



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

GUSTAVO ROCHA GOMES

**ANÁLISE DE VELOCIDADE DE
MIGRAÇÃO EM PROFUNDIDADE
MEDIANTE CONTINUAÇÃO DE
VELOCIDADE EM FAMÍLIAS DE
PONTO IMAGEM COMUM**

CAMPINAS

2016

GUSTAVO ROCHA GOMES

**ANÁLISE DE VELOCIDADE DE MIGRAÇÃO EM
PROFUNDIDADE MEDIANTE CONTINUAÇÃO
DE VELOCIDADE EM FAMÍLIAS DE PONTO
IMAGEM COMUM**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo, na área de Reservatórios e Gestão.

ORIENTADOR: PROF. DR. JÖRG DIETRICH WILHELM SCHLEICHER

COORIENTADORA: PROF. DR. MARIA AMÉLIA NOVAIS SCHLEICHER

Este exemplar corresponde a versão final
Dissertação defendida pelo aluno Gustavo
Rocha Gomes e orientada pelo Prof. Dr.
Jörg Dietrich Wilhelm Schleicher.



Assinatura do Orientador

Campinas
2016

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

G585a Gomes, Gustavo Rocha, 1974-
Análise de velocidade de migração em profundidade mediante
continuação de velocidade em famílias de ponto imagem comum / Gustavo
Rocha Gomes. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Jörg Dietrich Wilhelm Schleicher.
Coorientador: Maria Amélia Novais Schleicher.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências.

1. Geofísica - Processamento de dados. 2. Velocidade. 3. Inversão
(Geofísica). 4. Tomografia sísmica. 5. Método sísmico de reflexão. I.
Schleicher, Jörg Dietrich Wilhelm, 1964-. II. Schleicher, Maria Amélia
Novais, 1967-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Depth-migration velocity analysis by velocity continuation of
common-image gathers

Palavras-chave em inglês:

Geophysics - Data processing

Velocity

Inversion (Geophysics)

Seismic tomography

Seismic reflection method

Área de concentração: Reservatórios e Gestão

Titulação: Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo

Banca examinadora:

Jörg Dietrich Wilhelm Schleicher [Orientador]

Eduardo Filpo Ferreira da Silva

Jessé Carvalho Costa

Data de defesa: 11-07-2016

Programa de Pós-Graduação: Ciências e Engenharia de Petróleo

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**ANÁLISE DE VELOCIDADE DE MIGRAÇÃO EM
PROFUNDIDADE MEDIANTE CONTINUAÇÃO
DE VELOCIDADE EM FAMÍLIAS DE PONTO
IMAGEM COMUM**

Autor: Gustavo Rocha Gomes

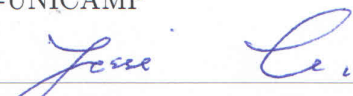
Orientador: Prof. Dr. Jörg Dietrich Wilhelm Schleicher

Coorientadora: Prof. Dr. Maria Amélia Novais Schleicher

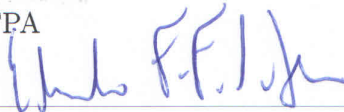
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Jörg Dietrich Wilhelm Schleicher
IMECC-UNICAMP



Prof. Dr. Jessé Carvalho Costa
CPGF-UFFA



Dr. Eduardo Filpo Ferreira da Silva
PETROBRAS

Campinas, 11 de Julho de 2016

Dedico este trabalho à minha família

Agradecimentos

Inicialmente, agradecemos aos membros da banca examinadora: Prof. Jörg Schleicher, Dr. Eduardo Filpo e Prof. Jessé Costa cujos questionamentos e orientações durante a qualificação e sessão pública contribuíram ao trabalho desenvolvido.

Ao Prof. Jörg Schleicher e à Prof. Amélia Novais que nos introduziu no tema, pelo incentivo e pressão para que o trabalho chegasse ao bom termo.

Ao Gerente da Petrobras Fábio Rodamilans Bastos, pelo apoio e incentivo.

Às instituições CNPQ, Petrobras e Consórcio WIT que dando apoio ao Grupo de Geofísica Computacional do IMECC-UNICAMP acabaram por contribuir direta ou indiretamente com este trabalho.

Aos professores Lúcio Tunes e Ricardo Biloti pela dedicação e ensinamentos.

Ao colega da Petrobras Alan Souza por ter contribuído na implementação de códigos computacionais, inclusive tornando-os mais ágeis.

A Alcides e Samuel pelo apoio em informática.

Ao colega Henrique dos Santos por dispor do código de continuação no CIG em que baseamos para gerar o código principal deste trabalho.

Aos colegas de curso: Alexandre Camargo, Daniela, Diego, Marco Salcedo, Otávio, Paulo Finardi e Yuri pela convicência e discussões.

À Petrobras, pela oportunidade e financiamento para realização deste trabalho.

Resumo

Neste Trabalho foi implementado um método de continuação da imagem no domínio das Famílias de Ponto Imagem Comum (CIG, acrônimo de Common Image Gather) para aplicação na migração em profundidade. A partir do conceito de Moveout Residual (RMO) foi desenvolvida uma rotina para análise de velocidade. Este modo de análise de velocidade permite construir modelos de velocidade para migrar em profundidade partindo de um modelo inicial simples.

Inicialmente é apresentado (i) o conceito sobre onda imagem, depois (ii) a construção do CIG, (iii) uma abordagem para obter a Equação Diferencial Parcial (EDP) de continuação da imagem, (iv) a obtenção da EDP de continuação da imagem no CIG segundo esta abordagem, (v) a solução desta EDP através do método de diferenças finitas e por fim (vi) o mecanismo de análise de velocidade e construção do modelo. O programa implementado foi testado mediante aplicação em dados sintéticos 2D: um dado sintético gerado a partir de um modelo de três interfaces e o dado do Marmousoft.

Esta técnica de análise de velocidades permite construir modelos de velocidade 2D para migração em profundidade partindo de um modelo inicial simples. É demonstrado a capacidade do método de construir modelos aceitáveis em profundidade sem a necessidade de informação a priori. A técnica pode ser empregada para reduzir o risco no processo exploratório através da geração expedita de imagens aceitáveis em profundidade.

Palavras-chave: Migração, Profundidade, Imagem, Exploração, *Moveout* Residual, Análise de velocidade.

Abstract

In this work we implemented an image continuation technique in the Common Image Gather (CIG) domain for application in depth migration. By means of the concept of residual-moveout (RMO) analysis, we develop a routine for velocity analysis. This velocity-analysis tool allows to build velocity models to migrate in depth starting from a simple initial model.

We present (i) the concept of image wave, (ii) the construction of CIGs, (iii) an approach for Partial Differential Equation (PDE) of image continuation, (iv) obtaining PDE of image continuation in CIG according to this approach, (v) the solution of this PDE by the method of finite differences and finally (vi) a velocity-analysis tool and its application for model building. The implemented program was tested by applying to 2D synthetic data: a synthetic dataset corresponding to model of three interfaces and the Marmousoft data.

This velocity-analysis tool allows to build 2D velocity models to migrate in depth starting from a simple initial model. We demonstrate the method's ability to construct acceptable models in depth without the need of prior information. The technique can be employed to reduce the risk in the exploration process by generating quickly acceptable depth images.

Keywords: Migration, Depth, Image, Exploration, Residual-moveout, Velocity-analysis.

Índice

Agradecimentos	6
Resumo	7
Abstract	8
Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas	14
1 Introdução	15
2 Fundamentação Teórica	18
2.1 Conceito de Onda Imagem	18
2.2 O Domínio CIG	19
2.3 A Pedra no Lago: o Iconal, a Equação Iconal e a Equação da Onda . . .	20
3 Metodologia	24
3.1 Dedução da Equação da Onda Imagem no CIG	24
3.2 Continuação da Onda Imagem em profundidade por Diferenças Finitas .	25
3.3 Execução do Esquema de Diferenças Finitas	27
3.4 O processo de análise de velocidade	29
3.5 Velocidades Intervalares	30
3.6 Atualização de Um Modelo Não Homogêneo	33
4 Resultados Numéricos	39
4.1 Modelo de Três Interfaces	39
4.1.1 Modelagem	39
4.1.2 Migração	42
4.1.3 Continuação dos CIGs e Seções de Velocidade	43
4.1.4 Construção do modelo de velocidade e atualização	46

4.1.5	Construção por atualização das velocidades	50
4.1.6	Construção por atualização das vagarosidades	54
4.1.7	Supressão dos Afastamentos Longos	58
4.2	<i>Layer-Stripping</i>	60
4.3	Dado Marmousoft	64
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	71
5.1	Conclusões	71
5.2	Trabalhos Futuros	72

Lista de Figuras

2.1	Esboço esquemático para entender onda imagem: (a) Frentes de onda em três instantes de tempo. (b) Imagens do refletor migrado para três velocidades de migração.	19
2.2	Esboço esquemático mostra, na parte superior, quatro imagens parciais de <i>offset</i> constante migradas h_1 , h_2 , h_3 e h_4 e o domínio do CIG, para um ponto, representado pela região cinza. O CIG em x_{CIG} , na parte inferior, consiste na coleção da imagem nas quatro seções na posição x_{CIG}	20
2.3	Esboço esquemático de uma frente de onda no lago gerada por uma pedra lançada em (x_0, z_0) depois de um tempo de propagação.	22
3.1	Geometria do esquema de diferenças finitas para obtenção da imagem em $n + 1$ a partir da imagem em n	27
3.2	O esboço esquemático mostra as imagens parciais e um CIG específico de um evento em profundidade em dois momentos: antes e depois da continuação da imagem. O processo de análise de velocidade pretende variar o <i>moveout</i> no CIG através da continuação da imagem até ficar horizontal. Nesta situação a velocidade está correta e as imagens parciais estão na mesma posição.	31
3.3	Esboço esquemático para mostrar que: O CIG da migração com V_0 e continuado até V_1 é aproximadamente igual ao CIG obtido da migração com V_1	31
3.4	Obtendo a velocidade intervalar a partir de velocidades médias.	34
3.5	O fluxograma de construção do modelo.	38
4.1	(a) Modelo de velocidade utilizado para gerar dados sintéticos com interfaces suaves para traçamento de raio e (b) ilustração mostrando traçamento de raios de um tiro na posição (7.525,0.0) km.	40
4.2	Distribuição do número de traços ao longo dos CMPs (a posição do CMP coincide com a distância). A cobertura não é completa nas extremidades, por conta da rampa de cobertura.	41

4.3	Dado sintético. No primeiro plano é o painel de afastamento mais curto (50 m) e ao lado o CMP contendo os três eventos.	41
4.4	Dado sintético migrado com Kirchhoff em profundidade com modelo $V_0 = 2000$ m/s.	43
4.5	Instantâneos do CIG 7550, com velocidade de referência igual a 2000 m/s, para as velocidades: 1500 m/s, 1680 m/s, 1870 m/s, 2190 m/s e 2520 m/s.	44
4.6	Seções de velocidade para o CIG 7525. Em (a) vê-se a seção obtida simplesmente empilhando horizontalmente os traços dos CIGs continuados e (b) obtida através do semblance convencional como descrito em 4.1. . . .	47
4.7	Evolução dos CIGs para posição 7550.	50
4.8	Evolução dos modelos com atualização das velocidades: (a) modelo real, (b) primeiro modelo, (c) segundo modelo e (d) terceiro modelo.	51
4.9	CIGs após migração com velocidade constante de 2000 m/s.	52
4.10	CIGs após primeira iteração. Obtido a partir da migração com primeiro modelo (Figura 4.8 (b)).	52
4.11	CIGs após segunda iteração. Obtido a partir da migração com segundo modelo (Figura 4.8 (c)).	53
4.12	CIGs após terceira iteração. Obtido a partir da migração com terceiro modelo (Figura 4.8 (d)).	53
4.13	Evolução dos modelos com atualização das vagarosidades: (a) modelo real, (b) primeiro modelo, (c) segundo modelo e (d) terceiro modelo. Compare com a Figura 4.8.	55
4.14	CIGs após migração com velocidade constante de 2000 m/s.	56
4.15	CIGs após primeira iteração. Obtido a partir da migração com primeiro modelo (Figura 4.13 (b)).	56
4.16	CIGs após segunda iteração. Obtido a partir da migração com segundo modelo (Figura 4.13 (c)).	57
4.17	CIGs após terceira iteração. Obtido a partir da migração com terceiro modelo (Figura 4.13 (d)).	57
4.18	Esboço esquemático de duas camadas planas horizontais com velocidades V_1 e V_2 onde $V_2 > V_1$ mostrando a trajetória do raio entre fonte (F) e receptor (R) com reflexão na segunda interface (em I) para dois afastamentos.	58

4.19	Modelos obtidos com uma análise de velocidades (sem atualizações), a partir de CIGs continuados (a) sem silenciamento, (b) com silenciamento mais extensivo, uma reta $m(z) = 0.2 \times z + 2000$ e (c) com silenciamento mais restritivo, uma reta $m(z) = 1.0 \times z + 1000$	59
4.20	Introdução de informação a priori da interface 1: (a) modelo de partida construído a partir de velocidade constante, (b) recalculado com informação a priori da interface 1.	62
4.21	Fazendo uma iteração para ajustar interfaces 2 e 3: (a) modelo de partida obtido com introdução de informação a priori da interface 1, (b) obtido com uma iteração.	62
4.22	Introdução de informação a priori das interfaces 1 e 2: (a) modelo de partida obtido com uma iteração, (b) recalculado com informação a priori das interfaces 1 e 2.	63
4.23	Fazendo uma iteração para ajustar interface 3: (a) modelo de partida recalculado com informação a priori das interfaces 1 e 2, (b) obtido com segunda iteração.	63
4.24	CIGs do dado Marmousoft obtidos com velocidade constante de 2000 m/s.	66
4.25	Semblances do Marmousoft obtidos com CIGs da Figura 4.24 continuados na faixa de 1400 m/s a 4000 m/s.	66
4.26	Evolução dos modelos de velocidade para o dado Marmousoft: (a) primeiro modelo e (b) segundo modelo.	67
4.27	Resultados da migração (empilhado) para o dado Marmousoft: (a) para o modelo Figura 4.26(a) e (b) para o modelo Figura 4.26(b).	67
4.28	CIGs do dado Marmousoft para primeira iteração. Obtido a partir da migração com o primeiro modelo (Figura 4.26 (a)).	69
4.29	Semblances do dado Marmousoft para primeira iteração. Obtido a partir da migração com o primeiro modelo (Figura 4.26 (a)).	69
4.30	CIGs do dado Marmousoft para segunda iteração. Obtido a partir da migração com o segundo modelo (Figura 4.26 (b)).	70
4.31	Semblances do dado Marmousoft para segunda iteração. Obtido a partir da migração com o segundo modelo (Figura 4.26 (b)). Note que todos os espectros são interpretáveis até a profundidade em que ocorre o primeiro desvio da linha vertical em 2000 m/s.	70

Lista de Tabelas

3.1	Definições de velocidades.	35
4.1	Tabela de parâmetros utilizados para gerar dado sintético	40
4.2	Valores de profundidade e velocidade média obtidos com a picagem da Figura 4.6 (b).	46
4.3	Modelo construído para o CIG 7550 obtidos a partir da picagem na Figura 4.6 (b). São mostrados os valores da profundidade do refletor e a Velocidade Intervalar com seus respectivos erros relativos.	48
4.4	Valores de profundidade e velocidade média obtidos na segunda picagem e os valores da operação de atualização na posição do CIG 7550.	48
4.5	Modelo construído para o CIG 7550 obtidos a partir da segunda picagem. São mostrados os valores da profundidade do refletor e a Velocidade Intervalar com seus respectivos erros relativos.	49
4.6	Modelo construído para o CIG 7550 obtidos a partir da terceira picagem. São mostrados os valores da profundidade do refletor e a Velocidade Intervalar com seus respectivos erros relativos.	49
4.7	Tabela de parâmetros da dado Marmousoft.	64

1 Introdução

Muitos autores têm proposto Análise de Velocidade para Migração (*Migration Velocity Analysis*, MVA), como forma de obter um modelo de velocidades para migração. Os métodos discutidos abrangem uma gama que começa numa simples comparação de imagens de afastamento comum (Gardner et al., 1974), passa por análise de coerência do evento no mesmo ponto da imagem migrada (Sattlegger, 1975), extrapolação de famílias CMP (Yilmaz and Chambers, 1984), migrações tentativas seguido de empilhamento (Fowler, 1985) e análise da profundidade de focalização (Jeannot et al., 1986) para terminar em análise do *moveout* residual (*residual moveout*, RMO) dentro da família de ponto comum (*Common Image Gather*, CIG) no domínio de afastamento comum (*offset-domain* CIG) ou ângulo comum (*angle-domain* CIG), ADCIG (Biondi and Symes, 2004).

Por causa de sua clareza conceitual e simplicidade, a análise RMO se tornou a ferramenta favorita para MVA. Recentemente foi proposto um novo método de MVA para migração em tempo que faz uso da correção do RMO por variação da velocidade de migração. Este método de MVA propõe-se a começar a análise com um modelo inicial simples, sem a necessidade de especificar nele determinadas características do modelo procurado. Sendo assim, este método se distingue fundamentalmente dos métodos tomográficos ou de inversão do campo de ondas, que necessitam de um bom modelo inicial para garantir a sua convergência.

Schleicher et al. (2008) construíram uma ferramenta para análise RMO usando uma implementação de diferenças finitas de uma equação diferencial parcial (EDP). Esta EDP que descreve o deslocamento dos eventos em função da velocidade de migração foi denominada de *equação da onda imagem* (Goldin, 1994; Fomel, 1994, 1997; Hubral et al., 1996). A idéia é propagar os eventos dentro dos CIGs até que fiquem horizontais, usando a EDP deduzida especificamente para este fim. Assim, pode-se encontrar, para cada evento identificável, um valor da velocidade que horizontaliza-o. Após migração com o modelo assim construído, o procedimento pode ser repetido para melhorá-lo.

O maior atrativo da MVA por propagação da imagem dentro do CIG, é sua capacidade de construir uma imagem a partir de um modelo inicial muito básico. No trabalho

original de Schleicher et al. (2008), um modelo constante com a velocidade de água foi suficiente para recuperar um modelo de velocidade aceitável para migração em tempo dos dados Marmousoft (Billette et al., 2003).

A versão do método implementada por Schleicher et al. (2008) é restrita à migração em tempo. Este método de migração somente é aplicável em meios com pouca variação lateral de velocidade. Sendo assim, a imagem migrada do modelo Marmousoft na região central, onde há falhas e fortes variações laterais da velocidade, fica prejudicada. Por outro lado, Schleicher et al. (2008) também deduziram uma versão da equação da onda imagem para migração em profundidade.

Neste contexto, o presente trabalho irá mostrar resultados obtidos com o método de diferenças finitas para esta EDP em profundidade, para depois aplicar o método de MVA neste domínio. Será mostrado um processo de construção do modelo 2D para um processo adequado em profundidade (Schleicher et al., 2004). Os resultados foram obtidos inicialmente para um dado sintético, um modelo de três camadas. Em seguida foi aplicado ao dado do Marmousoft (Billette et al., 2003). Os resultados são animadores, visto que na primeira iteração é obtido um modelo razoável para migração em profundidade.

No Capítulo 2, **Fundamentação Teórica**, estabelecemos o conceito de onda imagem, definimos o domínio do CIG e mostramos como o mesmo é construído. Apresentamos também uma abordagem para obtenção da EDP de continuação da onda imagem.

No Capítulo 3, **Metodologia**, desenvolvemos a EDP de continuação da onda imagem no domínio do CIG em profundidade utilizando a abordagem do capítulo anterior e uma solução através do método de diferenças finitas. Daí, desenvolvemos o processo de análise de velocidades a partir dos CIGs continuados, estabelecemos o modo de cálculo das velocidades intervalares e profundidades das interfaces e estabelecemos o fluxo para construção do modelo e atualização. Para atualização apresentamos duas expressões: uma atualiza as velocidades e outra atualiza as vagarosidades.

No Capítulo 4, **Resultados Numéricos**, estabelecemos o modelo físico de três interfaces, a modelagem e migração utilizados, com descrição dos programas e parâmetros. Apresentamos para estes dados resultados de continuação dos CIGs e seções de Semblance. Desta forma, detalhamos a construção do modelo para uma posição e conseguimos obter os modelos em três iterações supondo as duas expressões de atualização e mostramos que as convergências são bem distintas. Além disso, desenvolvemos dois pontos que influenciam sobremaneira no resultado final: a supressão de afastamentos

longos e o uso da estratégia de *layer-stripping*. Por fim, mostramos o resultado do método para duas iterações no dado do Marmousoft Billette et al. (2003) e apresentamos os benefícios e pontos de melhorias.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Conceito de Onda Imagem

O conceito de continuação de velocidade foi introduzido por Goldin (1994) e Fomel (1994, 1997). Hubral et al. (1996) e Schleicher et al. (1997) usaram o termo onda imagem (*image waves*) para descrever a mesma idéia. A importância desse conceito repousa na habilidade em prever mudanças na geometria e intensidade de eventos de reflexão na imagem sísmica com a mudança da velocidade de migração.

Uma onda imagem não é uma onda física, mas esta se comporta de maneira análoga. Seu conceito é melhor entendido com ajuda da Figura 2.1. A Figura 2.1(a) retrata a propagação de uma onda de corpo. A figura indica três frentes de onda em três tempos distintos. A Figura 2.1(b), retrata três imagens migradas do mesmo refletor sísmico obtido com três velocidades constantes de migração. Por comparação com a situação retratada na Figura 2.1(a) não é difícil de aceitar que esta pode ser entendida conceitualmente como uma espécie de propagação de onda. Da mesma forma que a Figura 2.1(a) retrata uma frente de onda física em três instantes de tempo a Figura 2.1(b) pode ser encarada como uma frente de onda imagem em três “instantes” de velocidade de migração.

Da mesma maneira que as ondas físicas propagam em função do tempo, essas ondas imagens propagam em função da velocidade de migração. Tudo se passa como se diferentes imagens migradas fossem *snapshots* da onda imagem em diferentes instantes da velocidade de migração. Da mesma maneira que na Figura 2.1(a) pode ser descrita como uma função $t = T(x, z)$, onde $T(x, z)$ é a iconal, a imagem do refletor migrado em profundidade na Figura 2.1(b) pode ser descrito como uma função $v = V(x, z)$, onde $V(x, z)$ pode ser chamado de iconal da onda imagem.

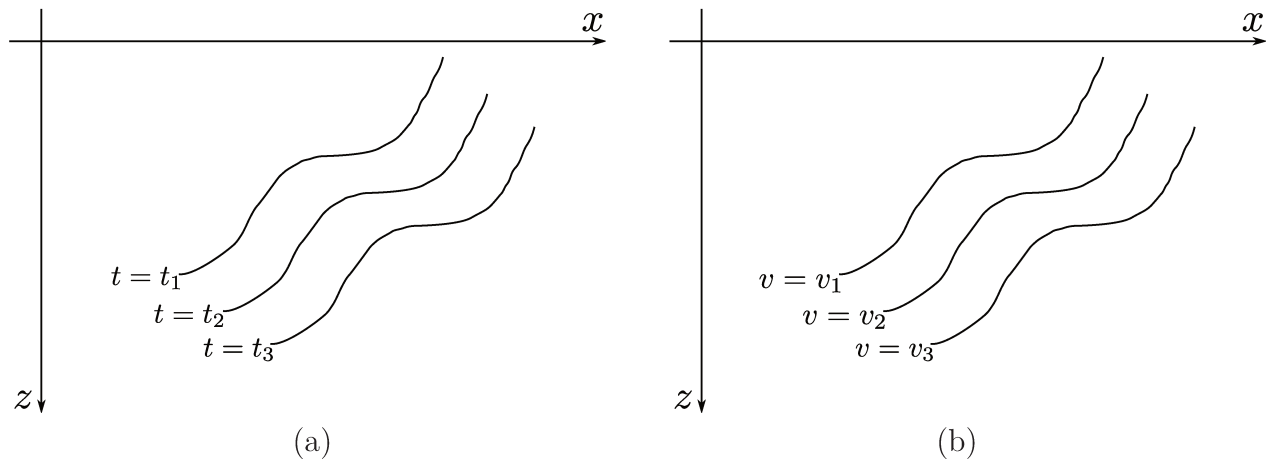


Figura 2.1: Esboço esquemático para entender onda imagem: (a) Frentes de onda em três instantes de tempo. (b) Imagens do refletor migrado para três velocidades de migração.

2.2 O Domínio CIG

Normalmente os métodos de migração 2D produzem uma seção migrada função de duas coordenadas espaciais. Para análise de velocidade e amplitude é necessário explorar a redundância do dado sísmico e neste caso a migração deve produzir dados com mais dimensões que simplesmente as duas coordenadas espaciais. Por exemplo, quando usamos migração Kirchhoff 2D é comum obter a imagem do dado como função do afastamento subdividindo o domínio de integração em seções de afastamento constante durante o processo Kirchhoff. Estas subdivisões são também chamadas de seções de afastamento constante, CO (*Common offset*). As seções CO migradas usam somente uma parte do dado e por isso são imagens parciais. A imagem completa é um volume obtido pela reunião de todas as imagens parciais.

Para análise de velocidade e análise petrofísica as medidas de variação entre as imagens parciais em um ponto de imagem fixo é muito útil. O conjunto de todas as imagens parciais com o mesmo ponto de imagem em comum são usados para realizar este tipo de análise. Este domínio é chamado de família de ponto imagem comum, frequentemente denominado pela sigla CIG (acrônimo de *Common Image Gather*), e pode ser melhor entendido através da Figura 2.2. A Figura 2.2 mostra esquematicamente um volume de quatro imagens parciais referente ao mesmo evento em subsuperfície. A posição do evento nas imagens parciais, também chamadas de seções migradas CO, estão em po-

sições diferentes o que significa que a velocidade de migração não está correta (será discutido mais a frente). Um CIG na posição x_{CIG} é uma seção das imagens coletadas nesta posição para as 4 seções.

Como dito anteriormente o CIG, como no método CMP, apresenta redundância de informação que pode ser usada para análise de velocidade, petrofísica, mas também para obter a imagem final. A soma (horizontal) normalizada dos traços do CIG gera um traço com maior razão sinal/ruído, que representa o final do processo de migração pré-empilhamento.

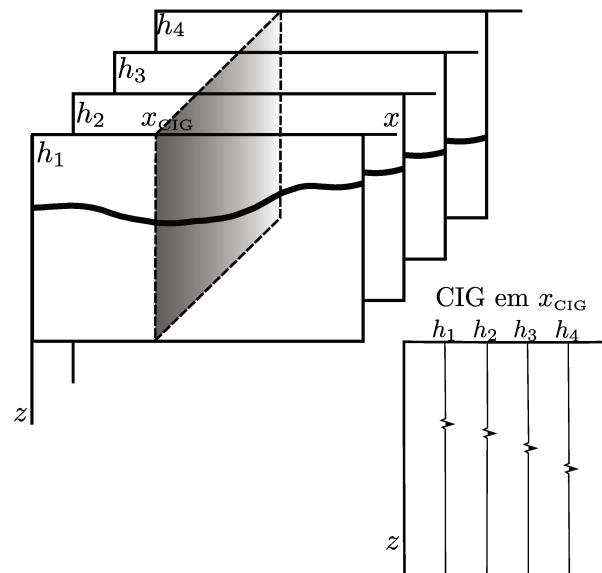


Figura 2.2: Esboço esquemático mostra, na parte superior, quatro imagens parciais de *offset* constante migradas h_1 , h_2 , h_3 e h_4 e o domínio do CIG, para um ponto, representado pela região cinza. O CIG em x_{CIG} , na parte inferior, consiste na coleção da imagem nas quatro seções na posição x_{CIG} .

2.3 A Pedra no Lago: o Iconal, a Equação Iconal e a Equação da Onda

Na Seção 2.1 foi mostrado a frente de onda real, que é possível observar fisicamente, e a frente de onda imagem que não é física, mas uma abstração matemática. Nesta seção faremos um exercício simples de como se constrói a EDP que descreve o movimento das frentes de onda (Equação da Onda) partindo da fotografia de uma delas. Será levado em

conta apenas o aspecto cinemático, sem se preocupar com as amplitudes. Isto vai nos ajudar a entender como encontramos a EDP que descreve a continuação da imagem no CIG.

A frente de onda é o conjunto de pontos no espaço nos quais a onda tem o mesmo valor de tempo de propagação associado. A função espacial que descreve tempo de propagação em todos os pontos espaciais recebe o nome de função iconal. Se resolvemos obter a taxa de variação desta função iconal em relação à posição obtemos a Equação Iconal que descreve para onde e em que taxa movimenta-se a frente de onda. A esta Equação Iconal existe uma equação de onda associada.

Vamos supor o cenário da 'pedra no lago' (ver Figura 2.3). Com o lançamento de uma 'pedra no lago' na posição (x_0, z_0) , depois de um tempo, são geradas ondulações em sequência em formato de círculos em torno da posição do lançamento. As ondulações apresentam variações no comprimento de onda e por conta disto propagam com velocidades diferentes: as ondas mais longas (círculos externos) viajam a velocidades maiores que as mais curtas (círculos internos). A velocidade de propagação v dessas ondulações é muito menor que a velocidade da onda acústica na água ($v \approx 1500$ m/s) por se tratar de uma onda superficial.

Neste exercício vamos tratar apenas o aspecto cinemático de uma ondulação, por isso vamos usar um único valor de velocidade. A função que descreve esta frente de onda circular nos pontos com coordenadas (x, z) é

$$T(x, z) = \frac{1}{v} \sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}, \quad (2.1)$$

onde v é a velocidade de propagação da onda na superfície da água e (x_0, z_0) é a posição da fonte, isto é, do lugar onde a pedra caiu na água.

Vamos determinar a equação geral que descreve o deslocamento desta frente de onda. No entanto, a função 2.1 contém variáveis que não interessam a descrição geral da propagação: x_0 e z_0 . Para eliminar estas variáveis vamos reescrever a função 2.1 da seguinte forma

$$(vT(x, z))^2 = (x - x_0)^2 + (z - z_0)^2. \quad (2.2)$$

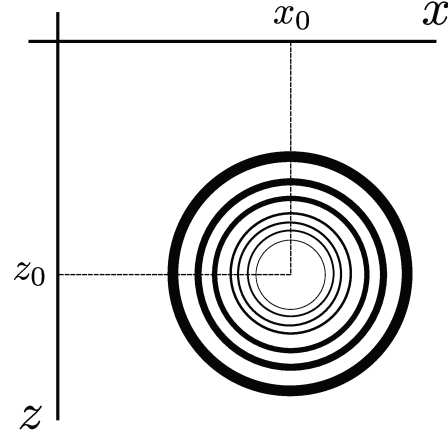


Figura 2.3: Esboço esquemático de uma frente de onda no lago gerada por uma pedra lançada em (x_0, z_0) depois de um tempo de propagação.

Assim, podemos obter as derivadas com respeito a x e z implicitamente para cálculo do gradiente, ou seja

$$\begin{aligned} v^2 T(x, z) \frac{\partial T(x, z)}{\partial x} &= (x - x_0) \quad \text{e} \\ v^2 T(x, z) \frac{\partial T(x, z)}{\partial z} &= (z - z_0) \quad . \end{aligned} \quad (2.3)$$

Com a substituição dos valores de $(x - x_0)$ e $(z - z_0)$ em 2.2 temos

$$(vT(x, z))^2 = \left(v^2 T(x, z) \frac{\partial T(x, z)}{\partial x} \right)^2 + \left(v^2 T(x, z) \frac{\partial T(x, z)}{\partial z} \right)^2, \quad (2.4)$$

que pode ser simplificado para

$$\left(\frac{\partial T(x, z)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T(x, z)}{\partial z} \right)^2 = \frac{1}{v^2}, \quad (2.5)$$

que é a equação iconal. Esta equação determina a variação de qualquer frente de onda inicial, mesmo esta não estando inicialmente em formato circular. Ela também pode ser usada para traçar raios, que são curvas no espaço que descrevem o caminho de propagação da onda e contém em cada ponto o tempo de propagação.

A equação iconal tem uma equação de onda associada. A equação da onda mais simples associada a equação iconal 2.5 é

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (2.6)$$

onde p é o campo de onda, função de (x, z, t) . É possível confirmar que a EDP 2.6 descreve o movimento da ondulação no lago através da substituição de funções candidatas tipo $p(x, z, t) = p_0(x, z)f(t \pm T(x, z))$ na equação 2.6. O sinal negativo, na candidata, indica que a função se desloca para fora do círculo da Figura 2.3 e o sinal positivo indica que a função se desloca para o centro do círculo. Substituindo as candidatas em cada termo da equação 2.6 temos:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 p_0}{\partial x^2} f \pm 2 \frac{\partial p_0}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \pm p_0 \left[\frac{\partial^2 f}{\partial T^2} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial f}{\partial T} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right], \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 p_0}{\partial z^2} f \pm 2 \frac{\partial p_0}{\partial z} \frac{\partial f}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial z} \pm p_0 \left[\frac{\partial^2 f}{\partial T^2} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 + \frac{\partial f}{\partial T} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \text{ e} \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{p_0}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}, \quad (2.9)$$

por fim, organizando a soma dos termos obtemos:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial^2 p_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_0}{\partial z^2} \right) f \pm \overbrace{p_0 \frac{\partial^2 f}{\partial T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - \frac{1}{v^2} \right]}^{\text{termo contendo a iconal!}} \\ & \pm p_0 \frac{\partial f}{\partial T} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0. \end{aligned}$$

O termo de maior ordem nas derivadas da $f(t)$ fornece a equação iconal 2.5.

Enfim, de maneira simples, isso mostra que a equação 2.6 é a equação que governa um movimento da ondulação com a cinemática observada.

3 Metodologia

3.1 Dedução da Equação da Onda Imagem no CIG

Nesta seção deduzimos a EDP que descreve o movimento da imagem de um evento no domínio CIG (Common Image Gather). Como já foi dito antes, a movimentação da imagem com a variação da velocidade pode ser tratada como um processo de propagação de onda. Tendo em mente esta abstração matemática podemos usar os mesmos recursos da Seção 2.3 para obter uma equação diferencial que descreve o movimento de eventos migrados no CIG. Seguimos nesta dedução os passos de Schleicher et al. (2008).

Semelhante à equação de Al-Yahya (1989) que descreve a posição migrada em tempo de um refletor horizontal, Schleicher and Biloti (2007) deduziram a equação que descreve a pseudo-profundidade migrada z no CIG de um refletor horizontal em um meio homogêneo com velocidade v_0 :

$$z = \sqrt{\frac{v^2}{v_0^2} z_0^2 + \left(\frac{v^2}{v_0^2} - 1\right) h^2}, \quad (3.1)$$

onde v é a velocidade de migração, h é o meio-afastamento e z_0 é a profundidade verdadeira do refletor supostamente horizontal. Ao resolver a equação 3.1 por v obtém-se

$$v = V(z, h) = v_0 \sqrt{\frac{h^2 + z^2}{h^2 + z_0^2}}. \quad (3.2)$$

A função $V(z, h)$ pode ser interpretada como função iconal da equação da onda imagem para migração em profundidade no domínio do CIG. Ao tentar derivar $V(z, h)$ com respeito a z , para obter a equação iconal, teremos como resultado uma expressão que depende das quantidades desconhecidas v_0 e z_0 . Essa expressão não nos interessa. Se reescrevermos a equação 3.2 de maneira mais cômoda para

$$\frac{V(z, h)^2}{h^2 + z^2} = \frac{v_0^2}{h^2 + z_0^2}, \quad (3.3)$$

e fizermos uma simples diferenciação implícita da equação 3.3 com respeito a z , podemos nos livrar da velocidade v_0 e da profundidade verdadeira z_0 (quantidades desconhecidas no processo de inversão). Após o isolamento da derivada de V , a equação resultante é

$$\frac{\partial V(z, h)}{\partial z} = \frac{vz}{h^2 + z^2}, \quad (3.4)$$

que é a equação iconal da onda imagem para migração em profundidade. Esta equação descreve o deslocamento da imagem de um refletor plano no CIG, independentemente do seu formato inicial. A substituição de uma candidata da forma $p(z, h, v) = p_0(z, h)f(v - V(z, h))$ na equação

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{vz}{h^2 + z^2} \frac{\partial P}{\partial v} = 0 \quad (3.5)$$

demonstra que esta é a forma mais simples da equação da onda imagem associada à equação iconal 3.4. A equação 3.5 tem a forma matemática de uma equação de onda *one-way* 1D:

$$\frac{\partial \mathbf{u}(x, t)}{\partial x} + \frac{1}{a} \frac{\partial \mathbf{u}(x, t)}{\partial t} = 0, \quad (3.6)$$

onde a é a velocidade de propagação do campo $\mathbf{u}(x, t)$. No caso da equação 3.5 a velocidade do meio v faz o papel da variável temporal e $(h^2 + z^2)/vz$ faz o papel da velocidade de propagação. Naturalmente a equação é dispersiva porque a velocidade de continuação varia com o afastamento e a profundidade. A imagem é continuada mais rapidamente nos afastamentos mais longos e mais profundos que nos afastamentos curtos e mais rasos. Nota-se que há uma indeterminação quando tenta-se obter essa velocidade na profundidade zero. Neste caso, vamos evitar a continuação (imagens nas profundidades próximas de zero).

3.2 Continuação da Onda Imagem em profundidade por Diferenças Finitas

Schleicher et al. (2008) já tinham deduzido a equação da onda imagem no CIG em profundidade (equação 3.5) e apresentado uma forma simples de implementar a solução através do método de diferenças finitas. Este esquema de diferenças finitas é classificado como implícito e de segunda ordem e considerado incondicionalmente estável.

Nesta seção, apresentaremos a implementação da solução para migração em profundidade de maneira análoga a apresentada em Schleicher et al. (2008). Para isso a equação 3.5 é discretizada. Vamos supor um traço imagem em profundidade discreto em um dado afastamento. As amostras do traço são definidas pelo índice k e as velocidades de continuação são definidas pelo índice n . As derivadas são aproximadas por:

$$\frac{\partial P}{\partial v} \approx \frac{P_k^{n+1} - P_k^n}{\Delta v}, \quad (3.7)$$

sendo a diferença centrada no ponto $n + \frac{1}{2}$ (ver o ponto $\times$ na Figura 3.1) e

$$\frac{\partial P}{\partial z} \approx \frac{1}{2\Delta z} \left[\frac{1}{2} (P_{k+1}^n - P_{k-1}^n) + \frac{1}{2} (P_{k+1}^{n+1} - P_{k-1}^{n+1}) \right], \quad (3.8)$$

sendo a média das diferenças centradas em k . Neste caso estamos discretizando a equação em $n + \frac{1}{2}$ e k (ver Figura 3.1), então é preciso calcular o valor da velocidade v também neste ponto, isto é $v_{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (v_n + v_{n+1})$.

De acordo com a geometria do esquema mostrada na Figura 3.1 para calcular a derivada $\frac{\partial P}{\partial v}$ de acordo com a equação 3.5 no **ponto 3**, necessita-se dos valores P_k^{n+1} no **ponto 2** e P_k^n no **ponto 1**. Para calcular a derivada $\frac{\partial P}{\partial z}$ de acordo com a equação 3.5 no **ponto 3**, necessita-se dos valores $\frac{1}{2\Delta z} (P_{k+1}^n - P_{k-1}^n)$ no **ponto 1** e $\frac{1}{2\Delta z} (P_{k+1}^{n+1} - P_{k-1}^{n+1})$ no **ponto 2**. Para montar a equação 3.5 no ponto 3 é fundamental ter o valor da velocidade em $n + \frac{1}{2}$. Então, substituindo as aproximações 3.7 e 3.8 em 3.5 obtém-se:

$$P_k^{n+1} - P_k^n + \frac{(h^2 + z_k^2)\Delta v}{v_{n+\frac{1}{2}} z_k 4\Delta z} [P_{k+1}^n - P_{k-1}^n + P_{k+1}^{n+1} - P_{k-1}^{n+1}] = 0.$$

Por fim, chamando

$$\alpha_k^n = \frac{(h^2 + z_k^2)\Delta v}{v_{n+\frac{1}{2}} z_k 4\Delta z}, \quad \text{temos}$$

$$P_k^{n+1} + \alpha_k^n (P_{k+1}^{n+1} - P_{k-1}^{n+1}) = P_k^n - \alpha_k^n (P_{k+1}^n - P_{k-1}^n), \quad (3.9)$$

que é a expressão usada para resolver o problema de forma implícita.

Schleicher et al. (2008) mostram que a equação de onda imagem no CIG em tempo pode ser discretizada pelo mesmo esquema de diferenças finitas, com um significado diferente do coeficiente α_k^n . Além disso Schleicher et al. (2008) fazem uma análise de

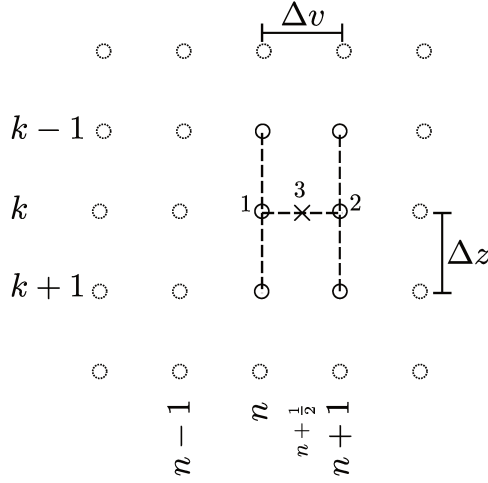


Figura 3.1: Geometria do esquema de diferenças finitas para obtenção da imagem em $n + 1$ a partir da imagem em n .

estabilidade segundo von Neumann e mostram que o esquema 3.9 é incondicionalmente estável.

3.3 Execução do Esquema de Diferenças Finitas

Supomos um traço do CIG, com determinado afastamento. Queremos fazer a continuação da imagem deste traço de uma velocidade n para $n + 1$. Os valores da imagem em n são conhecidos enquanto os $n + 1$ queremos determinar. Usamos para tal a expressão 3.9 para diferentes valores de $k = 1, 2, 3 \dots, m - 1, m$. Assim temos:

$$\begin{aligned}
 -\alpha_1^n P_0^{n+1} + P_1^{n+1} + \alpha_1^n P_2^{n+1} &= P_1^n - \alpha_1^n (P_2^n - P_0^n) , \\
 -\alpha_2^n P_1^{n+1} + P_2^{n+1} + \alpha_2^n P_3^{n+1} &= P_2^n - \alpha_2^n (P_3^n - P_1^n) , \\
 -\alpha_3^n P_2^{n+1} + P_3^{n+1} + \alpha_3^n P_4^{n+1} &= P_3^n - \alpha_3^n (P_4^n - P_2^n) , \\
 &\vdots \\
 -\alpha_{m-1}^n P_{m-2}^{n+1} + P_{m-1}^{n+1} + \alpha_{m-1}^n P_m^{n+1} &= P_{m-1}^n - \alpha_{m-1}^n (P_m^n - P_{m-2}^n) , \\
 -\alpha_m^n P_{m-1}^{n+1} + P_m^{n+1} + \alpha_m^n P_{m+1}^{n+1} &= P_m^n - \alpha_m^n (P_{m+1}^n - P_{m-1}^n) ,
 \end{aligned}$$

onde usamos condições de contorno homogêneas, isto é, $P_0^{n+1} = 0$, $P_0^n = 0$ e $P_{m+1}^n = 0$.

Este sistema de equações pode ser escrito de forma matricial da seguinte forma:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{y}, \quad (3.10)$$

onde

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_1^n & & & & \\ -\alpha_2^n & 1 & \alpha_2^n & & & \\ & -\alpha_3^n & 1 & \alpha_3^n & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ 0 & & & -\alpha_{m-1}^n & 1 & \alpha_{m-1}^n \\ & & & & -\alpha_m^n & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} P_1^{n+1} \\ P_2^{n+1} \\ P_3^{n+1} \\ P_4^{n+1} \\ \vdots \\ P_{m-2}^{n+1} \\ P_{m-1}^{n+1} \\ P_m^{n+1} \end{bmatrix} \text{ e} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} P_1^n - \alpha_1^n P_2^n \\ P_2^n - \alpha_2^n (P_3^n - P_1^n) \\ P_3^n - \alpha_3^n (P_4^n - P_2^n) \\ \vdots \\ P_{m-1}^n - \alpha_{m-1}^n (P_m^n - P_{m-2}^n) \\ P_m^n + \alpha_m^n P_{m-1}^n \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

A matriz dos coeficientes é quadrada e tem dimensão $m \times m$. Esta matriz é bandada tridiagonal e pode ser facilmente decomposta em uma matriz triangular superior e uma

matriz triangular inferior utilizando decomposição LU. A partir desta decomposição o sistema é resolvido facilmente, obtendo os valores da imagem continuados para uma velocidade $n + 1$.

Como a equação 3.5 é unidirecional, a solução é propagada na direção definida pelo incremento de velocidade a partir de uma velocidade de referência V_R . Se desejarmos propagar a imagem para valores crescentes de velocidade o incremento de velocidade deve ser positivo, mas se quiser propagar para valores decrescentes o incremento deve ser negativo.

Um código computacional que faz a continuação por diferenças finitas foi implementado em Schleicher et al. (2008) em FORTRAN90 para continuação da imagem em tempo. Este código foi adequado para continuação da imagem em profundidade como descrito nesta seção.

3.4 O processo de análise de velocidade

Sabemos que os eventos no CIG têm que estar horizontalizados se a velocidade de migração for a verdadeira velocidade do meio. Portanto, se os eventos no CIG aparecem curvos, a velocidade de migração utilizada é incorreta. A grande questão, no entanto, é como obter o modelo de velocidade que tornem os eventos nos CIGs horizontais. Vamos tratar do processo de análise para obtenção do modelo de velocidade partindo dessa premissa: que os eventos no CIG fiquem horizontais. Caso não estejam totalmente horizontais dizemos que há *moveout*, o qual está associado a um erro no modelo de velocidade. Este tipo de análise de velocidade é conhecido como análise RMO (*Residual MoveOut*).

Na Seção 3.2 apresentamos a EDP da onda imagem que faz a continuação da imagem no CIG. Esta EDP foi discretizada para fazer a continuação da imagem numericamente usando um esquema de diferenças finitas. A partir do esquema de diferenças finitas é possível continuar um CIG da velocidade de partida para uma outra que se deseja. Assim, partindo de um CIG obtido por uma migração com um modelo de velocidade constante, faz-se a continuação usando o esquema de diferenças finitas 3.9. A velocidade de partida (velocidade de referência) neste caso específico, é igual a velocidade constante. Daí, define-se a faixa de velocidades para qual deseja continuar a imagem (velocidade inicial até uma velocidade final) e o passo ou intervalo de velocidade Δv . O passo de

velocidade não pode ser muito grande para que a dispersão numérica fique tolerável. Essas continuações da imagem do CIG podemos chamar de instantâneos de velocidade. A continuação da imagem no CIG reflete no *moveout* do evento no CIG. Para um evento específico obtemos o CIG modificado um número de vezes, cada um com um *moveout* associado.

A continuação da imagem no CIG permite variar o *moveout* dos eventos no CIG mediante variação de velocidade. Com isto, o que se pretende é variar o *moveout* até que os eventos fiquem horizontais e deste ponto extrair a velocidade (ver Figura 3.2). A velocidade de que estamos tratando é uma velocidade de focalização ou horizontalização em profundidade. Na seção seguinte vamos ver que esta velocidade é uma velocidade média, ou seja, quando fazemos a continuação no CIG, estamos usando uma velocidade média. Suponha que tenhamos um CIG obtido a partir de uma velocidade de migração V_0 e continuamos a imagem até V_1 , daí tudo se passa como se tivéssemos obtido o CIG a partir de uma migração com V_1 (ver Figura 3.3). O comportamento da continuação da imagem no CIG é similar ao que ocorre em NMO quando se varia a velocidade, mas estamos tratando de velocidades diferentes: enquanto que na continuação usamos velocidades médias, no NMO temos a velocidade NMO que aproxima-se da velocidade RMS (*Root Mean Square*). Com estas considerações podemos estabelecer a análise de velocidade para migração em profundidade. Ainda de maneira simplória seria assim: (i) usa-se uma faixa de velocidades para continuação da imagem no CIG e (ii) extrai-se as velocidades que horizontaliza cada evento, lembrando que são velocidades médias que precisam ser convertidas em velocidades intervalares.

3.5 Velocidades Intervalares

A velocidade que determina o posicionamento do evento migrado em profundidade mediante propagação da imagem é descrita pelo inverso da média sobre a vagarosidade (Schleicher et al., 2004) supondo meios lateralmente homogêneos. Então, supondo um modelo de camadas planas como na Figura 3.4, a relação entre as vagarosidades médias

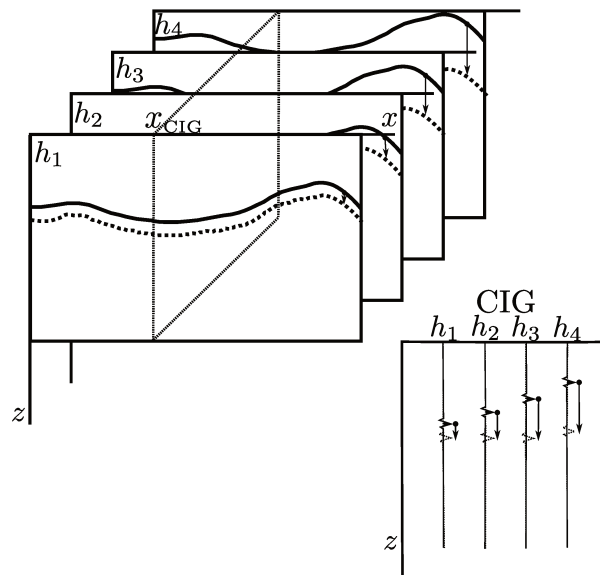


Figura 3.2: O esboço esquemático mostra as imagens parciais e um CIG específico de um evento em profundidade em dois momentos: antes e depois da continuação da imagem. O processo de análise de velocidade pretende variar o *moveout* no CIG através da continuação da imagem até ficar horizontal. Nesta situação a velocidade está correta e as imagens parciais estão na mesma posição.

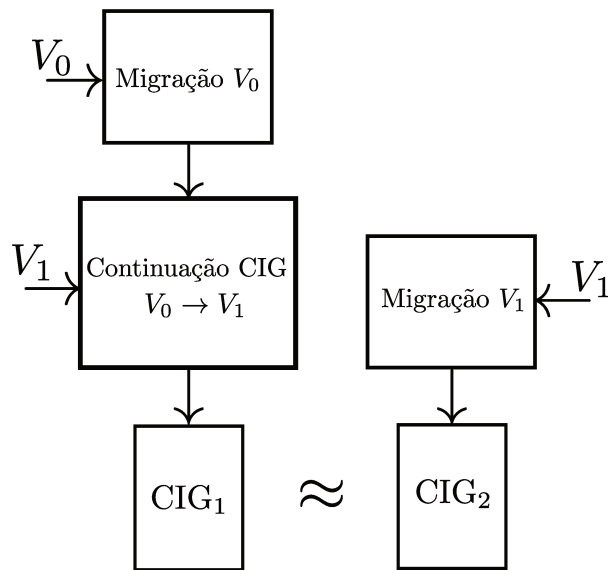


Figura 3.3: Esboço esquemático para mostrar que: O CIG da migração com V_0 e continuado até V_1 é aproximadamente igual ao CIG obtido da migração com V_1 .

e as vagarosidades de cada camada é

$$\begin{aligned}\frac{1}{V_M^1} &= \frac{1}{z_1 - z_0} \left[\frac{z_1 - z_0}{V_I^1} \right], \\ \frac{1}{V_M^2} &= \frac{1}{z_2 - z_0} \left[\frac{z_1 - z_0}{V_I^1} + \frac{z_2 - z_1}{V_I^2} \right], \\ \frac{1}{V_M^3} &= \frac{1}{z_3 - z_0} \left[\frac{z_1 - z_0}{V_I^1} + \frac{z_2 - z_1}{V_I^2} + \frac{z_3 - z_2}{V_I^3} \right], \\ &\vdots \\ \frac{1}{V_M^j} &= \frac{1}{z_j - z_0} \left[\sum_{k=0}^{j-1} \frac{z_{k+1} - z_k}{V_I^{k+1}} \right],\end{aligned}$$

onde V_I^j denota a velocidade intervalar da camada j e V_M^j denota a velocidade média até a profundidade da j -ésima camada. Assim, o processo de conversão das velocidades médias para velocidades intervalares em profundidade baseia-se na seguinte fórmula, que descreve a velocidade média $V_M(z)$ entre dois níveis de profundidade z_0 and z ,

$$\frac{1}{V_M(z)} = \frac{1}{z - z_0} \int_{z_0}^z \frac{dZ}{V_I(Z)}, \quad (3.14)$$

em função da verdadeira velocidade intervalar, $V_I(Z)$, em todas as profundidades Z entre z_0 e z . A profundidade z representa a maior profundidade até onde a velocidade intervalar verdadeira é conhecida ou aproximada com qualidade suficiente. Em outras palavras, consideramos que a zona em profundidade onde a velocidade precisa ser atualizada começa abaixo da profundidade z_0 (ver Figura 3.4).

Desse fato é possível converter velocidades médias em profundidade para velocidades intervalares. A equação 3.14 pode ser invertida pela velocidade intervalar, resultando em

$$\frac{1}{V_I(z)} = \frac{d}{dz} \left(\frac{z - z_0}{V_M(z)} \right). \quad (3.15)$$

Discretizando, podemos calcular a velocidade do pacote entre dois níveis z_{j-1} e z_j , abaixo da profundidade z_0 , através da expressão

$$V_I^j = \frac{(z_j - z_{j-1})}{\left(\frac{z_j - z_0}{V_M^j} - \frac{z_{j-1} - z_0}{V_M^{j-1}} \right)}. \quad (3.16)$$

Então, na continuação do CIG, para vários valores de velocidade é possível coletar aquelas velocidades que horizontalizam determinados eventos (velocidades que focalizam as imagens). Essas velocidades de horizontalização correspondem a velocidades médias sobre as velocidades intervalares acima do refletor sob análise. Utilizando 3.16 e dado uma sequência de pontos onde são determinadas essas velocidades médias, é possível obter a velocidade intervalar nos intervalos entre esses pontos, como pode ser visto na Figura 3.4.

A partir daqui, constrói-se um modelo de velocidade intervalar de forma análoga ao que é feito em Dix (1955). Neste modelo há um erro associado, isso é verificado migrando o dado com este modelo e verificando os CIGs. Se estiverem horizontais o modelo obtido é aceitável, mas se não, é necessário melhorar o modelo. Como fazer isto?

3.6 Atualização de Um Modelo Não Homogêneo

Nesta seção vamos mostrar como é feita a atualização supondo que o modelo de partida não é um modelo homogêneo. Esta atualização é necessária visto que estamos construindo um modelo qualquer a partir de uma aproximação de camada plana e velocidade constante. Então, se o dado que estivermos invertendo não atender as premissas, certamente um primeiro modelo não horizontalizará os eventos dos CIGs. Para evitar algum tipo de confusão, a Tabela 3.1 define uma lista de velocidades que são utilizadas nesta seção.

Vamos supor que migramos o dado com o modelo de velocidade obtido conforme a Figura 3.4 e que os eventos nos CIGs não foram devidamente horizontalizados, ou seja há um erro de velocidade associado a cada evento. Vamos usar o dado migrado com esse modelo e fazer a continuação. Para iniciar a continuação, é preciso definir uma velocidade constante qualquer que serve como velocidade de referência V_R . O processo de continuação então supõe que o CIG a ser continuado foi gerado com uma migração utilizando essa velocidade de referência. Obviamente, esta hipótese é incorreta, já que a imagem migrada não corresponde mais a uma velocidade constante. A partir daí

$$\begin{array}{c}
z_0 \text{ ————— } V_M^0 \\
V_I^1 = \frac{(z_1 - z_0)}{\left(\frac{z_1 - z_0}{V_M^1} - \frac{z_0 - z_0}{V_M^0} \right)} = V_M^1 \\
z_1 \text{ ————— } V_M^1 \\
V_I^2 = \frac{(z_2 - z_1)}{\left(\frac{z_2 - z_0}{V_M^2} - \frac{z_1 - z_0}{V_M^1} \right)} \\
z_2 \text{ ————— } V_M^2 \\
V_I^3 = \frac{(z_3 - z_2)}{\left(\frac{z_3 - z_0}{V_M^3} - \frac{z_2 - z_0}{V_M^2} \right)} \\
z_3 \text{ ————— } V_M^3 \\
\vdots \\
z_{j-1} \text{ ————— } V_M^{j-1} \\
V_I^j = \frac{(z_j - z_{j-1})}{\left(\frac{z_j - z_0}{V_M^j} - \frac{z_{j-1} - z_0}{V_M^{j-1}} \right)} \\
z_j \text{ ————— } V_M^j
\end{array}$$

Figura 3.4: Obtendo a velocidade intervalar a partir de velocidades médias.

V_I	Velocidade intervalar. É o valor real de velocidade das camadas do modelo que está sendo invertido. É a velocidade utilizada para migração em profundidade.
V_M	Velocidade média. É a velocidade média de propagação de uma onda, da superfície até o refletor considerado. Para obtê-la é necessário conhecer as velocidades intervalares e espessuras das camadas que compõem o pacote acima do refletor considerado..
V^j	Velocidade média que horizontaliza o evento. No processo iterativo este seria o valor ótimo de velocidade a ser atingido.
$V_{M,i}^j$	Velocidade média na interação i para um evento j . Para a primeira iteração esta velocidade é obtida diretamente da picagem enquanto que para as iterações subsequentes ela é obtida da atualização anterior.
$V_{M,i+1}^j$	Velocidade média na iteração $i + 1$ para um evento j . Esta velocidade é obtida através da atualização da velocidade de migração na iteração i com a diferença entre a velocidade de picagem V_h^j e a velocidade de referência V_R .
V_h^j	Velocidade média obtida da picagem para um evento j a partir da segunda iteração onde o modelo não é mais homogêneo. Esta velocidade contém informação relativa que é extraída para a atualização.
V_R	Velocidade de referência é o valor utilizado como partida para o programa de continuação da imagem nos CIGs. Na construção do primeiro modelo o valor desta é igual ao do modelo homogêneo utilizado para migrar. Nas iterações subsequentes este valor pode ser qualquer um entre $V_{inicial}$ e V_{final} para servir como referência para medida do valor de atualização.
$V_{inicial}$	Velocidade inicial para continuação da imagem no CIG.
V_{final}	Velocidade final para continuação da imagem no CIG.
ΔV	Incremento de velocidade para continuação da imagem no CIG.

Tabela 3.1: Definições de velocidades.

novamente interpretamos os CIGs para encontrar as velocidades que horizontalizam os eventos. Essas velocidades médias V_h^j não possuem mais um significado absoluto e não podem ser utilizadas diretamente para o novo modelo. Agora, as velocidades médias giram em torno da velocidade de referência.

Apesar disso, estes valores V_h^j (velocidade média no j -ésimo evento) ainda possuem informação relativa que pode ser extraída para atualizar o modelo de velocidade V_M^j . As diferenças entre as velocidades V_h^j e V_R representam uma medida das diferenças entre a velocidade V^j ótima (que horizontaliza o evento perfeitamente) e o modelo de velocidade atual. Então, supondo que $V_{M,i}^j$, $V_{M,i+1}^j$ são dois valores de velocidade média em duas iterações subsequentes i e $i+1$, para o evento j , temos a seguinte expressão de atualização:

$$V^j \approx V_{M,i+1}^j = V_{M,i}^j + V_h^j - V_R . \quad (3.17)$$

Neste caso estamos atualizando as velocidades, mas existe outra possibilidade que é atualizar as vagarosidades:

$$V^j \approx V_{M,i+1}^j = \left(\frac{1}{V_{M,i}^j} + \frac{1}{V_h^j} - \frac{1}{V_R} \right)^{-1} . \quad (3.18)$$

Nesse processo de atualização surge um porém: a profundidade do evento, nas duas iterações subsequentes, são diferentes. Então, na construção do modelo define-se que a profundidade do evento deve ser aquela última onde o evento ficou horizontal.

O processo iterativo para construção e atualização do modelo é similar ao descrito em Schleicher et al. (2008) para migração em tempo, com a maior diferença sendo a determinação do modelo de velocidades intervalares. O fluxo de construção do modelo é mostrado na Figura 3.5. Este fluxo é composto dos seguintes passos:

1. Migre os dados usando uma velocidade constante qualquer e ordene os dados em CIGs.
2. Aplique a continuação de determinados CIGs.
3. Determine as velocidades e profundidades de horizontalização.

4. Construa um novo modelo de migração. Se for a primeira execução, é feito apenas o preenchimento do modelo. Se for uma execução subsequente, é necessário fazer a atualização utilizando uma das expressões 3.17 ou 3.18.
5. Migre os dados usando este novo modelo.
6. Se os CIGs não estiverem satisfatoriamente horizontalizados, aplique a continuação mais uma vez.
7. Repita os passos 3 a 6 até que a horizontalização dos eventos nos CIGs esteja satisfatória.

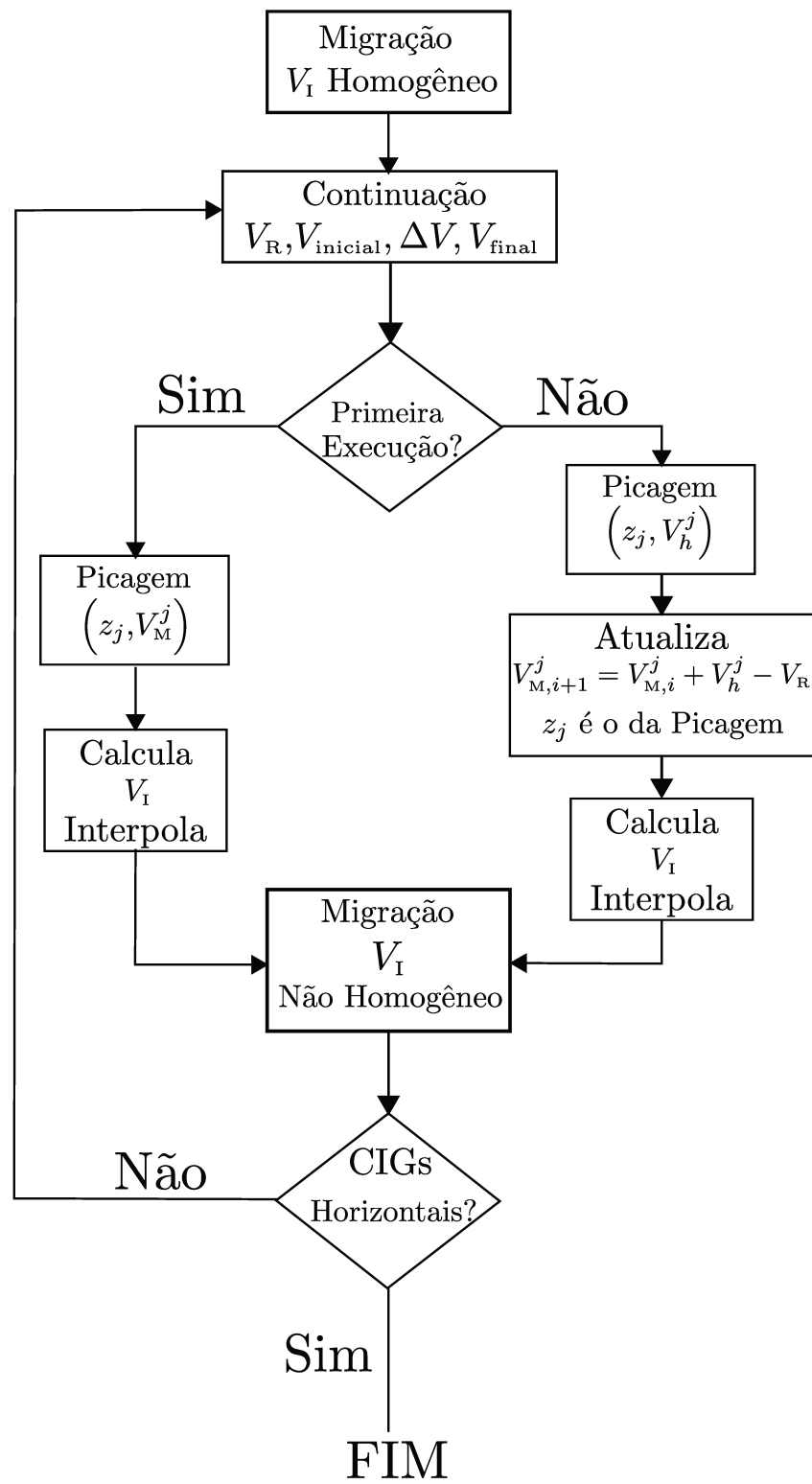


Figura 3.5: O fluxograma de construção do modelo.

4 Resultados Numéricos

Para testar o método de análise de velocidade de migração em profundidade mediante propagação da onda imagem no domínio do CIG, aplicamos a dados sintéticos provenientes de dois modelos. O primeiro é um modelo relativamente simples de três interfaces, com quatro camadas com velocidades constantes, e o segundo o modelo do Marmousi suavizado.

4.1 Modelo de Três Interfaces

Para o primeiro teste, usamos um modelo simples de três interfaces com camadas de velocidades constantes. O modelo de velocidades usado pode ser visto na Figura 4.1. Ele tem uma extensão de 25.850 km e é composto por quatro camadas homogêneas com velocidades que variam de 1.5 km/s a 4.5 km/s. Além disso, as interfaces são suaves para que não haja problemas no traçamento de raios. A camada de 1.5 km/s simula uma lâmina d'água enquanto que a de 4.5 km/s uma camada de sal. Esse é um modelo simples, no entanto representativo dos problemas encontrados na exploração sísmica. Nota-se que não envolve propagação de ondas na camada de sal, motivo pelo qual a velocidade desta camada não poderá ser recuperada.

4.1.1 Modelagem

O dado sintético foi gerado usando o traçamento de raio paraxial no programa SM88Modeling acessado através da interface GêBR (Biloti, 2010). Foram modeladas apenas as reflexões primárias da onda P sem levar em conta o espalhamento geométrico, nem tampouco absorção. Para representar a fonte foi usado um pulso Ricker com amplitude 1, fase zero e frequência dominante de 25 Hz. Além disso, foi escolhida a opção de mudança de amplitude e fase a partir do ângulo crítico.

Os parâmetros de aquisição escolhidos são mostrados na Tabela 4.1. Eles foram suficientes para mapear os refletores. A distribuição de afastamentos dos CMPs a cada

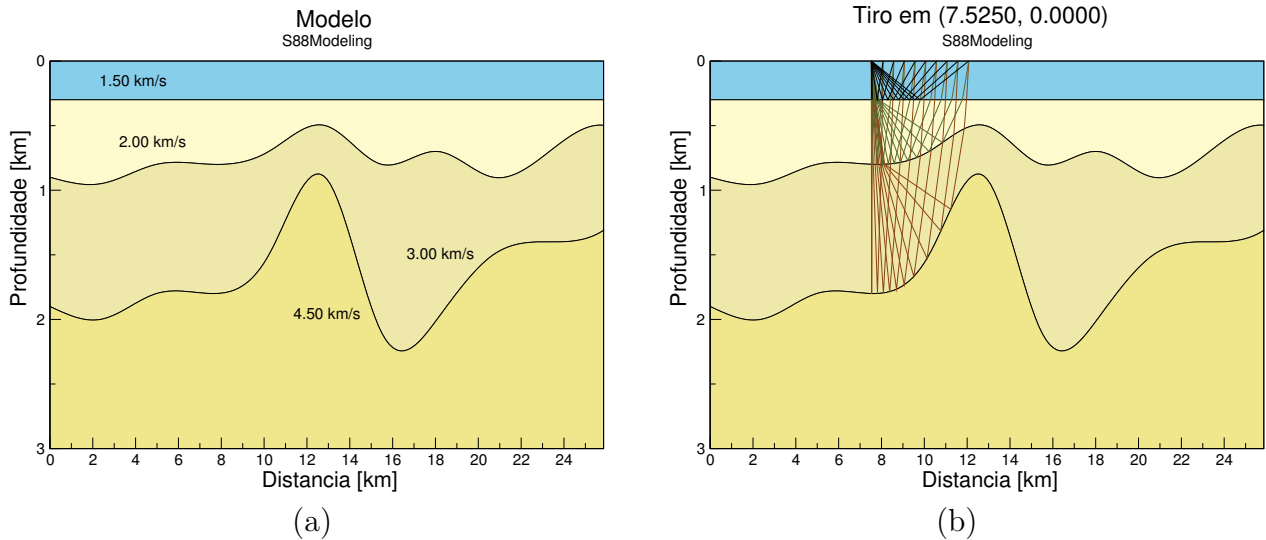


Figura 4.1: (a) Modelo de velocidade utilizado para gerar dados sintéticos com interfaces suaves para traçamento de raio e (b) ilustração mostrando traçamento de raios de um tiro na posição (7.525,0.0) km.

25 m não é regular. É importante que essa distribuição seja regular e por isso foi então feita uma decimação, colhidos CMPs a cada 50 m de maneira que a distribuição de afastamentos fosse a mesma. A Tabela 4.1 mostra os parâmetros finais. A Figura 4.2 mostra a distribuição final de traços por CMP (cobertura).

Intervalo de Tiros	50m
Intervalo de Receptores	50m
Número de Receptores	100
Número de Tiros	480
Tamanho do Lanço	4950m
Tempo de Registro	4s
Intervalo de CMP	50m
Afastamento mais curto	50m
Afastamento mais longo	4950m

Tabela 4.1: Tabela de parâmetros utilizados para gerar dado sintético

O dado gerado é um volume com três dimensões: (i) tempo, (ii) CMP e (iii) afastamento. A Figura 4.3 foi gerada com o software *open-source* Madagascar (Fomel et al., 2013) e ilustra como o dado sintético foi organizado. A representação é semelhante a projeção ortográfica de desenho técnico. Na visão frontal temos um painel de afastamento

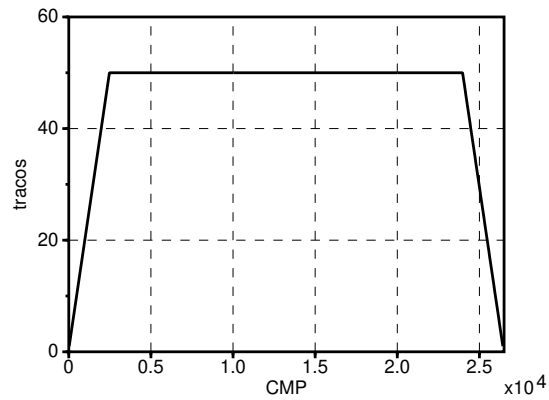


Figura 4.2: Distribuição do número de traços ao longo dos CMPs (a posição do CMP coincide com a distância). A cobertura não é completa nas extremidades, por conta da rampa de cobertura.

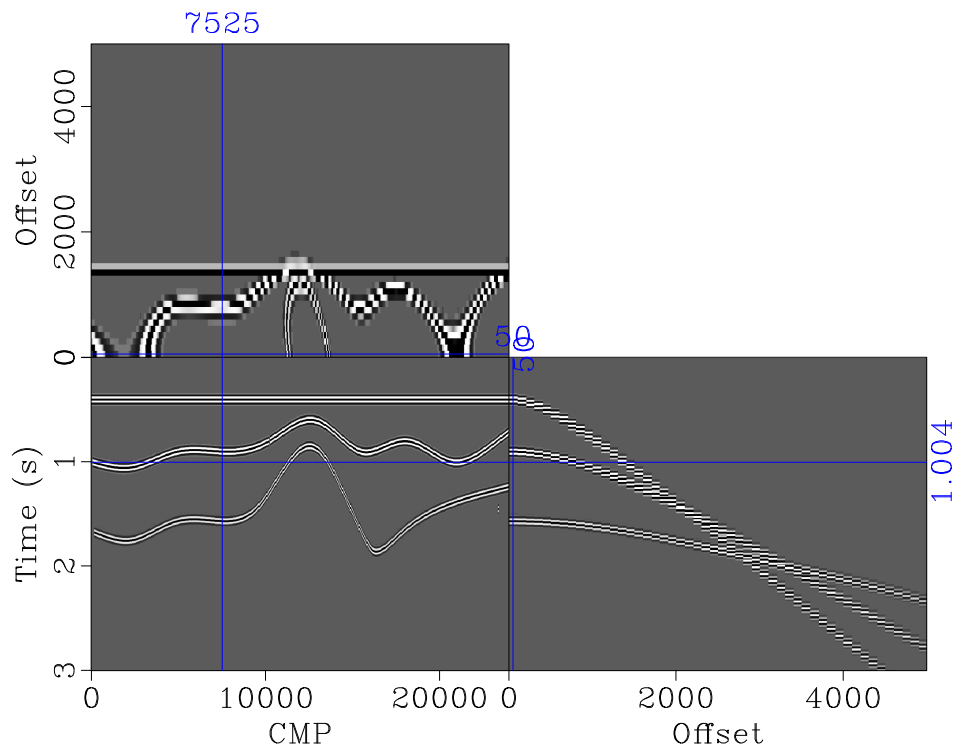


Figura 4.3: Dado sintético. No primeiro plano é o painel de afastamento mais curto (50 m) e ao lado o CMP contendo os três eventos.

constante, o mais curto (de 50m). Na visão lateral, temos um CMP (o da posição 7525) e na visão superior temos um slice no tempo de 1.004 seg para todos os afastamentos. A posição de cada painel é indicada nos outros dois por uma linha azul.

4.1.2 Migração

Para continuação da onda-imagem é necessário migrar o dado antes. A migração utilizada nos experimentos foi migração Kirchhoff em profundidade. Foi utilizado a função do pacote open-source SU (Seismic Unix): **sukdmig2d**. Esta função faz a migração em profundidade de dados 2D pre-empilhamento. Diferente da migração Kirchhoff em tempo, onde há uma expressão bem definida para a curva de difração, na migração Kirchhoff em profundidade a curva de difração é construída a partir do traçamento de raio no modelo de velocidade. Então, neste tipo de migração é indispensável dispor de tabelas de tempos de trânsito a partir das quais o programa constrói as curvas de difração para colecionar amplitudes e realizar o empilhamento Kirchhoff.

O cálculo dos tempos de trânsito pode ser feito tanto utilizando o traçamento de raio quanto um outro método baseado na solução da Equação Iconal. Nos experimentos feitos aqui, as tabelas de tempos de trânsito foram geradas pelo programa **rayt2d** onde os tempos de trânsito são calculados por traçamento de raio paraxial (Beydoun and Keho, 1987; Cervený, 1985). Para isso, o modelo de velocidade de entrada é uniformemente amostrado e suavizado preferencialmente. O resultado deste programa são as tabelas com os tempos numa grade de pontos menor ou igual as dimensões do modelo a partir da posição da fonte (para cada posição de fonte há uma tabela). A princípio a grade de pontos não precisa ser refinada, pois no processo de migração, os tempos de trânsito são interpolados, quando necessário, nas posições de tiro e receptor.

Para **sukdmig2d**, os traços de entrada devem ter a posição da fonte e do receptor especificada nos campos **sx** e **gx** do *header*. Deve-se definir a grade de pontos de saída, a abertura de migração: (i) abertura lateral e (ii) ângulo de abertura medido a partir da vertical. Para cômputo das amplitudes das amostras migradas é suposto um perfil de velocidade de referência, $(v(z) = v_0 + dvz \times z)$, definido por uma velocidade de partida, v_0 , e um gradiente, dvz . Em todas as migrações utilizamos um $v_0=1500$ m/s e um gradiente $dvz=0$ m/s/m.

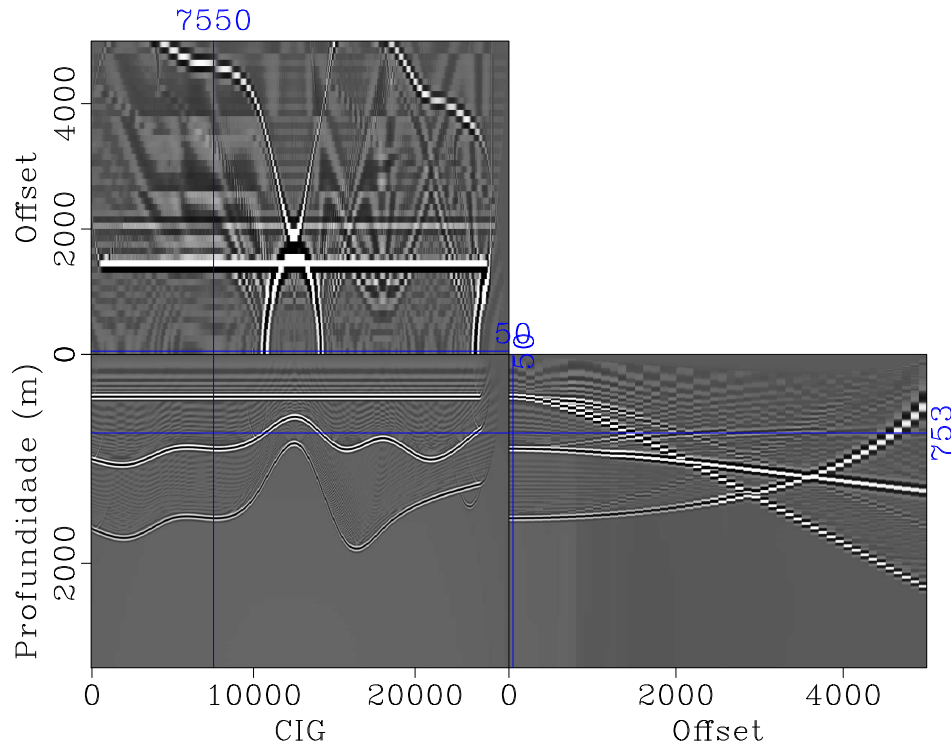


Figura 4.4: Dado sintético migrado com Kirchhoff em profundidade com modelo $V_0 = 2000$ m/s.

A migração Kirchhoff em profundidade foi conduzida na seguinte sequência: (i) cálculo da tabela de tempos de trânsito traçando raios no campo de velocidade intervalar, (ii) migração das seções de CO e (iii) agrupamento em seções CIG.

A primeira migração do dado sintético foi com o modelo de velocidade intervalar constante. Foi utilizada uma velocidade constante $V_0=2000$ m/s. O resultado da migração é mostrado na Figura 4.4. Se a velocidade escolhida fosse 1500 m/s o primeiro evento apareceria no CIG horizontal. No entanto, como a velocidade escolhida foi maior o evento apresenta um *moveout* para baixo indicando que a velocidade está alta.

4.1.3 Continuação dos CIGs e Seções de Velocidade

A continuação dos CIGs foi feita utilizando o esquema de diferenças finitas descrito anteriormente. Inicialmente é necessário escolher o CIG que pretendemos continuar. Em seguida definem-se os parâmetros para continuação: (i) velocidade de referência V_R , (ii) a faixa de velocidades para qual deseja-se continuar (V_{inicial} a V_{final}), (iii) o incremento de

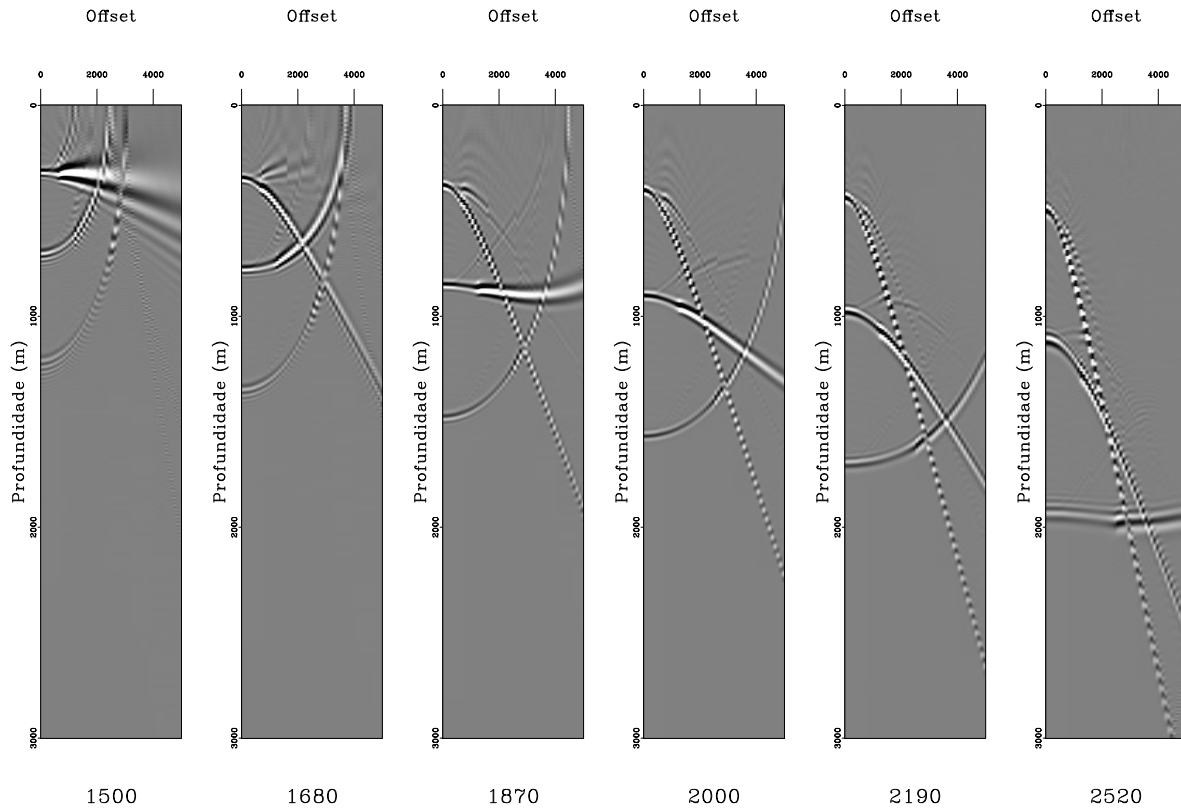


Figura 4.5: Instantâneos do CIG 7550, com velocidade de referência igual a 2000 m/s, para as velocidades: 1500 m/s, 1680 m/s, 1870 m/s, 2190 m/s e 2520 m/s.

instantâneos gravados, ou seja o intervalo de seções de velocidade a serem gravados e (iv) o passo de velocidade (ΔV), necessariamente menor que o incremento de instantâneos gravados. A Figura 4.5 mostra o comportamento da continuação no CIG. Nesta figura, um CIG na posição 7550 do dado migrado com velocidade de 2000 m/s é continuado para outros valores de velocidade. O CIG foi continuado na faixa desde 1400 m/s até 4000 m/s, com incremento de velocidade de 1 m/s, mas com gravação dos instantâneos a cada 10 m/s. As seções mostradas foram obtidas a partir da seleção daqueles valores de velocidade mostrados na figura.

O incremento de instantâneos pode ser tão denso quanto se queira, desde que o passo não seja maior. Neste caso, deve-se avaliar a relação custo-benefício. Para o início da análise de velocidade, por exemplo, onde há uma faixa ampla de velocidades a serem definidas não é prudente escolher o incremento pequeno, até porque vai custar tempo para continuar os CIGs. Além disso, existe a expectativa de que o erro numérico

seja maior quanto mais distante estiver da velocidade de referência. Contudo, com a evolução do modelo no processo iterativo há redução da faixa de velocidades, neste caso, é justificável reduzir o incremento.

Assim que é obtido um volume de dados contendo os CIGs continuados para uma faixa de velocidades, é possível montar um esquema para analisar e definir a velocidade que melhor horizontaliza o evento. A inspeção visual dos CIGs é um método capaz de definir estas velocidades, mas é preciso passar cada um dos instantâneos até encontrar a velocidade de horizontalização. Na Figura 4.5, por exemplo, pode-se dizer que a melhor velocidade para o primeiro evento é 1500 m/s, 1870 m/s para o segundo e 2520 m/s para o terceiro.

Um volume de CIGs continuados, pode ser manipulado para definir estas velocidades. Uma forma simples é fazer o empilhamento horizontal dos CIGs continuados e criar uma seção de velocidades para análise, como um mapa de coerência. Assim, num CIG continuado com determinada velocidade, esta soma feita em cada nível de profundidade determina um gráfico (um traço) que representa o quão o evento é horizontal. Se há algum evento horizontal na seção o empilhamento horizontal faz com que neste ponto a amplitude se destaque do restante.

No empilhamento horizontal deve-se levar em conta a supressão dos afastamentos longos por causa do estiramento e porque a velocidade que horizontaliza o evento nos afastamentos longos pode ser diferente dos afastamentos curtos (assunto que será discutido mais a frente). A supressão evitaria o empilhamento construtivo de intervalos nos afastamentos longos que porventura ficassem horizontais mesmo com erro de velocidade. No CIG continuado com 1870 m/s da Figura 4.5, por exemplo, há uma oportunidade de empilhar mais fortemente no trecho entre os afastamentos 2000 m e 4000 m, todavia a melhor velocidade que horizontaliza o segundo evento é 1810 m/s. Assim, a presença de longos afastamentos pode transladar o pico no espectro de velocidades para valores incorretos.

Quando se empilha horizontalmente os traços no CIG o resultado é um traço que varia entre valores negativos e positivos (ver Figura 4.6 (a)). Isto gera mais dificuldade ao definir o ponto onde fazer a picagem. A melhor alternativa é obter uma medida de coerência normalizada como o semblance convencional. O semblance convencional é rotineiramente usado para estimar velocidade NMO como função do tempo *zero-offset*. Adequando a expressão do semblance convencional para os CIGs continuados de acordo

com Neidell and Taner (1971) temos:

$$s[i] = \frac{\sum_{j=i-M}^{i+M} \left(\sum_{k=0}^{N-1} P[j, k] \right)^2}{N \sum_{j=i-M}^{i+M} \sum_{k=0}^{N-1} P[j, k]^2}, \quad (4.1)$$

onde i e j são os índices das amostras em profundidade, k é o afastamento, e $P[j, k]$ é a amplitude do traço na profundidade j e afastamento k do CIG continuado. Os somatórios internos corridos em k correspondem a N traços do CIG continuado com um valor de velocidade, enquanto os somatórios externos correspondem a uma janela em profundidade de comprimento $2M + 1$ centrado no índice de profundidade i . Nestas seções de semblance fica mais claro onde fazer a picagem (ver Figura 4.6 (b)). Os valores da picagem para seção de velocidade na Figura 4.6 (b) são mostrados na Tabela 4.2.

Profundidade (m)	Velocidade Média (m/s)
323.48	1498.31
902.61	1884.75
1961.74	2542.37

Tabela 4.2: Valores de profundidade e velocidade média obtidos com a picagem da Figura 4.6 (b).

4.1.4 Construção do modelo de velocidade e atualização

Os semblances permitem obter estimativas das velocidades médias que horizontalizam os eventos. Cada evento tem uma velocidade que está associada a uma profundidade de horizontalização. No dado investigado, foram feitas análises de velocidade nos CIGs 50 a 25050 em intervalo de 500 m. Cada análise resulta em uma tabela com as coordenadas ortogonais do ponto na seção de velocidade: profundidade e velocidade, como na Tabela 4.2. A partir dessas tabelas de valores foi possível utilizar o esquema mostrado na Figura 3.4 para construir o modelo. Como os valores de velocidade intervalar são determinados entre dois eventos, para o dado sintético em questão foram determinadas três valores de velocidade. Como dito anteriormente não há como determinar a velocidade abaixo do último evento. Na posição do CIG 7550, cujos valores obtidos da picagem são

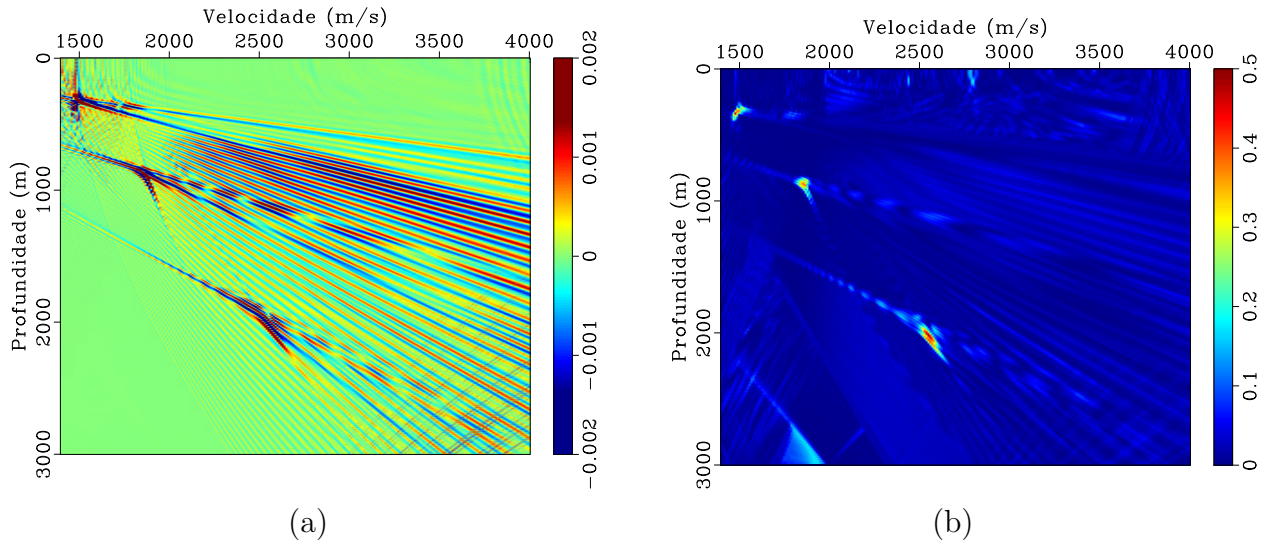


Figura 4.6: Seções de velocidade para o CIG 7525. Em (a) vê-se a seção obtida simplesmente empilhando horizontalmente os traços dos CIGs continuados e (b) obtida através do semblance convencional como descrito em 4.1.

mostrados na Tabela 4.2, as velocidades intervalares são

$$\begin{aligned}
 V_r^1 &= \frac{323.48 - 0.0}{\left(\frac{323.48}{1498.31} - 0.0\right)} = 1498.31, \\
 V_r^2 &= \frac{902.61 - 323.48}{\left(\frac{902.61}{1884.75} - \frac{323.48}{1498.31}\right)} = 2201.97, \\
 V_r^3 &= \frac{1961.74 - 902.61}{\left(\frac{1961.74}{2542.37} - \frac{902.61}{1884.75}\right)} = 3618.27.
 \end{aligned}$$

O modelo obtido para esta posição é mostrado na Tabela 4.3. Nesta posição os refletores 1, 2 e 3 estão a 300m, 800m e 1800m respectivamente.

O modelo de velocidade intervalar foi determinado em CIGs com um intervalo de 500 m. Para continuar o fluxo de construção foi necessário preencher estes intervalos até a amostragem para traçamento dos raios (intervalo de 50 m). As velocidades nas posições intermediárias foram obtidas através de interpolação linear. Este foi o método de interpolação mais adequado visto que outros (interpolação polinomial, spline cúbica, etc.) criavam velocidades anômalas, bem fora da faixa do modelo.

Profundidade (m)	Erro Relativo	Velocidade (m/s)	Erro Relativo
323.48	8%	1498.31	-0.1%
902.61	13%	2201.97	10%
1961.74	9%	3618.27	20%

Tabela 4.3: Modelo construído para o CIG 7550 obtidos a partir da picagem na Figura 4.6 (b). São mostrados os valores da profundidade do refletor e a Velocidade Intervalar com seus respectivos erros relativos.

Foi feita a migração em profundidade no primeiro modelo e continuação dos CIGs nas posições de análise. As tabelas obtidas a partir da nova análise de velocidade foram atualizadas de acordo com a expressão (3.17). As profundidades foram atualizadas adotando-se as profundidades definidas na picagem mais recente. A Tabela 4.4 mostra os valores obtidos de velocidade média ($V_{M,2}$) na segunda picagem, os valores anteriores ($V_{M,1}$) e suas respectivas profundidades de horizontalização. Além disso, a Tabela 4.4 mostra a operação de atualização dos valores de velocidade média.

Vale salientar que para migração em profundidade é necessário traçar raios para calcular os tempos de trânsito. Neste caso é fundamental a suavização do modelo para evitar dispersão ou “escape” dos raios e a criação de descontinuidades nas tabelas de tempo de trânsito. Assim, a atualização do modelo foi feita a partir do modelo suavizado o que indica que a suavização pode alterar o resultado nas iterações.

Profundidade (m)	Velocidade Média (m/s)
323.48→313.04	$(V_f=2000.00)-(V_R=2000)+(V_{M,1}=1498.31)=(V_{M,2}=1498.31)$
902.61→819.13	$(V_f=1915.25)-(V_R=2000)+(V_{M,1}=1884.75)=(V_{M,2}=1800.00)$
1961.74→1695.65	$(V_f=1644.07)-(V_R=2000)+(V_{M,1}=2542.37)=(V_{M,2}=2186.44)$

Tabela 4.4: Valores de profundidade e velocidade média obtidos na segunda picagem e os valores da operação de atualização na posição do CIG 7550.

Então, o novo modelo construído (segundo modelo), na posição do CIG 7550 é mostrado na Tabela 4.5. Nesta posição os erros relativos apresentam valores menores que 10%. Lembramos que a velocidade da última camada não pode ser extraída do método.

Para um terceiro modelo, na posição do CIG 7550, é mostrado na Tabela 4.6. Os resultados obtidos para este CIG mostram que os erros aumentaram na terceira atualização que não indica uma convergência.

Profundidade (m)	Erro Relativo	Velocidade (m/s)	Erro Relativo
313.04	4%	1498.31	-0.1%
819.13	2%	2056.08	3%
1695.65	-6%	2735.21	9%

Tabela 4.5: Modelo construído para o CIG 7550 obtidos a partir da segunda picagem. São mostrados os valores da profundidade do refletor e a Velocidade Intervalar com seus respectivos erros relativos.

Profundidade (m)	Erro Relativo	Velocidade (m/s)	Erro Relativo
318.26	6%	1511.86	0.7%
829.56	4%	1745.77	-12%
2055.65	14%	2427.11	-19%

Tabela 4.6: Modelo construído para o CIG 7550 obtidos a partir da terceira picagem. São mostrados os valores da profundidade do refletor e a Velocidade Intervalar com seus respectivos erros relativos.

A evolução do CIG para a posição 7550 é concordante com análise do erro. A Figura 4.7 mostra que o CIG para o primeiro modelo (Modelo 1) ainda persiste *moveout* indicando velocidade alta. No CIG para o segundo modelo (Modelo 2) os dois primeiros eventos ficam horizontais enquanto que o último mantém um erro considerável. Já no terceiro modelo (Modelo 3) há alterações no *moveout* que indicam que não há convergência.

Notamos que ao dar liberdade para modificar profundidades e velocidades médias de todos os eventos no processo de atualização estamos tornando o processo instável e que implica na divergência. Para o sucesso e robustez da construção do modelo é importante ter em mente a estratégia de *layer-stripping* que é corrigir o máximo possível os eventos mais rasos antes de tentar corrigir os mais profundos. Trataremos desse aspecto mais à frente. Neste caso, para não atualizar os valores de profundidade e velocidade calculados para eventos já corrigidos basta fazer a picagem na profundidade do evento e na velocidade igual a de referência. Assim, não é gerado um valor de atualização.

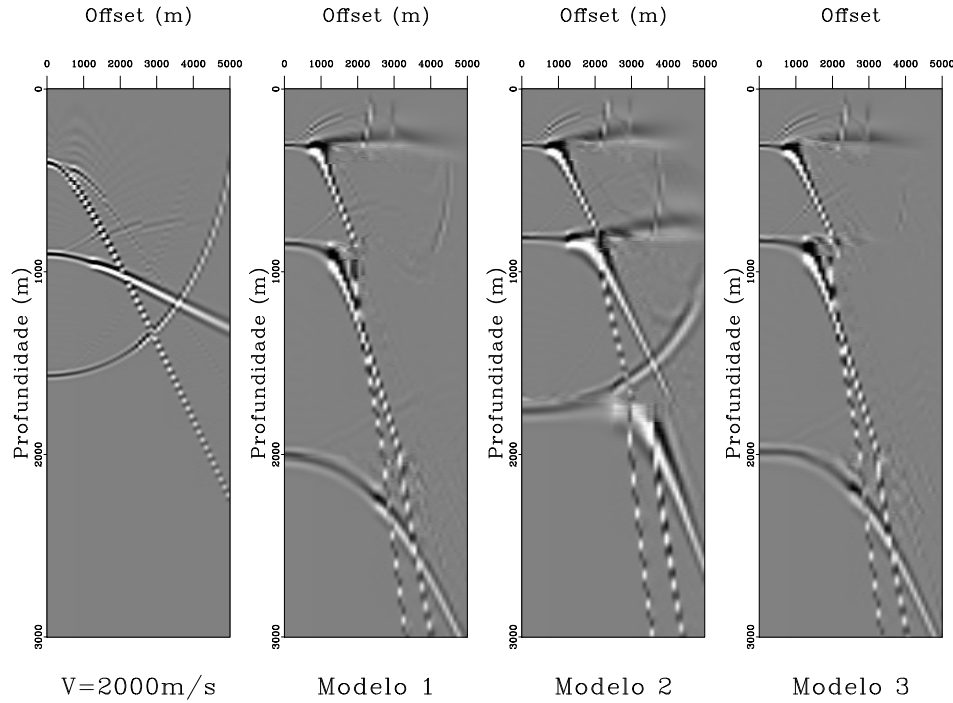


Figura 4.7: Evolução dos CIGs para posição 7550.

4.1.5 Construção por atualização das velocidades

A Figura 4.8 mostra a evolução do modelo adotando a atualização através das velocidades (equação 3.17). O resultado do primeiro modelo mostrado na Figura 4.8(b) é surpreendente, pois já apresenta a morfologia do modelo real. Essa característica de obter na primeira construção um modelo razoável para migração em profundidade é sem dúvida o ponto alto do método. O efeito dessa primeira inversão pode ser analisada através da comparação entre os CIGs da migração com velocidade constante de 2000 m/s, mostrados na Figura 4.9, com os CIGs da migração com o primeiro modelo invertido, mostrado na Figura 4.10. Este primeiro modelo no entanto, contém erros de velocidade que ultrapassam os 10 %, valor considerado tolerável. Além disso, os CIGs da Figura 4.10 apresentam *moveout* com as curvas voltadas para baixo que indicam que a velocidade está alta.

No segundo modelo, Figura 4.8(c), há melhorias tanto na profundidade quanto nas velocidades, e o modelo se aproxima mais do real. Os CIGs referentes a migração do segundo modelo são mostrados na Figura 4.11 e mostram uma melhor horizontalização se comparado com os anteriores. O modelo da terceira iteração é mostrado na Figura 4.8(d).

Uma análise mostra que existem valores na terceira iteração que se distanciaram do valor real. Isto é perfeitamente possível em regiões com variação lateral forte de velocidade e também por conta da aproximação que estamos fazendo. No entanto, por inspeção visual no mapa de cores nota-se que o modelo da terceira iteração está mais distante do real que o segundo modelo. Isto pode ser constatado com a análise comparativa dos CIGs obtidos de cada modelo (ver Figuras 4.10, 4.11 e 4.12). Assim sendo, reconhecemos que o resultado não está convergindo.

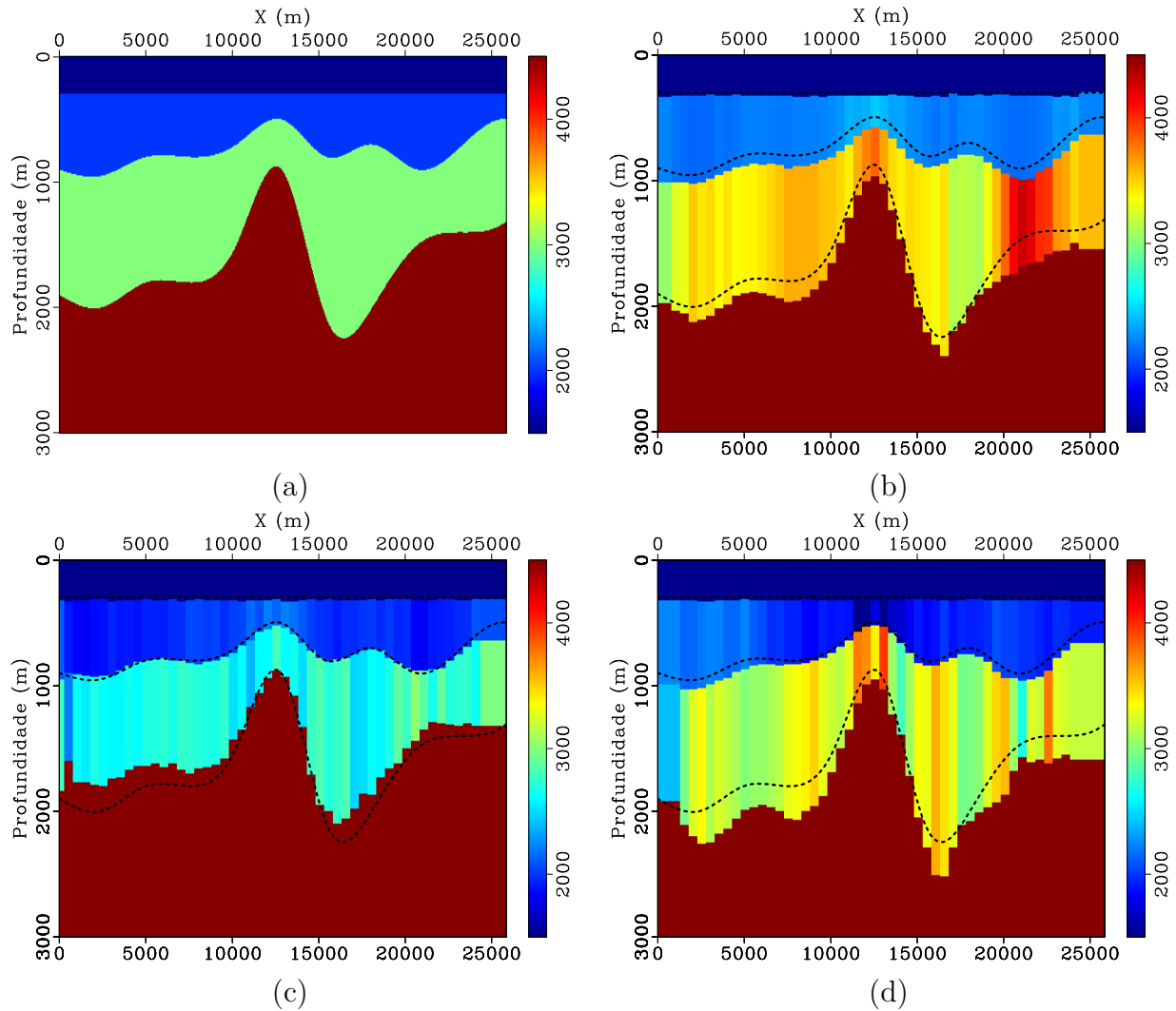


Figura 4.8: Evolução dos modelos com atualização das velocidades: (a) modelo real, (b) primeiro modelo, (c) segundo modelo e (d) terceiro modelo.

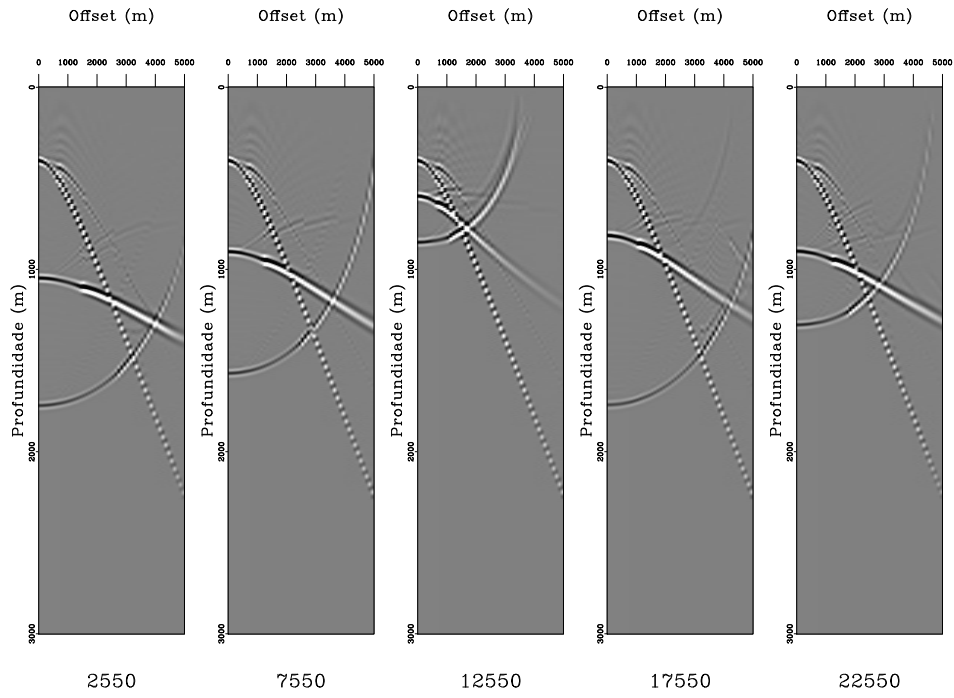


Figura 4.9: CIGs após migração com velocidade constante de 2000 m/s.

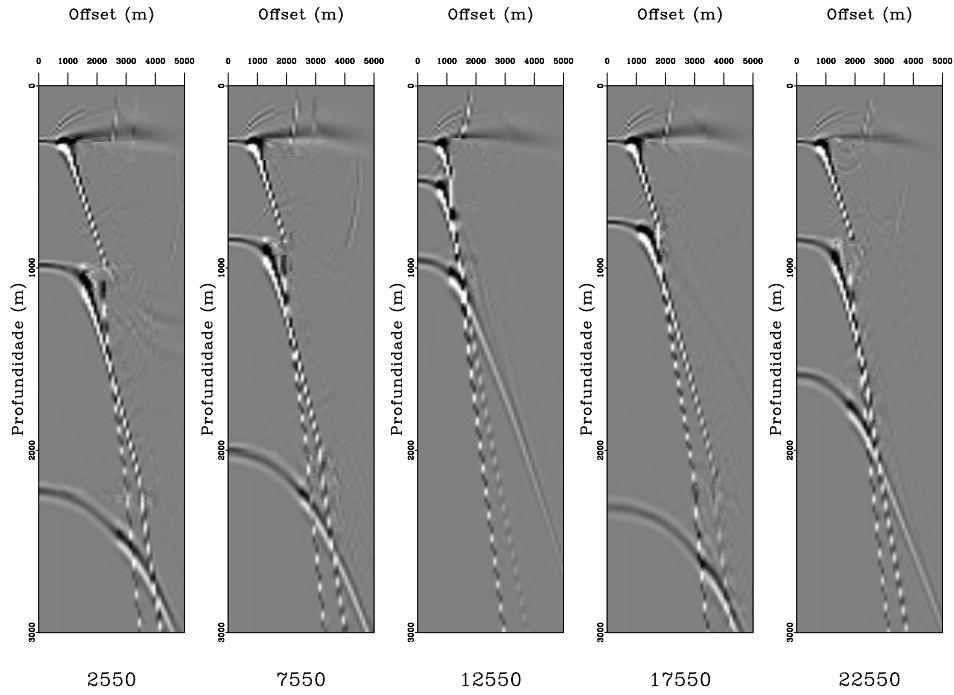


Figura 4.10: CIGs após primeira iteração. Obtido a partir da migração com primeiro modelo (Figura 4.8 (b)).

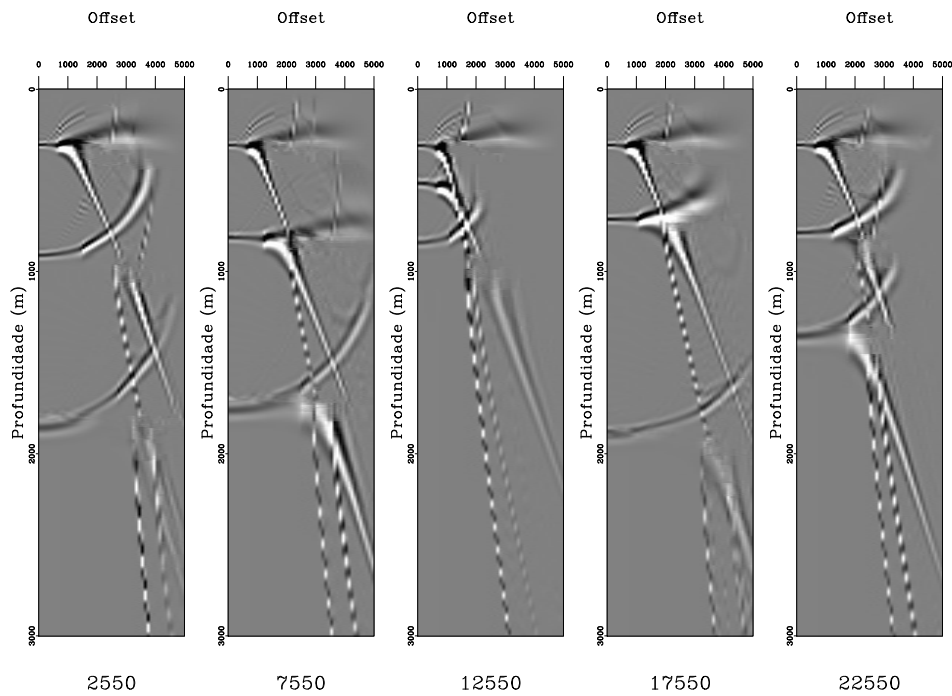


Figura 4.11: CIGs após segunda iteração. Obtido a partir da migração com segundo modelo (Figura 4.8 (c)).

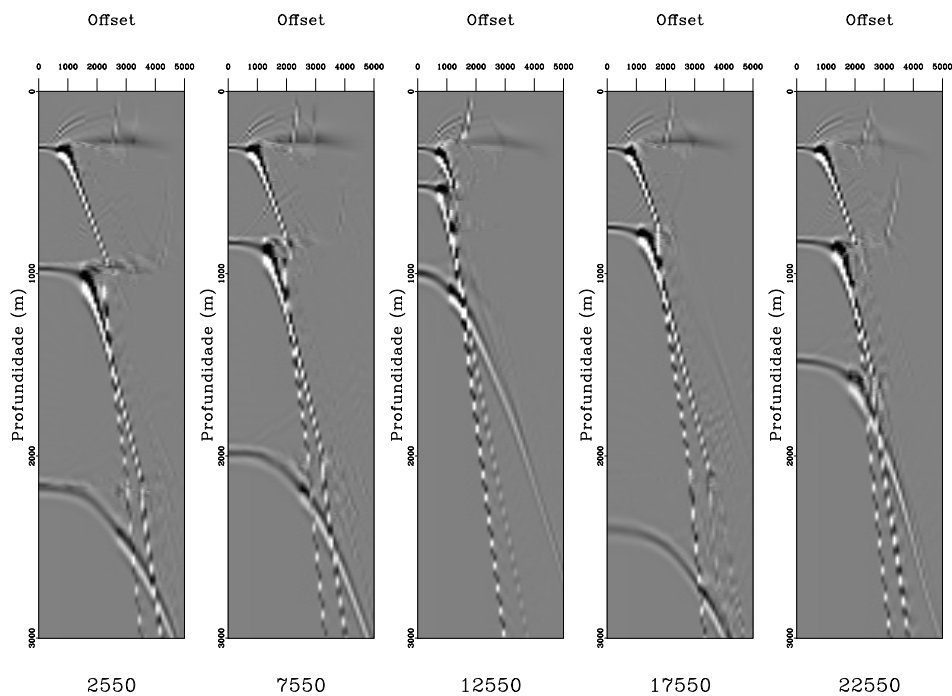


Figura 4.12: CIGs após terceira iteração. Obtido a partir da migração com terceiro modelo (Figura 4.8 (d)).

4.1.6 Construção por atualização das vagarosidades

A Figura 4.13 mostra a evolução do modelo adotando a atualização através das vagarosidades (equação 3.17). O resultado mostrado na Figura 4.13(b) é similar ao da Figura 4.8(b) porque não envolve atualização. No segundo modelo, Figura 4.13(c), as profundidades são similares ao da Figura 4.8(c), mas as velocidades são bem diferentes. Esta diferença é mais notável na terceira camada em que os valores de atualização diminuíram a velocidade além do obtido pelo caso anterior (modelo atualizado com a expressão de velocidades). Isto indica que a expressão que das vagarosidades é influenciada pelo valor da velocidade média que está atualizando. O modelo na próxima iteração, mostrado na Figura 4.13(d) mostra uma maior variação lateral das velocidades na terceira camada causado pela dependência mencionada. Quanto maior for a velocidade média a ser atualizada com respeito a velocidade de referência mais discrepante será o resultado obtido com a expressão das velocidades. Ao verificar a evolução dos CIGs através das Figuras 4.14 (migrado com velocidade constante 2000 m/s), 4.15 (primeiro modelo), 4.16 e 4.17 notamos que não há convergência. Além disso, o resultado é inferior ao obtido com a atualização das velocidades. Por hora, decidimos abandonar a atualização por vagarosidades tendo em vista este comportamento e adotar na próxima etapa do trabalho a expressão da atualização por velocidades.

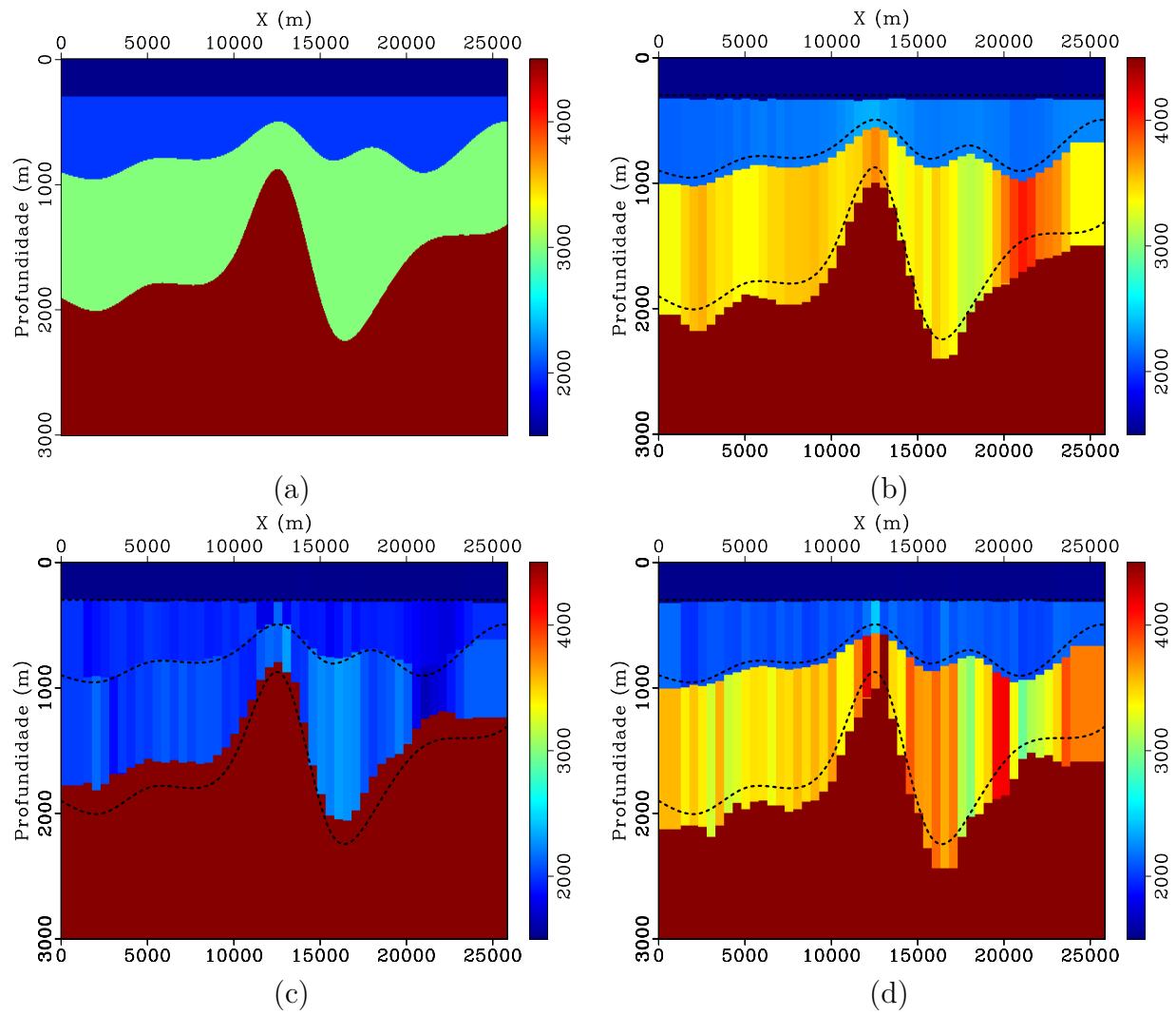


Figura 4.13: Evolução dos modelos com atualização das vagarosidades: (a) modelo real, (b) primeiro modelo, (c) segundo modelo e (d) terceiro modelo. Compare com a Figura 4.8.

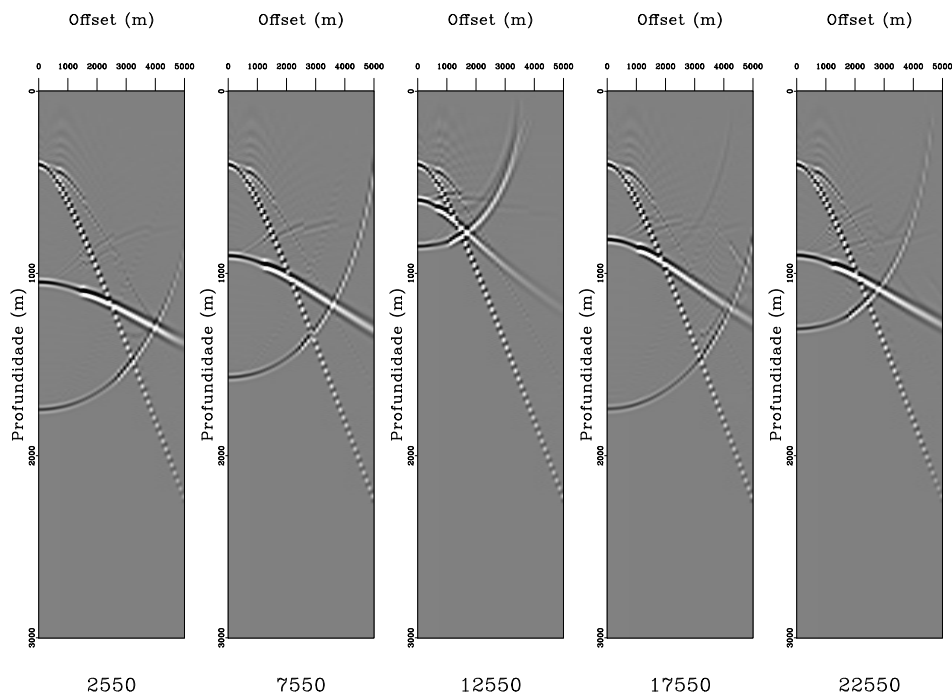


Figura 4.14: CIGs após migração com velocidade constante de 2000 m/s.

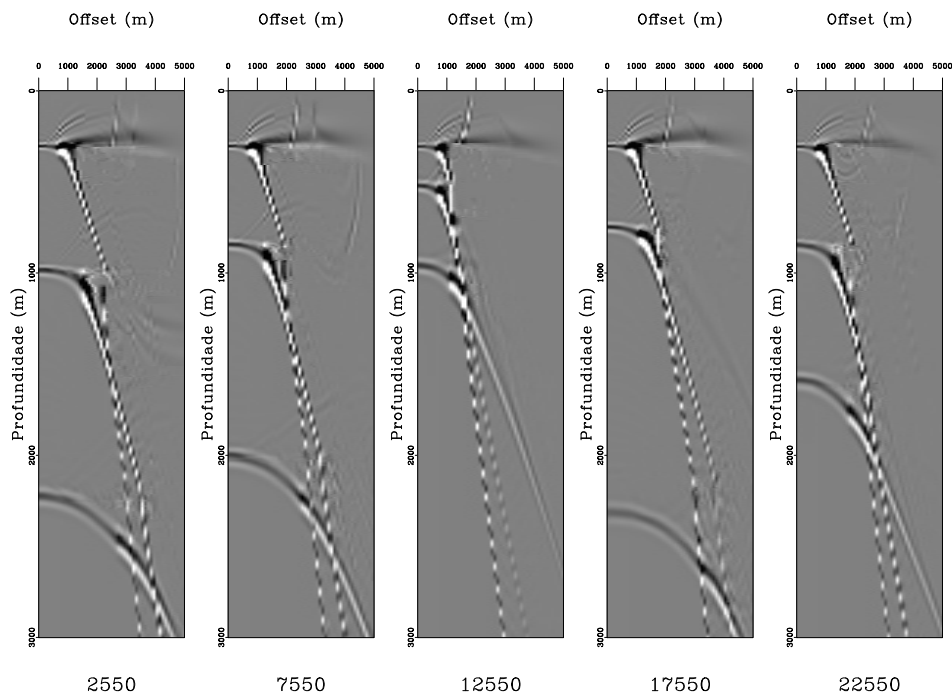


Figura 4.15: CIGs após primeira iteração. Obtido a partir da migração com primeiro modelo (Figura 4.13 (b)).

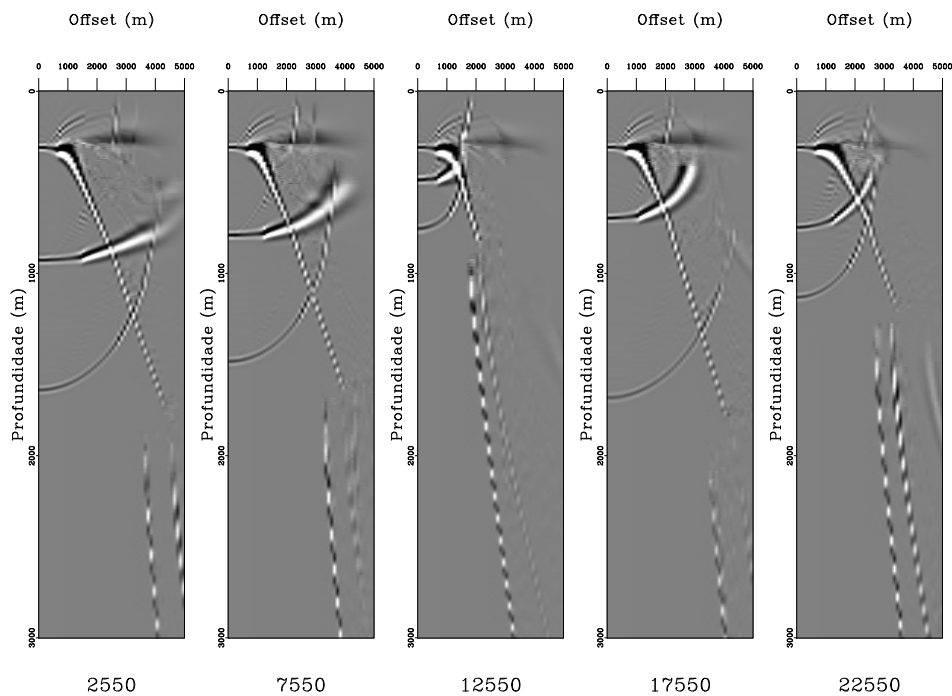


Figura 4.16: CIGs após segunda iteração. Obtido a partir da migração com segundo modelo (Figura 4.13 (c)).

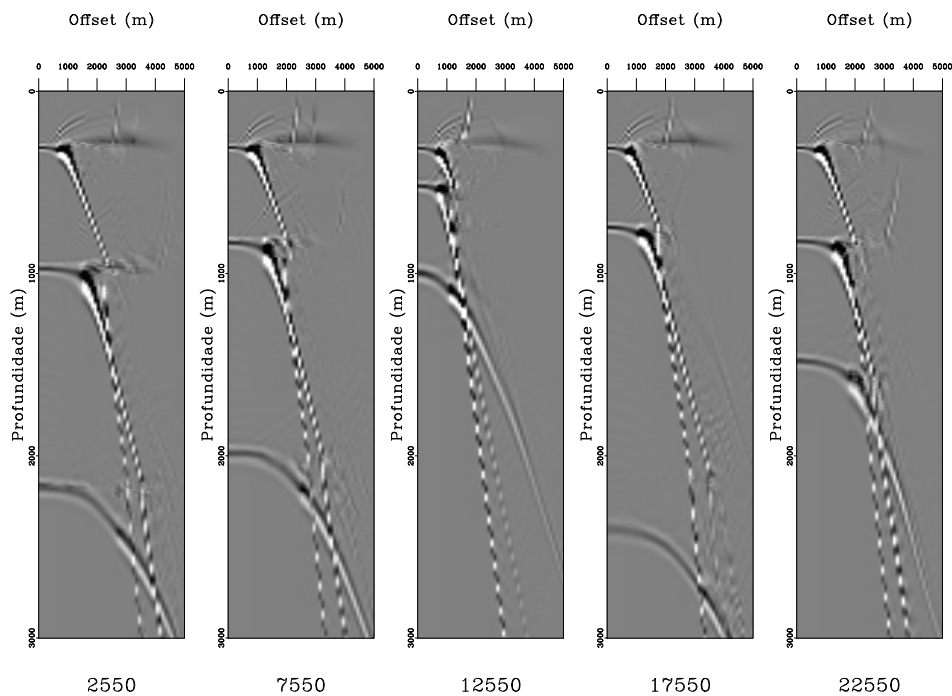


Figura 4.17: CIGs após terceira iteração. Obtido a partir da migração com terceiro modelo (Figura 4.13 (d)).

4.1.7 Supressão dos Afastamentos Longos

O resultado da construção do primeiro modelo depende da faixa de afastamentos utilizada para determinar a velocidade média mediante propagação da imagem. A velocidade média que determina o posicionamento do evento migrado em profundidade não é igual para faixas de afastamentos diferentes. Isto pode ser explicado através do modelo com duas interfaces planas e horizontais com contraste de velocidade (ver Figura 4.18). Suponha que neste modelo específico, que o ponto imagem seja **I**, na segunda interface e justamente no ponto médio entre **F** (fonte) e **R** (receptor) e que há dois afastamentos para determinar a velocidade mediante propagação da imagem: um mais curto (a) e um mais longo (b). A diferença entre a trajetória reta do raio (**FIR**) da Fonte ao Receptor refletindo em **I** e a trajetória do raio desviando na primeira interface (**FAIBR**) é maior no afastamento longo (b) que no mais curto (a). Isto significa que a velocidade média para posicionar o ponto **I** corretamente é menor para o afastamento curto que para o afastamento longo. Esta diferença de trajetória é reduzida para o caso em que as reflexões são mais profundas e a relação afastamento fonte-receptor é pequena se comparada a profundidade.

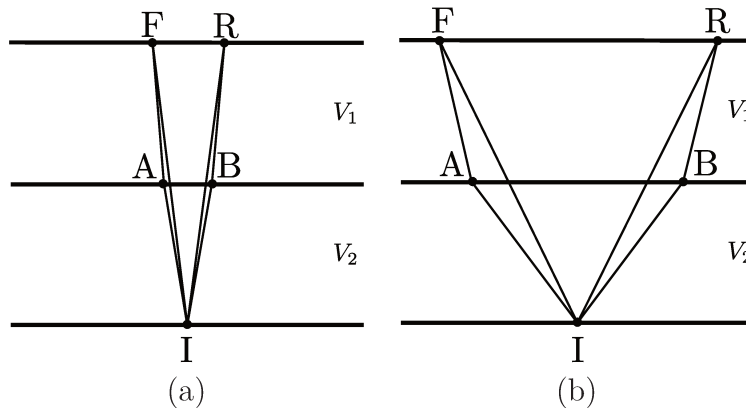


Figura 4.18: Esboço esquemático de duas camadas planas horizontais com velocidades V_1 e V_2 onde $V_2 > V_1$ mostrando a trajetória do raio entre fonte (F) e receptor (R) com reflexão na segunda interface (em I) para dois afastamentos.

Para melhorar a estimativa das velocidades médias e profundidades por propagação da imagem é recomendado a supressão, nos CIGs continuados, das imagens nos afastamentos longos através da função de silenciamento.

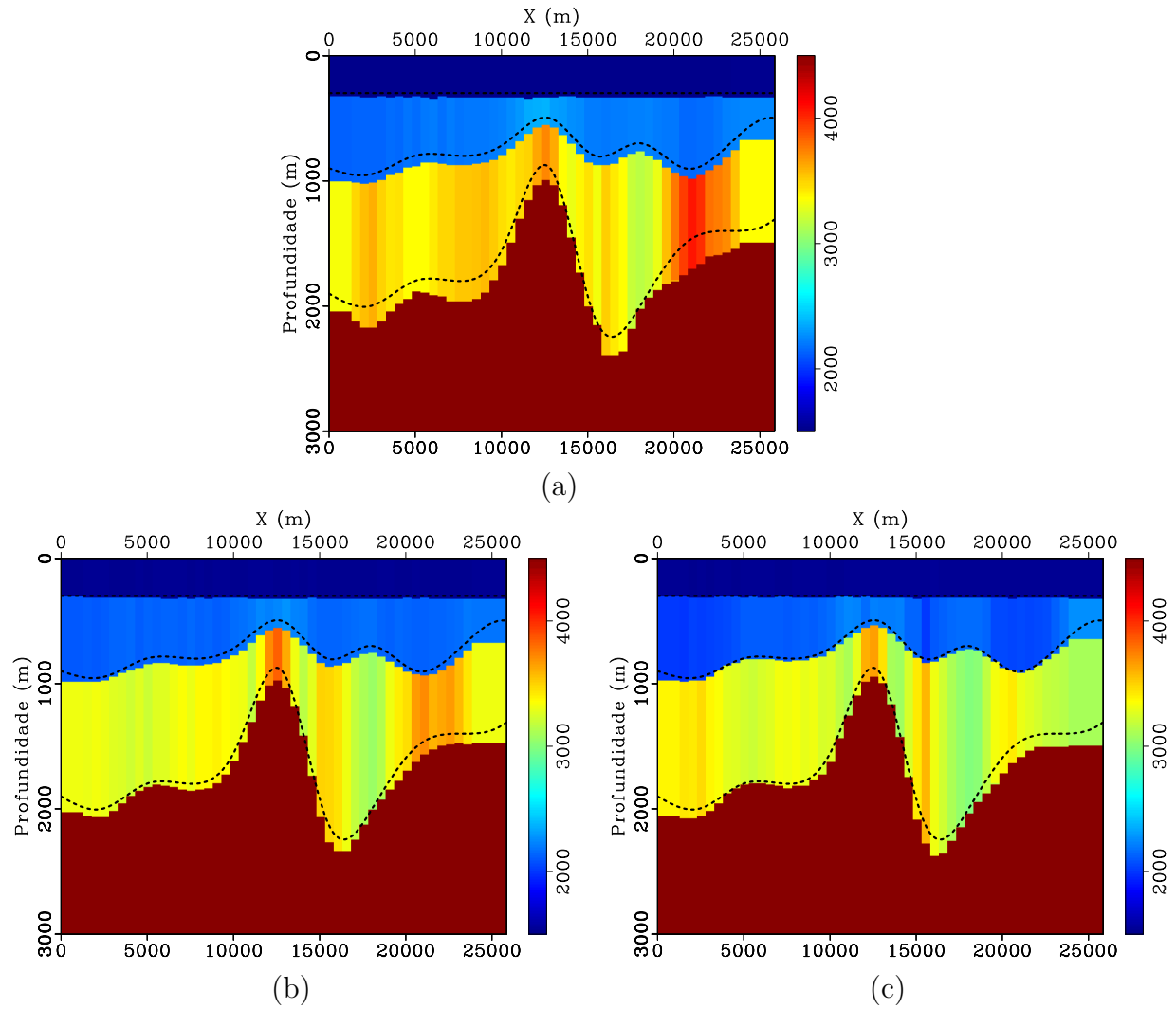


Figura 4.19: Modelos obtidos com uma análise de velocidades (sem atualizações), a partir de CIGs continuados (a) sem silenciamento, (b) com silenciamento mais extensivo, uma reta $m(z) = 0.2 \times z + 2000$ e (c) com silenciamento mais restritivo, uma reta $m(z) = 1.0 \times z + 1000$.

Para verificar o efeito do silenciamento na construção do primeiro modelo foram utilizadas duas funções: (i) uma mais extensiva, uma reta $m(z) = 0.2 \times z + 2000$ e (ii) uma mais restritiva, uma reta $m(z) = 1.0 \times z + 1000$. A Figura 4.19 mostra os modelos construídos a partir do uso dessas supressões. A Figura 4.19(a) mostra o modelo construído sem silenciamento, é igual ao primeiro modelo nas figuras da Seção 4.1.4 (Figuras 4.8(b) e 4.13(b)). A Figura 4.19(b) mostra o resultado para o silenciamento mais extensivo enquanto a Figura 4.19(c) para o mais restritivo. O resultado mostra que os modelos melhoram progressivamente, seja nos valores de velocidade quanto de profundidade, com a supressão das imagens com afastamentos mais longos.

4.2 *Layer-Stripping*

Na Seção 4.1.4 vimos que para tornar o método de construção mais robusto e com convergência mais rápida é sugerido usar a estratégia de *layer-stripping*. No caso aqui, esta estratégia consiste em corrigir o máximo possível as velocidades médias bem como profundidades dos eventos mais rasos com a finalidade de reduzir o erro propagado para os eventos mais profundos. Nesta seção vamos antecipar a informação para o método, vamos acrescentar os parâmetros conhecidos (velocidade média e profundidade) das interfaces, de cima para baixo, em um modelo imaturo e fazer as devidas atualizações a fim de melhorar os parâmetros da última interface.

Com objetivo de demonstrar o funcionamento desta estratégia na construção mediante continuação da imagem seguimos uma sequência de acordo com o fluxo de construção do capítulo anterior: (i) construímos um modelo partindo de velocidade constante, (ii) supomos conhecer os parâmetros da primeira interface (interface 1), recalculamos a velocidade intervalar da segunda camada e fizemos a primeira iteração com atualização das velocidades, (iii) supomos que a segunda interface (interface 2) foi determinada, recalculamos a velocidade intervalar da terceira camada e fizemos a segunda iteração com atualização das velocidades. Assim, por inspeção visual, mostramos que em cada passo a determinação da profundidades bem como da velocidades nas interfaces mais profundas é melhorada.

A Figura 4.20(a) mostra o modelo construído partindo da velocidade constante. O resultado é melhor que o obtido na Seção 4.1.4 porque utilizamos uma função de silenciamento suprimindo os afastamentos mais longos. O horizonte tracejado, que representa a

posição correta do refletor não coincide com o determinado pelo método, ou seja, contém um erro associado. Na Figura 4.20(b) é mostrado o modelo com a informação a priori da interface 1 (velocidade média e profundidade). Com a informação a priori a velocidade intervalar da segunda camada é recalculada. Notamos que essa diferença é pouco perceptível porque a posição e velocidade da primeira camada foram determinadas com boa qualidade resultando assim em pouca correção pela introdução de informação a priori sobre essa camada.

O modelo da Figura 4.20(b) foi sujeito a uma iteração (migração, continuação dos CIGs e picagem de velocidade) com atualização das velocidades e profundidades das interfaces 2 e 3: a comparação entre as duas fases é mostrada na Figura 4.21. De um modo geral o modelo se ajusta às interfaces 2 e 3 verdadeira e as velocidades intervalares ficam mais próximas da real. No entanto, percebe-se que em alguns pontos, cuja suspeita recai naqueles onde é difícil definir a picagem, a interface 2 fica mais rasa do que a real e a velocidade intervalar fica mais baixa que a real, ou seja a atualização foi além da conta.

O modelo da Figura 4.21(b) é alterado com a introdução de informação a priori das interfaces 1 e 2. Esta alteração simula a conclusão da análise de velocidade para as interfaces 1 e 2. O modelo que obtemos é o da Figura 4.22(b). Neste caso, os valores de velocidade da terceira camada são recalculados. Observamos uma melhora significativa das velocidades e posicionamento da interface 3 após introdução da informação a priori sobre as interfaces 1 e 2, indicando que o processo de *layer-stripping* é promissor para metodologia proposta.

O modelo da Figura 4.22(b) foi sujeito a uma iteração (migração, continuação dos CIGs e picagem de velocidade) com atualização das velocidades: a comparação entre as duas fases é mostrada na Figura 4.23. A Figura 4.23(b) mostra que de um modo geral o modelo se ajusta à interface 3 verdadeira e as velocidades intervalares ficam mais próximas da real. Mas como no caso da interface 2 anteriormente a atualização foi além da medida nos pontos que havia algum erro na determinação. Os erros que ainda perduram estão associados a avaliação errônea da picagem manual.

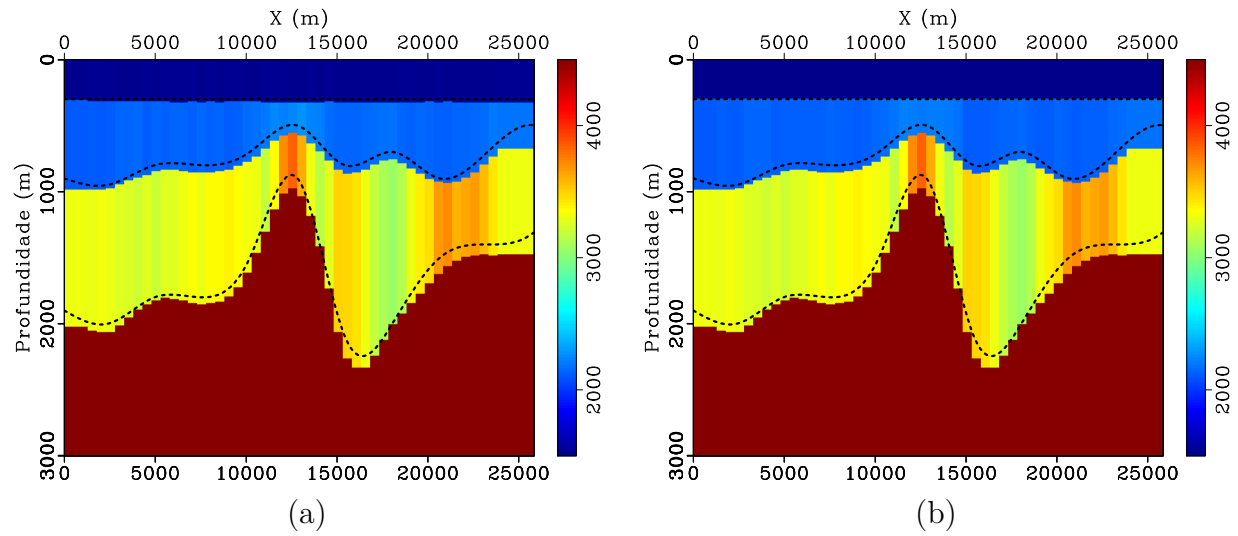


Figura 4.20: Introdução de informação a priori da interface 1: (a) modelo de partida construído a partir de velocidade constante, (b) recalculado com informação a priori da interface 1.

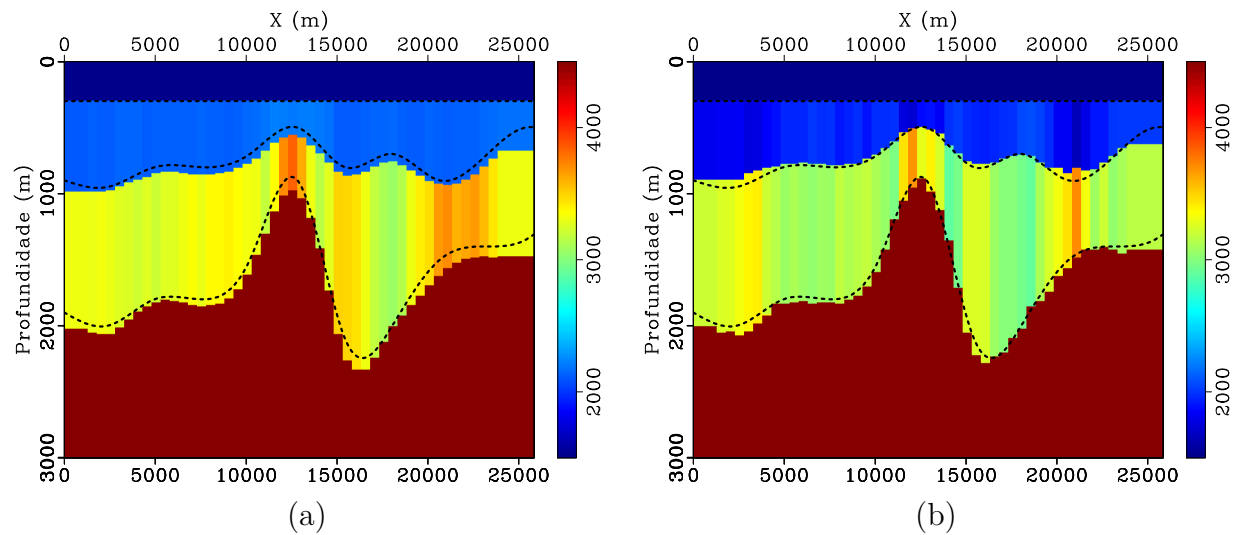


Figura 4.21: Fazendo uma iteração para ajustar interfaces 2 e 3: (a) modelo de partida obtido com introdução de informação a priori da interface 1, (b) obtido com uma iteração.

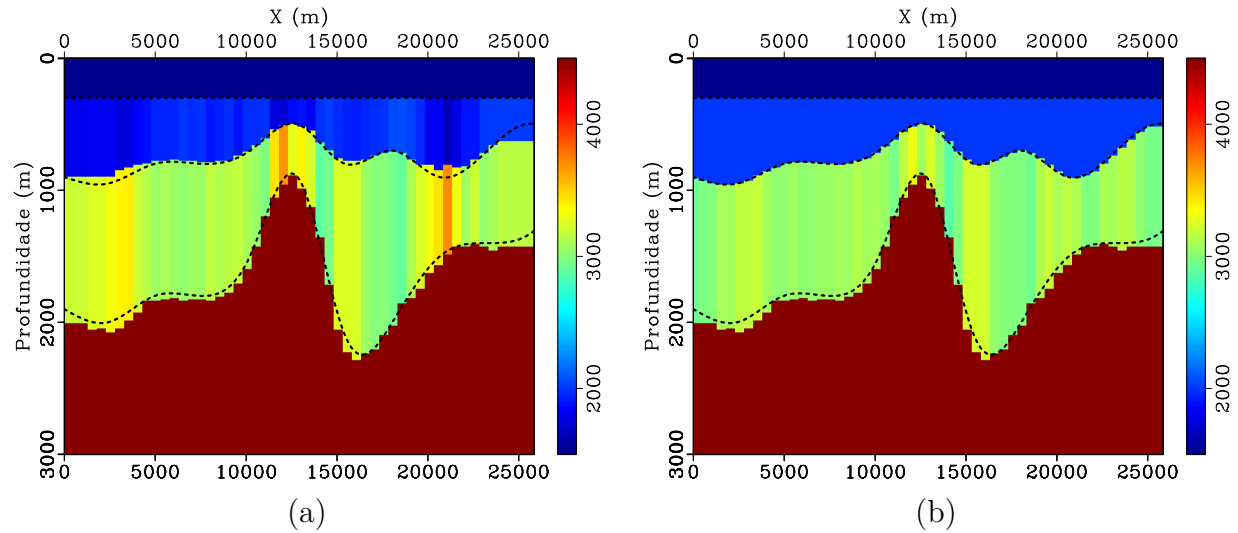


Figura 4.22: Introdução de informação a priori das interfaces 1 e 2: (a) modelo de partida obtido com uma iteração, (b) recalculado com informação a priori das interfaces 1 e 2.

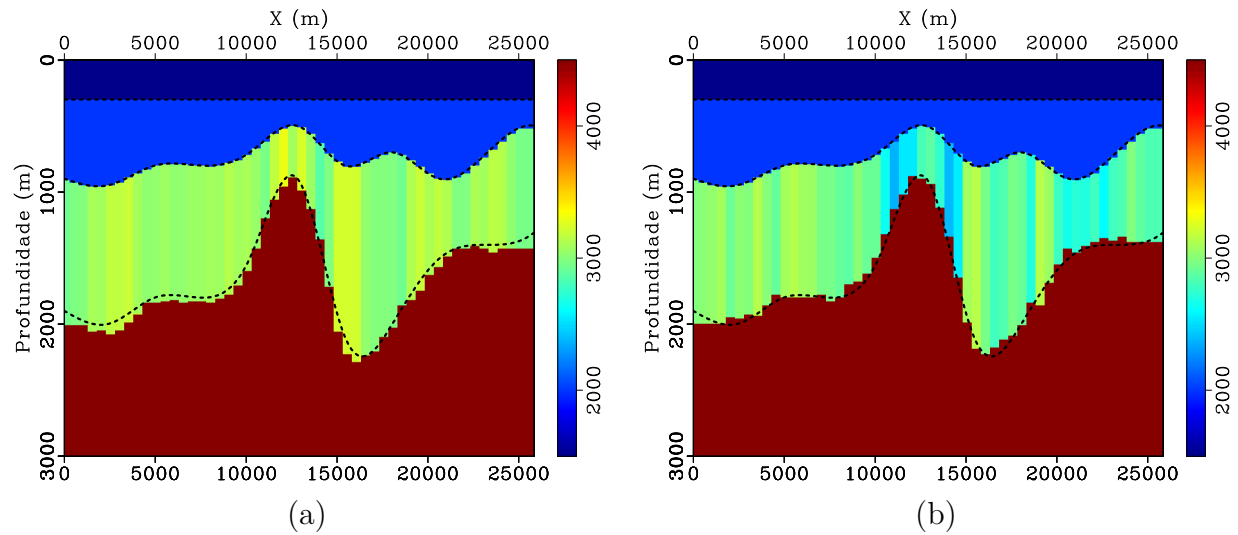


Figura 4.23: Fazendo uma iteração para ajustar interface 3: (a) modelo de partida recalculado com informação a priori das interfaces 1 e 2, (b) obtido com segunda iteração.

4.3 Dado Marmousoft

O processo aplicado no dado sintético inicial tem seus eventos bem distintos, identificáveis, de maneira que o processo de atualização é mais simples. Os eventos escolhidos na iteração i são os mesmos na iteração $i + 1$ e então pode ser feita a operação (3.17) diretamente. No caso de um dado real, com muitos eventos, o controle dos eventos interpretados na primeira iteração não corresponde aos da segunda iteração a não ser que seja feito um trabalho de identificação dos eventos.

Para fazer a atualização em um dado real optamos por não identificar os eventos. Ao invés de usar essa estratégia, optamos por fazer a picagem no semblance naturalmente e calculamos a velocidade média do evento na iteração i a partir da profundidade obtida na picagem na iteração $i + 1$. A velocidade pôde ser calculada através da expressão 3.14.

O dado Marmousoft (Billette et al., 2003) é um dado gerado por modelagem Born do modelo suavizado do Marmousi. Este dado é regularizado e num estágio pronto para a análise de velocidade de migração. Os parâmetros do dado são mostrados na Tabela 4.7. O dado cobre (cobertura completa) cerca de 5 km de extensão. Tem uma cobertura (*fold*) de 96 traços e um afastamento máximo de 2475 m, este talvez, seja um parâmetro complicador no processo de análise de velocidade tendo em vista que pretende-se obter imagem até 3 km.

O processo de análise de velocidade descrito foi aplicado ao dado Marmousoft da maneira mais elementar e portanto não foi feito a supressão dos afastamentos longos e também não se utilizou da estratégia de *layer-stripping*.

Número de CMPs	261
Intervalo de CMP	12.5m
Número de Afastamentos	96
Afastamento mais curto	100m
Afastamento mais longo	2475m
Intervalo de Afastamento	25m
Intervalo de Amostragem	4ms
Tempo de Registro	3.6s

Tabela 4.7: Tabela de parâmetros da dado Marmousoft.

Para primeira análise de velocidade foi feita migração Kircchoff com velocidade constante $V_c=2000$ m/s. Na migração, utilizou-se uma abertura de 10 km, um ângulo máximo

de 85° e frequência máxima de 60 Hz. O intervalo de amostras para a saída da migração foi definido em 3 m e um total de 1001 amostras e maneira a compor 3 km de imagem.

Foram feitas análises de velocidade a cada 250 m gerando 35 CIGs para análise. Para continuação dos CIGs utilizamos 2000 m/s como velocidade de referência e a mesma faixa de velocidade utilizada na seção anterior: 1400 m/s a 4000 m/s. As velocidades intervalares obtidas nestas posições foram em seguida interpolados linearmente até a distância de 25 m para preenchimento do modelo. Alguns CIGs migrados com velocidade de 2000 m/s são mostrados na Figura 4.24. Percebe-se que os eventos nestes CIGs têm o formato previsto pela teoria na lateral do modelo (CIGs 3500, 4500 e 7500). No centro, o formato é bem mais irregular, motivo pelo qual esperamos que o desempenho do método seja prejudicado. Isso se confirma na análise dos espectros de semblance respectivos mostrados na Figura 4.25. É possível notar uma boa focalização dos espectros nos CIGs 3500, 4500 e 7500, facilitando a determinação das velocidades de horizontalização. Em contraposição, a focalização nos outros dois espectros é bem mais fraca, indicando a dificuldade de determinar uma velocidade média válida nesta região. Observamos que neste experimento não restringimos os afastamentos usados. Esperamos uma melhora no aspecto da focalização se um silenciamento inteligente for usado.

Foram feitas duas iterações utilizando atualização das velocidades de acordo com a expressão 3.17. A evolução dos modelos bem como as seções sísmicas empilhadas são mostradas nas figuras 4.26 e 4.27 respectivamente. O primeiro modelo, da Figura 4.26(a), apresenta um resultado surpreendente, indicando a morfologia das estruturas. A seção empilhada da Figura 4.27(a), obtida com este modelo mostra que até 1500 m de profundidade, os refletores estão bem definidos com as estruturas corretamente posicionadas e as falhas reforçadas. Além de 1500 m e na parte central pode-se notar a imagem distorcida como um *pull-up* dos eventos induzido pela ambiguidade na definição das velocidades nesta porção.

O segundo modelo mostrado na Figura 4.26(b) apresenta um aumento das velocidades na parte central que faz com que a imagem dos refletores desloquem para baixo (ver Figura 4.27(b)). No entanto, na porção central da seção, na profundidade 1500 m e posição 6000, a imagem perde definição o que indica uma piora do modelo. Uma inspeção mais detalhada revela que, mesmo na parte central os refletores acima de 1000 m de profundidade ficaram mais focados, indicando que os erros abaixo desta profundidade

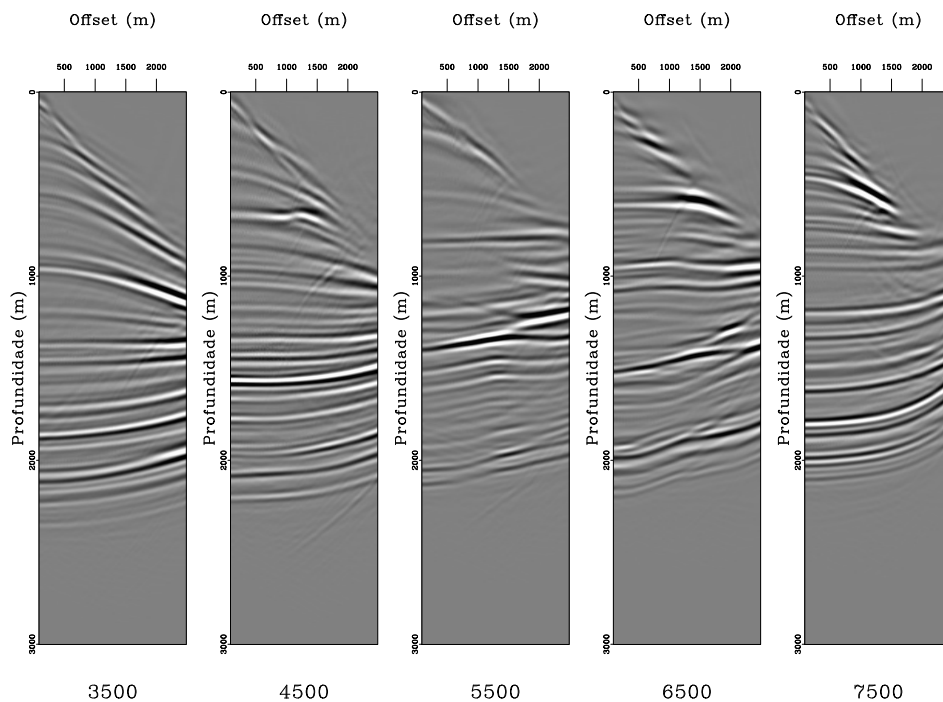


Figura 4.24: CIGs do dado Marmousoft obtidos com velocidade constante de 2000 m/s.

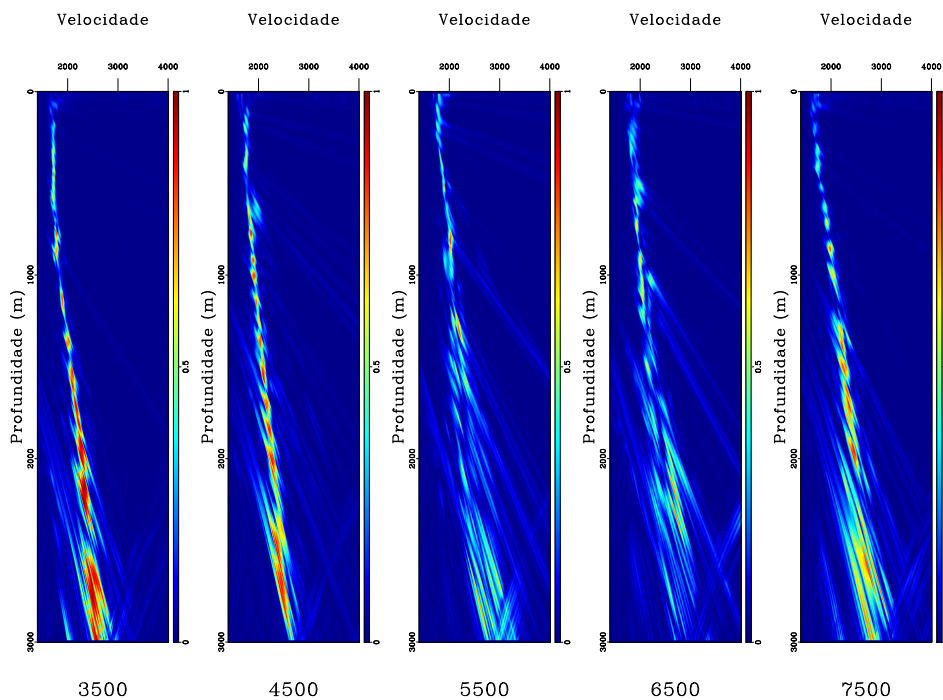


Figura 4.25: Semblances do Marmousoft obtidos com CIGs da Figura 4.24 continuados na faixa de 1400 m/s a 4000 m/s.

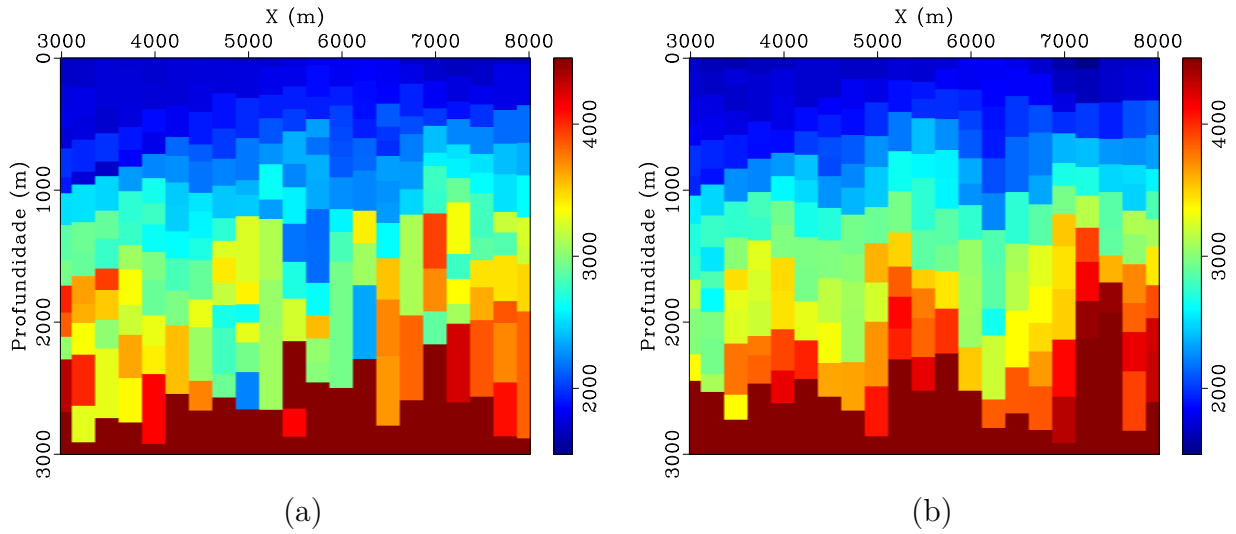


Figura 4.26: Evolução dos modelos de velocidade para o dado Marmousoft: (a) primeiro modelo e (b) segundo modelo.

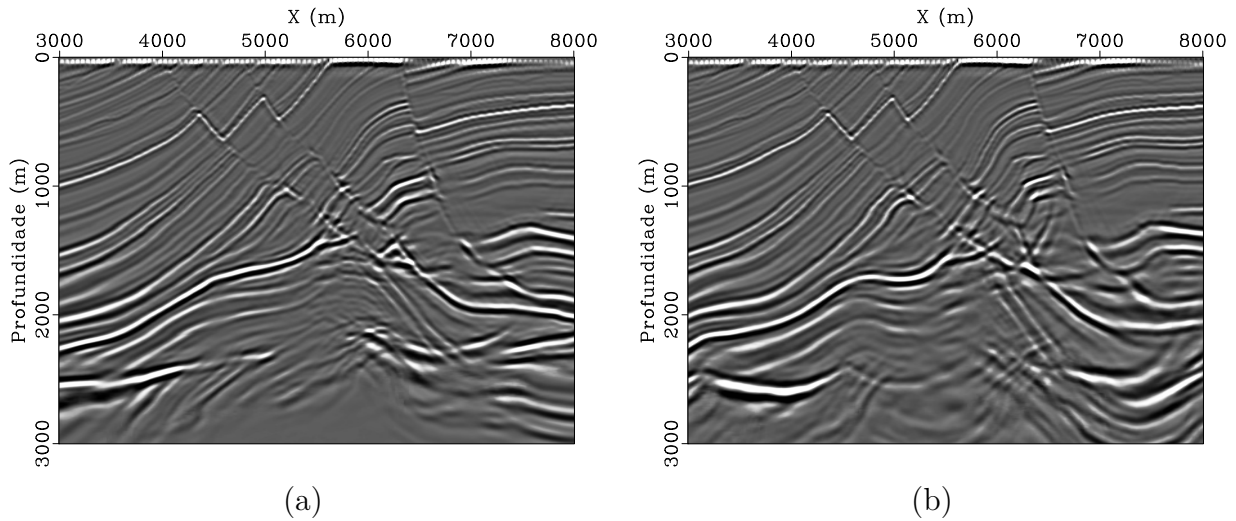


Figura 4.27: Resultados da migração (empilhado) para o dado Marmousoft: (a) para o modelo Figura 4.26(a) e (b) para o modelo Figura 4.26(b).

resaltam principalmente os erros acumulados do primeiro modelo em profundidades mais rasas. Espera-se que em iterações adicionais esta parte também melhore.

Os CIGs referentes ao primeiro modelo são mostrados na Figura 4.28. Os eventos são horizontalizados até 1000 m com pouco *moveout* residual. Esta observação é também notada nos semblances da Figura 4.29 onde os picos se concentram próximos de 2000 m/s. Além de 1000 m, há uma aumento dos *moveouts* residuais nos CIGs e também um

distanciamento dos picos nos semblances com respeito a velocidade de referência. Além disto, nos CIGs centrais além de 1000 m, aparecem eventos conflitantes, com *moveouts* diversos, que nas seções de semblance mostram-se como picos não definidos e dispersos (há mais de um pico para mesma profundidade). A ambiguidade, que está associada a complexidade do meio, aumenta as chances de erro na geração do modelo desta região.

Os CIGs referentes ao segundo modelo são mostrados na Figura 4.30. Há pouca alteração nos eventos até 1000 m, se comparado aos CIGs anteriores, com a exceção do CIG 7500 que apesar de ter uma melhora significativa dos primeiros três eventos mais rasos. Nos CIGs 4500 a 7500, a partir de 1000 m há, um aumento do *moveout* para baixo (velocidade alta) que reflete nos respectivos semblances da Figura 4.31 em um deslocamento do *trend* de picos para esquerda da velocidade de referência. Este erro no processo de análise pode estar associado a propagação do erro de eventos superiores ainda não corrigidos adequadamente ou na definição de velocidades erradas por conta da ambiguidade da região complexa. A maior possibilidade é que por não ter sido utilizado a estratégia de *layer-stripping*, o erro dos eventos superiores contribuíram para o erro dos demais. Esta interpretação é reforçada pelo fato de que os eventos nos espectros de semblance entram em foco até uma profundidade onde ocorre o primeiro desvio de posição dos picos, afastando-se da linha vertical correspondente à velocidade de referência de 2000 m/s. Abaixo de um tal desvio, os eventos não geram mais picos focados. A solução imediata é fazer mais iterações para obter a convergência, focando especialmente nos eventos mais rasos que ainda tiverem seus picos deslocados da linha de 2000 m/s.

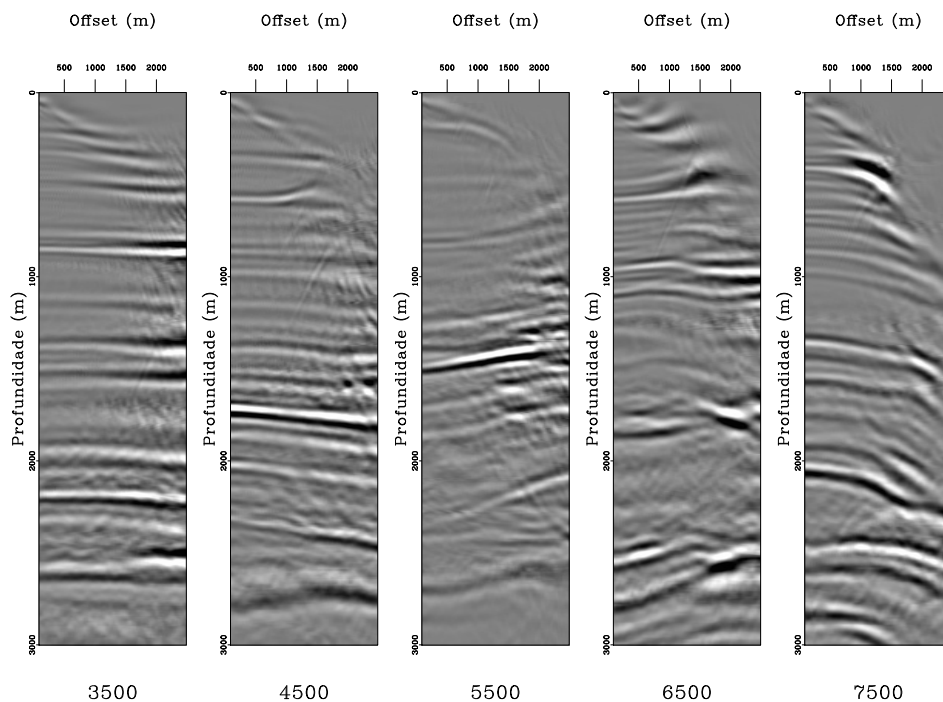


Figura 4.28: CIGs do dado Marmousoft para primeira iteração. Obtido a partir da migração com o primeiro modelo (Figura 4.26 (a)).

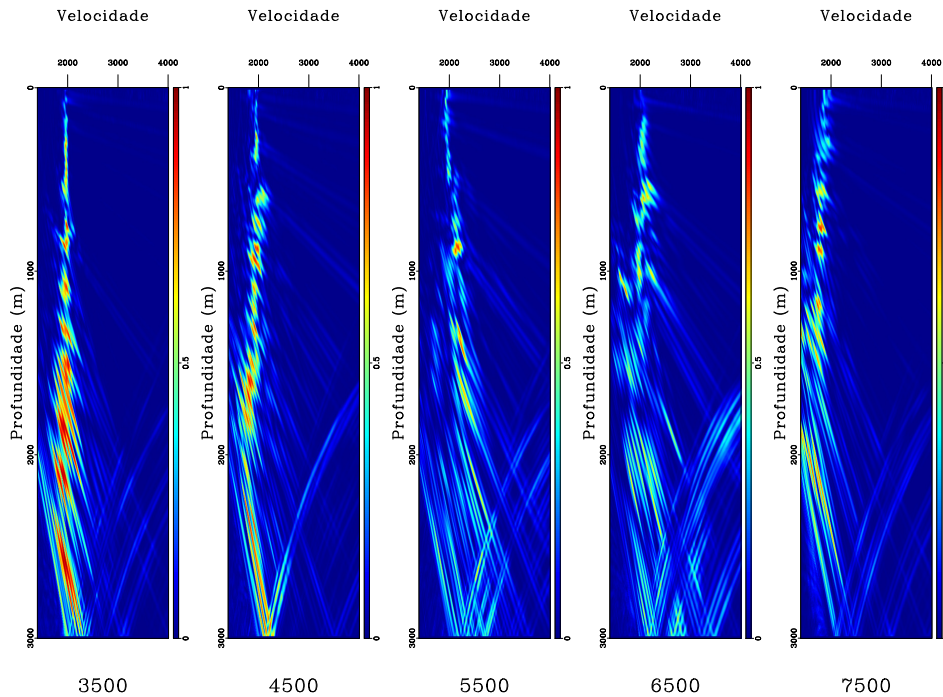


Figura 4.29: Semblances do dado Marmousoft para primeira iteração. Obtido a partir da migração com o primeiro modelo (Figura 4.26 (a)).

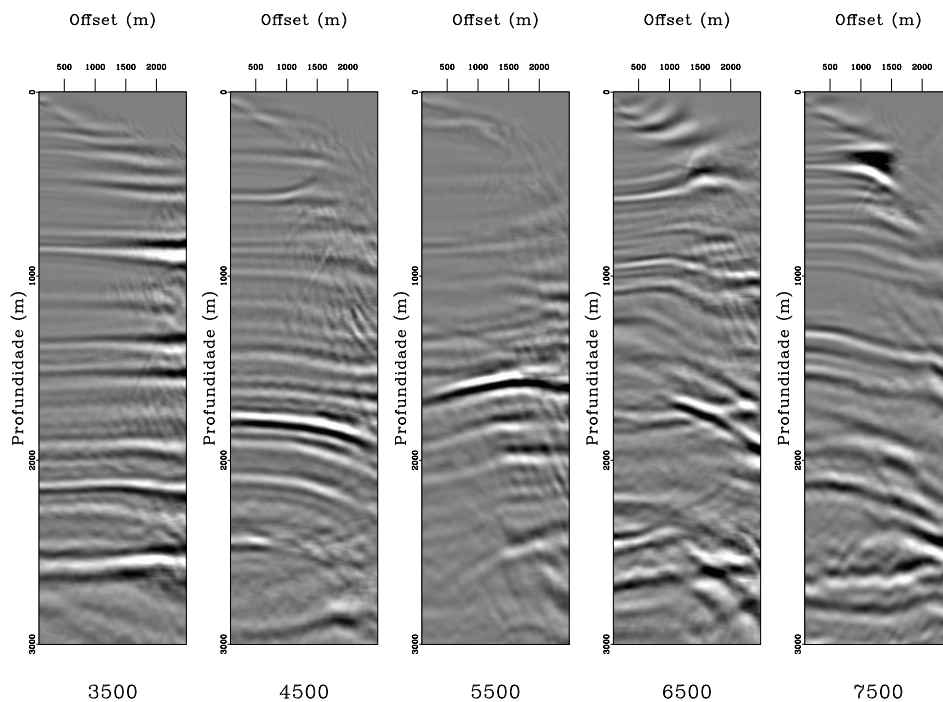


Figura 4.30: CIGs do dado Marmousoft para segunda iteração. Obtido a partir da migração com o segundo modelo (Figura 4.26 (b)).

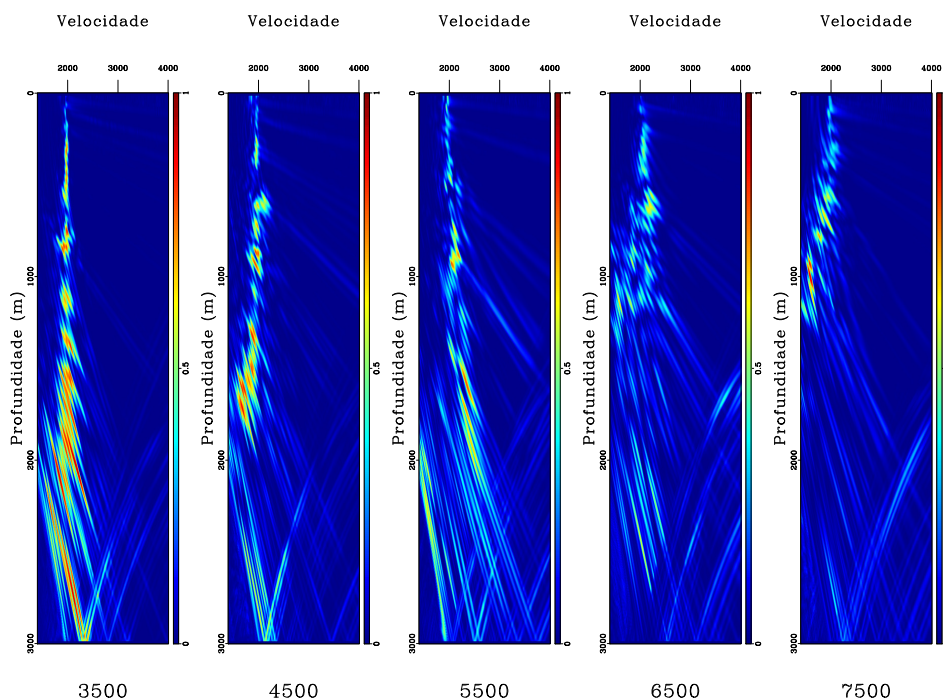


Figura 4.31: Semblances do dado Marmousoft para segunda iteração. Obtido a partir da migração com o segundo modelo (Figura 4.26 (b)). Note que todos os espectros são interpretáveis até a profundidade em que ocorre o primeiro desvio da linha vertical em 2000 m/s.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Neste trabalho, foi implementado uma técnica baseada na propagação da imagem em função da velocidade para construção do modelo de velocidade de migração em profundidade utilizando continuação da imagem no CIG. O método, apresenta a opção de atualizar esse modelo a fim de melhorá-lo através de um processo iterativo. Testada em dois dados sintéticos, essa técnica apresentou resultados promissores tendo em vista que em uma primeira iteração, partindo de um modelo de velocidade constante, já foi possível obter a morfologia do modelo que estava sendo invertido. A técnica pode ser empregada para reduzir o risco no processo exploratório através da geração expedita de imagens de qualidade.

Os resultados na Seção 4.1.4 demonstram que não há uma convergência uniforme para o modelo real através da análise dos erros relativos num CIG específico bem como por inspeção visual dos modelos construídos. A convergência não ocorre porque é dada liberdade para que as velocidades e profundidades dos três eventos mudem a cada iteração. Também é notado que para convergência, a expressão de atualização das velocidades é mais comportada que a das vagarosidades.

Os resultados na Seção 4.1.7 demonstram que é grande a influência dos afastamentos longos no resultado do modelo. Isto se deve a variação da velocidade média com o afastamento devido ao aumento da diferença de caminho entre o raio reto médio e o real desviado pelas interfaces.

A introdução de informação a priori nas interfaces (velocidade média e profundidade) de cima para baixo na Seção 4.2 demonstrou a validade da estratégia de *layer-stripping* que consiste em corrigir os parâmetros de velocidade e profundidade dos eventos mais rasos antes de corrigir os mais profundos. Com o avanço da estratégia, no modelo de 3 interfaces, foi possível obter um melhor ajuste para a interface 3.

Na Seção 4.3 foi mostrado que a imagem obtida (seção empilhada) a partir do primeiro modelo, para o caso do Marmousoft, apresenta de um modo geral a estruturação correta dos eventos e o destaque das falhas. Como a supressão dos afastamentos longos não foi feita e também não usamos a estratégia de *layer-stripping* o resultado do segundo modelo não melhora para eventos mais profundos. Além disso, a estratégia adotada para cálculo da atualização, integrando no modelo anterior para obter a velocidade média, pode acrescentar erro no processo que acarreta piora do modelo.

Todos os resultados obtidos indicam fortemente que a técnica deve ser aplicada na forma de *layer-stripping*, uma vez que quaisquer erros na parte rasa do modelo prejudicam o resultado nas partes mais profundas.

5.2 Trabalhos Futuros

Os pontos de análise de velocidade *picks* são uma fonte de erro porque eventuais interpretações podem estar destoantes de interpretações vizinhas. Para reduzir esse tipo de erro seria importante implementar um modo que ajustasse esses valores espúrios para um valor coerente.

A suavização do modelo para o traçamento de raios afeta a atualização porque altera os valores de velocidade e reduz a riqueza de detalhes. Não está claro quanto o modelo deve ser suavizado e portanto seria um ponto a ser analisado. Uma suavização extrema do modelo, por exemplo, poderia transformar um modelo detalhado em um modelo de velocidade constante que acabaria reiniciando o fluxo de construção do modelo.

Esse problema da suavização do modelo para traçamento dos raios poderia ser contornado com a utilização de um outros métodos para o cálculo dos tempos de trânsito como os que resolve a Equação Iconal ou métodos mais sofisticados como *Gaussian Beam*.

A utilização de outros modelos sintéticos seria muito importante para resolver questões sobre o comportamento da continuação da imagem com a inclinação de refletores e contrastes de velocidade. Um modelo sintético interessante a ser analisado seria um com diversas camadas inclinadas onde pudesse ser avaliado o impacto da inclinação na determinação do modelo.

A implementação de Semblances mais sofisticados poderia melhorar a interpretações dos espectros de velocidade. Isto seria fundamental para partir para uma futura automação do processo.

É muito importante estabelecer outras estratégias para o tratamento de dados reais. A atualização das profundidades e velocidades médias de um novo *picking*, que depende da determinação das profundidades e velocidades no modelo anterior, poderia ser melhorada através da integração ao longo do raio imagem ao invés do raio reto. A atualização poderia ser feita orientada a determinados eventos identificados no dado. Neste caso, as seções de semblance deveriam ser montadas ao longo desses eventos.

Referências Bibliográficas

- Al-Yahya, K. (1989). Velocity analysis by iterative profile migration. *Geophysics*, 54(6):718–729.
- Beydoun, W. B. and Keho, T. H. (1987). The paraxial ray method. *Geophysics*, 52(12):1639–1653.
- Billette, F., Bégat, S. L., Podvin, P., and Lambaré, G. (2003). Pratical aspects and applications of 2D stereotomography. *Geophysics*, 68(3):1008–1021.
- Biloti, R. (2010). *S88 Modeling*. Department of Applied Mathematics, IMECC/UNICAMP. S88 Modeling employs Seis88 available in <http://sw3d.mff.cuni.cz/> package developed by Vlatislav Cervený and Ivan Psencik. version 3. It is part of ToSCo Project.
- Biondi, B. and Symes, W. W. (2004). Angle-domain common-image gathers for migration velocity analysis by wavefield-continuation imaging. *Geophysics*, 69(5):1283–1298.
- Cervený, V. (1985). *Seismic Shear Waves, Part A: Theory*, chapter The application of ray tracing to the numerical modeling of seismic wavefields in complex structures, pages 1–124. Number 15. Geophysical Press.
- Dix, C. H. (1955). Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 20(1):68–86.
- Fomel, S. (1994). Method of velocity continuation in the problem of seismic time migration. *Russian Geology and Geophysics*, 35(5):100–111.
- Fomel, S. (1997). Velocity continuation and the anatomy of residual prestack migration. In *Expanded Abstract, 67th Annual International Meeting*, pages 1762–1765, Tulsa. SEG.
- Fomel, S., Sava, P., Vlad, I., Liu, Y., and Bashkardin, V. (2013). Madagascar: open-source software project for multidimensional data analysis and reproducible computational experiments. *Journal of Open Research Software*, 1(1):e8. DOI:<http://dx.doi.org/10.5334/jos.ag>.

- Fowler, P. (1985). Migration velocity analysis by optimization: Linear theory. *SEP Report*, 44:1–20.
- Gardner, G. H., French, W. S., and Matzuk, T. (1974). Elements of migration and velocity analysis. *Geophysics*, 39(6):811–825.
- Goldin, S. V. (1994). Superposition and continuation of transformations used in seismic migration. *Russian Geology and Geophysics*, 35(9):109–121.
- Hubral, P., Tygel, M., and Schleicher, J. (1996). Seismic image waves. *Geophysical Journal International*, (125):431–442.
- Jeannot, J. P., Faye, J. P., and Denelle, E. (1986). Pre-stack migration velocities from focusing depth analysis. In *Expanded Abstract, 56th Annual International Meeting of SEG*, pages 438–440, Houston, Texas. SEG.
- Neidell, N. S. and Taner, M. T. (1971). Semblance and other coherency measures for multichannel data. *Geophysics*, 36(3):482–497.
- Sattlegger, J. W. (1975). Migration velocity determination: Part I. philosophy. *Geophysics*, 40(1):1–5.
- Schleicher, J. and Biloti, R. (2007). Dip correction for coherence-based time migration velocity analysis. *Geophysics*, 72(1):S41–S48.
- Schleicher, J., Costa, J. C., and Novais, A. (2008). Time-migration velocity analysis by image-wave propagation of common-image gathers. *Geophysics*, 73(5):VE161–VE171.
- Schleicher, J., Hubral, P., Hocht, G., and Liptow, F. (1997). Seismic constant-velocity remigration. *Geophysics*, 62(2):589–597.
- Schleicher, J., Novais, A., and Munerato, F. P. (2004). Migration velocity analysis by depth image-wave remigration: first results. *Geophysical Prospecting*, 52(6):559–573.
- Yilmaz, O. and Chambers, R. (1984). Migration velocity analysis by wave-field extrapolation. *Geophysics*, 49(10):1664–1674.