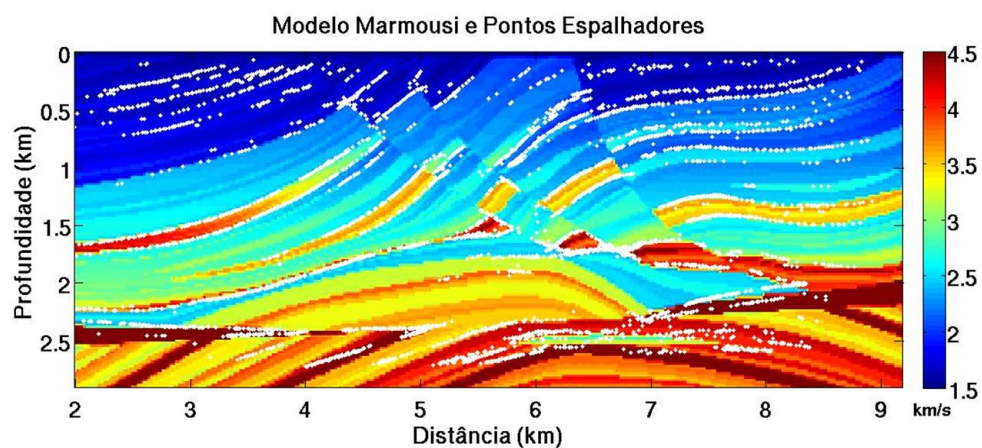
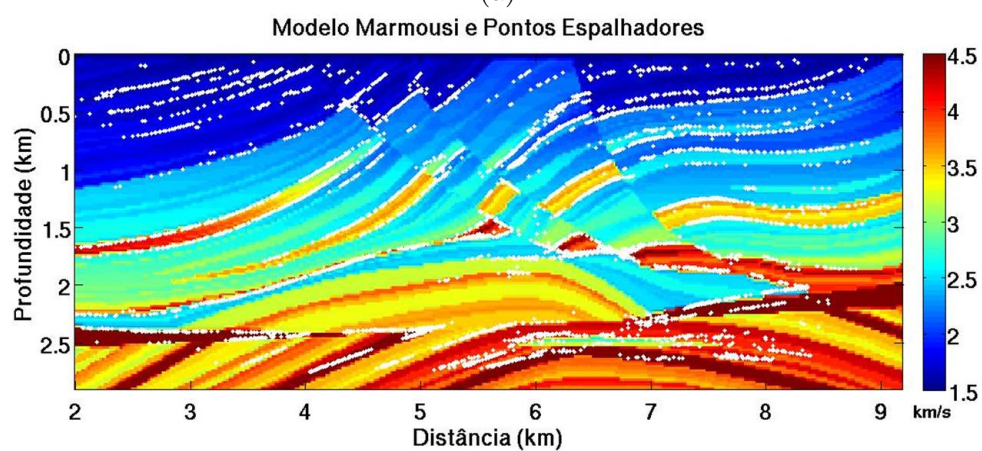


Figura 3.17: Modelos de velocidade obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).



(a)



(b)

Figura 3.18: Modelos dos pontos espalhadores obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).

3.3.2.2 Gradiente intermediário

Nesta seção, o modelo inicial de velocidade utilizado para inversão é caracterizado por um gradiente vertical que vai de, aproximadamente, 1,78 km/s, na superfície, a 3,45 km/s, a 3 km de profundidade, e está representado na Figura 3.19(a). Os modelos iniciais dos pontos espalhadores, gerados a partir das estratégias do modelo homogêneo e do traçamento de raios, são apresentados nas Figuras 3.19(b) e 3.19(c). Os melhores resultados da inversão que utilizou a primeira estratégia estão representados nas Figuras 3.20(a) e 3.21(a). As Figuras 3.20(b) e 3.21(b), por sua vez, são resultantes da inversão utilizando a técnica de traçamento de raios.

Valores satisfatórios para os desvios padrão foram possíveis com as duas estratégias. O melhor resultado foi obtido quando se utilizou da construção de um modelo homogêneo, para achar os parâmetros iniciais do raio. Para este caso, os desvios padrão da posição, da vagarosidade e do tempo de trânsito foram iguais a 0,313 m, a 0,0033 s/km e a 0,151 ms, respectivamente. Ainda usando a ordem anterior, os desvios padrão encontrados, com a utilização da segunda estratégia, foram equivalentes a 0,93 m, a 0,0064 s/km e a 0,38 ms.

Comparando os modelos de velocidade 3.20(a) e 3.20(b) entre si, identificamos diferenças bem nítidas. Por exemplo, até a coordenada horizontal 3 km e até a profundidade de 1,5 km, a Figura 3.20(b) apresenta camadas com formas distorcidas em relação àquelas da primeira Figura. Além disso, a partir de 1,5 km de profundidade, os modelos apresentam zonas de velocidade com formas e valores diferentes. Em relação ao modelo Marmousi, o modelo que mais se aproxima é o da Figura 3.20(a). As principais diferenças entre esta e o modelo original são: a forma da camada de menor velocidade; a variação lateral de velocidade, entre 1 e 1,75 km de profundidade; e o conteúdo e distribuição das velocidade a partir de 1,75 km.

Finalmente, o modelo dos pontos espalhadores 3.21(a) caracteriza corretamente a maioria dos refletores do modelo Marmousi e supera algumas limitações do modelo 3.21(b), principalmente, em relação ao posicionamento dos refletores da parte esquerda.

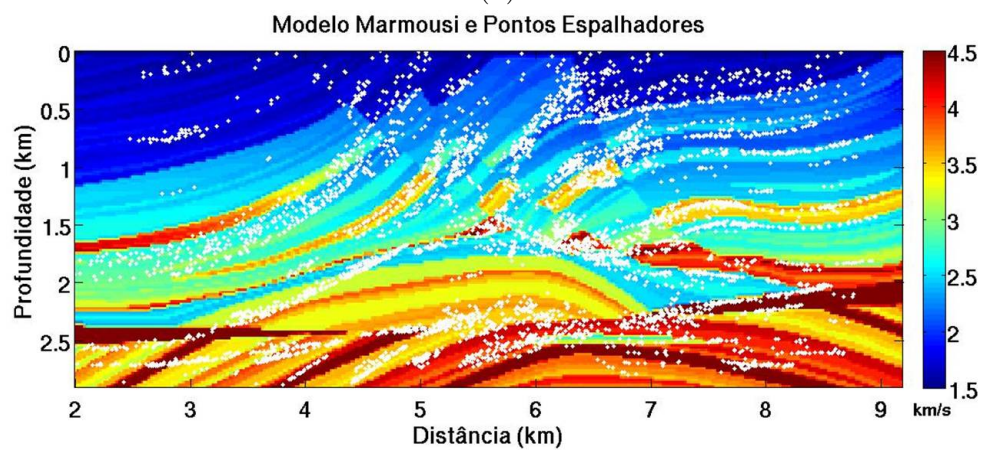
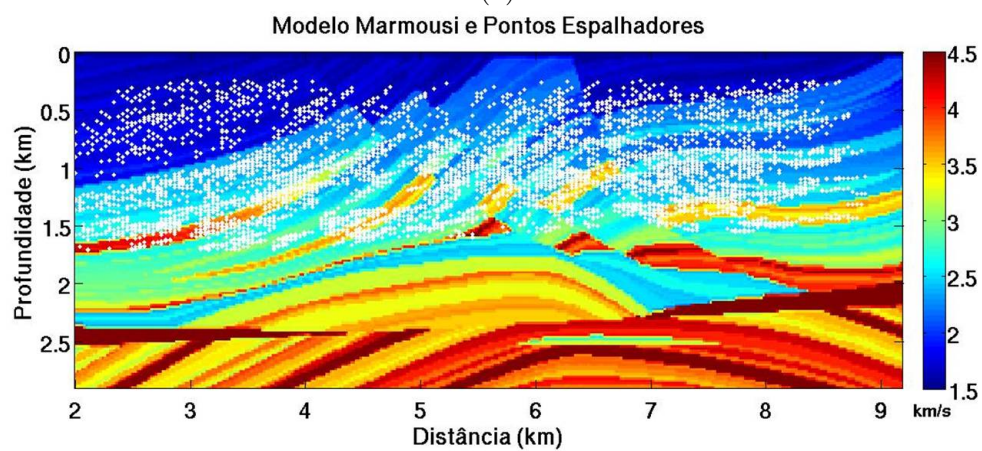
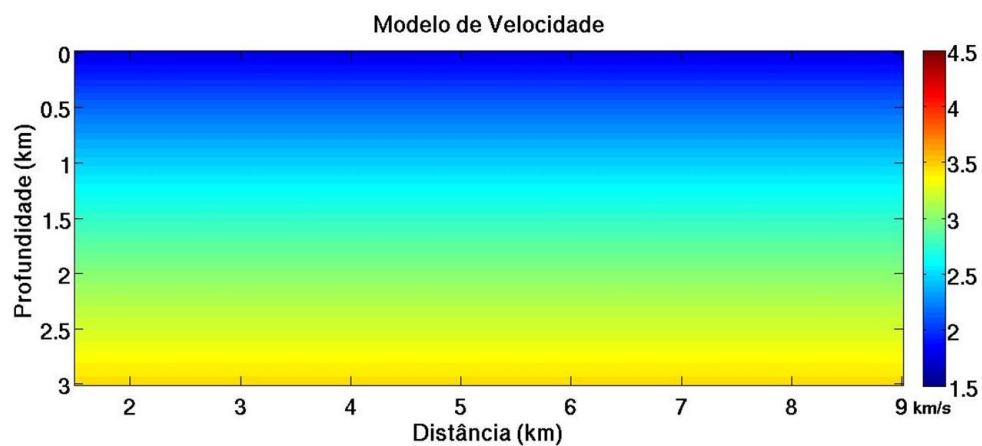


Figura 3.19: (a) Modelo inicial de velocidade com gradiente intermediário. (b) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado com a construção de um modelo homogêneo. (c) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado através da técnica de traçamento de raios

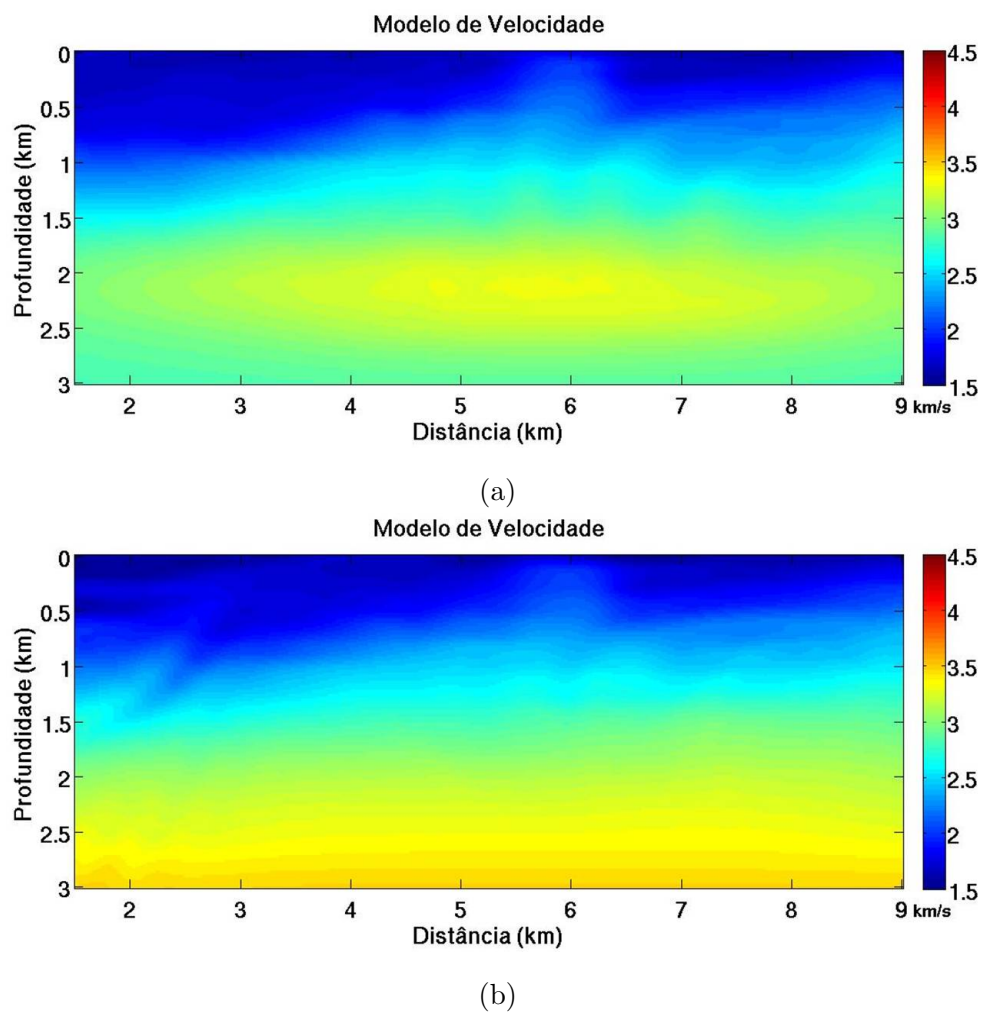
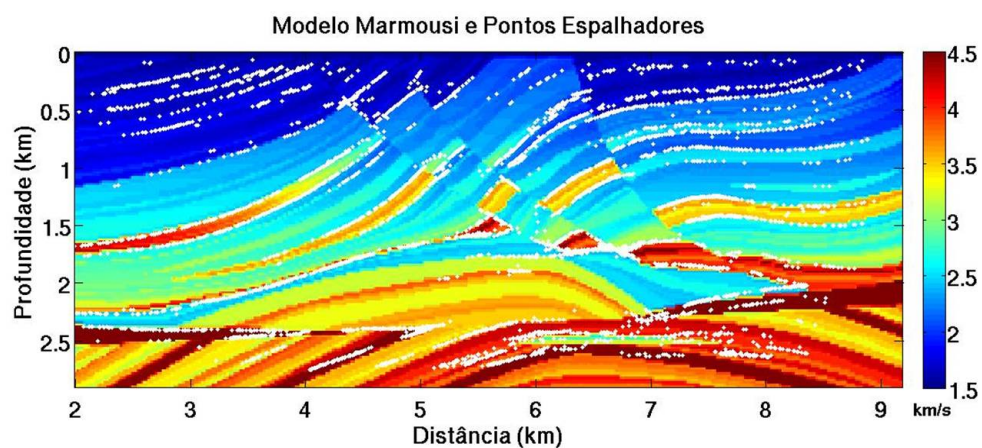
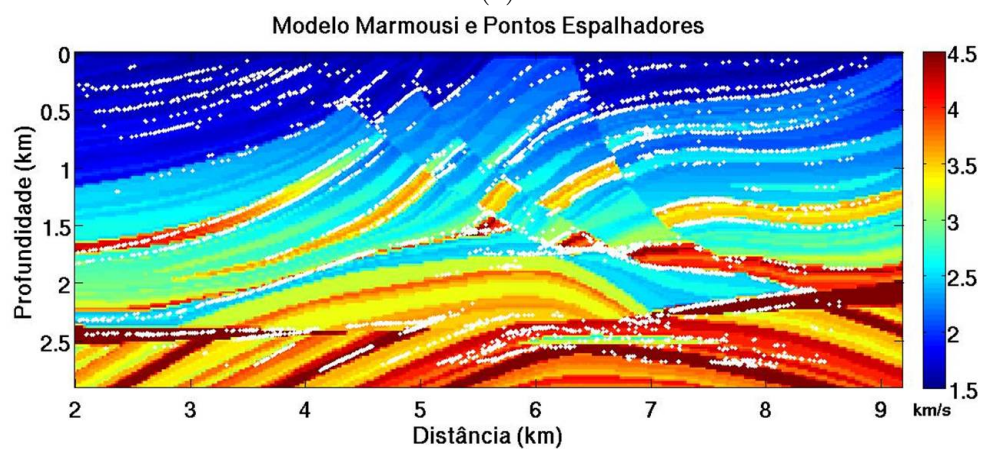


Figura 3.20: Modelos de velocidade obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).



(a)



(b)

Figura 3.21: Modelos dos pontos espalhadores obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).

3.3.2.3 Gradiente forte

O modelo inicial de velocidade com o maior gradiente foi testado nesta seção e seus valores de velocidade variam de 2,06 km/s, na superfície, a 4,03 km/s, a 3 km de profundidade, como mostra a Figura 3.22(a). As estratégias de obtenção dos parâmetros iniciais dos raios, a de construção de um modelo homogêneo e a de traçamento de raios, produziram os modelos dos pontos espalhadores iniciais das Figuras 3.22(b) e 3.22(c), respectivamente. Os melhores resultados da inversão utilizando a primeira técnica para obtenção do modelo inicial estão representados nas Figuras 3.23(a) e 3.24(a). Os modelos 3.23(b) e 3.24(b), por sua vez, são resultantes da inversão utilizando a estratégia de traçamento de raios.

Quanto ao ajuste de dados, as duas estratégias produziram valores satisfatórios para os desvios padrão. O melhor resultado foi obtido quando se utilizou da construção de um modelo homogêneo, para achar os parâmetros iniciais do raio. Para este caso, os desvios padrão da posição, da vagarosidade e do tempo de trânsito foram iguais a 0,309 m, a 0,0030 s/km e a 0,151 ms, respectivamente. Já os desvios padrão encontrados com a utilização da segunda estratégia foram equivalentes a 0,458 m, a 0,0043 s/km e a 0,22 ms.

Em relação aos modelos de velocidade gerados com os diferentes modelos iniciais de pontos espalhadores, observa-se que as Figuras 3.23(a) e 3.23(b) diferem bastante entre si, tanto pela forma e posição das camadas quanto pelos valores de velocidade encontrados em cada uma delas. Comparando o modelo 3.23(a) com o Marmousi suavizado, percebemos que há semelhanças até, aproximadamente, 1,75 km de profundidade. Nesta região, porém, algumas diferenças podem ser identificadas, principalmente em relação à reprodução das ondulações e da variação lateral de velocidade, presentes no modelo original, entre 1 e 1,5 km. Abaixo de 1,75 km o conteúdo de velocidades e a distribuição das mesmas é bastante diferente entre os dois modelos. Comparando, agora, o modelo 3.23(b) com o modelo Marmousi suavizado, percebemos que a maioria das formas e das posições das camadas diferem daquelas do modelo original. É importante ressaltar, entretanto, que a Figura 3.23(b) foi a única, entre todas as outras mostradas até agora, que apresentou valores de velocidade em torno de 4 km/s. Além disso, as ondulações que ocorrem entre 1 e 1,5 km de profundidade, apresentaram-se mais acentuadas do que em todos os outros modelos anteriores.

Finalmente, o modelo dos pontos espalhadores 3.24(a) caracteriza corretamente a maioria dos refletores do modelo Marmousi e supera algumas dificuldades do modelo 3.24(b), principalmente, em relação à recuperação da posição e da inclinação dos refletores, abaixo de 1,5 km de profundidade.

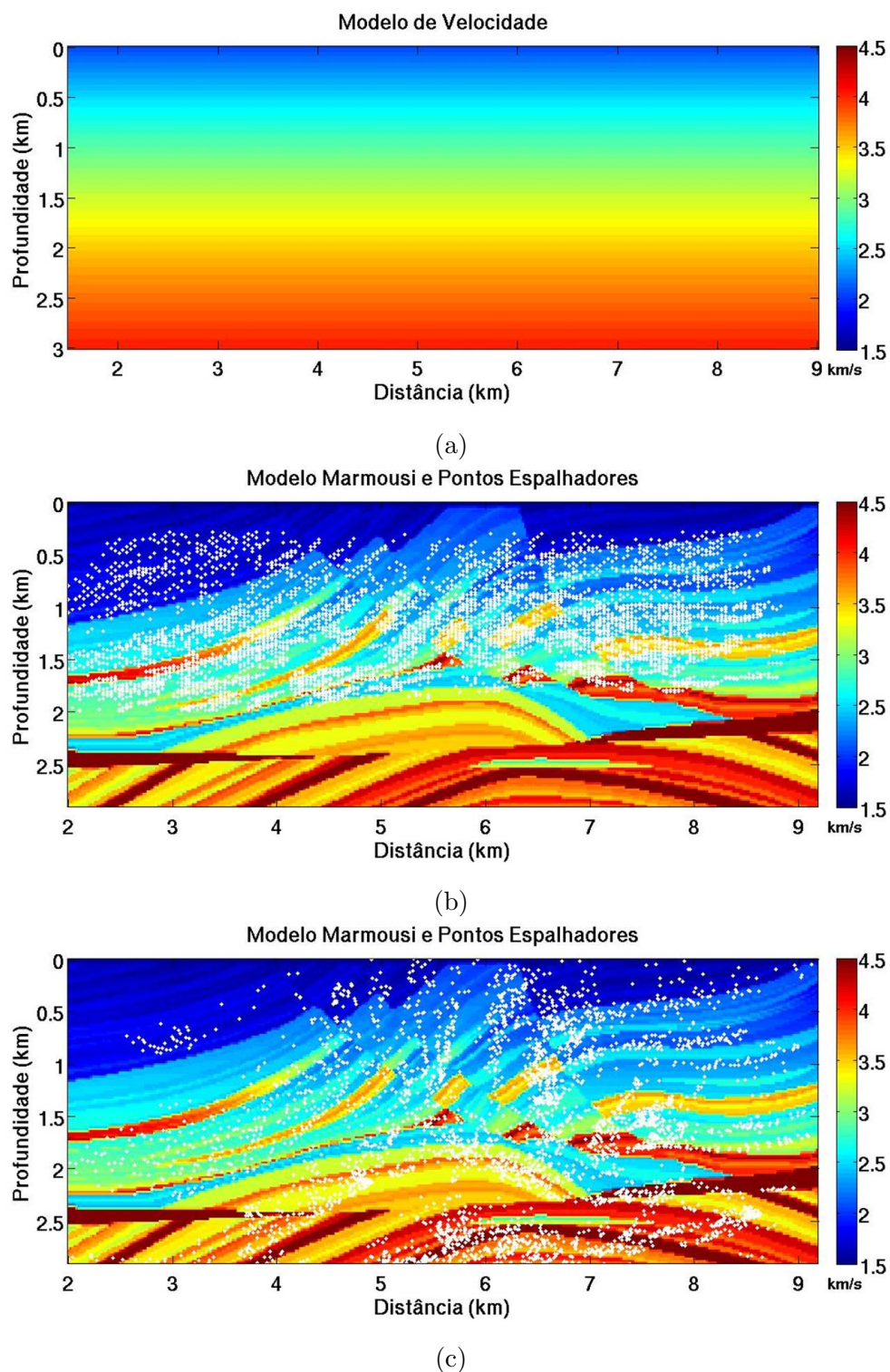
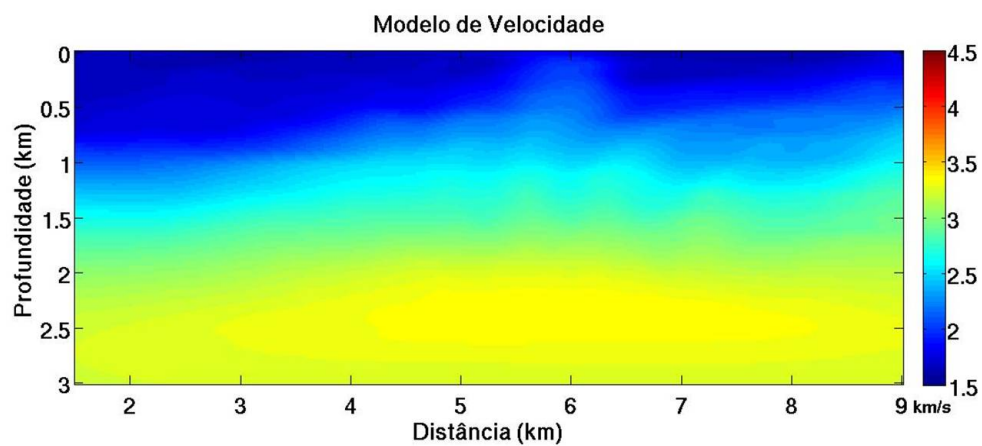
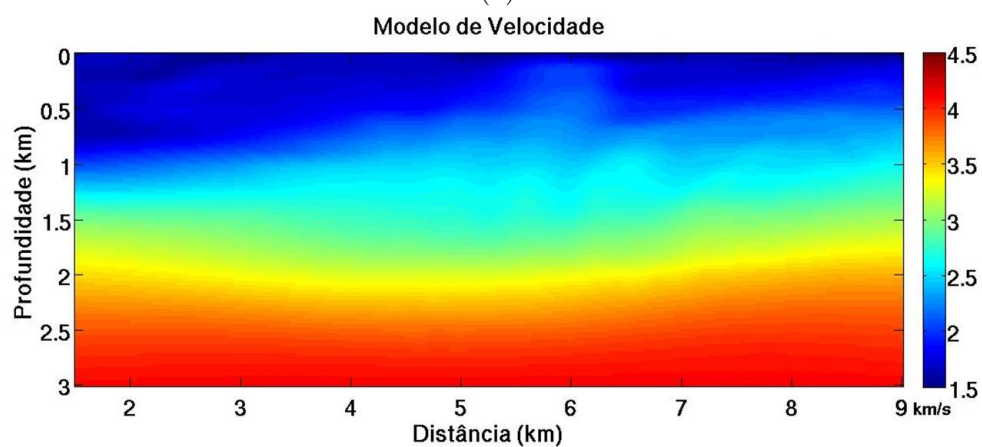


Figura 3.22: (a) Modelo inicial de velocidade com gradiente forte. (b) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado com a construção de um modelo homogêneo. (c) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado através da técnica de traçamento de raios

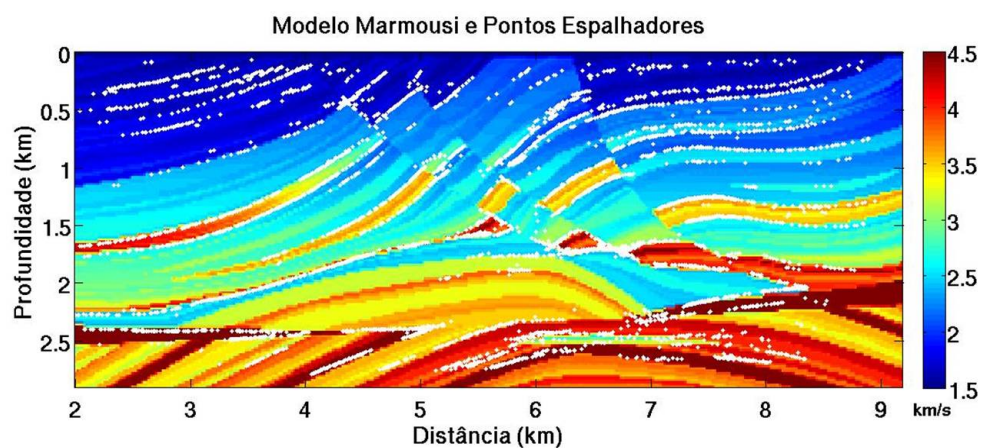


(a)

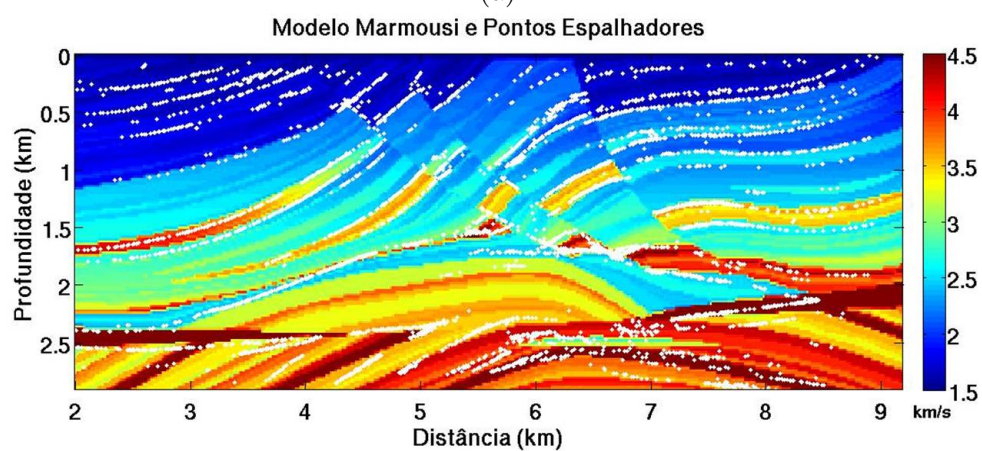


(b)

Figura 3.23: Modelos de velocidade obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).



(a)



(b)

Figura 3.24: Modelos dos pontos espalhadores obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).

3.3.2.4 Análise dos resultados

As duas estratégias de obtenção dos parâmetros iniciais dos raios, a de construção de um modelo homogêneo e a de traçamento de raios, produziram ajustes satisfatórios dos dados, para todos os testes. A Figura 3.25 mostra uma tabela com o resumo dos ajustes dos testes da seção 3.3.2. A estratégia desenvolvida neste trabalho foi responsável pelos melhores ajustes nos testes com o modelo de gradiente mais fraco (seção 3.3.2.1). Nas seções 3.3.2.2 e 3.3.2.3, a construção do modelo homogêneo produziu melhores resultados para os desvios padrão. Ainda sobre esta técnica, observou-se que quanto mais forte o gradiente do modelo de velocidade inicial, melhores foram os ajustes encontrados.

Em relação aos modelos de velocidade, observou-se que, quanto maior o gradiente, maior a diferença entre os modelos gerados com estratégias diferentes. Apesar disto, foi possível identificar uma característica em comum nos modelos resultantes das duas técnicas: à medida em que se aumenta o gradiente do modelo inicial, percebe-se um aumento dos valores de velocidade presentes a partir de 2 km de profundidade.

Quanto aos modelos dos pontos espalhadores obtidos com a inversão, a técnica do modelo homogêneo proporciona a melhor recuperação dos refletores, nas seções 3.3.2.2 e 3.3.2.3. A outra estratégia é a responsável pelos melhores resultados da seção 3.3.2.1.

Modelo inicial de velocidade	Parâmetros iniciais dos raios	Resíduo dos dados	Desvios padrão		
			Posição (m)	Vagarosidade (s/km)	Tempo de Trânsito (ms)
Gradiente fraco	Modelo homogêneo	0,00197	0,323	0,00365	0,154
	Traçamento de raios	0,00183	0,326	0,00339	0,155
Gradiente médio	Modelo homogêneo	0,00177	0,313	0,00328	0,151
	Traçamento de raios	0,01393	0,932	0,00640	0,384
Gradiente forte	Modelo homogêneo	0,00165	0,309	0,00305	0,151
	Traçamento de raios	0,00232	0,458	0,00429	0,218

Figura 3.25: Tabela com os ajustes encontrados nas seções 3.3.2.1, 3.3.2.2 e 3.3.2.3

3.3.3 Modelo convertido em profundidade

Nesta seção, serão apresentados os resultados de inversões feitas com 2 modelos iniciais de velocidade, provenientes da conversão tempo-profundidade de um mesmo modelo, mas com diferentes níveis de suavização: forte e médio. Para cada modelo inicial de velocidade, as duas estratégias de obtenção dos parâmetros iniciais dos raios serão testadas e comparadas.

3.3.3.1 Suavização forte

O modelo inicial de velocidade, utilizado nesta seção, está representado na Figura 3.26(a) e corresponde ao modelo com maior suavização. Os modelos iniciais dos pontos espalhadores, gerados a partir das estratégias do modelo homogêneo e do traçamento de raios, são apresentados nas Figuras 3.26(b) e 3.26(c), respectivamente. Os melhores resultados da inversão utilizando a primeira estratégia estão representados nas Figuras 3.27(a) e 3.28(a). As Figuras 3.27(b) e 3.28(b), por sua vez, são resultantes da inversão utilizando a estratégia de traçamento de raios.

O ajuste de dados encontrado para as duas estratégias foi satisfatório. O menor resíduo dos dados ocorreu com a utilização da segunda estratégia, que resultou em desvios padrão da posição, da vagarosidade e do tempo de trânsito iguais a 0,315 m, a 0,0033 s/km e a 0,151 ms, respectivamente. Quanto aos desvios padrão gerados com a construção de um modelo homogêneo, foram obtidos os valores de 0,32 m, 0,0036 s/km e 0,153 ms.

Os modelos de velocidade obtidos com as duas estratégias são muito parecidos entre si, consequência da grande proximidade entre seus valores de desvio padrão. Apesar disto, pode-se observar uma diferença bastante nítida entre os modelos de velocidade resultantes: a partir de, aproximadamente, 2,5 km de profundidade, o modelo 3.27(a) apresenta uma faixa de velocidade com valor aproximado de 2,5 km/s, o que não ocorre na Figura 3.27(b). Ambas as estratégias geraram modelos semelhantes ao modelo Marmousi suavizado, até, aproximadamente 1,75 km de profundidade. A partir desta profundidade, encontra-se a grande limitação dos modelos resultantes da inversão: a incapacidade de reproduzir as altas velocidades do modelo original.

Os modelos 3.28(a) e 3.28(b), contendo os pontos espalhadores, são praticamente idênticos e conseguem reproduzir boa parte dos refletores do modelo Marmousi. O modelo 3.28(b), porém, consegue recuperar melhor alguns refletores, como os da parte esquerda da Figura, localizados a partir de 2,25 km de profundidade, aproximadamente.

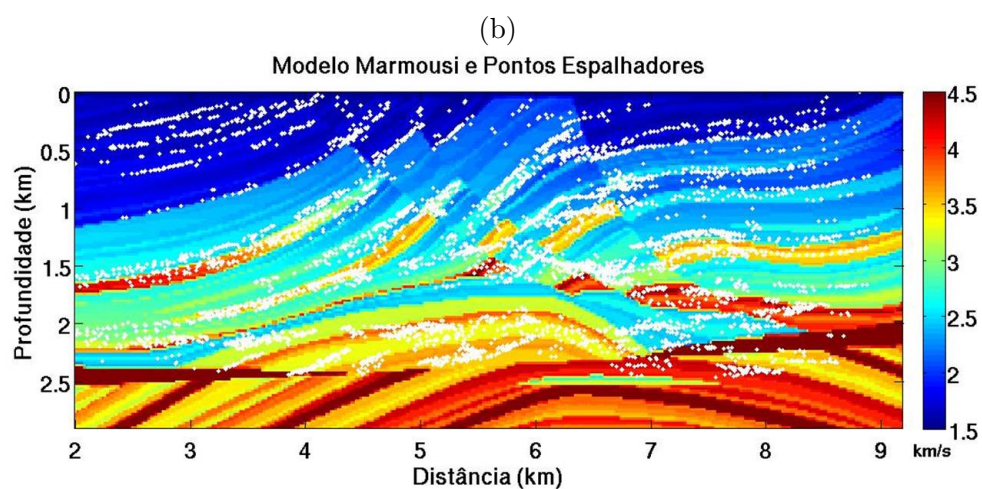
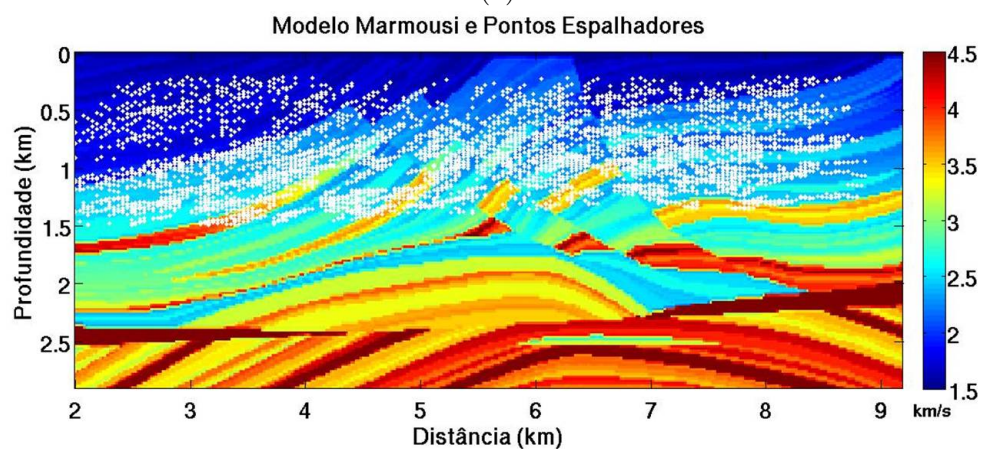
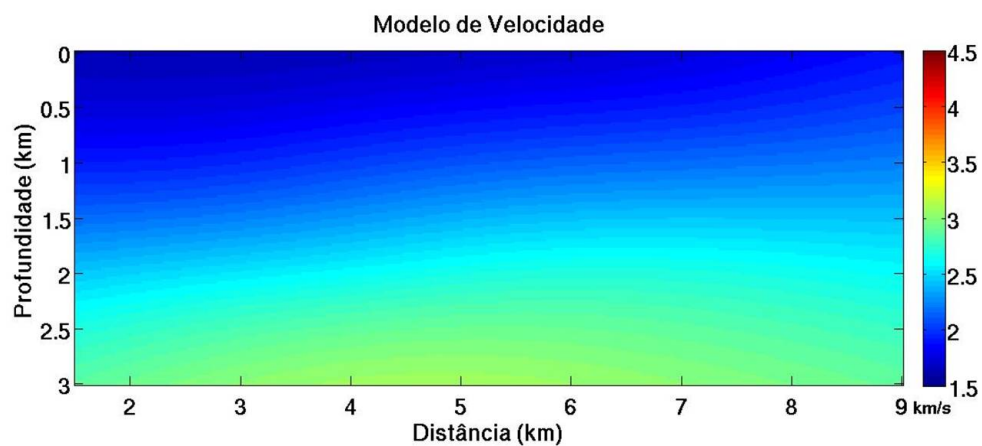
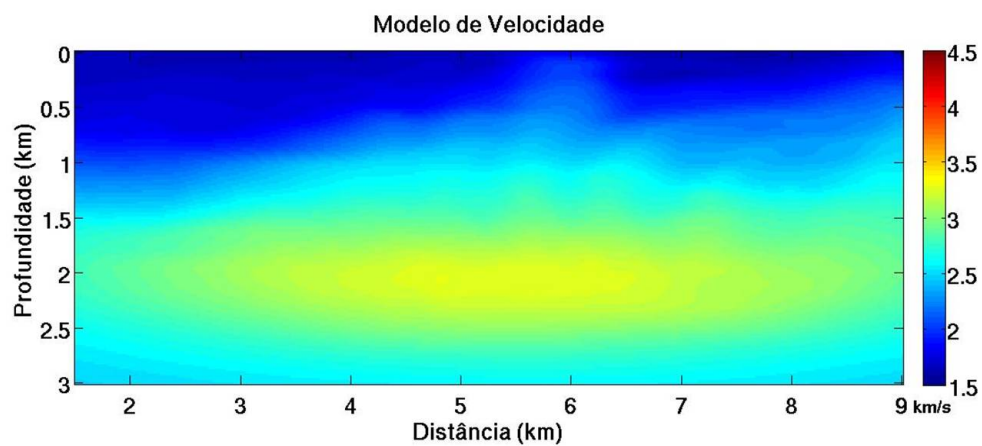
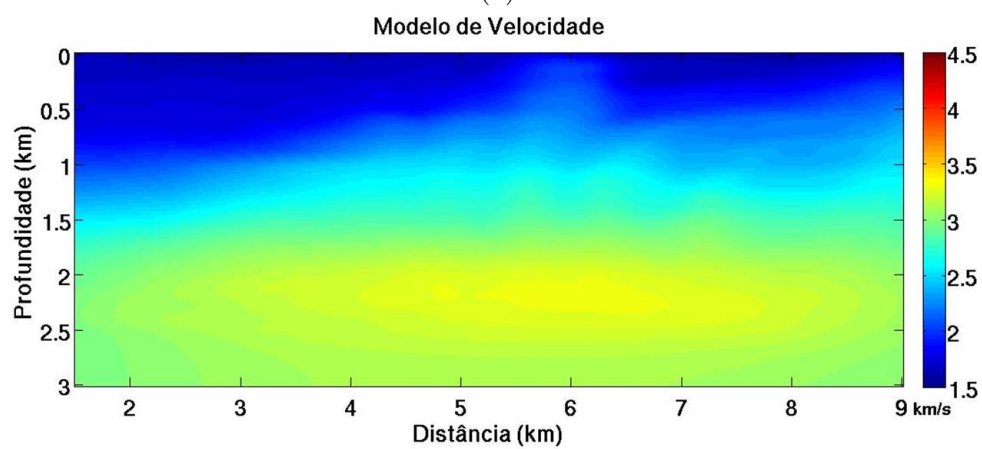


Figura 3.26: (a) Modelo inicial de velocidade com suavização forte. (b) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado com a construção de um modelo homogêneo. (c) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado através da técnica de traçamento de raios

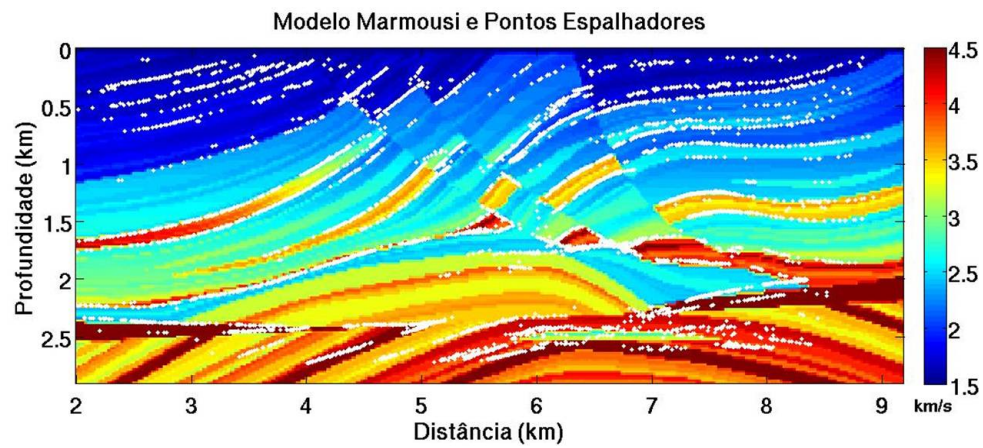


(a)

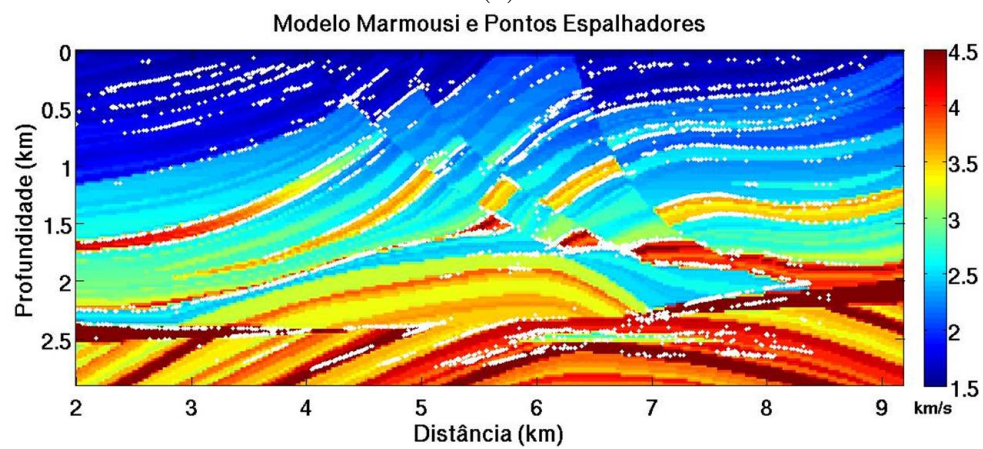


(b)

Figura 3.27: Modelos de velocidade obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).



(a)



(b)

Figura 3.28: Modelos dos pontos espalhadores obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).

3.3.3.2 Suavização média

Nesta seção, todos os testes foram feitos tomando-se o modelo 3.29(a) como modelo inicial de velocidade. Este foi proveniente da conversão tempo-profundidade, do mesmo modelo em tempo que originou o modelo 3.26(a), mas com suavização um pouco mais fraca. As Figuras 3.29(b) e 3.29(c) representam os modelos iniciais dos pontos espalhadores, gerados a partir das estratégias do modelo homogêneo e do traçamento de raios, respectivamente. Os melhores resultados encontrados com a utilização da primeira estratégia estão representados nas Figuras 3.30(a) e 3.31(a). As Figuras 3.30(b) e 3.31(b), por sua vez, são resultantes da inversão utilizando a estratégia de traçamento de raios.

Para as duas estratégias de obtenção dos parâmetros iniciais dos raios, foi possível obter ajustes satisfatórios para os dados. O melhor resultado foi alcançado com o traçamento de raios, que gerou desvios padrão iguais a 0,312 m (posição), a 0,0031 s/km (vagarosidade) e a 0,150 ms (tempo de trânsito). Os desvios originados com a construção de um modelo homogêneo foram equivalentes a 0,318 m, a 0,0034 s/km e a 0,152 ms.

Assim como na seção anterior, as duas estratégias geraram valores de desvios padrão bem próximos e modelos de velocidade similares, até 2 km de profundidade. A partir desta profundidade, os modelos 3.30(a) e 3.30(b) diferem entre si, tanto pelo conteúdo de velocidades quanto pela distribuição das mesmas. Também semelhante à seção anterior, ambas as estratégias geraram modelos bem próximos ao modelo Marmousi suavizado, até, aproximadamente 1,75 km de profundidade. A partir desta profundidade, porém, os modelos resultantes da inversão não conseguem reproduzir as altas velocidades do modelo original.

Quanto aos modelos com os pontos espalhadores, as Figuras 3.31(a) e 3.31(b) caracterizam corretamente a maioria dos refletores. O modelo 3.31(b), porém, supera algumas dificuldades do modelo 3.31(a) em reproduzir a inclinação de alguns refletores abaixo de 2,25 km.

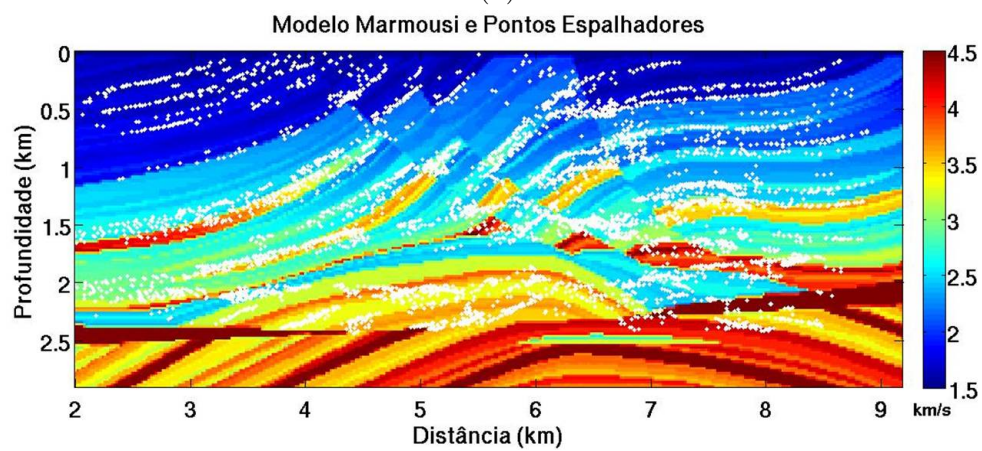
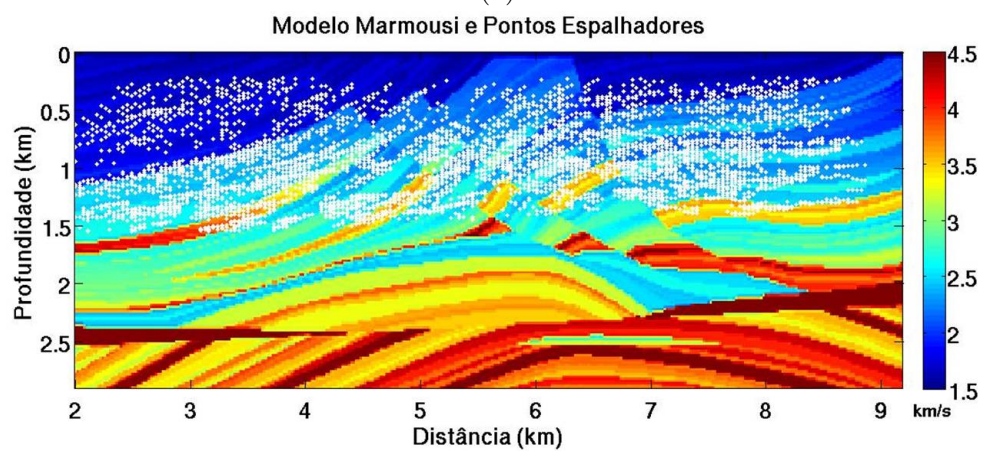
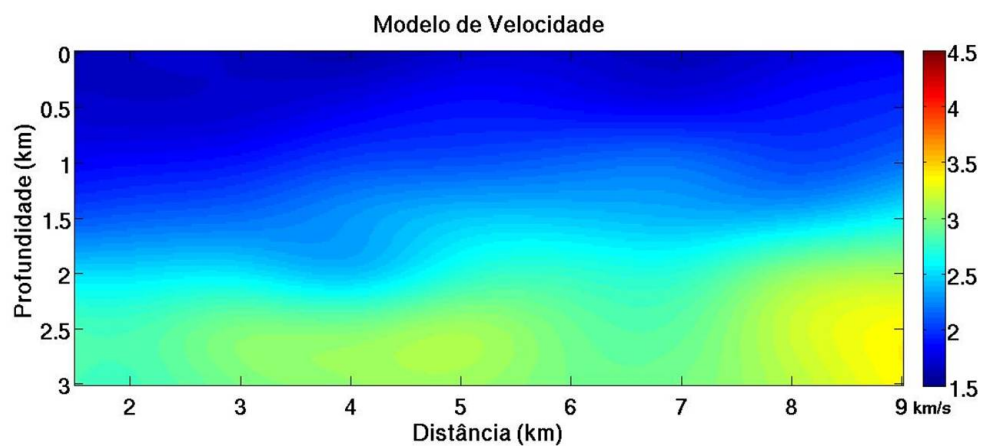
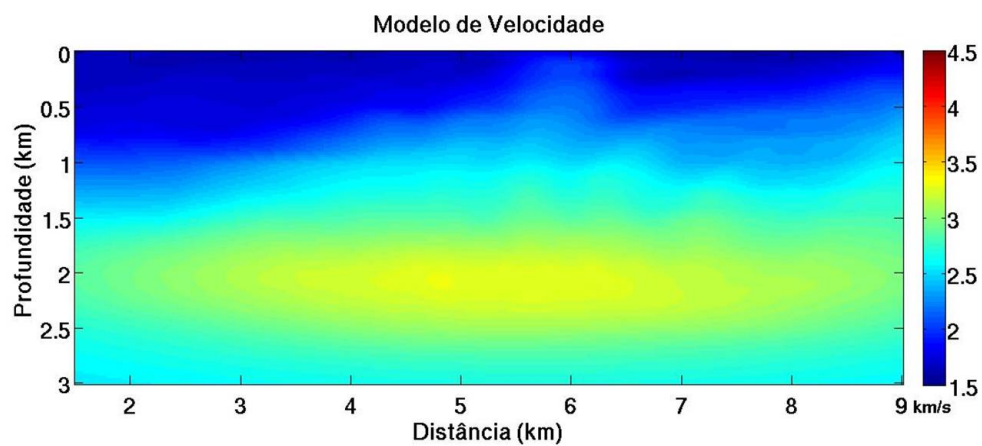
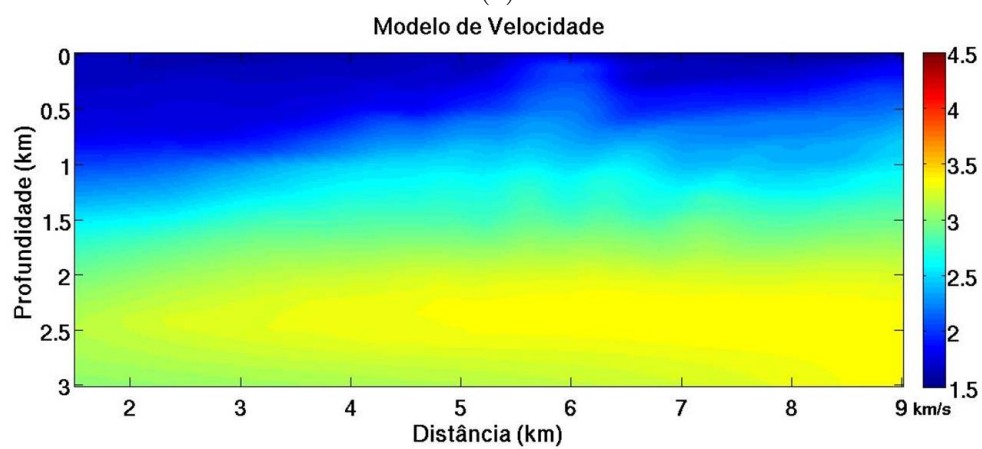


Figura 3.29: (a) Modelo inicial de velocidade com suavização média. (b) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado com a construção de um modelo homogêneo. (c) Modelo inicial dos pontos espalhadores gerado através da técnica de traçamento de raios

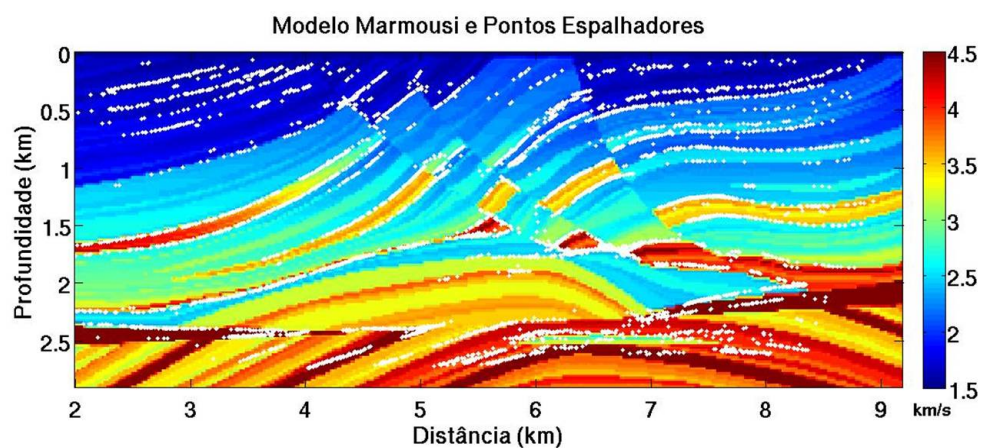


(a)

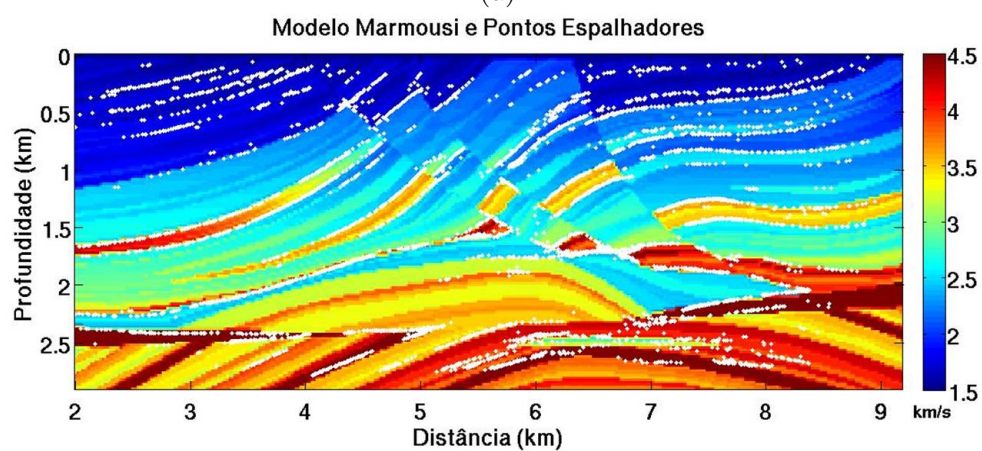


(b)

Figura 3.30: Modelos de velocidade obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).



(a)



(b)

Figura 3.31: Modelos dos pontos espalhadores obtidos com a estratégia do modelo homogêneo (a) e com a estratégia do traçamento de raios (b).

3.3.3.3 Análise dos resultados

Tanto na seção 3.3.3.1 quanto na 3.3.3.2, a utilização da nova técnica para geração dos parâmetros iniciais dos raios produziu melhores resultados do que a estratégia do modelo homogêneo (ver Figura 3.32). Para as duas estratégias citadas, os testes com o modelo inicial de menor suavização tiveram melhores ajustes do que aqueles da seção 3.3.3.1.

Quanto aos modelos de velocidade gerados, quando usamos a técnica do modelo homogêneo, tanto o modelo 3.27(a) quanto o modelo 3.30(a) apresentam uma zona de baixa velocidade ao final do modelo, diferindo daqueles gerados com o traçamento de raios.

Finalmente, em relação aos pontos espalhadores, a nova estratégia desenvolvida apresentou melhor recuperação dos refletores mais profundos.

Modelo inicial de velocidade	Parâmetros iniciais dos raios	Resíduo dos dados	Desvios padrão		
			Posição (m)	Vagarosidade (s/km)	Tempo de Trânsito (ms)
Suavização forte	Modelo homogêneo	0,00192	0,320	0,00357	0,153
	Traçamento de raios	0,00176	0,315	0,00327	0,151
Suavização média	Modelo homogêneo	0,00186	0,318	0,00345	0,152
	Traçamento de raios	0,00168	0,312	0,00311	0,150

Figura 3.32: Tabela com os ajustes encontrados nas seções 3.3.3.1 e 3.3.3.2

4 CONCLUSÃO

Os primeiros testes deste trabalho (seção 3.3.1) avaliaram diversas combinações de ponderação dos dados, a fim de verificar a influência desta, nos resultados das inversões, e de definir uma ponderação adequada para ser utilizada nas seções posteriores. Inicialmente, foram atribuídos valores iguais, variando de 1 a 0.005, para os pesos relativos à posição, à vagarosidade e ao tempo de trânsito. Em seguida, foi avaliada a influência da ponderação de cada dado no resultado da estereotomografia. Para isto, variamos um peso de cada vez, atribuindo um valor igual a todos os demais. Nos testes individuais dos pesos, observou-se que os desvios padrão da posição e do tempo de trânsito diminuíram conforme reduzimos os pesos correspondentes. O mesmo não ocorreu para o desvio padrão da vagarosidade, provavelmente, pelo fato de esta ser a propriedade com mais incertezas na seleção de dados.

Como nenhum dos testes produziu ajuste satisfatórios, duas últimas ponderações foram testadas, baseadas nos resultados anteriores. A primeira ponderação utilizou os valores que produziram os menores resíduos nas seções 3.3.1.2-3.3.1.4, enquanto que a segunda combinou os valores que geraram os melhores ajustes individuais dos dados, isto é, os valores dos pesos que obtiveram os menores desvios padrão relativos à sua propriedade. Apesar de ambas as ponderações terem obtido ajustes satisfatórios para todos os dados, a segunda mostrou qualidade superior tanto no ajuste de dados quanto na recuperação do modelo de velocidade e dos refletores do Marmousi, e, portanto, foi utilizada nas seções seguintes.

É válido ressaltar que a escolha da melhor ponderação (seções 3.3.1.5) baseou-se em inversões feitas a partir de um mesmo modelo inicial de velocidade e dos mesmos parâmetros iniciais dos raios. Além disso, todas as inversões foram referentes ao mesmo conjunto de dados (*picks*). A ponderação utilizada neste trabalho, não deve, portanto, ser generalizada como a ponderação ideal para todo e qualquer tipo de modelo inicial de referência e de dados de entrada. Como os pesos dos dados devem ser fornecidos pelo usuário como dados de entrada, sugerimos que um estudo mais aprofundado sobre a ponderação seja feito, de maneira a automatizar as escolhas dos pesos, evitando que o usuário faça testes exaustivos, até encontrar uma ponderação adequada.

O segundo tipo de testes deste trabalho teve como objetivo avaliar a influência do modelo de inicial, no resultado das inversões. Para isto, foram testados diferentes modelos iniciais

de velocidade (modelos com gradiente vertical e modelos provenientes da conversão tempo-profundidade), assim como diferentes parâmetros iniciais dos raios, gerados a partir da técnica original do programa e daquela implementada neste trabalho. Desta forma, foi possível analisar a eficiência da nova estratégia de obtenção dos parâmetros iniciais dos raios.

Para as inversões que utilizaram modelos com gradiente vertical, três modelos foram testados, com gradientes de velocidade fraco, médio e forte. Para todos os gradientes, as duas técnicas de obtenção dos parâmetros iniciais dos raios produziram ajustes satisfatórios dos dados. A estratégia de traçamento de raios foi responsável pelos melhores ajustes, somente, nos testes com o modelo de gradiente fraco. Algumas tendências foram observadas com o aumento do gradiente: melhora dos ajustes encontrados com a utilização da técnica do modelo homogêneo; aumento dos valores de velocidade, a partir de 2 km de profundidade, nos modelos resultantes das duas estratégias; aumento das diferenças entre modelos de velocidade gerados com estratégias diferentes. Finalmente, quanto aos pontos espalhadores, a técnica do modelo homogêneo proporcionou melhor recuperação dos refletores para os gradientes médio e forte. A técnica do traçamento de raios foi responsável pelos melhores resultados para o modelo com gradiente fraco.

Além de modelos com gradiente, mais dois modelos, provenientes da conversão tempo-profundidade, foram testados como modelos iniciais de velocidade: um com suavização forte e outro com suavização média. A utilização das duas estratégias de obtenção dos parâmetros iniciais dos raios produziram ajustes satisfatórios dos dados. Também para as duas estratégias, o modelo com menor suavização gerou melhores ajustes em relação ao modelo fortemente suavizado. Para os dois modelos de velocidade iniciais, os melhores resultados foram obtidos com a estratégia do traçamento de raios. Consequentemente, esta estratégia também foi a responsável pela melhor recuperação do modelo de velocidade e dos refletores do modelo Marmousi.

Em quase todos os modelos de velocidade resultantes dos testes do modelo inicial, observou-se que as semelhanças entre estes e o modelo Marmousi ocorrem, principalmente, até 1.75 km de profundidade. Além disso, verificou-se que os modelos resultantes das inversões não conseguem reproduzir as altas velocidades do modelo original, nas regiões mais profundas. A explicação destes fatos está na cobertura dos raios, pois, com a profundidade, existe maior dificuldade de selecionar os dados, proporcionando baixa cobertura na área. Esta mesma explicação pode ser dada para a melhor recuperação dos refletores da parte superior do modelo. Na parte inferior, onde ocorre menor cobertura, é também onde acontecem as maiores dificuldades no posicionamento dos pontos.

Conclui-se, portanto, que o modelo inicial tem grande influência nos resultados das inversões, tanto em termos de ajustes dos dados, quanto em termos de recuperação do modelo de velocidade e dos refletores do modelo original. A nova estratégia desenvolvida não só apresentou valores satisfatórios de desvios padrão em todos os testes, como superou os resultados obtidos com a construção do modelo homogêneo, na maioria dos testes realizados neste trabalho. No entanto, é válido ressaltar, que a eficiência de cada estratégia de obtenção dos pontos espalhadores depende, também, do modelo inicial de velocidade. Sugerimos que mais testes sejam feitos, utilizando outros modelos iniciais de velocidade e outros dados de entrada, para um estudo mais aprofundado da eficiência da nova estratégia desenvolvida neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AKI, K.; P., R. *Quantitative seismology: theory and methods*. [S.l.]: Freeman, W. H. and company, 1980.
- BARBOSA, B. S. S. *Análise de sensibilidade para estereotomografia em meios elípticos e anelípticos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, 2005.
- BILLETTE, F. et al. Practical aspects and applications of 2d stereotomography. *Geophysics*, v. 68, n. 3, p. 1008–1021, 2003.
- ČERVENÝ, V. *Seismic Ray Theory*. [S.l.]: Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- COSTA, J. C. et al. Regularization in slope tomography. *Geophysics*, v. 73, n. 5, p. VE39–VE47, 2008.
- DELPRAT-JANNAUD, F.; LAILLY, P. Ill-posed and well-posed formulations of the reflection travel time tomography problem. *Journal of Geophysical Research*, v. 98, p. 6589–6605, 1993.
- FARRA, V.; MADARIAGA, R. Seismic waveform modeling in heterogeneous media by ray perturbation theory. *Journal of Geophysical Research*, n. 92, p. 2697–2712, 1987.
- FOMEL, S. Velocity-independent time-domain seismic imaging using local event slopes. *Geophysics*, v. 72, n. 3, p. S139–S147, 2007.
- GOLDSTEIN, H. *Classical Mechanics*. [S.l.]: Addison Wesley series in physics, 1980.
- LAMBARÉ, G. Stereotomography. *Geophysics*, v. 73, n. 5, p. VE 25–VE34, 2008.
- LAMBARÉ, G.; ALERINI, M.; PODVIN, P. Stereotomography picking in practice. *SEG Int'l Exposition and 74th Annual Meeting*, 2004.
- LAMBARÉ, G. et al. Non-linear tomography for time imaging. *SEG Houston 2009 International Exposition and Annual Meeting*, 2009.
- MELO, L. A. V. *Regularização em estereotomografia*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, 2009.
- MENKE, W. *Geophysical data analysis: discrete inverse theory*. [S.l.]: Academic Press (International Geophysics), 1989.
- PAIGE, C. C.; SAUNDERS, M. A. Lsq: an algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Transactions on Mathematical Software*, v. 8, n. 3, p. 43–71, 2004.

TARANTOLA, A. *Inverse Problem Theory and Methods for Parameter Estimation*. [S.l.]: SIAM, 2005.

VERSTEEG, R. The marmousi experience: Velocity model determination on a synthetic complex data set. *The Leading Edge*, p. 927–936, Setembro 1994.

YILMAZ, O. *Seismic data analysis*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2001.