

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

**TESE DE DOUTORADO**

**MIGRAÇÃO EM PROFUNDIDADE PRÉ-EMPILHAMENTO**  
**UTILIZANDO OS ATRIBUTOS CINEMÁTICOS DO EMPILHAMENTO**  
**POR SUPERFÍCIE DE REFLEXÃO COMUM**

**SAMUEL LEVI FREITAS DA LUZ**

**BELÉM – PARÁ – BRASIL**

**JUNHO – 2007**



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

**TESE DE DOUTORADO**

**MIGRAÇÃO EM PROFUNDIDADE PRÉ-EMPILHAMENTO  
UTILIZANDO OS ATRIBUTOS CINEMÁTICOS DO EMPILHAMENTO  
POR SUPERFÍCIE DE REFLEXÃO COMUM**

**SAMUEL LEVI FREITAS DA LUZ**

**BELÉM – PARÁ – BRASIL**

**JUNHO – 2007**

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

**MIGRAÇÃO EM PROFUNDIDADE PRÉ-EMPILHAMENTO UTILIZANDO OS  
ATRIBUTOS CINEMÁTICOS DO EMPILHAMENTO POR SUPERFÍCIE DE  
REFLEXÃO COMUM**

TESE APRESENTADA POR

**SAMUEL LEVI FREITAS DA LUZ**

COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE  
DOUTOR EM CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

Data de Aprovação: / / 2007

Conceito:

BANCA DE TESE:

---

Prof. Dr. João Carlos Ribeiro Cruz (Orientador)

---

Prof. Dr. João dos Santos Protázio

---

Prof. Dr. Jörg Schleicher

---

Prof. Dr. Djalma Manoel Soares Filho

---

Prof. Dr. German Garabito Callapino

**BELÉM – PARÁ – BRASIL  
JUNHO – 2007**

*À memória de*

*José Maria Laranjeira da Luz, meu pai.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiro e especialmente, eu dedico meus agradecimentos ao meu bom Deus por me proporcionar esta grande alegria na conclusão deste trabalho.

Ao CPGf / UFPa e a todo o corpo docente, técnico e administrativo que contribuíram de alguma forma na realização deste trabalho.

Ao orientador, Prof. Dr. João Carlos R. Cruz, por ter sugerido e proposto o tema desta tese.

Aos membros da banca examinadora, Professores Dr. João Protázio, Dr. Jörg Schleicher, Dr. Djalma Filho, Dr. German Garabito pela paciência dispensada na correção deste trabalho.

À ANP – Agência Nacional do Petróleo pela outorgação da bolsa de estudo, além de proporcionar minha participação em congressos e permitir um estágio realizado na Unicamp, sob a orientação de Martin Tygel e Rodrigo Portugal, para os quais dedico meus sinceros agradecimentos.

Ao colega e professor German Garabito por sua colaboração na conclusão da tese.

Aos amigos e amiga pela convivência agradável, atenção e apoio dedicado nos momentos mais difíceis.

A toda minha família por incentivar, apoiar e acreditar nesta grande conquista obtida.

## RESUMO

O empilhamento por superfície de reflexão comum (ou empilhamento SRC), conhecido como empilhamento CRS, do inglês “Common reflection surface”, constitui-se em um novo método para o processamento sísmico na simulação de seções afastamento nulo (AN) e afastamento comum (AC). Este método é baseado em uma aproximação paraxial hiperbólica de segunda ordem dos tempos de trânsito de reflexão na vizinhança de um raio central. Para a simulação de seção AN, o raio central é um raio normal, enquanto que para a simulação de uma seção AC o raio central é um raio de afastamento finito.

Em adição à seção AN, o método de empilhamento SRC também fornece estimativas dos atributos cinemáticos do campo de onda, sendo aplicados, por exemplo, na determinação (por um processo de inversão) da velocidade intervalar, no cálculo do espalhamento geométrico, na estimativa da zona de Fresnel, e também na simulação de eventos de tempos de difrações, este último tendo uma grande importância para a migração pré-empilhamento.

Neste trabalho é proposta uma nova estratégia para fazer uma migração em profundidade pré-empilhamento, que usa os atributos cinemáticos do campo de onda derivados do empilhamento SRC, conhecido por método CRS-PSDM, do inglês “CRS based pre-stack depth migration”. O método CRS-PSDM usa os resultados obtidos do método SRC, isto é, as seções dos atributos cinemáticos do campo de onda, para construir uma superfície de tempos de trânsito de empilhamento, ao longo da qual as amplitudes do dado sísmico de múltipla cobertura são somadas, sendo o resultado da soma atribuído a um dado ponto em profundidade, na zona alvo de migração que é definida por uma malha regular.

Similarmente ao método convencional de migração tipo Kirchhoff (K-PSDM), o método CRS-PSDM precisa de um modelo de velocidade de migração. Contrário ao método K-PSDM, o método CRS-PSDM necessita apenas computar os tempos de trânsito afastamento nulo, ao seja, ao longo de um único raio ligando o ponto considerado em profundidade a uma dada posição de fonte e receptor coincidentes na superfície. O resultado final deste procedimento é uma imagem sísmica em profundidade dos refletores a partir do dado de múltipla cobertura.

**Palavras chaves:** Imageamento Sísmico. Construção de Frentes de Onda. Migração. Empilhamento CRS.

## ABSTRACT

The Common-Reflection-Surface (CRS) stack is a new seismic processing method for simulating zero-offset (ZO) and common-offset (CO) sections. It is based on a second-order hyperbolic paraxial approximation of reflection traveltimes in the vicinity of a central ray. For ZO section simulation the central ray is a normal ray, while for CO section simulation the central ray is a finite-offset ray.

In addition to the ZO section, the CRS stack method also provides estimates of wavefield kinematic attributes useful for solving interval velocity inversion, geometrical spreading calculation, Fresnel zone estimate, and also diffraction events simulation.

In this work, It's proposed a new strategy to do a pre-stack depth migration by using the CRS derived wavefield kinematic attributes, so-called CRS based pre-stack depth migration (CRS-PSDM) method. The CRS-PSDM method uses the CRS results (ZO section and kinematic attributes) to construct an optimized stack traveltime surface along which the amplitudes of the multi-coverage seismic data are to be summed and the result is put in a point of the migration target zone in depth.

In the same sense as in Kirchhoff type pre-stack depth migration (K-PSDM), the CRS-PSDM method needs a migration velocity model. Unlike the K-PSDM method, the CRS-PSDM needs only to calculate the zero-offset traveltimes, i.e, along only ray connecting the considered point in depth to a given coincident position of source-receptor at surface. The final result is a zero-offset time-to-depth converted seismic image of reflectors from pre-stack seismic data.

**Key words:** Seismic Imaging. Wave Front Constructing. Migration. CRS Stacking.

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

### ❖ Regra geral e definições

$a, b, c$  variáveis (ou constantes)

$\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$  vetores

$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$  produto escalar dos vetores  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$

$\mathbf{a} \times \mathbf{b}$  produto vetorial dos vetores  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$

$A, B, C$  pontos

$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$  matrizes:  $\det \mathbf{A}$  (determinante de  $\mathbf{A}$ )

$R$  conjunto dos números reais

$\ddot{\mathbf{u}}$  2ª derivada no tempo:  $\partial^2 \mathbf{u} / \partial t^2$

$\hat{\mathbf{u}}$  transformada de Fourier de  $\mathbf{u}$

$\sum_{n=1} a_n$  somatória de  $a_n$  de acordo com os valores apropriados de  $n$

$\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  vetores unitários nas direções  $x, y$  e  $z$

$i$  número imaginário:  $= \sqrt{-1}$

$\pi$  número irracional:  $= 3.1415\dots$

$e$  base dos logaritmos naturais:  $= 2,7\dots$

$\nabla$  operador gradiente:

$\mathbf{i} (\partial/\partial x) + \mathbf{j} (\partial/\partial y) + \mathbf{k} (\partial/\partial z)$

$\Delta$  operador Laplaciano:

$(\partial^2/\partial x^2) + (\partial^2/\partial y^2) + (\partial^2/\partial z^2)$

### ❖ Símbolos em Latim

$A$  abertura de migração

$\mathcal{A}$  perda total de amplitude por transmissão

$f$  frequência dominante

$F$  sinal analítico da fonte

$G$  geofone

$h$  meio afastamento

$\mathbf{H}_F$  matriz Hessiana

$J$  jacobiano do raio

$l$  comprimento de arco ao longo do raio

$\mathcal{L}$  espalhamento geométrico

$\mathbf{p}$  vetor vagarosidade

$\mathbf{P}_0$  ponto de amostragem

$R_c$  coeficiente de reflexão

$R_{PIN}$  raio de onda PIN (ponto de incidência normal)

$R_N$  raio de onda N (normal)

$s$  comprimento do raio

$S$  fonte sísmica

$S_e$  coeficiente de semblance

$t$  tempo de trânsito

$t_0$  tempo duplo do raio normal

$\Delta t$  intervalo de tempo

$\mathbf{u}$  vetor deslocamento

$U$  amplitude do deslocamento (tempo)

$U_F$  dado sísmico filtrado

$U_{TA}$  sinal com amplitude verdadeira

$v$  velocidade do meio

$v_0$  velocidade próxima à superfície

$V$  amplitude do dado em profundidade

$W$  função peso

$x_G$  coordenada do geofone

$x_m$  coordenada do ponto medio

$x_S$  coordenada da fonte

$x_0$  coordenada do ponto  $X_0$

$X_0$  ponto de emergência do raio normal

$\Delta x$  intervalo de discretização em  $x$

$\Delta z$  intervalo de discretização em  $z$

### ❖ Símbolos em Grego

$\beta_0$  ângulo de incidência do raio normal

$\gamma$  coordenada do raio

$\delta_{ij}$  função delta de Kronecker

$\theta$  ângulo; ângulo entre vetores

$\lambda$  parâmetro de Lamé

$\mu$  parâmetro de Lamé

$\xi$  parâmetro de posição

$\rho$  densidade do meio

$\sigma$  tensor de tensão

$\tau$  função fase (eiconal)

$\tau_R$  tempo de reflexão

$\tau_D$  tempo de difração

$\tau_F$  diferença entre  $\tau_D$  e  $\tau_R$

$\varphi$  ângulo entre vetores

$\psi$  frente de onda  
 $\omega$  frequência angular  
 $\Lambda$  raio sísmico

❖ **Siglas**

AC afastamento comum  
AN afastamento nulo  
CFO construção de frentes de onda  
CRS do inglês "common reflection surface"  
DMO do inglês "dip moveout"  
CRS-PSDM do inglês "CRS based pre-stack depth migration"  
EDO equação diferencial ordinária  
EDP equação diferencial parcial  
FC fonte comum  
K-PSDM do inglês "Kirchhoff pre-stack depth migration"  
NMO do inglês "normal moveout"  
PIN (ponto de incidência normal)  
N (normal)  
PMC ponto médio comum  
RFO raios e frentes de onda  
SDC superfície de difração comum  
SRC superfície de reflexão comum

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 ESTRUTURAÇÃO DA TESE.....	14
<b>2 FUNDAMENTO TEÓRICO DA TEORIA DO RAIO.....</b>	<b>16</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	16
2.2 EQUAÇÃO DA ONDA ELÁSTICA .....	16
2.3 APROXIMAÇÃO ASSINTÓTICA .....	18
2.4 EQUAÇÕES EICONAL E DE TRANSPORTE .....	19
2.5 EQUAÇÕES CINEMÁTICAS DO RAIO .....	20
2.6 ESPALHAMENTO GEOMÉTRICO .....	21
<b>3 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DA CONSTRUÇÃO DE FRENTES DE ONDA.....</b>	<b>24</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	24
3.2 FRENTES DE ONDA.....	25
3.3 PROPAGAÇÃO DE FRENTES DE ONDA.....	26
3.4 CRITÉRIOS DE DENSIDADE DE RAIOS.....	29
3.5 INTERPOLAÇÃO DE NOVOS RAIOS.....	32
3.6 CONSTRUÇÃO DA MALHA RAIOS E FRENTES DE ONDA.....	33
3.7 EXEMPLO NUMÉRICO DO MÉTODO CFO.....	34
<b>4 FUNDAMENTOTEÓRICO DA MIGRAÇÃO KIRCHHOFF CONVENCIONAL.....</b>	<b>37</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	37
4.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA MIGRAÇÃO KIRCHHOFF.....	38
4.3 EMPILHAMENTO DE DIFRAÇÕES .....	40
4.4 INTEGRAL DE EMPILHAMENTO DE DIFRAÇÃO.....	42
4.5 AVALIAÇÃO ASSINTÓTICA DA INTEGRAL DE EMPILHAMENTO.....	43
4.6 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO DE MIGRAÇÃO.....	44

<b>5 O MÉTODO DE EMPILHAMENTO POR SUPERFÍCIE DE REFLEXÃO COMUM (SRC).....</b>	<b>47</b>
5.1 INTRODUÇÃO.....	47
5.2 ATRIBUTOS CINEMÁTICOS .....	48
5.3 OPERADOR DE EMPILHAMENTO SRC.....	49
5.4 OPERADOR DE EMPILHAMENTO SDC.....	52
5.5 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO DE EMPILHAMENTO SRC.....	55
5.5.1 A medida de coerência “ <i>Semblance</i> ”.....	55
<b>6 O MÉTODO CRS-PSDM.....</b>	<b>60</b>
6.1 INTRODUÇÃO.....	60
6.2 CURVAS DE EMPILHAMENTO DOS OPERADORES KIRCHHOFF E SRC.....	61
6.3 ASPECTOS TEÓRICOS DA INTEGRAL DE KIRCHHOFF COM O MÉTODO SRC.....	63
6.4 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO .....	66
6.5 LIMITAÇÃO DA ABERTURA DE MIGRAÇÃO.....	70
<b>7 EXEMPLOS NUMÉRICOS DE APLICAÇÃO DO MÉTODO CRS-PSDM.....</b>	<b>72</b>
7.1 MODELO 1.....	72
7.1.1 Critério de discretização espacial para migração em profundidade.....	73
7.1.2 Migração pós-empilhamento pelo método convencional de migração Kirchhoff.....	73
7.1.3 Migração pós-empilhamento pelo método CRS-PSDM.....	76
7.1.4 Migração pré-empilhamento pelos métodos convencional kirchhoff e CRS - PSDM.....	81
7.1.5 Explorando a possibilidade do uso das múltiplas chegadas na migração.....	89
7.2 MODELO 2 .....	94
7.2.1 Migração pós-empilhamento pelo método convencional de migração Kirchhoff.....	94
7.2.2 Migração pré-empilhamento pelos métodos convencional Kirchhoff e CRS-PSDM...97	
7.2.3 Sensibilidade do método CRS-PSDM ao modelo de velocidade.....	101
<b>8 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS .....</b>	<b>108</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>113</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O melhoramento no processo de imageamento sísmico tem sido o alvo de importantes trabalhos científicos na área de geofísica, tendo como resultado o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novas técnicas para a determinação de uma imagem de boa resolução da estrutura interna da Terra, a partir de dados de campo obtidos em levantamentos sísmicos. A migração sísmica é a parte do processamento de dados responsável pela construção de imagens da subsuperfície. Durante o ano de 2001, no Workshop da SEG/EAGE realizado em Karlsruhe na Alemanha sobre “amplitudes sísmicas verdadeiras”, e pela publicação especial do “Jornal de Exploração Sísmica”, editado por Tygel (2001), novos aspectos da migração sísmica pré-empilhamento foram apresentados com o objetivo de obter uma imagem de boa qualidade. Esta imagem da subsuperfície da Terra serve, por exemplo, na indústria de petróleo, como uma boa referência na decisão da posição supostamente correta para a perfuração dos poços, evitando assim possíveis erros na interpretação sísmica.

A migração em profundidade tipo Kirchhoff constitui um dos métodos tradicionais mais usados pela indústria petrolífera na obtenção de uma imagem de refletores sísmicos a partir de um dado pré-empilhado. Este método é baseado na construção de superfícies de tempos de trânsito de difração, usando “a priori” o modelo de velocidade de migração. Este modelo de velocidade, entretanto, constitui um dos pontos críticos para o método tradicional de migração Kirchhoff, pois devido à sua imprecisão, erros são cometidos durante a migração, comprometendo assim a confiabilidade da imagem migrada. Uma outra dificuldade encontrada pela indústria no processo de migração pré-empilhamento tipo Kirchhoff é o alto custo computacional empregado no processo. Portanto, dois aspectos principais são fundamentais no desenvolvimento de uma nova técnica ou método de imageamento sísmico: *a redução do tempo computacional* empregado no processo de migração pré-empilhamento e a *estabilidade*, na obtenção de uma imagem de boa resolução, mesmo diante de um modelo de velocidades impreciso.

Recentemente, novas estratégias para melhorar o processo de imageamento sísmico e obter uma imagem com alta resolução da subsuperfície da Terra foram propostos sem a utilização do modelo de velocidade. Um deles é o método de empilhamento por superfície de reflexão comum (SRC), conhecido como empilhamento CRS do inglês “Common reflection

surface”. Uma boa abordagem deste assunto pode ser vista, por exemplo, nos trabalhos desenvolvidos por Garabito et al. (2001), Jäger et al.(2001) e Mann et al.(1999). Este método está baseado em uma aproximação paraxial hiperbólica de segunda ordem dos tempos de trânsito de reflexão na vizinhança de um raio de reflexão normal, sendo útil para simular, a partir dos dados de múltipla cobertura, uma seção afastamento nulo (AN), isto é, com fontes e receptores coincidentes, de alta resolução por meio de um operador denominado operador de empilhamento SRC, que depende de três parâmetros: o ângulo de emergência  $\beta_0$  do raio normal, e dois raios de curvaturas de duas ondas hipotéticas, chamadas onda Ponto de Incidência Normal, ou simplesmente onda PIN e onda Normal, ou simplesmente onda N, cujo desenvolvimento matemático pode ser visto em Hubral (1983).

As seções correspondentes aos três parâmetros, associadas à seção simulada AN, são determinadas automaticamente através de um processo de busca de múltiplos parâmetros, utilizando como função-objetivo uma dada medida de coerência. Jäger et al. (2001) aplicaram o método SRC a um dado sintético, usando um modelo estratificado com camadas homogêneas separadas por interfaces curvas, e obtiveram um bom resultado na simulação da seção AN e na determinação das seções dos três parâmetros. Bergler et al. (2002) aplicaram o método SRC em um exemplo real de dado terrestre 3-D obtendo um bom resultado.

Vieth (2001) utilizou os atributos cinemáticos ( $\beta_0, t_0$ ) obtidos através do método SRC para fazer a conversão tempo-profundidade a partir de dados empilhados. Contrário ao procedimento convencional de migração tipo Kirchhoff, Vieth parte do domínio do tempo para o domínio da profundidade, ou seja, para cada amostra na seção AN três raios com afastamentos nulos são propagados tendo como pontos finais os pontos de uma malha previamente definida em profundidade. Para isto, tornou-se necessária uma interpolação bilinear permitindo assim que os pontos finais dos raios propagados sejam pontos da malha em profundidade e com isso o sinal, empilhado seja atribuído a estes pontos de forma mais precisa. Este procedimento feito para todas as amostras na seção AN produz uma imagem migrada em profundidade.

Motivado pelas grandes vantagens apresentadas pelo método SRC, tais como: o uso de um operador de empilhamento independente do modelo de velocidade, a alta resolução fornecida na seção simulada AN e à grande expansibilidade a modelos geologicamente complexos, e tendo em vista a grande dificuldade encontrada pela indústria de petróleo mencionada anteriormente, propõe-se neste trabalho uma nova estratégia para a migração em profundidade pré-

empilhamento, na qual, contrário ao procedimento convencional de migração, que necessita do cálculo dos tempos de trânsito na configuração AC para diferentes afastamentos, aqui são computados apenas tempos de trânsito na configuração AN. Esta nova estratégia é aplicada em dado sísmico contendo alto grau de ruído com o fim de verificar sua estabilidade, além de sua robustez quando aplicada em modelos de velocidade imprecisos. Esta estratégia é denominada de método CRS-PSDM do inglês “CRS based pre-stack depth migration” e usa o operador SRC e as seções dos três parâmetros  $(\beta_0, R_{NIP}, R_N)$  que definem o operador de empilhamento SRC.

Neste trabalho, o operador de empilhamento SRC é usado como uma boa aproximação para o operador convencional de migração Kirchhoff, onde o operador SRC é utilizado na determinação das curvas de empilhamento sobre as quais as amplitudes do dado sísmico de múltipla cobertura são somadas, sendo o resultado do empilhamento atribuído a cada ponto em profundidade de uma malha regular, denominada malha alvo de migração previamente definida.

## 1.1 ESTRUTURAÇÃO DA TESE

A tese é composta de 8 capítulos, no início dos quais é feita uma breve introdução para fins explicativos, que se estendem desde uma revisão teórica da teoria do raio até os exemplos numéricos da aplicação do método CRS-PSDM.

No capítulo 2 é feita uma revisão teórica mostrando os fundamentos matemáticos da teoria do raio. São apresentados alguns tópicos especiais tais como o desenvolvimento da equação da onda elástica, as equações iconal e de transporte, e o sistema de equações cinemáticas do raio.

No capítulo 3 é apresentado o método da construção de frentes de onda (CFO) que surgiu como uma nova alternativa aos métodos tradicionais de determinação de tempos de trânsito. São apresentados ainda os principais critérios de densidade de raios permitindo uma boa precisão na determinação dos tempos de trânsito em meios com cáusticas. Conclui-se este capítulo mostrando alguns resultados numéricos que comprovam a eficácia e acurácia do método CFO.

No capítulo 4 são apresentados os fundamentos teóricos da migração tipo Kirchhoff em profundidade, revendo os principais conceitos relacionados ao processo de empilhamento de difração, onde é apresentado o operador de empilhamento de difrações, conhecido como curva

de Huygens, necessária para o empilhamento do dado sísmico, sendo este empilhamento feito segundo uma integral de empilhamento de difrações.

No capítulo 5 é dada uma breve revisão teórica do método de empilhamento SRC onde é apresentado o operador de empilhamento SRC, seguido de ilustração geométrica, podendo ser usado na simulação de tempos de reflexão ou difração, definindo neste último caso o operador SDC, ou seja, superfície de difração comum. O capítulo é finalizado com uma descrição do algoritmo que compreende todo o processo.

No capítulo 6, que constitui o principal capítulo da tese, é apresentado o método CRS-PSDM, visto como um novo formalismo para a migração pré-empilhamento, o qual utiliza os resultados fornecidos por qualquer algoritmo de empilhamento SRC. Pode ser visto neste capítulo que o operador SDC pode ser utilizado como uma boa aproximação do operador convencional de migração Kirchhoff na determinação (ou construção) das curvas de empilhamento. O capítulo é finalizado com um procedimento usado na delimitação da abertura de migração do dado sísmico.

No capítulo 7, mostra-se a aplicação do método CRS-PSDM em dados sintéticos, onde é feita a migração pós e pré-empilhamento do dado sísmico. São usados: um modelo simples e o conhecido modelo Marmousi, que apresenta uma alta complexidade geológica. Para efeito comparativo, e constituindo-se numa boa referência, os dados são também migrados pelo método tradicional de migração Kirchhoff (K-PSDM). Ainda neste capítulo, é apresentado um experimento, mostrando a possibilidade de uso das múltiplas chegadas de tempos na migração. O capítulo é finalizado analisando a sensibilidade de ambos os métodos ao modelo de velocidade perturbado.

No capítulo 8 são apresentadas as principais conclusões obtidas resultantes da aplicação do método de migração CRS-PSDM a dados sintéticos. Também são apresentadas algumas perspectivas futuras podendo ser consideradas como de interesse para futuros trabalhos

## 2 FUNDAMENTO TEÓRICO DA TEORIA DO RAI0

Neste capítulo são apresentados os fundamentos matemáticos da teoria do raio para meios bidimensionais, sendo abordados os seguintes tópicos: o desenvolvimento da equação da onda elástica, sua solução assintótica (que resulta nas equações iconal e transporte), o sistema de equações cinemáticas do raio e o espalhamento geométrico. Estes resultados servirão de base tanto para o método da construção de frentes de onda apresentado no próximo capítulo como para as técnicas de imageamento sísmico tais como a migração tipo Kirchhoff e o método de empilhamento SRC, apresentados nos capítulos posteriores.

### 2.1 INTRODUÇÃO

O imageamento sísmico é realizado produzindo-se artificialmente uma energia sísmica que se propaga através do interior da Terra na forma de ondas sísmicas, e analisando-se o campo de onda registrado em superfície que traz informações das propriedades físicas e geométricas do meio.

Uma boa maneira de termos um bom entendimento compreensivo da propagação da onda é através dos fundamentos da teoria do raio. Vale ressaltar que outros métodos de descrição de propagação de ondas sísmicas são extensivamente usados tais como: o método de diferenças finitas (KELLY et al., 1976) e o método de elementos finitos (STRANG e FIX; 1973), os quais dão um tratamento matemático ao campo de onda através do estudo da equação associada a ele.

Quando se estuda a teoria do raio deve-se levar em conta dois aspectos básicos: o cinemático, que trata das trajetórias dos raios, determinando os tempos de trânsito ao longo delas e o dinâmico, que lida com a distribuição espacial da energia propagada no meio, determinando a amplitude dos eventos sísmicos.

### 2.2 EQUAÇÃO DA ONDA ELÁSTICA

Considerando a estrutura da Terra como um meio elástico bidimensional, então, num sistema de coordenadas Cartesiano, no qual um vetor posição  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$  é descrito pelas

coordenadas  $(x_1, x_2)$ , a equação da onda elástica pode ser obtida (AKI; RICHARDS, 1980) combinando-se a equação do movimento (que relaciona as derivadas no tempo do vetor deslocamento  $\mathbf{u} = (\mathbf{x}, t)$  de uma partícula (um objeto cujas dimensões são desprezíveis em relação ao meio) às derivadas espaciais do vetor tensor de tensão  $\boldsymbol{\sigma}$ ) com a Lei de Hooke (que relaciona o tensor de tensão às derivadas espaciais do vetor deslocamento), como segue:

$$\sigma_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i, \quad i, j = 1, 2, \quad (2.1)$$

em que  $u_i$  e  $\sigma_{ij}$  são as componentes Cartesianas do vetor deslocamento e do tensor de tensão, respectivamente, e  $\rho$  é a densidade do meio. A equação homogênea acima descreve a propagação da onda elástica no meio sólido no instante em que a fonte sísmica deixa de atuar no meio. Em um meio isotrópico e heterogêneo, o tensor de tensão e a deformação sofrida por uma partícula no meio estão relacionadas através da expressão:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} u_{k,k} + \mu (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (2.2)$$

em que  $\delta_{ij}$  representa a função delta de Kronecker, definida como

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \\ 0, & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (2.3)$$

sendo  $\lambda = \lambda(\mathbf{x})$  e  $\mu = \mu(\mathbf{x})$  os parâmetros de Lamé que, juntamente com a densidade  $\rho$ , determinam as propriedades físicas do meio. Nas equações (2.1) a (2.4) é utilizada a convenção de Einstein para somatórios, isto é, índices repetidos implicam em somatório sobre os mesmos, a vírgula entre índices indica diferenciação em relação às coordenadas indicadas pelos índices e o ponto indica diferenciação em relação ao tempo.

A forma final da equação da onda elástica pode ser obtida inserindo (2.2) em (2.1), que resulta em:

$$(\lambda + \mu) u_{j,ij} + \mu u_{i,ij} + \lambda_{,i} u_{j,j} + \mu_{,j} (u_{i,j} + u_{j,i}) = \rho \ddot{u}_i. \quad (2.4)$$

Reescrevendo a equação acima na forma vetorial obtém-se a seguinte expressão:

$$(\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \Delta \mathbf{u} + \nabla \lambda \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \mu \times (\nabla \times \mathbf{u}) + 2(\nabla \mu \nabla) \mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}, \quad (2.5)$$

ou no domínio da frequência:

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot \hat{\mathbf{u}}) + \mu\Delta\hat{\mathbf{u}} + \nabla\lambda\nabla \cdot \hat{\mathbf{u}} + \nabla\mu \times (\nabla \times \hat{\mathbf{u}}) + 2(\nabla\mu\nabla)\hat{\mathbf{u}} = -\rho\omega^2\hat{\mathbf{u}}. \quad (2.6)$$

Aqui,  $\omega$  é a frequência angular e os operadores  $\nabla$  e  $\Delta$  representam o gradiente e o laplaciano, respectivamente, de uma dada função  $f(x_1, x_2)$ , sendo definidos por:

$$\nabla f = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2} \right), \quad (2.7)$$

$$\Delta f = \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2}, \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} \right). \quad (2.8)$$

Os vetores  $\mathbf{u}$  e  $\hat{\mathbf{u}}$  estão relacionados pelo par de transformadas de Fourier no domínio do tempo e da frequência, respectivamente, como seguem:

$$\mathbf{u}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{\mathbf{u}}(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (2.9)$$

$$\hat{\mathbf{u}}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{u}(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (2.10)$$

### 2.3 APROXIMAÇÃO ASSINTÓTICA

Como as aproximações assintóticas são realizadas no domínio da frequência, será considerada a equação da onda elástica (2.6). A teoria do raio tem por base a aproximação da solução da equação da onda elástica através da utilização de uma série assintótica. Desta forma, admite-se por hipótese, que a solução do problema de propagação de ondas tem uma expressão assintótica na forma (ČERVENÝ, 1985)

$$\hat{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, \tau) \approx e^{-i\omega\tau(\mathbf{x})} \sum_{n=0}^{\infty} \mathbf{U}^{(n)}(\mathbf{x}) (-i\omega)^{-n}, \quad i^2 = -1, \quad (2.11)$$

conhecida como série assintótica do raio. Na expressão acima,  $\Sigma$  indica a somatória das infinitas parcelas, cada uma das quais indexadas por  $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$ ,  $\mathbf{U}^{(n)}(\mathbf{x})$  são os coeficientes da série e estão relacionados com a amplitude,  $\tau(\mathbf{x})$  representa a função tempo de trânsito ao longo do raio. A precisão desta aproximação será tanto maior quanto maior for a frequência do campo de onda observado, ou seja, o comprimento de onda deve ser pequeno quando comparado às dimensões características do meio.

Considerando-se a aproximação de ordem zero da série do raio, ou seja, tomando-se apenas o primeiro termo da série assintótica, obtém-se uma solução para a equação da onda na forma:

$$\hat{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, \tau) = \mathbf{U}^{(0)}(\mathbf{x})e^{-i\omega\tau(\mathbf{x})}. \quad (2.12)$$

Aqui, a função vetorial  $\mathbf{U}^{(0)}(\mathbf{x})$  é simplesmente a amplitude, que juntamente com a função  $\tau(\mathbf{x})$  dependem somente das coordenadas espaciais, ou seja, independem da frequência  $\omega$ . Resta agora, utilizar esta aproximação para obter as equações iconal e de transporte.

## 2.4 EQUAÇÕES ICONAL E DE TRANSPORTE

Inserindo a equação (2.12) na equação (2.5) e considerando-se apenas as altas frequências, a equação iconal resulta na forma (ČERVENÝ, 1987)

$$(\nabla \tau(\mathbf{x}))^2 = \frac{1}{v^2(\mathbf{x})}, \quad (2.13)$$

na qual a função tempo de trânsito (ou função fase)  $\tau = \tau(\mathbf{x})$  é o iconal e  $v = v(\mathbf{x})$  a velocidade de propagação da onda no meio. Para a equação de transporte, a amplitude vetorial  $\mathbf{U}^{(0)}$  pode ser escrita na forma:

$$\mathbf{U}^{(0)} = U_t^{(0)}\mathbf{e}_1 + U_l^{(0)}\mathbf{e}_3 \quad (2.14)$$

sendo  $\mathbf{e}_1$  e  $\mathbf{e}_3$  os vetores unitários que formam a base ortogonal do sistema de coordenadas centradas no raio,  $l$  o comprimento de arco medido ao longo do raio e  $U_t^{(0)}$  e  $U_l^{(0)}$  as componentes da amplitude vetorial  $\mathbf{U}^{(0)}$  (ČERVENÝ, 1987).

Para uma onda compressional pura, isto é, uma onda P,  $\mathbf{U}^{(0)}$  é simplificado em

$$\mathbf{U}^{(0)} = U_l^{(0)} \mathbf{e}_3 = U_0 \mathbf{t}. \quad (2.15)$$

$U_0$  é chamado de componente principal do vetor deslocamento, representando a componente do vetor deslocamento de uma partícula na direção do vetor unitário  $\mathbf{t}$ , isto é, na direção do raio.

De acordo com a abordagem dada por Červený (1985), as componentes  $U_l^{(0)}$  e  $U_t^{(0)}$  podem ser calculadas ao longo do raio, resolvendo-se a equação de transporte, que é dada por

$$\frac{dU_l^{(0)}}{dl} + \frac{1}{2} U_l^{(0)} \left( \mathbf{v} \nabla^2 \tau + \frac{d}{dl} \ln(\rho v^2) \right) = 0, \quad (2.16)$$

$$\frac{dU_t^{(0)}}{dl} + \frac{1}{2} U_t^{(0)} \left( \mathbf{v} \nabla^2 \tau + \frac{d}{dl} \ln(\rho v^2) \right) = 0. \quad (2.17)$$

A partir das equações iconal (2.13) e de transporte (2.16) e (2.17), observa-se que a primeira traz apenas informação dos tempos de trânsito ao longo dos raios (aspecto cinemático da teoria do raio), enquanto que a segunda traz informação tanto dos tempos de trânsito quanto das amplitudes (aspecto dinâmico da teoria do raio) ao longo das trajetórias dos raios.

## 2.5 EQUAÇÕES CINEMÁTICAS DO RAI0

A equação iconal (2.13) representa uma equação diferencial parcial (EDP) não linear de primeira ordem e pode ser resolvida utilizando o método das características (BRONSTEIN; SEMENDJAJEJEW, 1991), que conduz a um sistema não linear de 4 (caso 2-D) equações diferenciais ordinárias (EDOs) de primeira ordem (6 equações para o caso 3-D), chamadas equações cinemáticas do raio, que parametrizado pelo tempo de trânsito assume a forma:

$$\frac{dx_i}{d\tau} = v^2 p_i, \quad i = 1, 2, \dots, \quad (2.18)$$

$$\frac{dp_i}{d\tau} = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dx_i}, \quad i = 1, 2, \dots, \quad (2.19)$$

Aqui,  $x_i$  representa as coordenadas do vetor posição  $\mathbf{x}$  ao longo do raio, e o novo parâmetro  $p_i$  as componentes do vetor vagarosidade, sendo expresso por  $\mathbf{p} = \nabla \tau(\mathbf{x})$ , com  $|\mathbf{p}| = 1/v$ .

Os raios (ou características) surgem como solução do sistema de equações diferenciais ordinárias, equações (2.18) e (2.19), chamadas equações características, ou equações do raio. Portanto, ao longo de cada raio os tempos de trânsito são determinados pela equação iconal (2.13) e então inseridos na equação de transporte (2.16) e (2.17) que é convertida em uma EDO, determinando-se finalmente as amplitudes correspondentes a cada tempo de trânsito.

## 2.6 ESPALHAMENTO GEOMÉTRICO

Definimos primeiramente uma grandeza importante que permite a mudança das coordenadas do raio  $(l, \gamma)$  para as coordenadas cartesianas  $(x_1, x_2)$ , e vice-versa, conhecida como Jacobiano do raio, sendo expresso por (BLEISTEIN, 1984):

$$J(l, \gamma) = \frac{\partial(x_1, x_2)}{\partial(l, \gamma)} = \det \left[ \frac{dx}{dl}, \frac{\partial x}{\partial \gamma} \right], \quad (2.20)$$

sendo  $l$  um parâmetro monotônico tomado ao longo do raio, para o qual, de acordo com a literatura, são comuns três escolhas, a saber:  $l = \sigma$  (não tem nenhum significado físico imediato),  $l = s$  (comprimento de arco) ou  $l = \tau$  (tempo de trânsito), cada qual apropriada para uma finalidade diferente. Em consequência, na hipótese do meio não possuir cáusticas, as coordenadas cartesianas, bem como qualquer quantidade relacionada ao raio, podem ser expressas em função de  $l$  e  $\gamma$  como segue:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(l, \gamma); \quad \mathbf{p} = \mathbf{p}(l, \gamma); \quad \tau = \tau(l, \gamma) \quad (2.21)$$

O espalhamento geométrico, como o próprio nome diz, está associado à forma como os raios se “espalham” geometricamente no meio durante a propagação de uma onda. Através dele é possível estimar o estreitamento ou o alargamento do tubo de raios ao longo do raio. No caso 2-D, e para um meio isotrópico e não homogêneo, pode-se ilustrar esta situação através da Figura 2.1, que representa a intercessão do tubo de raios, considerado entre dois instantes distintos, com um plano passando pelo seu eixo (raio central). A seção resultante está limitada abaixo pelo raio central (em vermelho) e acima por um raio tomado na sua vizinhança, e à esquerda e direita, pelos elementos infinitesimais de distância  $dL_A$  e  $dL_B$ , respectivamente, que representam partes das frentes de onda (curvas laranjas), perpendiculares aos raios, amostradas entre os dois instantes considerados. O fator de espalhamento geométrico, aqui representado por  $\mathcal{L}$ , está relacionado com o Jacobiano do raio por:

$$\mathcal{L} = |J|^{1/2}. \quad (2.22)$$

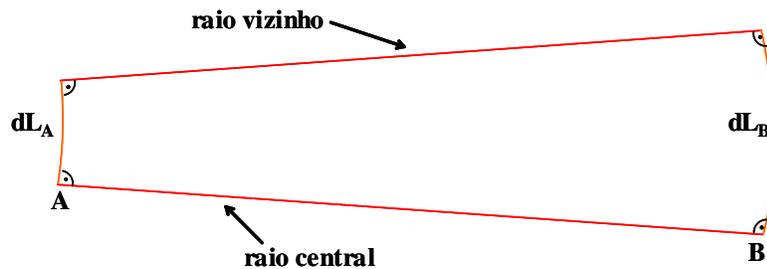


Figura 2.1 – Representação de uma seção de um tubo de raio, limitado à esquerda e direita pelos elementos infinitesimais de distância  $dL_A$  e  $dL_B$ , que representam partes das frentes de onda amostradas entre dois instantes distintos, e inferior e superiormente pelos raios central e vizinho.

Assume-se que a energia que se propaga no meio flui através desta seção. A amplitude desta energia é inversamente proporcional à raiz quadrada da curvatura da frente de onda. O cálculo do espalhamento geométrico é útil, por exemplo, quando se deseja obter uma estimativa dos coeficientes de reflexão de refletores de interesse, através de uma migração de dados sísmicos que preserve a amplitude dos eventos, conhecida como “migração com amplitude verdadeira”. As análises feitas sobre estes coeficientes são extremamente importantes na identificação e caracterização de reservatórios de hidrocarbonetos. Por sua grande importância, vários autores empenharam-se em desenvolver trabalhos e publicações abordando este assunto, dentre os quais citam-se: Bleistein (1986), Bleistein (1987), Červený (2001), Hubral (1983),

Newman (1973), Popov e Pšenčik (1978), Schleicher et al.(1993), Tygel et al. (1993), Ursin (1982).

Como mencionado anteriormente, o aspecto cinemático da teoria do raio trata da determinação dos *tempos de trânsito* ao longo dos raios, tendo sua grande aplicação no imageamento sísmico, por exemplo, na migração tipo Kirchhoff, onde é necessária a construção de curvas de empilhamento para a o somatório das amplitudes do dado sísmico. Estas curvas são obtidas definindo-se na profundidade uma malha regular de pontos (conhecida como malha alvo de migração), considerados como fontes secundárias, que geram, cada uma, uma curva conhecida como curva de Huygens, ou curva de difração.

No capítulo seguinte é apresentada uma nova alternativa na determinação de tempos de trânsito e amplitudes, que constitui uma importante ferramenta para o desenvolvimento deste trabalho.

### 3 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DA CONSTRUÇÃO DE FRENTES DE ONDA

Neste capítulo é apresentado o método da construção de frentes de onda como uma nova alternativa aos métodos tradicionais de determinação de tempos de trânsito e amplitudes, tendo por base a utilização do traçamento de raios para estimar novas frentes de onda a partir de informações da frente de onda anterior e da velocidade do meio. São apresentados ainda os principais critérios de densidade de raios através dos quais novos raios podem ser criados, aumentando assim a densidade de raios em zonas de sombras, e fazendo com que regiões com cáusticas sejam bem amostradas. Conclui-se este capítulo mostrando alguns resultados numéricos que justificam a eficácia e acurácia deste método na determinação dos tempos de trânsito de chegadas posteriores, sendo úteis, por exemplo, na modelagem de estruturas geológicas complexas.

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Os tempos de trânsito e amplitudes são de grande aplicação no modelamento e imageamento sísmico, como por exemplo, na migração. Tradicionalmente, a determinação dos tempos e amplitudes tem sido realizada através do traçamento do raio, onde citam-se os algoritmos de tiros (do inglês shooting) (JULIAN e GUBBINS, 1977) e de extrapolação paraxial (ČERVENÝ, 1985). Estes métodos determinam os tempos e amplitudes ao longo dos raios e os interpolam em uma malha regular. Entretanto, em áreas de grande espalhamento geométrico, o traçamento do raio convencional pode falhar na determinação dos tempos e amplitudes, mesmo em modelos onde seja válida a aproximação de altas frequências, tornando-se difícil cobrir todo modelo com um feixe de raios a partir da fonte. Além disso, o processo de interpolação dos tempos pode se tornar muito difícil e demorado computacionalmente.

A fim de tornar mais rápido o cálculo dos tempos, vários autores têm recentemente introduzido métodos para o cálculo dos tempos de trânsito diretamente sobre uma malha regular, usando versões diferentes de aproximações do operador de diferenças finitas para a equação iconal. Dentre estes autores, citam-se: Podvin e Lecomte (1991), Reshef e Kosloff (1986), van Trier e Symes (1990 e 1991) e Vidale (1988), Zhao (1996). Entretanto, estes métodos estimam

apenas os tempos correspondentes às primeiras chegadas, não sendo suficientes para reconstruir a imagem de refletores em meios com alta variação lateral de velocidades, como abordado por Geoltrain e Brac (1991).

Diante destas dificuldades e limitações, Vinje et al. (1993) desenvolveram um novo método de estimar os tempos de trânsito e amplitudes, conhecido como método da construção de frentes de onda (CFO), em que se recomenda o trabalho de Portugal (2002) como excelente referência, que permite a propagação das frentes de onda em um meio. Este método (VINJE et al., 1993) possibilita o cálculo das primeiras, segundas e terceiras chegadas em qualquer ponto do modelo, além de permitir que regiões de baixa densidade de raios, devido à presença de cáusticas, sejam iluminadas através do traçamento de raios auxiliares. Além disso, pode ser aplicado em modelos 3-D, apresentando um custo computacional razoável e mostrando-se, portanto, flexível, robusto e de boa acurácia.

### 3.2 FRENTE DE ONDA

Vimos anteriormente que a função  $\tau = \tau(\mathbf{x})$  descreve o tempo de trânsito que um evento sísmico leva para atingir um ponto cuja posição no plano Cartesiano é  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ . Portanto, fixado um tempo de trânsito  $\tau_0$ , pode-se entender uma frente de onda como o lugar geométrico de todos os pontos  $\mathbf{x}$  para os quais o tempo de propagação da onda a partir de uma fonte seja igual a  $\tau_0$ , ou seja, através da expressão:

$$\tau(\mathbf{x}) = \tau_0. \quad (3.1)$$

Matematicamente, defini-se uma frente de onda como uma curva (superfície em 3-D) parametrizada  $\Psi(\tau_0)$  dada por:

$$\Psi(\tau_0) = \{\mathbf{x} \in R^2 \mid \mathbf{x} = \mathbf{x}(\tau_0, \gamma), \gamma \in R^2\}. \quad (3.2)$$

Combinando a expressão (3.1) com a definição de frente de onda (3.2), obtém-se a equação:

$$\tau(\mathbf{x}(\tau_0, \gamma)) = \tau_0. \quad (3.3)$$

Diferenciando a equação (3.3) com relação a  $\gamma$  e aplicando a regra da cadeia, chega-se a equação:

$$\nabla\tau \cdot \frac{\partial\mathbf{x}}{\partial\gamma} = \mathbf{p} \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3.4)$$

Aqui, o vetor  $\mathbf{u}$  é, por definição, a derivada parcial de  $\mathbf{x}$  em relação à coordenada do raio  $\gamma$  tomada ao longo do raio. Sendo o produto escalar entre os vetores  $\mathbf{p}$  e  $\mathbf{u}$  nulo, esta equação mostra que os raios são ortogonais às frentes de onda (Figura 3.1).

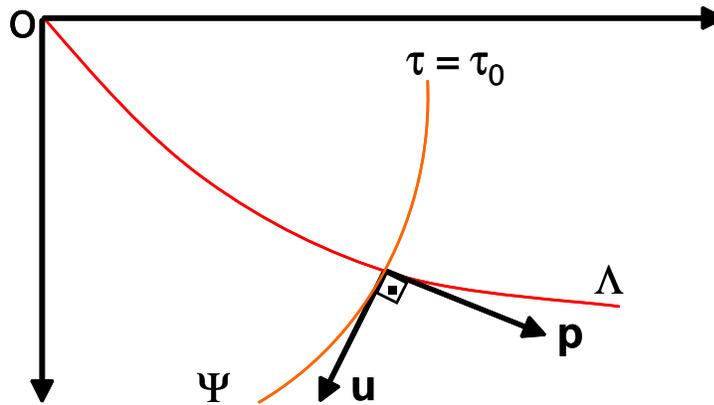


Figura 3.1 – O raio  $\Lambda$  (curva vermelha) no instante  $\tau = \tau_0$  é ortogonal à frente de onda  $\Psi$  (curva laranja) descrita pela equação  $\tau(\mathbf{x}) = \tau_0$ .

### 3.3 PROPAGAÇÃO DE FRENTES DE ONDA

Inicia-se o estudo da propagação, considerando que uma frente de onda  $\Psi$  (curva contínua laranja) esteja bem definida e amostrada no instante  $\tau$  (Figura 3.2). Considere-se ainda que os pontos (círculos cheios) sobre esta frente de onda sejam as posições iniciais dos raios (curvas vermelhas) que se propagarão perpendicularmente a ela. Neste trabalho, os raios são propagados usando o método de Runge-Kutta de quarta ordem, que é um método de integração numérica aplicado ao sistema de equações do raio (2.18) e (2.19), vistas no capítulo anterior. Vale ressaltar que estes raios também podem ser propagados utilizando o método de traçamento do raio por expansão de Taylor, como descrito por Vinje et al. (1993), sendo mais adequado para o traçamento de raios em pequenos intervalos de tempo  $d\tau$ . Afim de que o processo de integração por Runge-Kutta torne-se mais rápido, assume-se que o modelo de velocidades seja suave e fornecido através de splines-bicúbica, sendo em seguida sobre-amostrado.

Finalmente, a nova frente de onda (curva tracejada laranja) é obtida como resultado da reunião de todos os pontos finais (círculos vazios) de propagação dos raios (curvas tracejadas vermelhas). Portanto, uma nova frente de onda é obtida a partir de informações do meio e da frente de onda anterior.

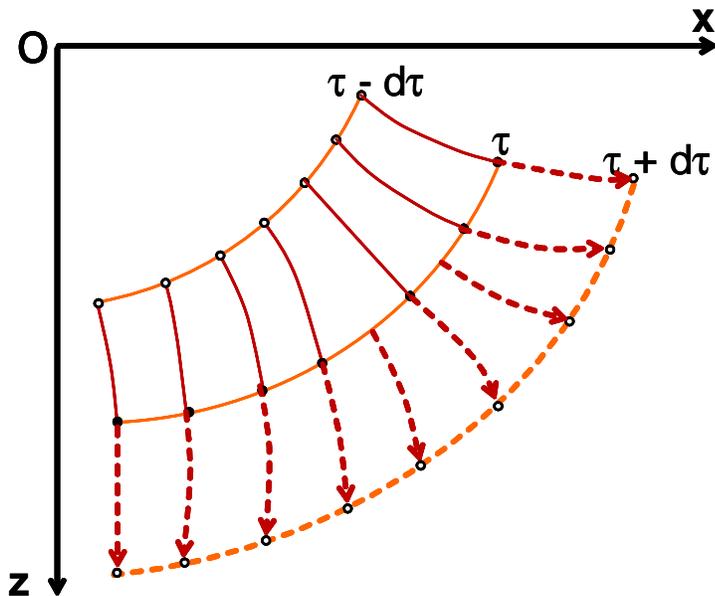


Figura 3.2 – Uma nova frente de onda (curva tracejada laranja) no instante  $\tau + d\tau$  é construída usando o traçamento de raios e a frente de onda (curva contínua laranja) no instante  $\tau$  (PORTUGAL, 2002).

Após a propagação dos raios e frentes de onda é construído um emaranhado de células, que mais se assemelha a uma “teia de aranha”, originadas pela intercessão de raios vizinhos e frentes de onda consecutivas (Figura 3.2). Estas células por sua vez podem ser vistas como quadriláteros, cujos vértices são os pontos de intercessão entre raios vizinhos e frentes de onda consecutivas, chamados nós. Da forma como são construídas, fica estabelecida uma topologia para as células, indicando para cada célula quais são suas células vizinhas. Assim, esta coleção de células pode ser vista como uma malha irregular de pontos contendo informações das quantidades armazenadas como tempos de trânsito e amplitudes.

Entretanto, um problema surge diante da existência de cóustica no modelo, pois neste caso a malha irregular dobrar-se-á sobre si mesma comprometendo desta forma a unicidade da solução. O procedimento neste caso é ir guardando separadamente as quantidades computadas em cada nó da malha, ou seja, a um ponto da malha pode estar associado um vetor de

quantidades, oriundas de diferentes células. Em geral, este vetor é ordenado em ordem crescente pelo tempo de trânsito interpolado, permitindo assim que sejam computadas as quantidades correspondentes às chegadas posteriores tanto de tempos quanto de amplitudes.

A Figura 3.3 mostra duas células, sendo a primeira convexa e a segunda não convexa originada pela existência de uma cáustica no ponto  $M$ . Pode-se ver que ambas as células podem ser decompostas em dois triângulos, isto é, a primeira nos triângulos  $\Delta[ABC]$  e  $\Delta[BCD]$  e a segunda nos triângulos  $\Delta[ABM]$  e  $\Delta[CDM]$ .

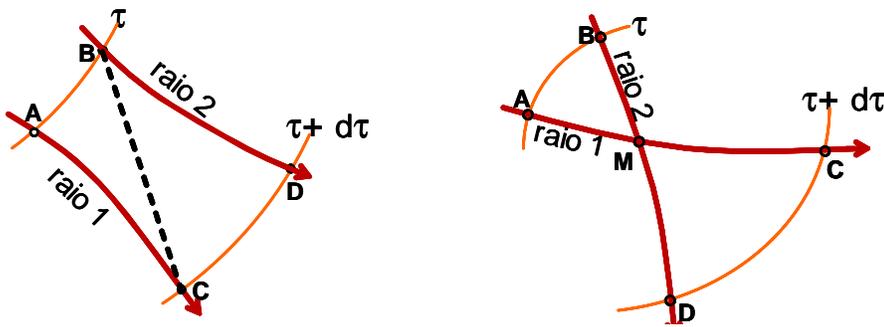


Figura 3.3 – Representação de uma célula através de um quadrilátero cujos vértices  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  são os pontos de interseção dos raios vizinhos (em vermelho) e frentes de onda consecutivas (em laranja). À esquerda temos uma célula convexa; à direita uma célula não convexa resultante da existência de uma cáustica no ponto  $M$ . Ambas as células podem ser decompostas em dois triângulos (PORTUGAL, 2002).

Um outro exemplo para ilustrar o dobramento (ou cruzamento) de uma frente de onda é dado através da Figura 3.4, onde os pontos em negrito representam pontos sobre uma frente de onda amostrada no instante  $\tau_0$ , que ao encontrar uma região de baixa velocidade dobra-se sobre si mesma, assumindo a forma característica de um “rabo de gaivota”. Nesta frente de onda destacam-se três ramos trazendo informações significativas. O primeiro que contém os pontos de amostragem 4, 5, e 11, corresponde à primeira chegada, o segundo contendo os pontos 6 e 10, à segunda chegada, e o terceiro contendo os pontos 7, 8 e 9, à terceira chegada da frente de onda.

Os algoritmos convencionais que estimam os tempos de trânsito através da solução da equação iconal não levam em conta os dois últimos ramos, computando, portanto, apenas as primeiras chegadas. Uma das grandes vantagens do método CFO é permitir a inclusão da segunda e terceira chegadas de quantidades como tempos de trânsito e amplitudes armazenadas nos pontos de amostragem de uma frente de onda.

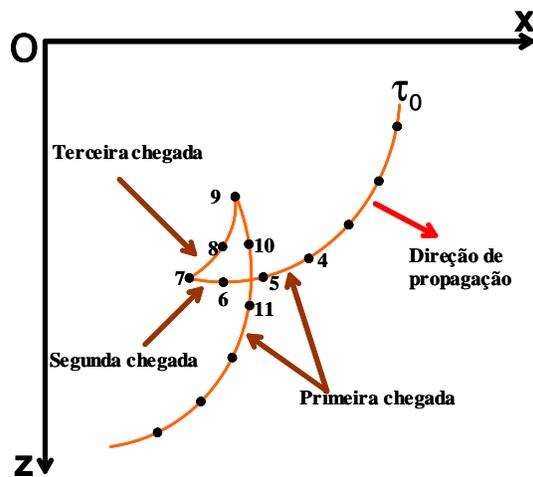


Figura 3.4 – Cruzamento de uma frente de onda sobre si mesma amostrada no instante  $\tau_0$ , ocasionada pela existência de uma cáustica no meio. Os ramos contendo os pontos de amostragem 4, 5, e 11 representam as primeiras chegadas, para os pontos 6 e 10 tem-se as segundas chegadas, e para os pontos 7, 8 e 9 a terceira chegada (VINJE et al., 1993).

Um outro problema ocorre quando há divergências dos raios, que neste caso, partes da frente de onda sofrerão um “estiramento ou alargamento” durante sua propagação através do meio, diminuindo assim a sua regularidade e não permitindo que certas regiões do meio sejam cobertas por raios. Este problema também pode ser resolvido com o método CFO através da criação de novos raios, segundo um critério de densidade de raios. Através deste critério pode-se controlar a regularidade de uma frente de onda, possibilitando assim que zonas (ou regiões) do meio com baixa densidade de raios sejam preenchidas pelos mesmos, e fazendo com que quantidades como tempos de trânsito e amplitudes fiquem bem amostradas em todo o meio.

### 3.4 CRITÉRIOS DE DENSIDADE DE RAIOS

Entende-se por regularidade de uma frente de onda ao grau de distribuição uniforme que os nós, resultantes dos raios propagados, apresentam ao longo dela. Portanto, com este critério pode-se avaliar se os nós estão ou não densamente distribuídos na frente de onda. A seguir, são descritos os principais critérios de densidade de raios. Na Figura 3.5, destaca-se uma célula mostrando a distância (em azul) entre dois nós (ou raios vizinhos) e os vetores vagarosidade (em verde) usados nos critérios de densidade de raios. Os nós são identificados no sistema de coordenadas cartesianas pelos vetores posições  $\mathbf{x}_1$  e  $\mathbf{x}_2$  (linhas tracejadas).

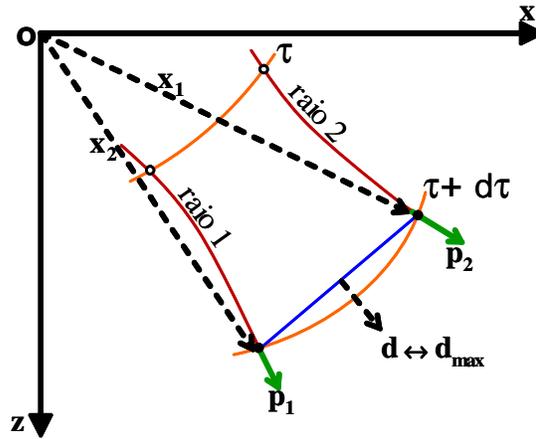


Figura 3.5 – Representação de uma célula mostrando a distância (em azul) entre dois raios vizinhos (em vermelho) e os vetores vagariedade (em verde) usados no critério de densidade de raios. Os nós (círculos cheios) são identificados no sistema de coordenadas cartesianas pelos vetores posições  $\mathbf{x}_1$  e  $\mathbf{x}_2$  (linhas tracejadas), Portugal (2002).

- **Distância Euclidiana**

Este critério (VINJE et al. ,1993) compara a distância entre dois nós vizinhos na frente de onda com uma distância máxima predefinida. Isto é, a distância entre os dois nós deve obedecer à relação abaixo:

$$\|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2\| \leq d_{\max} \quad (3.5)$$

Aqui,  $\|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2\|$  representa a distância euclidiana entre os dois nós e  $d_{\max}$  uma distância máxima predefinida que em geral deve ser da ordem de grandeza do espaçamento da malha regular.

- **Ângulo do vetor vagariedade**

Este critério (LUCIO et al. ,1995) considera que o ângulo entre os vetores vagariedade  $\mathbf{p}_1$  e  $\mathbf{p}_2$  deve obedecer à seguinte relação:

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2}{\|\mathbf{p}_1\| \|\mathbf{p}_2\|} \geq \cos \theta_{\max} , \quad (3.6)$$

sendo  $\theta_{\max}$  um ângulo máximo predefinido.

Entretanto, dois raios vizinhos podem se distanciar muito, mesmo satisfazendo o limite de ângulo estabelecido acima. Da mesma forma, mesmo satisfazendo ao critério da distância euclidiana, ou seja, estando próximos, podem apresentar uma grande divergência ultrapassando o limite de ângulo predefinido. Portanto, em geral estes dois critérios são aplicados simultaneamente. A condição estabelecida pelo primeiro critério permite que se tenha um controle da amostragem espacial do modelo através da criação de novos raios, enquanto que o segundo critério permite que se tenha um controle da curvatura da frente de onda. Estes critérios são os mais simples, porém eficazes. Lambaré, Lúcio e Hanyga (1994) introduziram outro critério de interpolação de raios na construção de frentes de onda, resultando em um aumento na precisão uniforme da interpolação ao longo da frente de onda, como descrito a seguir.

- **Distância paraxial absoluta**

Este critério investiga se dois nós vizinhos estão, cada um, na zona paraxial do outro. Sejam  $\bar{\mathbf{x}}_1$  e  $\bar{\mathbf{x}}_2$  as aproximações paraxiais com relação aos nós 1 e 2, respectivamente, sendo os nós 1 e 2 dados pela intercessão dos raios 1 e 2 com a frente de onda no instante  $\tau + d\tau$ , respectivamente, Figura 3.5. Em símbolos temos:

$$\left\| \mathbf{x}_1 - \bar{\mathbf{x}}_2 \right\| \leq d_{\max} \quad (3.7)$$

$$\left\| \bar{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{x}_2 \right\| \leq d_{\max} . \quad (3.8)$$

A zona de paraxialidade é uma região em torno do raio, na qual as quantidades podem ser aproximadas linearmente a partir do raio central. Desta forma, se um raio está na região de paraxialidade do outro, as quantidades interpoladas linearmente entre estes dois raios têm um grande grau de confiabilidade. Este critério engloba os dois critérios anteriores, sendo, portanto, o mais sofisticado.

- **Distância paraxial relativa**

Neste critério considera-se o ângulo entre os vetores genéricos  $\mathbf{q}_1$  e  $\mathbf{q}_2$  dados por:

$$\cos \varphi = \frac{\bar{\mathbf{q}}_1 \cdot \bar{\mathbf{q}}_2}{\|\bar{\mathbf{q}}_1\| \|\bar{\mathbf{q}}_2\|} \geq \cos \varphi_{\max} \quad (3.9)$$

$$\cos \varphi = \frac{\bar{\mathbf{q}}_1 \cdot \mathbf{q}_2}{\|\bar{\mathbf{q}}_1\| \|\mathbf{q}_2\|} \geq \cos \varphi_{\max} \quad (3.10)$$

em que  $\varphi_{\max}$  é o ângulo máximo permitido. Este critério é apenas uma sofisticação do critério anterior. O vetor genérico é definido como  $\mathbf{q}_j = (x_j, p_j)$ ,  $j = 1, 2$  e suas aproximações paraxiais dadas por:

$$\bar{\mathbf{q}}_1 = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{x}}_1 \\ - \\ \bar{\mathbf{p}}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ - \\ \mathbf{p}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{u}_1 \\ - \\ \mathbf{v}_1 \end{pmatrix} \delta\gamma_1, \quad (3.11)$$

sendo o mesmo para  $\bar{\mathbf{q}}_2$ .

### 3.5 INTERPOLAÇÃO DE NOVOS RAIOS

Diante dos critérios de densidade de raios vistos anteriormente, é possível agora adicionar (ou criar) novos raios, como resultado da falha de uma das condições estabelecidas pelos critérios. A Figura 3.6 mostra a criação de um terceiro raio (raio 3 em verde) em decorrência do critério de densidade ter falhado para os raios vizinhos, raio 1 e raio 2 (em vermelho), na frente de onda amostrada no instante  $\tau + 2d\tau$ . Este novo raio inicia sua propagação na frente de onda no instante  $\tau + d\tau$ , e possui condições iniciais que dependem basicamente das quantidades dos raios vizinhos e do meio.

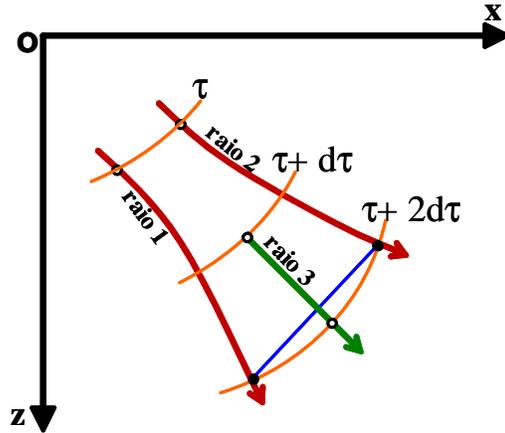


Figura 3.6 – Criação de um novo raio 3 (em verde) na frente de onda em  $\tau + d\tau$  entre os raios vizinhos raio 1 e raio 2, devido a distância entre eles ter excedido o limite estabelecido pelo critério de densidade na frente de onda em  $\tau + 2d\tau$ , Portugal (2002).

### 3.6 CONSTRUÇÃO DA MALHA RAIOS E FRENTES DE ONDA

Finalmente, após a criação dos raios e frentes de onda, a aplicação do critério de densidade de raios nas frentes de ondas, e a definição de uma topologia para os nós e células, uma malha irregular de pontos denominada malha RFO (raios e frentes de onda) é construída. Resta agora projetar as informações contidas em seus nós para uma malha alvo regular previamente definida. O algoritmo para a construção de raios e frentes de onda, usado neste trabalho (PORTUGAL, 2002), é constituído de três etapas: pré-processamento, conexão dos pontos da malha alvo às células e interpolação das quantidades.

- **Pré-processamento**

Esta etapa consiste em determinar um subconjunto de células da malha alvo que se intercepta com a malha RFO.

- **Conexão entre pontos e células**

Nesta etapa, faz-se a conexão entre os pontos do subconjunto determinado na primeira etapa, com as células da malha RFO. A conexão é feita associando um ponto desse subconjunto a uma célula da malha RFO, isto é, verificando se esse ponto pertence ou não a uma dada célula

usando o teste do ponto-interior-ao-triângulo, pois como foi visto anteriormente, uma célula pode ser decomposta em dois triângulos.

- **Interpolação das quantidades**

Nesta etapa, para cada ponto da malha alvo, agora associado a uma dada célula da malha RFO, faz-se uma interpolação linear usando as quantidades armazenadas nos três vértices do triângulo ao qual o ponto pertence. Caso o ponto pertença a mais de uma célula, repete-se o processo quantas vezes for necessário, ou até um número máximo de vezes fornecido pelo usuário.

### 3.7 EXEMPLO NUMÉRICO DO MÉTODO CFO

Nesta seção é mostrada a aplicação do método da construção de frentes de onda, apresentando suas vantagens na criação de novos raios, quando necessários, e na determinação de chegadas posteriores. Neste trabalho, toma-se a liberdade de utilizar o programa de modelamento sísmico, que usa o método da construção de frentes de onda, desenvolvido por Portugal (2002).

- **EXEMPLO 1**

Apenas para efeito ilustrativo e como um primeiro exemplo numérico da aplicação do método CFO, foi criado um modelo cujas camadas rasas (próximas à superfície) possui uma velocidade baixa ( $1100m/s$ ) em relação às camadas mais profundas ( $3200m/s$ ). Posicionou-se a fonte pontual na posição ( $1250m$ ,  $1000m$ ) e a malha RFO foi construída, mostrando a propagação das frentes de onda no meio. Através da Figura 3.7(a), pode-se notar um aumento significativo na divergência dos raios quando em contato com as camadas de baixa velocidade, pois neste caso não foi usado o critério de densidades de raios. Na Figura 3.7(b) foi usado o critério de densidade de raios, permitindo a criação de novos raios, quando necessários, resultando assim em uma maior cobertura de raios nas zonas de grandes divergências de raios.

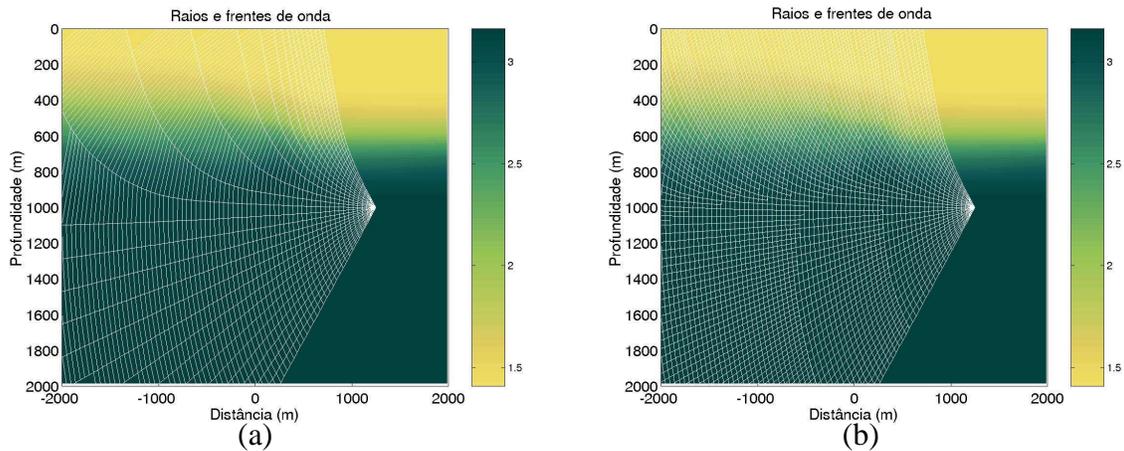


Figura 3.7 – Exemplo numérico de aplicação do método CFO. (a) Sem controle de densidade de raio. (b) Com controle de densidade de raio. Em (b) vemos a criação de novos raios permitindo uma maior cobertura nas zonas de grandes divergências de raios.

- EXEMPLO 2

Neste segundo exemplo, a intenção é confirmar uma outra grande vantagem do método CFO em situações onde existam cáusticas. Para isto foi criado um modelo contendo um foco suavizado e enterrado de baixa velocidade, como mostrada pela Figura 3.8.

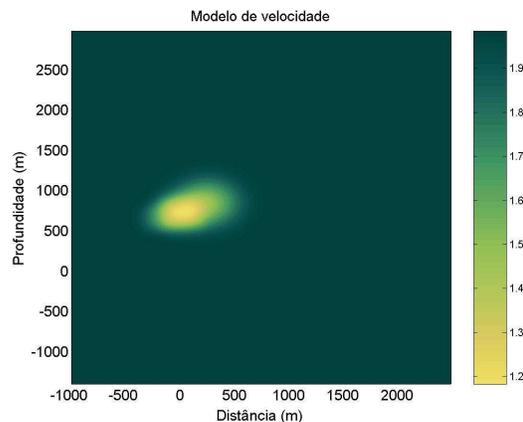


Figura 3.8 – Modelo de velocidades contendo um foco suavizado de baixa velocidade usado para a construção de frentes de onda.

Para este modelo foram construídos os raios e frentes de onda como mostrada pela Figura 3.9(a). Devido ao baixo valor de velocidade no foco os raios tendem a se curvar produzindo uma zona de sombra. Graças ao critério de densidade de raios esta zona de sombra é coberta por raios

criados permitindo que se tenha uma boa amostragem das quantidades desejadas. Além disso, pode-se ver claramente o dobramento da malha RFO sobre si mesma como resultado da cáustica localizada aproximadamente em  $(250m, 750m)$ . Este dobramento permite que as quantidades sejam computadas e armazenadas em cada nó da malha RFO, tantas vezes quantas forem necessárias, resultando na construção de três painéis de tempos de trânsito dispostos em ordem crescente, isto é, a primeira (Figura 3.9(b)), segunda (Figura 3.10(a)) e terceira (Figura 3.10(b)) chegadas da frente de onda.

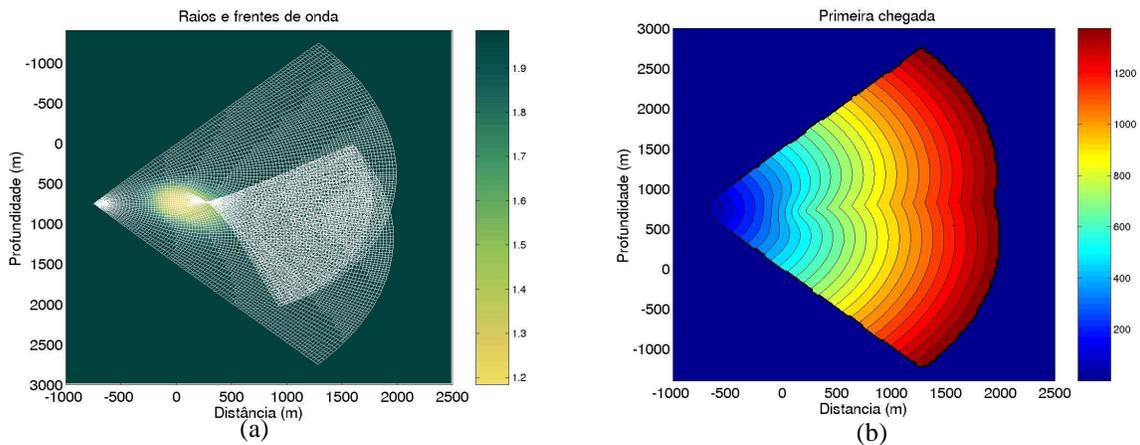


Figura 3.9 – (a) Construção da malha RFO para o modelo da Figura 3.8. Nota-se claramente que o foco de baixa velocidade é iluminado densamente pelo critério de densidade de raios além do dobramento da malha RFO devido à cáustica localizada em  $(250m, 750m)$ . (b) Primeiras chegadas de tempos de trânsito.

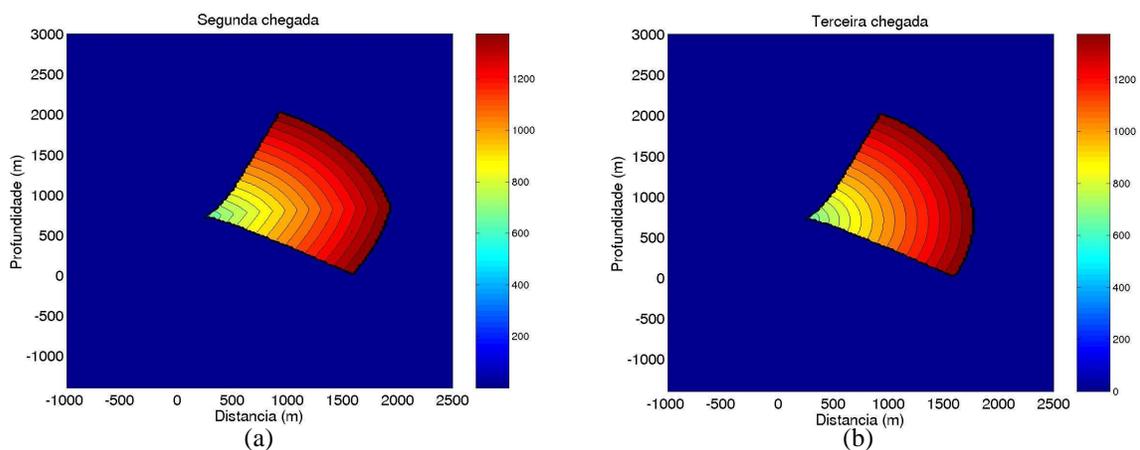


Figura 3.10 – (a) Painel de tempos de trânsito correspondentes às segundas chegadas das frentes de onda. (b) Painel de tempos de trânsito correspondentes às terceiras chegadas das frentes de onda.

## 4 FUNDAMENTO TEÓRICO DA MIGRAÇÃO KIRCHHOFF CONVENCIONAL

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos da migração tipo Kirchhoff em profundidade, revendo os principais conceitos relacionados ao processo de empilhamento de difração. São apresentados inicialmente os princípios básicos da migração Kirchhoff, sendo descrito em seguida todo o processo de empilhamento de difrações, onde é apresentada a chamada curva de Huygens (difrações) para pontos em profundidade, necessária para o empilhamento do dado sísmico, sendo este empilhamento feito segundo uma integral de empilhamento de difrações. Finalmente, apresenta-se uma descrição do algoritmo de migração em profundidade juntamente com o fluxograma, mostrando os passos principais que constitui o mesmo, para uma melhor clareza.

### 4.1 INTRODUÇÃO

A migração constitui uma das mais importantes etapas do processamento sísmico, tendo como objetivo principal fornecer a imagem de refletores de interesse em subsuperfície. Devido à esta grande importância, foram desenvolvidos métodos de migração com o fim de melhorar cada vez mais a resolução da imagem em subsuperfície. Dentre estes métodos citamos o método de migração por diferenças finitas, a migração frequência-número de onda e o método de migração Kirchhoff, cada um apresentando suas vantagens e desvantagens dependendo das condições do meio considerado. Para um bom entendimento dos métodos de migração mencionados, recomendam-se como excelentes referências os livros de Yilmaz (1987) e Claerbout (1993), que trazem um grande número de exemplos e aplicações práticas, onde este último livro oferece muitos códigos fontes para o pré-processamento e migração.

Entretanto, o método de migração Kirchhoff tem se destacado dentre os outros métodos, sendo extensamente usado pela indústria de petróleo para gerar imagens da subsuperfície a partir do dado sísmico de superfície. Isto se deve a um menor custo computacional no processo de migração, à sua rica história na indústria do petróleo por apresentar um alto grau de confiabilidade, à facilidade de lidar com fonte irregular e espaçamento de traços, e a menor exigência de memória computacional comparada a outros métodos.

A migração Kirchhoff, também conhecida como migração por empilhamento de difrações, baseia-se na construção de curvas (superfícies em 3-D) de tempos de trânsito de difrações usando a priori um modelo de velocidade de migração. Estas curvas servirão como trajetórias de empilhamento, sobre as quais o dado sísmico será somado (ou empilhado) e o resultado do empilhamento atribuído a um ponto da malha de migração definida em profundidade.

Semelhante à teoria do raio, a migração Kirchhoff admite dois aspectos: o cinemático e o dinâmico. O primeiro, conhecido como migração cinemática que fornece apenas a imagem dos refletores em profundidade, e o segundo, como migração em verdadeira amplitude que apresenta uma estimativa dos coeficientes de reflexão das reflexões primárias. Existe grande número na literatura abordando este segundo aspecto. Dentre eles recomendam-se os artigos de Hubral et al. (1992a e 1992b) e Schleicher et al. (1993 e 2001).

## 4.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA MIGRAÇÃO KIRCHHOFF

Considere-se inicialmente que a superfície da Terra seja plana, e que neste plano ( $z = 0$ ) a superfície de medidas seja densamente coberta por pares fonte-receptor ( $S, G$ ), cujas posições podem ser descritas (BLEISTEIN, 1987; SCHLEICHER et al., 1993) em 2-D por um parâmetro  $\xi$ , ou seja,  $S = S(\xi)$  e  $G = G(\xi)$  com o parâmetro  $\xi$  assumindo todas as posições dentro de um conjunto  $A$ , conhecido como “a abertura da configuração de medida”, e também por constantes dependentes da configuração de medida. Esta descrição é válida para todas as configurações de medidas usuais em sísmica: fonte-comum (FC), afastamento comum (AC), afastamento nulo (AN), ponto médio comum, (PMC), ou “cross-spread” (do inglês: dispositivo em cruz).

Considere-se ainda que em  $A$ , cada traço sísmico seja resultado de uma superposição apenas de reflexões de ondas-P primárias de componente principal, aqui denotada por  $u(\xi, t)$ . A Figura 4.1 mostra uma reflexão primária  $P_G$  correspondendo ao raio  $SRG$  (curva vermelha) a partir de um refletor desconhecido (curva azul), definida para os pares de fonte e receptor, designados por  $S(\xi)$  e  $G(\xi)$ , respectivamente. Esta reflexão também pode ser vista como a resposta cinemática de um ponto de reflexão  $R$  em profundidade.

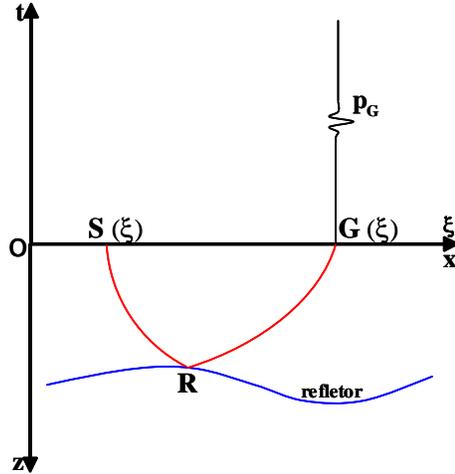


Figura 4.1 – Representação de uma reflexão primária  $P_G$ , correspondente ao raio  $SRG$  (curva vermelha) a partir de um refletor desconhecido (curva azul), definida para o par de fonte  $S(\xi)$  e receptor  $R(\xi)$  descritos pelo parâmetro  $\xi$ . A reflexão  $P_G$  é conhecida como a resposta cinemática do ponto de reflexão  $R$  em profundidade.

Durante a propagação da energia no meio, considerado elástico, o deslocamento sofrido por uma partícula ao longo do raio emergindo em  $G(\xi)$ , é descrito pela reflexão primária  $u(\xi, t)$ . Considerando-se o termo de ordem zero da série assintótica do raio (SCHLEICHER et al., 1993), vista no capítulo 1, e que a superfície de registro não é uma superfície livre, o deslocamento analítico da partícula pode ser expresso por:

$$U(\xi, t) = R_c \frac{\mathcal{A}}{\mathcal{L}} F(t - \tau_R(\xi)). \quad (4.1)$$

Nesta equação,  $F(t - \tau_R(\xi))$  representa o sinal analítico da fonte, que consiste do sinal da fonte (parte real) e de sua transformada de Hilbert (parte imaginária),  $\tau_R(\xi)$  é a função que fornece o tempo de trânsito da reflexão primária ao longo do raio  $SRG$ ,  $R_c$  o coeficiente de reflexão de onda plana medido no ponto de reflexão  $R$ ,  $\mathcal{A}$  a perda total na amplitude, devido à transmissão da onda através de todas as interfaces, medida ao longo do raio e  $\mathcal{L}$  é o fator de espalhamento geométrico.

Entretanto, devido a certas condições que o meio possa apresentar como, por exemplo, uma não-homogeneidade ou uma dada geometria do refletor, ocasionando uma convergência ou divergência de raios, a amplitude do dado sísmico de uma reflexão primária será afetada pelo fator de espalhamento geométrico.

De acordo com Schleicher et al. (1993), um traço sísmico com amplitude verdadeira pode ser obtido multiplicando-se cada reflexão primária do traço pelo fator de espalhamento geométrico. Chamando  $U_{TA}$  de sinal analítico de amplitude verdadeira, tem-se:

$$U_{TA}(\xi, t) = \mathcal{L}U(\xi, t) = R_c \mathcal{A}F(t). \quad (4.2)$$

Assumindo-se que não haja perda de amplitude por outros fatores, isto é, fazendo  $\mathcal{A} = 1$ , a expressão acima fornece uma medida do coeficiente de reflexão  $R_c$ . Uma abordagem mais detalhada da migração Kirchhoff em amplitude verdadeira pode ser vista nos artigos de Schleicher et al. (1993), Tygel et al. (1996), além dos livros de Bleistein et al. (2001) e Schleicher et al. (2001), que tratam o assunto de uma forma mais completa.

#### 4.3 EMPILHAMENTO DE DIFRAÇÕES

Na migração por empilhamento de difrações, cada ponto de uma malha regular previamente definida em profundidade, chamada malha alvo de migração, é considerado como um ponto difrator, que ao ser excitado por uma onda incidente, gera uma onda secundária (princípio de Huygens), que é registrada pelos receptores em superfície, definindo então uma curva de tempos de difração, conhecida como curva de Huygens. Desta forma, para um ponto  $M$  em profundidade, definimos esta curva como:

$$\tau_D(\xi, M) = \tau(S, M) + \tau(M, G), \quad (4.3)$$

sendo  $\tau(S, M)$  e  $\tau(M, G)$  os tempos de trânsito computados ao longo das trajetórias dos raios que ligam a fonte  $S(\xi)$  ao ponto  $M$  e este ao receptor  $G(\xi)$ , respectivamente. O termo “empilhamento de difrações” se aplica ao somatório (ou empilhamento) das amplitudes dos traços sísmicos que é realizada ao longo das curvas de difrações.

A partir deste procedimento, são possíveis duas situações, conforme a Figura 4.2: a primeira, em que o ponto difrator  $M$  coincide com um ponto de reflexão  $R$ , e a segunda, em que o ponto  $M$  da malha alvo não constitui um ponto de reflexão. Na primeira situação, a curva de difração  $\tau_D(\xi)$  será tangente à curva de tempos de reflexão, designada por  $\tau_R(\xi)$ , fazendo com

que o resultado do empilhamento assuma um valor significativo, enquanto que na segunda, o valor do empilhamento ao longo da curva de difração, que é atribuído a este ponto, será desprezível, comparado com o anterior. Este fato pode ser justificado expressando-se o empilhamento de difração através de uma integral, conhecida como integral de empilhamento de difração, e avaliando-a assintoticamente através do método da fase estacionária (SCHLEICHER et al. 1993).

Neste exemplo, a curva de tempos de reflexão foi construída para a configuração de medida “afastamento comum”. Após ser realizado este procedimento para todos os pontos  $M$  da malha alvo de migração, o refletor esperado (em azul) surgirá como resultado do contraste de valores de amplitudes atribuídos a estes pontos. A malha alvo de migração (retângulo pontilhado) é definida convenientemente, pressupondo-se estar o refletor (desconhecido) limitado pelos contornos da mesma.

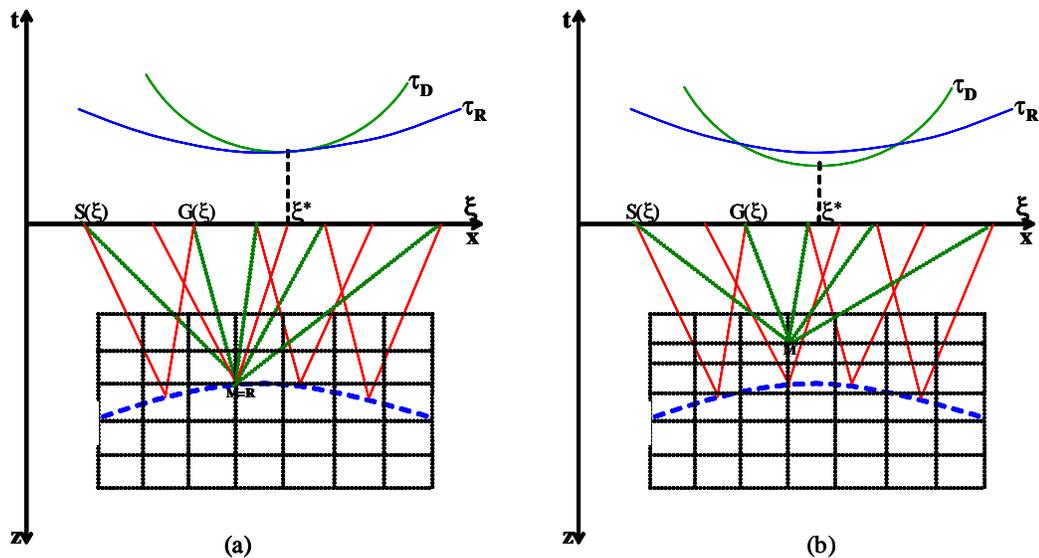


Figura 4.2 – Ilustração geométrica do processo de empilhamento de difrações. Curvas de tempo de trânsito de reflexão ( $\tau_R$ ) e difração ( $\tau_D$ ) para diferentes escolhas do ponto  $M$  de uma malha regular. (a)  $M$  é um ponto refletor e as duas curvas são tangentes. (b)  $M$  não é um ponto refletor, não havendo ponto de tangência entre as curvas. (Adaptado de SCHLEICHER et al., 1993).

#### 4.4 INTEGRAL DE EMPILHAMENTO DE DIFRAÇÃO

Para realizar o processo de empilhamento de difração, visto na seção anterior, através da expressão (4.3), é necessário um macro-modelo de velocidade juntamente com um algoritmo eficiente de tempos de trânsito para a construção das curvas de difração, ao longo das quais as amplitudes dos dados serão somadas. Este somatório (ou empilhamento) pode ser matematicamente expressa pela seguinte integral:

$$V(M, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_A d\xi W(\xi, M) U(\xi, t + \tau_D(\xi, M)) \quad (4.4)$$

Na equação acima,  $U(\xi, t)$  é o dado sísmico e  $W(\xi, M)$  o fator de ponderação da integral, representando a função peso, que deve ser escolhida adequadamente permitindo a determinação dos coeficientes de reflexão sobre os refletores. Esta função peso é tal que, se lhe for atribuída o valor unitário, ainda assim a equação (4.4) permite a reconstrução dos refletores de interesse, constituindo o que chamamos de migração cinemática. Substituindo na equação acima o dado por sua representação dada pela teoria do raio (equação 4.1) tem-se:

$$V(M, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_A d\xi W(\xi, M) R \frac{\mathcal{A}}{\mathcal{L}} F(t + \tau_F(\xi, M)), \quad (4.5)$$

sendo  $\tau_F(\xi, M) = \tau_D(\xi, M) - \tau_R(\xi)$  a diferença entre os tempos de difração e de reflexão. A equação (4.5) escrita no domínio da frequência assume a forma

$$\hat{V}(M, \omega) = \frac{\hat{F}(\omega)}{\sqrt{2}} \int_A d\xi W(\xi, M) R_c \frac{\mathcal{A}}{\mathcal{L}} e^{i\omega\tau_F(\xi, M)}, \quad (4.6)$$

sendo  $\hat{V}(M, \omega)$  e  $\hat{F}(\omega)$  as transformadas de Fourier de  $V(M, t)$  e  $F(t)$  em  $t$ , respectivamente. Entretanto, a integral acima pertence à classe das integrais que possuem um núcleo oscilatório, que depende de um parâmetro (em geral a frequência). Por esta razão, esta integral não pode ser resolvida analiticamente, sendo, portanto aproximada, para altas frequências, usando-se o

método da fase estacionária (BLEISTEIN, 1984). A restrição a altas frequências já foi de fato implicitamente feita, pois a propagação das ondas está sendo descrita pela teoria do raio (SCHLEICHER et al., 1993).

#### 4.5 AVALIAÇÃO ASSINTÓTICA DA INTEGRAL DE EMPLHAMENTO

Aplicar o método da fase estacionária à integral (4.6) significa expandir a função fase  $\tau_F(\xi, M)$  em uma série de Taylor com respeito ao ponto estacionário  $\xi^*$ , que truncada no termo de segunda ordem é dada por:

$$\tau_F(\xi, M) = \tau_F(\xi^*, M) + \frac{1}{2} \mathbf{H}_F (\xi - \xi^*)^2, \quad (4.7)$$

em que  $\mathbf{H}_F$  é a matriz Hessiana de ordem 2, dada pelas segundas derivadas de  $\tau_F$  avaliada em  $\xi = \xi^*$ .

Desde que  $\left. \frac{\partial \tau_F}{\partial \xi} \right|_{\xi=\xi^*} = 0$  e considerando que  $\mathbf{H}_F = \left. \frac{\partial^2 \tau_F(\xi, M)}{\partial \xi^2} \right|_{\xi=\xi^*} \neq 0$ , usando o método da fase estacionária, tem-se a solução assintótica (BLEISTEIN, 1984):

$$\hat{V}(M, \omega) \approx \frac{1}{\sqrt{-i\omega}} \hat{F}(\omega) \mathcal{W}(\xi^*, M) \frac{R_c \mathcal{A}}{\mathcal{L} \sqrt{|\mathbf{H}_F|}} \exp \left[ i\omega \tau_F(\xi^*, M) + \frac{i\pi}{4} (\text{sgn } \mathbf{H}_F - 1) \right]. \quad (4.8)$$

Esta expressão mostra que o empilhamento de difrações realizado de acordo com a equação (4.4) introduz no resultado um deslocamento de fase de  $\pi/4$  devido ao fator  $\frac{1}{\sqrt{-i\omega}}$ , que tem ao mesmo tempo a propriedade de atenuar as altas frequências. A integral de empilhamento de difração (4.4) deve, portanto, ser redefinida, de modo que o efeito do deslocamento seja retirado e que a forma do sinal da fonte seja preservada. A nova integral de migração assume a forma:

$$V_F(M, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_A d\xi \mathcal{W}(\xi, M) U_F(\xi, t + \tau_D(\xi, M)), \quad (4.9)$$

cuja representação, na forma discretizada (ou de trabalho), é (HANITZSCH et al., 1994):

$$V_F(M, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{\xi} \Delta\xi W(\xi, M) U_F(\xi, t + \tau_D(\xi, M)). \quad (4.10)$$

Nesta equação,  $U_F$  é o dado sísmico filtrado cuja determinação pode ser realizada no domínio da frequência como segue:

$$\hat{U}_F(\xi, \omega) = \sqrt{i\omega} (1 + \text{sgn } \omega) \hat{U}(\xi, \omega), \quad (4.11)$$

em que  $\hat{U}_F$  denota a transformada de Fourier do traço sísmico analítico filtrado e  $\hat{U}$  é a transformada de Fourier do traço sísmico real de entrada.

Neste trabalho, far-se-á uso deste resultado considerando apenas o aspecto cinemático da migração Kirchhoff. Pata tal consideração, será atribuído o valor unitário, como já mencionado anteriormente, à função peso  $W(\xi, M)$ , resultando numa migração apenas com os valores de amplitudes nos refletores desejados.

#### 4.6 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO DE MIGRAÇÃO

Para finalizar este capítulo, são apresentados resumidamente os passos aplicados na implementação do algoritmo de migração Kirchhoff em profundidade. Primeiramente, deve-se assumir um macro-modelo de velocidade e que um eficiente algoritmo de computação de tempos de trânsito esteja disponível. Deve-se ainda especificar a configuração de medidas para que a abertura  $A$  da migração, que consiste de um intervalo de valores  $\xi$ , esteja bem determinada.

O algoritmo de migração consiste dos três passos seguintes: (1) construção das curvas de difração; (2) aplicação de um filtro particular ao sismograma de entrada, e (3) empilhamento das curvas de difração.

##### 1) Construção das curvas de difração

Define-se uma malha regular de pontos em profundidade, e para cada ponto é computado o tempo de trânsito correspondente às duas trajetórias dos raios que ligam este ponto ao par  $(S, G)$  de fonte e receptor disposto na superfície. Este procedimento é realizado para todos os

pares  $(S, G)$  na superfície assumindo todas as posições do parâmetro  $\xi$  em  $A$ . Somando-se os tempos ao longo das duas trajetórias dos raios constrói-se a curva de Huygens para este ponto.

## 2) **Aplicação de um filtro aos dados**

Esta etapa consiste na filtragem do sismograma de entrada. Esta operação de filtragem consiste de duas partes que podem ser executadas simultaneamente no domínio da frequência. A primeira consiste no cálculo do sinal analítico do sismograma (traço sísmico complexo), enquanto que a segunda na aplicação de uma semi derivada temporal no dado sísmico. Há duas razões para computar o sinal analítico: o resultado da migração deve fornecer os coeficientes de reflexão complexos e reconstituir corretamente a forma do sinal da fonte na presença de cáusticas. A semi derivada temporal remove o efeito de deslocamento de fase na assinatura do sinal devido ao somatório que é executado no passo seguinte do algoritmo.

## 3) **Empilhamento de difrações**

Finalmente, esta etapa consiste em executar um empilhamento de difrações para todos os pontos da malha alvo de migração. A partir das curvas de difrações (Huygens) computadas na primeira etapa e usando a integral de migração (4.10), empilham-se as amplitudes dos traços sísmicos do sismograma ao longo dessas curvas e o resultado do empilhamento é atribuído ao ponto  $M$  considerado.

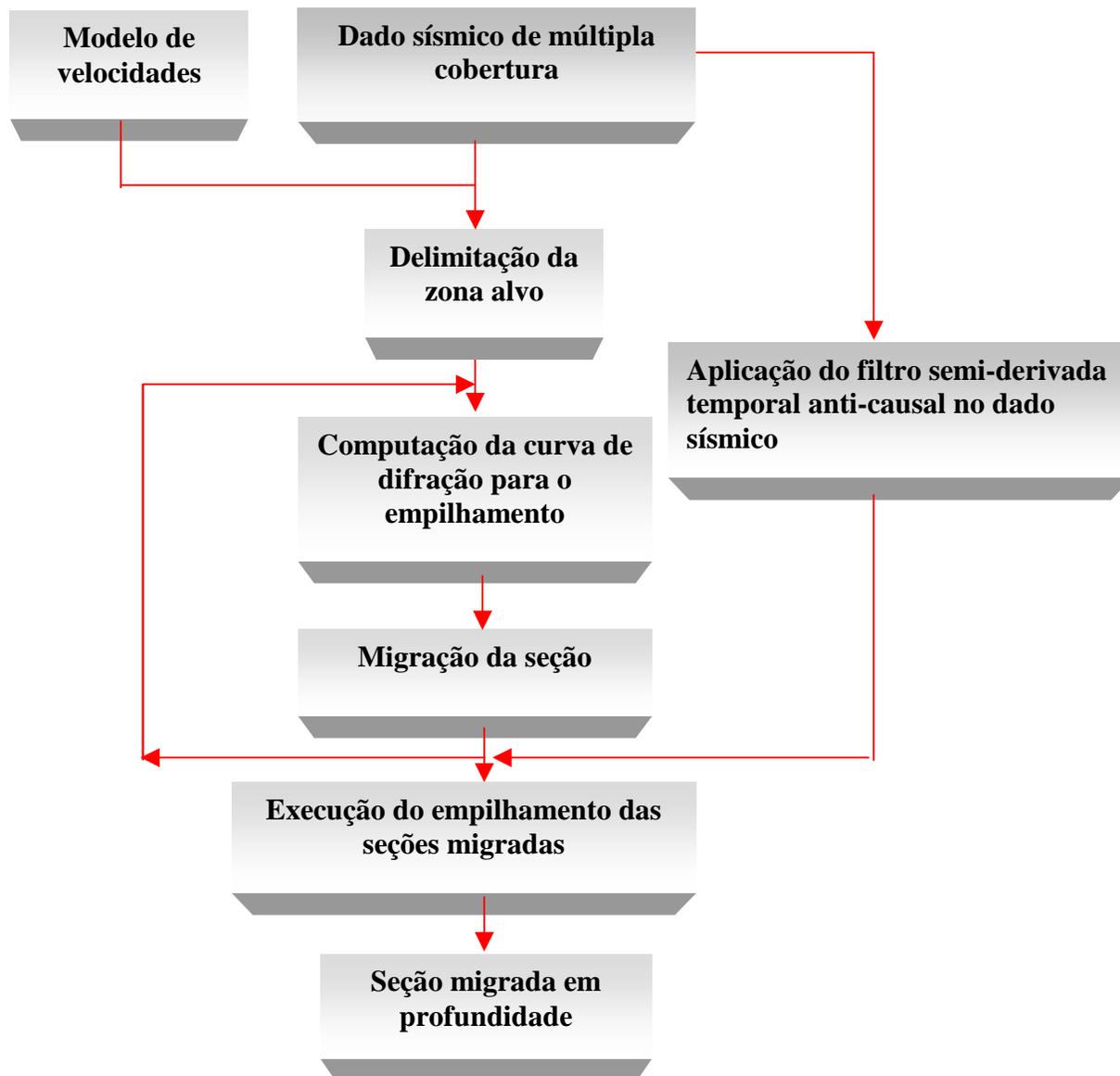


Figura 4.3 – Fluxograma mostrando todo o processo da migração Kirchhoff em profundidade, desde o dado sísmico de entrada (sismograma) até a exibição do resultado.

## 5 – O MÉTODO DE EMPILHAMENTO POR SUPERFÍCIE DE REFLEXÃO COMUM (SRC)

Neste capítulo, é apresentada uma breve revisão teórica do método de empilhamento por superfície de reflexão comum (ou simplesmente método SRC), conhecido como método CRS, do inglês “Common reflection surface”, que surgiu como uma nova alternativa aos métodos tradicionais de empilhamento para simulação de seções de afastamento-nulo de alta resolução. Inicialmente, são apresentados os atributos ou parâmetros cinemáticos de *ondas hipotéticas*, necessários para a construção do operador de empilhamento SRC, e que podem ser definidos considerando-se dois casos: (a) simulando tempos de reflexões ou (b) simulando tempos de difrações para um dado ponto refletor. É apresentada ainda uma descrição do algoritmo utilizado para a determinação dos parâmetros cinemáticos juntamente com o fluxograma mostrando todos os passos do mesmo. Estes resultados terão grande aplicabilidade no capítulo subsequente, onde será apresentada uma nova alternativa ao imageamento em profundidade convencional utilizando os atributos derivados do método SRC.

### 5.1 INTRODUÇÃO

No processamento sísmico, a técnica CMP (ponto médio comum), que compreende às correções *normal moveout* e *dip moveout* (MAYNE, 1962 e HALE, 1991), também conhecida como a técnica tradicional NMO/DMO, é usada na simulação de seções de afastamento-nulo (AN), isto é, considerando os pares de fonte e receptor coincidentes, e tem sido tradicionalmente aplicada nas indústrias de petróleo por mais de quatro décadas. Esta técnica é baseada no somatório, através de trajetórias de empilhamento, dos eventos sísmicos tais como reflexões, difrações, dentre outros. Entretanto, esta técnica convencional de empilhamento não produz bons resultados em meios que apresentam fortes variações laterais de velocidade. Diante disto, estratégias iniciais de imageamento sísmico, independente do modelo de velocidade, usadas para simulação de seções AN foram propostas por de Bazelaire (1986) e Gelchinsky (1988), que conduziram a outras novas técnicas, que só recentemente ganharam ampla atenção como, por exemplo, o método SRC (GARABITO, 2001; HUBRAL, 1999; JÄGER, 1999; MÜLLER, 1999), dentre outras.

O método de empilhamento SRC é baseado numa aproximação paraxial hiperbólica de segunda ordem dos tempos de trânsito de reflexão na vizinhança de um raio central, tendo como objetivo simular uma seção de afastamento nulo, além de seções de atributos cinemáticos com múltiplas aplicações. Além disso, estes atributos podem ser obtidos diretamente do dado sísmico de cobertura múltipla, por meio de um processo de busca multidimensional de parâmetros (GARABITO, 2001; JÄGER, 1999), usando para isto uma análise de coerência.

## 5.2 ATRIBUTOS CINEMÁTICOS

Em adição à seção simulada de afastamento nulo (AN), o método de empilhamento SRC fornece três atributos cinemáticos de campos de onda: um ângulo de emergência  $\beta_0$  na superfície, de um raio normal (ou central) a um ponto  $R$  do refletor, e dois raios de curvaturas de frentes de ondas hipotéticas como definidas por Hubral (1983), que podem ser aplicados, por exemplo, na determinação da velocidade intervalar, no cálculo do espalhamento geométrico, na estimativa da zona de Fresnel e também na simulação de eventos de difrações. Estas ondas hipotéticas são produzidas considerando-se dois experimentos hipotéticos, como ilustrados pela Figura 5.1, para um modelo constituído por duas camadas homogêneas sobre um semi-espço.

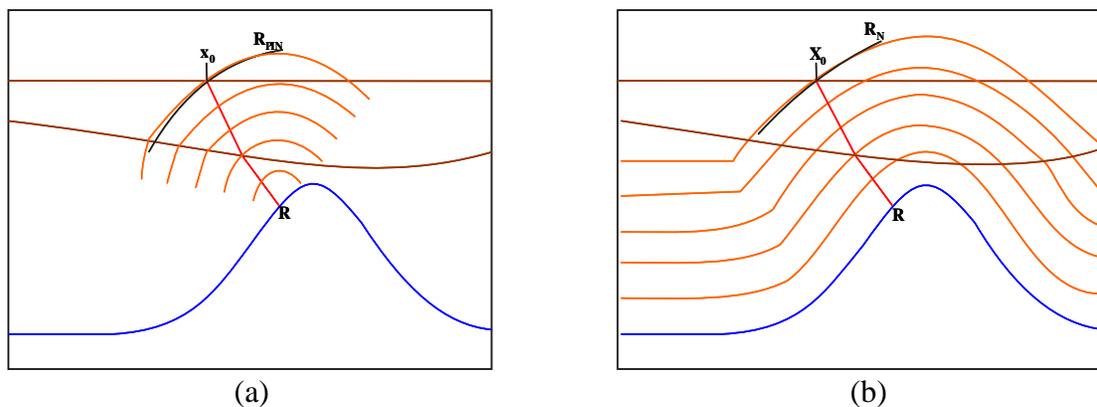


Figura 5.1 – Experimento hipotético mostrando (a) onda PIN produzida por um ponto difrator  $R$  sobre o refletor (em azul) e (b) onda N gerada por um experimento de refletor explosivo. As frentes de onda (em laranja) correspondentes ao raio normal (em vermelho) em  $R$  propagam-se de forma ascendente até atingir o ponto de emergência em  $X_0$  (MANN, 2001).

No primeiro experimento, o ponto  $R$  sobre o refletor (em azul) é um ponto de incidência Normal (PIN) de um raio (em vermelho) de afastamento nulo com origem no ponto  $X_0$  na

superfície. Este ponto, considerado um ponto de difração, simula uma onda denominada “Onda Ponto de Incidência Normal (onda PIN)”, que se propaga de forma ascendente até atingir o ponto de emergência  $X_0$  na superfície. O segundo experimento consiste em considerar cada ponto do refletor como um ponto difrator, simulando assim um experimento conhecido como “refletor explosivo”, onde o envelope das frentes de onda geradas por cada um destes pontos produz uma nova onda chamada “onda Normal (onda N)”, que se propaga de forma ascendente e tem a curvatura igual à curvatura local do refletor em  $R$ .  $R_{PIN}$  e  $R_N$  são os raios de curvaturas, respectivamente, das ondas PIN e N que estão associadas à trajetória do raio normal, sendo que as curvaturas finais destas ondas emergentes são medidas no ponto  $X_0$ , e o ângulo de emergência comum  $\beta_0$  das duas ondas coincidindo com o ângulo de emergência do raio normal em  $R$ .

### 5.3 OPERADOR DE EMPILHAMENTO SRC

Como mencionado anteriormente, os tempos de trânsito correspondentes às reflexões de raios vizinhos a um raio central, podem ser aproximados através de uma expansão hiperbólica de segunda ordem em série de Taylor da função tempo de trânsito de reflexão para o raio normal.

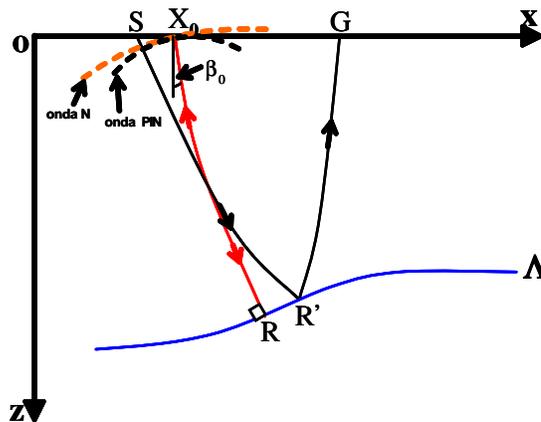


Figura 5.2 – Representação geométrica de um raio central (em vermelho) ao refletor (em azul) no ponto  $R$  de incidência normal juntamente com um raio  $SRG$  em sua vizinhança correspondente a uma reflexão primária. As duas frentes de onda PIN e N (curvas pontilhadas) atingem a superfície no ponto  $X_0$  de emergência do raio central (GARABITO, 2001).

A Figura 5.2 mostra um refletor (em azul) curvo em profundidade e um raio central fixo  $X_0RX_0$  com afastamento fonte-receptor nulo, sendo  $R$  o ponto de incidência normal deste raio.

Para um dado par fonte-receptor ( $S, G$ ) na vizinhança do ponto de emergência  $X_0$  do raio, considera-se um raio de reflexão primária  $SR'G$  com relação ao mesmo refletor. As reflexões primárias, para cada raio paraxial na vizinhança do raio central, são descritas matematicamente por uma expressão conhecida como “operador de empilhamento SRC”.

O operador de empilhamento SRC pode ser obtido de diferentes modos, por exemplo, de acordo com a aproximação geométrica dada por Höcht et al. (1999), que produz uma representação paramétrica do operador SRC. Entretanto, para geometrias de aquisição irregulares, uma representação explícita deste operador seria mais conveniente. Baseado na representação paramétrica dada por Höcht, a expansão hiperbólica de Taylor de segunda ordem, que também pode ser obtida por meio da teoria do raio paraxial (SCHLEICHER et al., 1993; TYGEL et al., 1997), assume, para um meio 2D a forma:

$$t^2(x_m, h) = \left( t_0 + \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} \left( \frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{PIN}} \right), \quad (5.1)$$

sendo  $t_0$  o tempo duplo do raio central de afastamento nulo e  $v_0$  a velocidade próxima à superfície, tomada em torno do ponto de emergência do raio central. As coordenadas  $x_m = (x_G + x_S) / 2$  e  $h = (x_G - x_S) / 2$  representam, respectivamente, o ponto médio e o meio-afastamento entre a fonte e o receptor, sendo  $x_S$  e  $x_G$  as coordenadas horizontais do par fonte-receptor ( $S, G$ ). A coordenada  $X_0 = (x_0, h = 0)$  sobre a linha sísmica é o ponto de emergência do raio central com fonte e receptor coincidentes.

A expressão (5.1) mostra que o operador SRC depende do trio de parâmetros cinemáticos ( $\beta_0, R_{PIN}, R_N$ ) e da velocidade próxima à superfície (conhecida a priori), não dependendo, portanto, do modelo de velocidade, e podendo então ser aplicada em meios heterogêneos. Para ilustrar geometricamente este operador, usa-se a Figura 5.3 que mostra em sua parte inferior um modelo sintético composto por três camadas homogêneas e um raio (em vermelho) normal ao refletor em  $R$  emergindo na superfície no ponto  $X_0$ . Na parte superior desta figura nota-se, no domínio do tempo, duas superfícies: a primeira (em azul) representando as curvas de tempos de trânsito de reflexões primárias correspondentes ao segundo refletor, medidas na superfície (ao longo da linha sísmica) com geometria de afastamento fonte-receptor comum, e a segunda (em vermelho), representando a superfície de empilhamento construída para um ponto de amostragem  $P_0(t_0, x_0)$  na seção AN, correspondente a uma reflexão primária no ponto de

incidência normal  $R$  sobre o segundo refletor. O termo “superfície de empilhamento” significa que as amplitudes dos eventos sísmicos são somadas (ou empilhadas) ao longo desta superfície e o resultado do empilhamento é atribuído a cada ponto de amostragem  $P_0$ , simulando assim a seção de afastamento nulo.

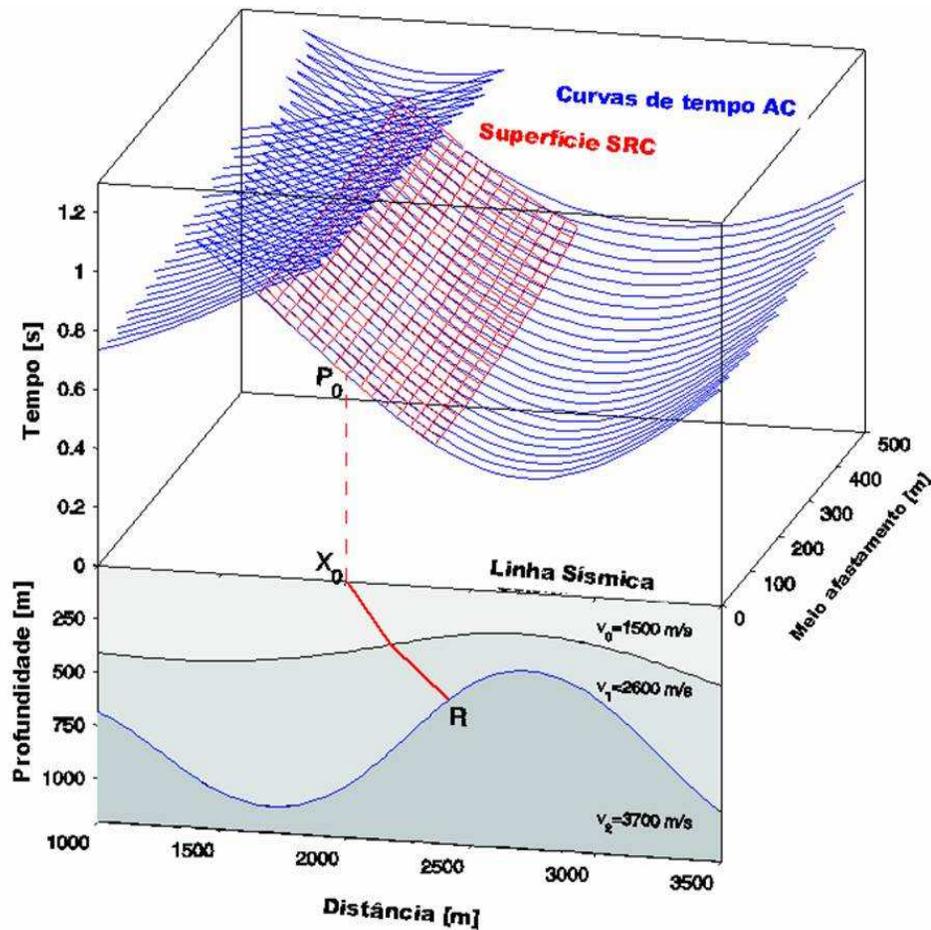


Figura 5.3 – Parte inferior: Modelo composto por três camadas homogêneas com um raio de afastamento nulo ou de incidência normal (em vermelho). Parte superior: Superfície de cobertura múltipla (curvas em azul) correspondente às reflexões da segunda interface. As curvas em vermelho definem a superfície de empilhamento SRC, correspondente ao ponto  $R$  de reflexão, GARABITO (2001).

A superfície SRC, também chamada “operador de empilhamento SRC” é uma aproximação da resposta cinemática de uma reflexão sobre uma interface curva no modelo heterogêneo (Figura 5.3). A superfície SRC é usada como uma trajetória de empilhamento do dado sísmico de múltipla cobertura e definida por meio dos três parâmetros  $(\beta_0, R_{PIN}, R_N)$ , então,

a melhor superfície SRC para um dado ponto de amostragem  $P_0$  na seção AN será aquela que melhor se ajusta aos dados de reflexões, e corresponderá, portanto, ao trio de parâmetros ótimos.

Estes parâmetros podem ser extraídos diretamente do dado de entrada por meio de processos de busca de múltiplos parâmetros (GARABITO et al., 2001; JÄGER, 1999; MÜLLER, 1999), que usam como função objeto uma certa medida de coerência. Desta forma, além das seções AN e dos atributos cinemáticos, o empilhamento SRC também fornece uma seção de coerência para cada amostra no tempo, a partir dos parâmetros de empilhamento otimizados.

#### 5.4 OPERADOR DE EMPILHAMENTO SDC

Nesta seção, será usado o formalismo do operador de empilhamento SRC para obter-se um novo operador que constitui uma aproximação do operador de migração Kirchhoff pré-empilhamento. Desde que as informações sobre a orientação angular do refletor no ponto de incidência normal, a posição do ponto de reflexão na subsuperfície e a curvatura podem ser fornecidas pelos três atributos cinemáticos, então, seguindo esta interpretação, se na expressão 5.1,  $R_N$  for substituído por  $R_{PIN}$ , significa que o raio de curvatura da onda hipotética N não fornece mais a informação da curvatura do refletor no ponto de incidência normal, e significando com isso que os atributos cinemáticos não estão vinculados de forma unívoca a um ponto de reflexão em subsuperfície. Aplicando esta condição, isto é,  $R_N = R_{PIN}$ , obtém-se a expressão:

$$t^2(x_m, h) = \left( t_0 + \frac{2\text{sen}\beta_0}{v_0}(x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{PIN}} ((x_m - x_0) + h^2), \quad (5.2)$$

resultando assim uma expressão que depende da dupla de parâmetros cinemáticos ( $\beta_0$ ,  $R_{PIN}$ ) associados à onda hipotética PIN. Devido ao fato de que  $\beta_0$  e  $R_{PIN}$  fornecem informações sobre a posição de um ponto na subsuperfície, os tempos de trânsito calculados por (5.2) podem ser interpretados como aproximações dos tempos de trânsito de uma difração; em outras palavras, a expressão (5.2) é uma aproximação na vizinhança do raio central do operador de migração pré-empilhamento. Por outro lado, como mostrado na parte superior da Figura 5.4, mesmo dependendo apenas de dois atributos cinemáticos, a superfície de empilhamento (curvas de cor verde) definida pela expressão 5.2 também é uma aproximação dos tempos de trânsito

associados à reflexão em  $R$ . A superfície de empilhamento descrita pela expressão (5.2) é conhecida como operador de empilhamento SDC (superfície de difração comum), Garabito (2001).

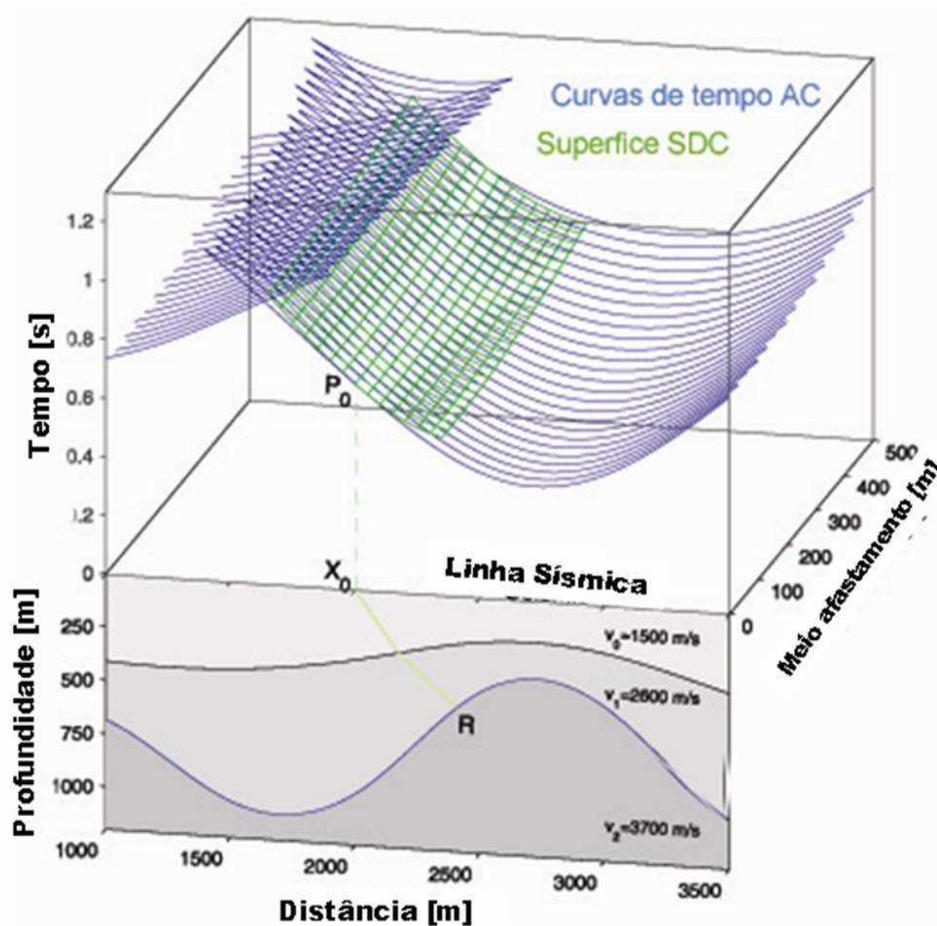


Figura 5.4 – Parte inferior: Modelo composto por três camadas homogêneas e um raio de afastamento nulo ou de incidência normal (em verde). Parte superior: Superfície de cobertura múltipla (curvas em azul) correspondente às reflexões da segunda interface. As curvas em verde definem a superfície de empilhamento SDC, correspondente ao ponto  $R$  de reflexão (supostamente um difrator), (GARABITO, 2001).

É importante mencionar que a expressão do operador de empilhamento SRC pode ser particularizada para as mais variadas configurações de fontes e receptores usadas com maior frequência no processamento sísmico convencional; entretanto, neste trabalho são consideradas apenas as configurações afastamento comum (AC) e afastamento nulo (AN). Desta forma, o operador SRC, descrito pela equação 5.1, pode ser particularizado, impondo-se a condição  $h = 0$ , para a configuração de afastamento nulo, descrevendo assim uma aproximação hiperbólica dos tempos de trânsito de reflexões normais, e assume a forma:

$$t^2(x_m) = \left( t_0 + \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} (x_m - x_0)^2. \quad (5.3)$$

Para uma ilustração deste novo operador de empilhamento, a Figura 5.5 (parte superior) mostra a curva de empilhamento (em vermelho) calculada pela expressão (5.3) para o ponto de amostragem  $P_0$  na seção AN, correspondente à reflexão primária no ponto em profundidade  $R$ . Em azul, vê-se a curva representando os tempos de trânsito AN das reflexões primárias normais do segundo refletor (parte inferior da mesma figura).

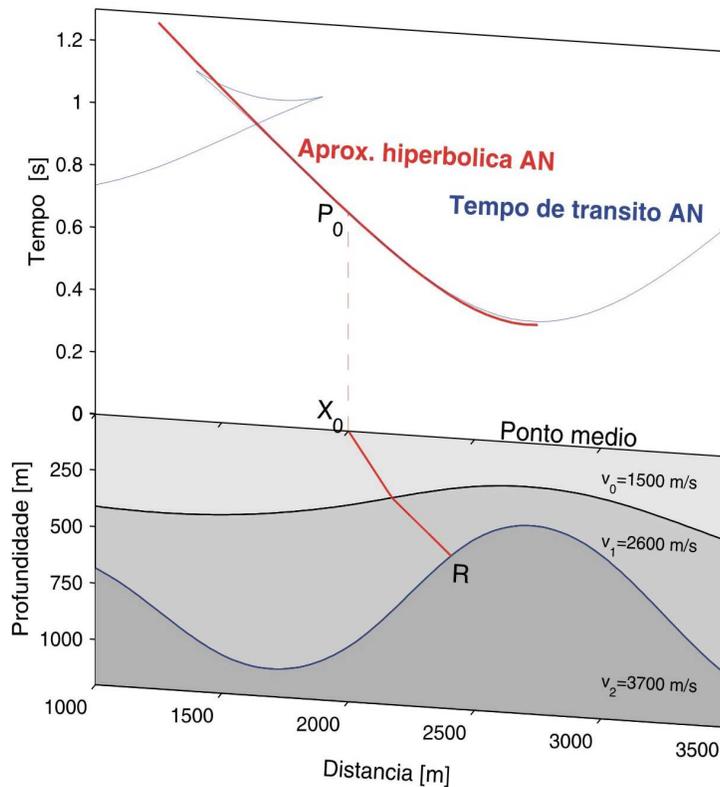


Figura 5.5 – Parte inferior: Modelo composto por três camadas homogêneas e um raio de afastamento nulo (em vermelho). Parte superior: A curva (em azul) corresponde aos tempos de trânsito AN das reflexões normais da segunda interface. A curva (em vermelho), chamada curva de empilhamento, corresponde ao ponto de reflexão  $R$ , e é calculada pela expressão 5.3 (GARABITO, 2001).

## 5.5 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO DE EMPILHAMENTO SRC

O empilhamento por superfície de reflexão comum consiste, como o próprio nome sugere, em uma soma (ou empilhamento) de amplitudes dos eventos sísmicos dos dados de cobertura múltipla ao longo de um operador de empilhamento (expressão 5.1), definido a partir da tripla  $(\beta_0, R_{PIN}, R_N)$  de parâmetros cinemáticos, construído para cada ponto de amostragem  $P_0$   $(t_0, x_0)$  em uma seção simulada AN.

Os três parâmetros de empilhamento podem ser determinados simultaneamente, a partir dos dados de cobertura múltipla, por meio de processos de busca global (ou otimização global) multidimensional, usando como função-objeto uma medida de coerência (*semblance*) do sinal sísmico, a qual é descrita na seção seguinte. Portanto, o problema de otimização do empilhamento SRC consiste na estimativa dos parâmetros ótimos, ou seja, aqueles que maximizam (ou minimizam) o *semblance*. O intervalo matemático definido para os parâmetros são  $-\pi/2 < \beta_0 < +\pi/2$  e  $-\infty < R_{PIN}, R_N < +\infty$ .

Desta forma, uma vez determinados os parâmetros ótimos, um ponto imagem  $P_0$  da seção AN é produzido pelo empilhamento dos eventos sísmicos contidos no operador SRC definido pelo trio de parâmetros que produzem o maior valor de coerência. A seção simulada AN é obtida pela repetição deste procedimento para cada um dos pontos imagem desta seção.

Outras estratégias de otimização para estimar estes parâmetros podem ser encontradas na literatura, por exemplo, Birgin et al. (1999), Garabito et al. (2001), Müller (1999). Neste trabalho, os parâmetros são estimados usando a estratégia dada por Garabito et al. (2001), que utiliza as equações (5.1), (5.2) e (5.3).

### 5.5.1 A medida de coerência “*Semblance*”

Em sismica, uma função de coerência usada extensamente é o *semblance* (NEIDELL; TANER, 1971). O *semblance* é uma medida de coerência econômica, a qual produz, de acordo com Mauch (1999), melhores resultados visualmente interpretados, além de melhorar (ou aumentar) as reflexões de coerências fracas comparados a outras medidas de coerência padrão. O coeficiente de *semblance* é usado nos algoritmos de otimização global e local para avaliar a qualidade dos parâmetros do operador SRC testados. A partir dos dados sísmicos de cobertura

múltipla, o coeficiente de *semblance* é utilizado para a otimização dos três parâmetros ( $\beta_0$ ,  $R_{PIN}$ ,  $R_N$ ). O *semblance* representa uma medida da razão entre a energia do sinal depois da somatória (ou empilhamento) dos traços e a energia acumulada de todos os traços envolvidos na somatória, cujo coeficiente pode ser expresso por:

$$S_e = \frac{\sum_t \left( \sum_{i=1}^M U_{i,t(i)} \right)^2}{M \sum_t \sum_{i=1}^M U_{i,t(i)}^2}, \quad (5.4)$$

em que  $U_{i,t(i)}$  representa a amplitude do sinal sísmico indexado pelo número de traços sísmicos,  $i = 1, \dots, M$ , e a trajetória de empilhamento,  $t(i)$ . O sobrescrito  $M$  indica o número de traços e  $\sum_t$  significa que o empilhamento é realizado numa janela temporal definida em relação à trajetória de empilhamento central. Na expressão 5.4, a trajetória de empilhamento refere-se à superfície de empilhamento definida pela fórmula hiperbólica dos tempos de trânsito dependente dos parâmetros ( $\beta_0$ ,  $R_{PIN}$ ,  $R_N$ ).

O *semblance* é uma medida de coerência normalizada com valores extremos entre 0 e 1, podendo atingir um valor próximo à unidade somente quando todos os valores do sinal sísmico são idênticos. O algoritmo de empilhamento descrito aqui considera o problema de minimização, onde é usado o valor de coerência negativo.

A seguir são descritos os três passos que compreendem este algoritmo de empilhamento SRC (GARABITO, 2001). Nos primeiro e segundo passos, é aplicado o método de otimização *Simulated Annealing* (SA) (SEN; STOFFA, 1995) enquanto que no terceiro passo é aplicado o método *quase-Newton* (QN), (BARD, 1974; GILL et al., 1981), também chamado de *Variable Metric*. Cada passo é executado para um dado ponto de amostragem (ou ponto imagem)  $P_0(t_0, x_0)$  na seção simulada de afastamento nulo.

- **Primeiro passo: Otimização global bidimensional**

Neste primeiro passo, o dado de entrada é o conjunto de dados de cobertura múltipla. O problema inverso consiste em, para cada ponto imagem  $P_0$  da seção AN a ser simulada, estimar simultaneamente um ou dois vetores dos parâmetros ( $\beta_0$ ,  $R_{PIN}$ ), por meio da aplicação do método

de otimização *Simulated Annealing* para uma busca bidimensional nos dados de cobertura múltipla. Esta dupla de parâmetros fornece o valor de *semblance* máximo de acordo com a equação 5.2, que é usada para calcular as superfícies de empilhamento.

Como resultado deste primeiro passo tem-se: a dupla de parâmetros correspondentes ao mínimo global e uma dupla de parâmetros correspondentes ao mínimo local para todos os pontos de amostragem da seção AN, bem como as seções de coerência e simulada AN.

- **Segundo passo: Otimização global unidimensional**

Neste segundo passo, o dado de entrada é a seção sísmica pós-empilhada simulada no primeiro passo. O problema inverso agora consiste em estimar um terceiro parâmetro  $R_N$  a partir do parâmetro  $\beta_0$  estimado anteriormente, usando para isto o algoritmo de otimização “*Simulated Annealing*”. Este novo parâmetro estimado  $R_N$ , obtido através de uma busca global unidimensional na seção AN, é tal que deve fornecer o máximo valor de *semblance* de acordo com a equação 5.3, dependente apenas dos parâmetros  $(\beta_0, R_N)$ . Neste passo, são determinados os valores de  $R_N$  associados tanto aos mínimos globais como também para todos os mínimos locais detectados no primeiro passo, ou seja, nos pontos de amostragem da seção AN.

Como resultados deste segundo passo tem-se: duas seções de coerências e duas seções dos raios de curvaturas das ondas N. Também neste passo são obtidas duas seções para cada resultado; isto é, uma seção para os mínimos globais e outra para os mínimos locais detectados

- **Terceiro passo: Otimização local tridimensional**

Neste terceiro passo, o dado de entrada é o dado sísmico pré-empilhado. O problema inverso agora consiste em estimar o trio de parâmetros ótimos  $(\beta_0, R_{PIN}, R_N)$  que fornecem o máximo valor de *semblance*, usando para isto o algoritmo de otimização “*Variable Metric*”. Como soluções iniciais para uma busca local tridimensional nos dados de cobertura múltipla, foram usados os trios de parâmetros (para mínimos global e local) determinados nas etapas anteriores. Neste terceiro passo, a função-objeto (*semblance*) usa a fórmula geral 5.1 para calcular os operadores de empilhamento SRC testados. O trio de parâmetros ótimos, resultante deste terceiro passo, produz a seção final simulada de afastamento nulo AN.

Como resultado final tem-se: uma seção simulada de afastamento nulo AN, uma seção de máxima coerência, e seções para a tripla de parâmetros ótimos  $(\beta_0, R_{PIN}, R_N)$ . A Figura 5.6 mostra, através de um fluxograma, todo o procedimento usado neste algoritmo de empilhamento SRC, para um melhor entendimento e fixação das etapas que compõe o mesmo.

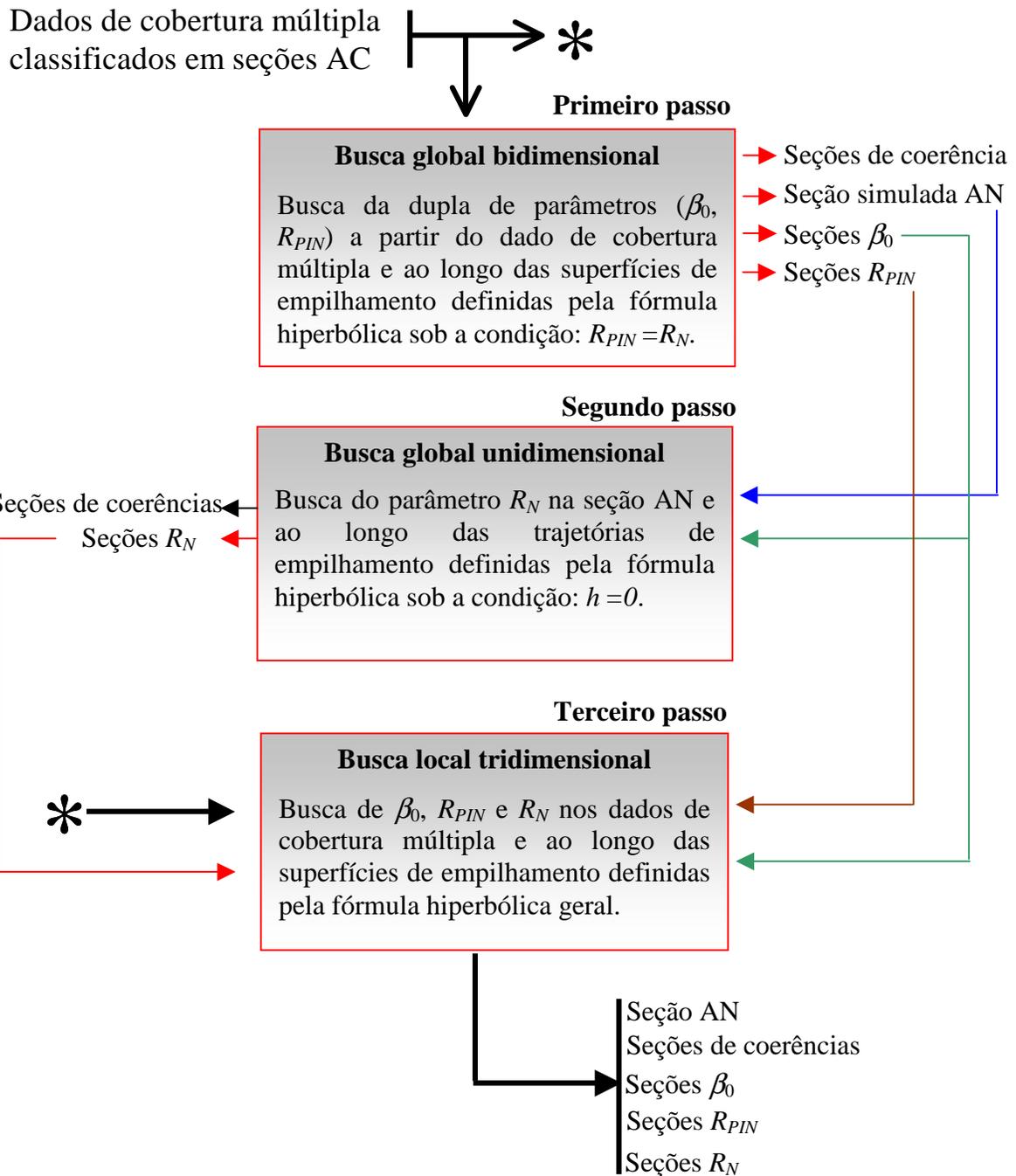


Figura 5.6 – Fluxograma do processo de empilhamento SRC. Como resultados finais obtêm-se uma seção AN, duas seções de coerências e duas seções para cada um dos três parâmetros, sendo uma seção para os mínimos globais e outra para os mínimos locais (GARABITO, 2001).

## 6 – O MÉTODO CRS-PSDM

Este capítulo constitui o capítulo principal da tese no qual é apresentada uma nova estratégia de determinação da imagem de refletores sísmicos em profundidade, sendo vista como uma nova alternativa ao imageamento sísmico de refletores, que usa os resultados obtidos pelo método de empilhamento SRC.

Inicialmente, relembrem-se os operados SRC e SDC, vistos no capítulo anterior, que serão utilizados como uma boa aproximação do operador convencional de migração Kirchhoff para a construção da curva de empilhamento sobre a qual serão somadas as amplitudes do dado sísmico de múltipla cobertura resultando em uma imagem da subsuperfície. Em seguida são apresentados os aspectos teóricos da integral de Kirchhoff com o método SRC onde é apresentada a integral de migração Kirchhoff adaptada ao método SRC. O próximo passo consiste na descrição do algoritmo do método proposto, sendo ilustrado em seguida todo o processo através de um fluxograma para melhor compreensão do mesmo. Finalmente é apresentado um procedimento usado para delimitar a abertura de migração do dado sísmico.

### 6.1 INTRODUÇÃO

O método tradicional de migração Kirchhoff tem sido visto pelas grandes empresas de petróleo como uma eficiente ferramenta no imageamento sísmico para a obtenção de uma imagem de boa resolução de subsuperfície. Este método convencional é baseado na construção de curvas (ou superfícies em 3D) de empilhamento sobre as quais somam-se as amplitudes do dado sísmico. A determinação destas curvas ou superfícies depende dos tempos de trânsito correspondentes aos raios que ligam cada ponto de uma malha em profundidade, denominada malha de migração, aos pares de fonte e receptor distribuídos em superfície. Desta forma, verifica-se uma grande dependência deste método ao modelo de velocidade, que constitui um dos pontos críticos da migração Kirchhoff em profundidade. Diante desta dificuldade, é apresentada uma estratégia de migração em profundidade pré-empilhamento que deve ser vista como uma nova alternativa ao método convencional Kirchhoff. Esta nova estratégia é denominada de método CRS-PSDM do inglês “CRS based pre-stack depth migration” que utiliza os atributos sísmicos resultantes do empilhamento SRC para a construção dos operadores SRC e

SDC (vistos no capítulo anterior) que servirão como trajetórias de empilhamento das amplitudes sísmicas do dado de múltipla cobertura. Estes operadores permitem a obtenção de uma boa aproximação do operador convencional de migração Kirchhoff, que contrariamente a este último, não dependem do modelo de velocidade. Entretanto, este novo método requer a utilização do modelo de velocidade apenas para computar os tempos de trânsito na configuração afastamento nulo. Em outras palavras, o método CRS-PSDM permite que se faça uma migração pré-empilhamento com o mesmo procedimento usado na migração pós-empilhamento, além de apresentar uma dependência menor ao modelo de velocidade.

## 6.2 CURVAS DE EMPILHAMENTO DOS OPERADORES KIRCHHOFF E SRC

Foram vistas, em capítulos anteriores, as curvas (superfícies em 3D) de empilhamento sobre as quais as amplitudes do dado sísmico devem ser somadas. Primeiro, foi apresentada, no capítulo 4, a curva de empilhamento (equação 4.3) para a migração convencional tipo Kirchhoff e no capítulo 5 a superfície de empilhamento SRC (equação 5.1) simulando os tempos de reflexão, na configuração AC, para um dado ponto em profundidade. A equação 5.1 pode ser usada para simular eventos de tempos aproximados de difração na configuração AC, tendo para isso que considerar  $R_N = R_{PIN}$  nesta equação, para o caso de um ponto difrator em subsuperfície (equação 5.2). De modo análogo, agora para a configuração AN, obtém-se, a partir das equações 5.1 e 5.2, e estabelecendo a condição  $h = 0$ , as equações 6.4 e 6.5 que simulam, respectivamente, os tempos de trânsito de reflexão e difração, sendo este último obtido pela condição  $R_N = R_{PIN}$ .

$$\tau_D(\zeta, M) = \tau(S, M) + \tau(M, G). \quad (6.1)$$

$$t^2(x_m, h) = \left( t_0 + \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} \left( \frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{PIN}} \right). \quad (6.2)$$

$$t^2(x_m, h) = \left( t_0 + \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{PIN}} \left( (x_m - x_0)^2 + h^2 \right). \quad (6.3)$$

$$t^2(x_m) = \left( t_0 + \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} (x_m - x_0)^2. \quad (6.4)$$

$$t^2(x_m) = \left( t_0 + \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{PIN}} (x_m - x_0)^2. \quad (6.5)$$

Pode-se ver que a curva de empilhamento construída para um dado ponto em profundidade a partir da equação 6.1 requer o cálculo dos tempos de trânsito ao longo de dois raios ligando o ponto considerado a um dado par  $(S, G)$  de fonte  $S$  e geofone  $G$  na superfície, sendo este procedimento feito para todos os pares distribuídos na superfície, enquanto que a curva ou superfície de empilhamento construída a partir do operador SRC requer apenas o cálculo dos tempos de trânsito ao longo de um único raio considerado normal a um dado ponto em profundidade. Uma consequência deste fato está no alto custo computacional na migração pré-empilhamento utilizando o operador de Kirchhoff. Neste trabalho, o operador SRC é usado como uma aproximação do operador convencional Kirchhoff para fazer a migração pré-empilhamento.

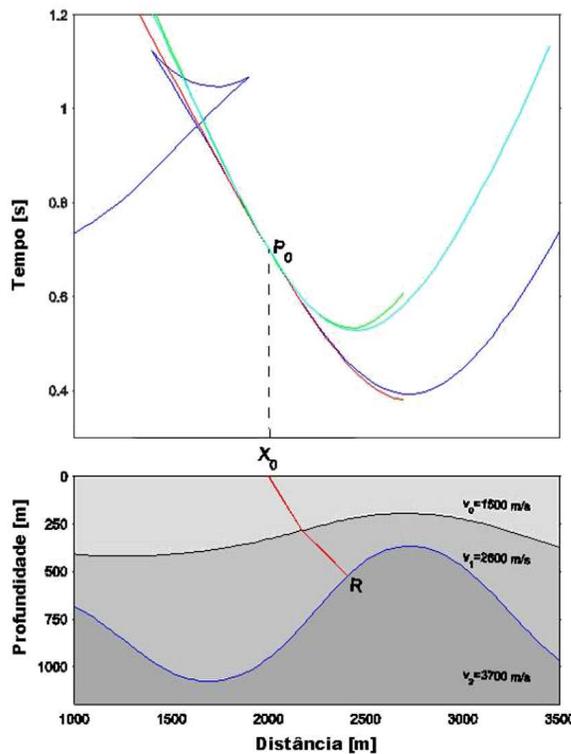


Figura 6.1 – Modelo de três camadas homogêneas separadas por interfaces curvas. A linha vermelha entre os pontos  $X_0$  e  $R$  representa um raio normal com afastamento fonte - receptor nulo. Acima temos: as curvas azul escuro e claro, representando, respectivamente, as curvas exatas de tempos de reflexão e difração, para a configuração afastamento nulo, e as curvas vermelha e verde, representando, respectivamente, as curvas aproximadas de reflexão e difração, Garabito (2006).

Considerando-se o modelo simples de três camadas homogêneas apresentado no capítulo 5 (Figura 5.3), as curvas de empilhamento para os operadores Kirchhoff e SRC podem ser bem ilustradas através da Figura 6.1. A linha vermelha, entre os pontos  $X_0$  e  $R$ , representa um raio normal com afastamento fonte receptor nulo. Na parte superior desta figura, vemos a curva de cor azul escuro, representando os tempos de trânsito de reflexão primária na configuração AN para a segunda interface e a curva de cor azul claro, correspondendo à resposta da difração do ponto  $R$ , considerado um difrator, sendo ambas as curvas exatas e calculadas com a equação (6.1). Para as aproximações às curvas exatas, tem-se a curva de cor vermelha e verde, representando, respectivamente, os tempos de reflexão e difração, ambos obtidos a partir das equações (6.4) e (6.5), sendo que esta última equação, constitui numa boa aproximação do operador de empilhamento de difração para a migração Kirchhoff pós-empilhamento.

Neste trabalho é feita a migração pré-empilhamento do dado de cobertura múltipla usando os operadores SRC e SDC (vistos no capítulo anterior) para a construção das curvas aproximadas de empilhamento de reflexão e difração obtidas respectivamente pelas equações (6.2) e (6.3). Para a migração pós-empilhamento, são utilizadas as equações (6.4) e (6.5). Diante desta boa aproximação do operador de migração Kirchhoff, são apresentados, na próxima seção, os aspectos teóricos da migração tipo Kirchhoff utilizando o operador do empilhamento SRC, isto é, o método CRS-PSDM.

### 6.3 ASPECTOS TEÓRICOS DA INTEGRAL DE KIRCHHOFF COM O MÉTODO SRC

Nesta seção, são apresentados os aspectos teóricos que relacionam a integral de migração tipo Kirchhoff convencional com o método de empilhamento SRC, resultando assim em uma integral de migração Kirchhoff adaptada ao operador de empilhamento SRC, aqui descrito como método CRS-PSDM. Primeiramente, lembrando a integral de migração de Kirchhoff (4.10), vista no capítulo 4, em sua forma discretizada, tem-se:

$$V_F(M, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{\xi} \Delta\xi W(\xi, M) U_F(\xi, t + \tau_D(\xi, M)), \quad (6.6)$$

sendo  $U_F$  o dado sísmico (sismograma) filtrado. Pode-se ver claramente que a curva de empilhamento  $\tau_D$ , expressão (6.1), depende estritamente do modelo de velocidade de migração, pois necessita dos tempos de trânsito ao longo de dois raios conectando uma fonte  $S$  a um dado ponto  $M$  em profundidade, e este a um geofone  $G$ , considerando-se o par  $(S, G)$  em superfície. Desta forma, diante de imprecisões muito freqüentes em modelos de velocidade, o erro cometido na migração Kirchhoff convencional, usando a expressão (6.6), será considerável, e tanto maior quanto maior for a complexidade geológica do meio comprometendo assim a resolução da imagem migrada de subsuperfície. Diante disto, visando agora minimizar este erro, a curva de empilhamento convencional  $\tau_D$  é substituída pela superfície de empilhamento SRC, expressão (6.2), agora com uma dependência bem menor do modelo de velocidade, pois necessita do cálculo apenas dos tempos de trânsito ao longo de uma única trajetória de um raio considerado normal a um dado ponto do refletor em profundidade. A integral de migração Kirchhoff convencional, adaptada agora ao método SRC, pela substituição das trajetórias de empilhamento, assumi a forma seguinte:

$$V_F(M, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{\xi} \Delta_{\xi} W(\xi, M) U_F(\xi, t + \tau_{SRC}). \quad (6.7)$$

O fato da curva de empilhamento (6.1) poder ser substituída pela superfície de empilhamento (6.2) na expressão (6.7), mostra que esta expressão permite que, na migração pré-empilhamento, as amplitudes das seções AC, que compõem o conjunto de dados de múltipla cobertura, possam ser empilhadas em um único procedimento, diferentemente da migração pré-empilhamento, realizada segundo a expressão (6.1), onde cada seção AC do conjunto de dados é migrada individualmente e só então empilhadas as seções migradas resultantes. Em outras palavras, a expressão (6.7) permite que se faça uma migração pré-empilhamento de múltiplas seções AC usando o mesmo procedimento para a migração pós-empilhamento, isto é, levando-se em consideração, apenas as posições de fontes e geofones, coincidentes em superfície, para a computação dos tempos de trânsito.

Na expressão acima, a superfície de empilhamento  $\tau_{SRC}$  pode ser substituída por qualquer uma das quatro expressões acima mencionadas, isto é, (6.2), (6.3), (6.4) e (6.5), conforme se

queira fazer a migração pré ou pós empilhamento e simulando eventos de tempos de reflexão ou difração.

Um aspecto importante do método CRS-PSDM que deve ser levado em consideração é com respeito às curvas de empilhamento aproximadas  $\tau_{SRC}$ , obtidas pelo operador SRC, expressão (6.2). Pode-se notar claramente, através da Figura (6.1), que a curva aproximada, simulando eventos de reflexão, expressão (6.4) (em vermelho) possui um maior intervalo de coincidência com a curva exata (em azul escuro), representando o dado sísmico, quando comparada à curva aproximada, simulando eventos de difração, expressão (6.5) (em verde). Uma consequência disto é que, na migração puramente cinemática, isto é, não levando em consideração o aspecto dinâmico, no qual se deseja preservar a amplitude verdadeira, o resultado obtido da imagem migrada em profundidade deve apresentar uma melhor resolução, com respeito à continuidade dos refletores, com relação à imagem obtida pela simulação de eventos de difração, principalmente quando o dado sísmico contém ruído. Entretanto, levando em consideração o aspecto dinâmico, para a migração preservando a amplitude do sinal, a superfície de empilhamento  $\tau_{SRC}$  deve ser substituída pela expressão (6.3), a qual simula eventos de difração, e é usada como uma boa aproximação do operador de empilhamento Kirchhoff convencional, expressão (6.1). Neste trabalho, apenas o aspecto cinemático da migração Kirchhoff em profundidade é tratado, não sendo de interesse a preservação da amplitude do sinal.

Um outro aspecto importante que deve ser analisado no método de migração CRS-PSDM é com relação aos eventos múltiplos, isto é, às múltiplas chegadas de tempos, que são computados pelo método da construção de frentes de onda (CFO) visto no capítulo 3. O método de empilhamento SRC pressupõe que os eventos de tempos são constituídos apenas por reflexões primárias, sendo desta forma que todos os tipos de ondas (difrações, múltiplas, etc) e ainda, as chegadas posteriores, são tratadas como reflexões primárias no processo de empilhamento pelo método CRS-PSDM, não havendo, portanto, nenhuma contradição entre as metodologias CFO e SRC. A seguir, é apresentado o algoritmo que descreve todos os passos realizados na migração em profundidade pelo método CRS-PSDM.

## 6.4 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO

Nesta seção, é apresentado o algoritmo do método CRS-PSDM que explica esta nova estratégia para fazer a migração em profundidade pré-empilhamento de um conjunto de dados de múltipla cobertura usando os operadores derivados do operador SRC (equação 6.2).

Como dado de entrada para o algoritmo CRS-PSDM tem-se o dado sísmico de múltipla cobertura, isto é, formado por seções afastamento comum, e como informações necessárias “a priori”, têm-se o modelo de velocidade de migração juntamente com as seções dos parâmetros (ou atributos sísmicos) do ângulo de emergência  $\beta_0$  e dos raios  $R_{PIN}$  e  $R_N$ , derivados do método SRC (visto no capítulo 5). Abaixo são apresentados os três passos que compõem o algoritmo do método CRS-PSDM:

1) Primeiramente, é necessário que se defina em profundidade uma malha regular, denominada malha de migração (ou ainda, zona alvo de migração), onde se pressupõem estarem os refletores sísmicos alvos de interesse. Uma das grandes vantagens do método de construção de frentes de onda (CFO), visto no capítulo 3, é que este método permite que a malha regular definida em profundidade, usada para o cálculo dos tempos de trânsito (ou ainda de amplitudes), seja a mesma malha regular usada para a migração em profundidade, evitando portanto, que nenhuma interpolação seja necessária entre os pontos de ambas as malhas.

Desta forma, a partir do modelo de velocidade de migração, fornecido “a priori”, computam-se todos os tempos de trânsito  $t_0^*$ , utilizando o programa que propaga os raios e frentes de onda (PORTUGAL, 2002) descrito no capítulo 3, para todos os pontos  $M$  da malha regular (malha de migração) definida previamente em profundidade, fazendo, para isto, a fonte assumir a posição de cada ponto  $X_0$  localizado na linha sísmica, onde  $X_0$  representa as posições de fonte e receptor coincidentes e definindo assim um mapa de tempos de trânsito afastamento nulo (Figura 6.2 (parte inferior)).

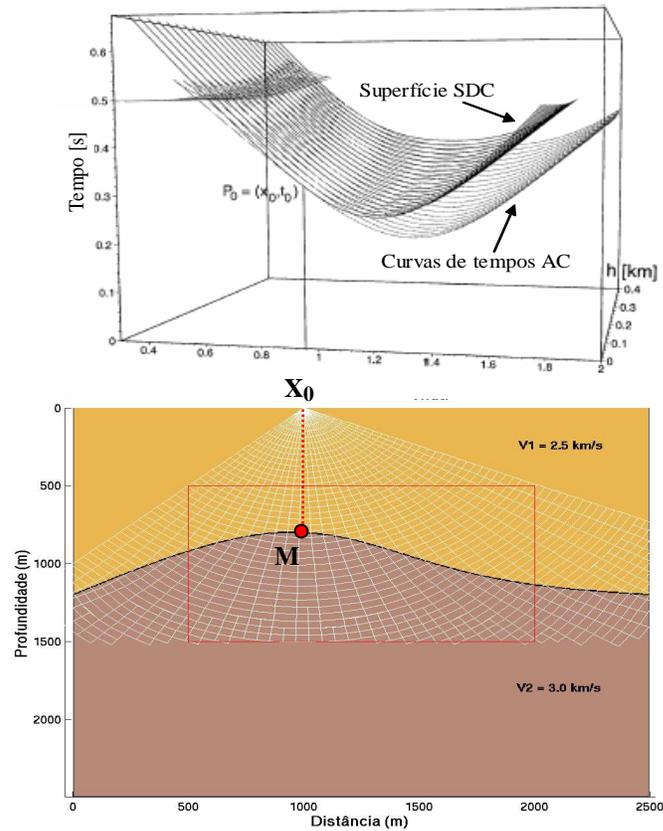


Figura 6.2 – Construção do mapa de tempos de trânsito e operador SDC. Parte inferior: modelo simples com duas camadas homogêneas separadas por uma interface curva. O mapa de tempos é computado e armazenado na zona alvo de migração (retângulo de cor vermelha). A linha vermelha entre os pontos  $X_0$  e  $M$  representa um raio normal AN. Parte superior: operador SDC construído a partir da tríplice  $(\beta_0, R_{PIN}, R_N)$  de parâmetros fornecidos pelo empilhamento SRC.

- 2) Em seguida, para cada ponto  $M$  da malha regular em profundidade e a partir do tempo  $t_0^*$  computado no passo anterior, considerando-se uma dada posição  $X_0$  na superfície, determina-se um ponto de amostragem  $(x_0, t_0)$  correspondente, na seção afastamento nulo, ou seja, o tempo  $t_0$  que seja igual, ou aproximadamente igual, ao ponto calculado  $t_0^*$  e extrai-se o trio de parâmetros  $(\beta_0, R_{PIN}, R_N)$  correspondentes.
- 3) Finalmente, obtidos os parâmetros  $\beta_0, R_{PIN}$  e  $R_N$  e o tempo  $t_0$ , constrói-se o operador de empilhamento SRC e SDC ao longo do qual as amplitudes dos eventos sísmicos de reflexão são somadas e o resultado da soma é atribuído ao ponto  $M$  da malha de migração. A Figura 6.2 (parte superior) mostra o operador SDC construído a partir dos parâmetros fornecidos. O somatório das

amplitudes é realizado segundo a expressão (6.7), sendo que é atribuído o valor unitário à função peso, ou seja,  $W(\xi, M) = 1$  na expressão (6.7), resultando em uma migração cinemática do dado sísmico.

Um aspecto importante que deve ser observado é que enquanto no método de migração convencional Kirchhoff, a curva de empilhamento, expressão (6.1) é construída baseada nos tempos de trânsito de difração calculados para cada ponto  $M$  de uma malha definida em profundidade, o operador de empilhamento SDC é construído baseado nos tempos de trânsito, considerando-se fonte e receptor coincidentes, calculados para todos os pontos  $M$  da malha. Em outras palavras, o operador SDC para cada ponto  $M$  é calculado computando-se o tempo de trânsito ao longo da trajetória de um único raio apenas, ligando o ponto  $M$  ao ponto  $X_0$  (posição de fonte-receptor coincidentes) na superfície.

Na Figura 6.2, assume-se por hipótese que o ponto  $M$  é um ponto do refletor desconhecido. Tendo em vista que o método SRC é baseado em uma aproximação paraxial de tempos de trânsito de reflexão normal, o método CRS-PSDM, aqui apresentado, deve considerar que os tempos de trânsito computados correspondam às trajetórias de raios supostamente normais a pontos candidatos a pontos refletores. Desta forma, verifica-se que após a fonte assumir todas as posições  $X_0$  na superfície e computados todos os tempos de trânsito  $t_0^*$  para o ponto  $M$  considerado, apenas um valor de tempo de trânsito  $t_0^*$  será equivalente à trajetória do raio normal (linha de cor vermelha) conectando este ponto  $M$  à posição assumida por  $X_0$ . Neste caso, o operador SDC construído para esta posição considerada se ajustará melhor ao conjunto de dados de múltipla cobertura comparado aos outros operadores SDC, construídos para outras posições de  $X_0$ , que nesses casos não corresponderiam às trajetórias de raios normais. Neste caso, diz-se que este operador, que se ajusta melhor aos dados, define uma superfície ótima de empilhamento. Uma consequência disto é que o valor resultante do somatório das amplitudes empilhadas ao longo da superfície ótima será significativo para o ponto  $M$ . Este experimento realizado para todos os pontos  $M$  da malha alvo de migração e considerando-se todas as posições  $X_0$  de fontes em superfícies reproduz a imagem dos refletores em decorrência do alto contraste das amplitudes empilhadas. Todo este procedimento, a partir dos dados de entrada até a obtenção da imagem migrada em profundidade, é ilustrado no fluxograma a seguir.

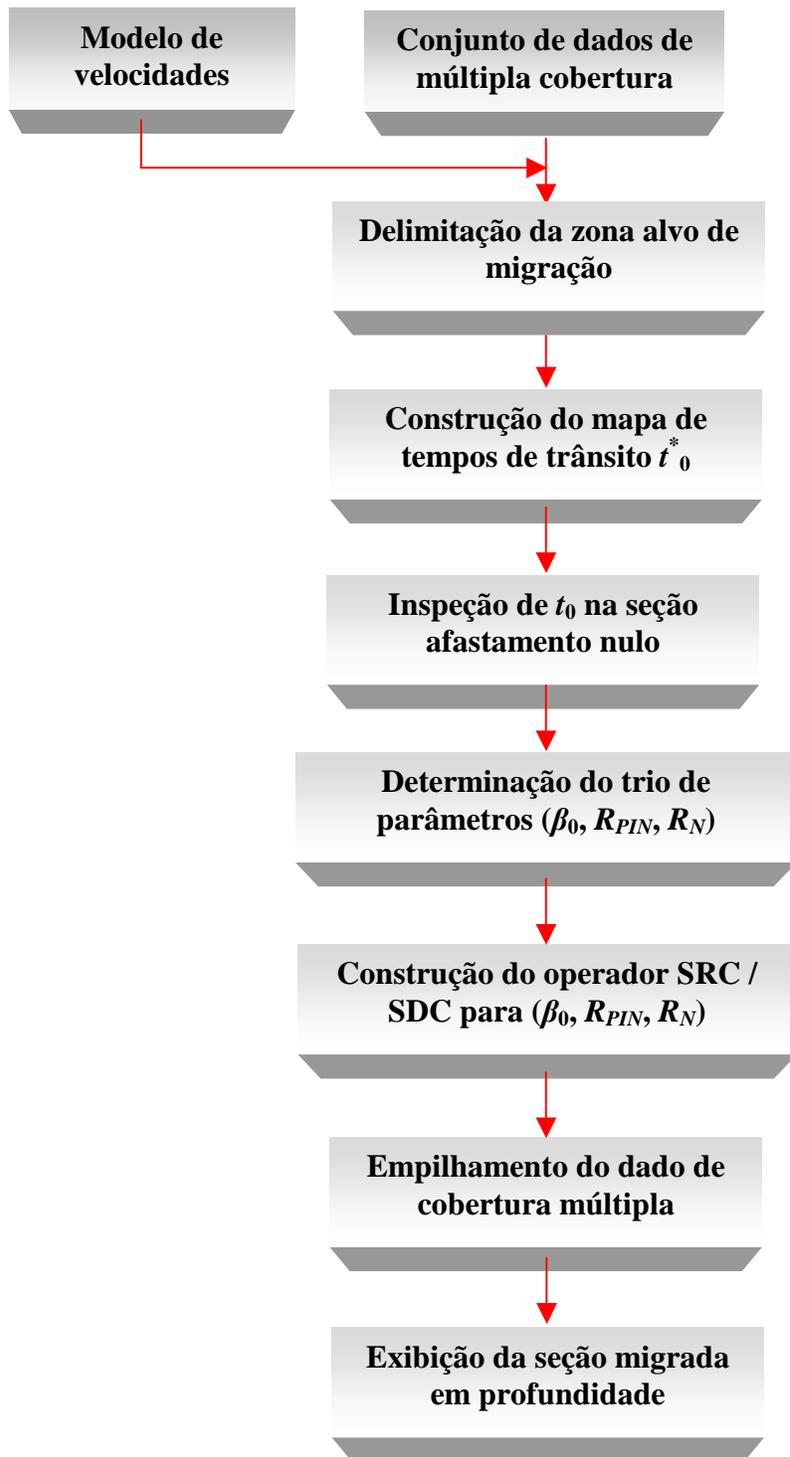


Figura 6.3 – Fluxograma ilustrando todos os passos do algoritmo do método CRS-PSDM

## 6.5 LIMITAÇÃO DA ABERTURA DE MIGRAÇÃO

Nesta seção chama-se a atenção do leitor quanto ao aspecto importante relacionado ao tamanho da abertura mínima usada no procedimento de migração Kirchhoff. A tão conhecida zona de Fresnel constitui-se em uma ferramenta importante para o imageamento sísmico de refletores, melhorando a resolução lateral das imagens migradas em profundidade. Estudos têm mostrado que a qualidade da imagem não melhora se o tamanho da abertura mínima, que determina os limites da integral de migração de Kirchhoff, é maior do que a zona de Fresnel (SCHLEICHER et. al, 1997; SUN, 1998; VIETH, 2001). Neste trabalho, não é implementada a zona de Fresnel, sendo esta importante tarefa deixada como uma das perspectivas deste trabalho, porém é usado um procedimento “empírico” para limitar a abertura de migração, permitindo assim que o empilhamento das amplitudes envolva um número limitado de traços sísmicos. Para descrever este procedimento simples, considera-se o modelo já conhecido da Figura 6.1.

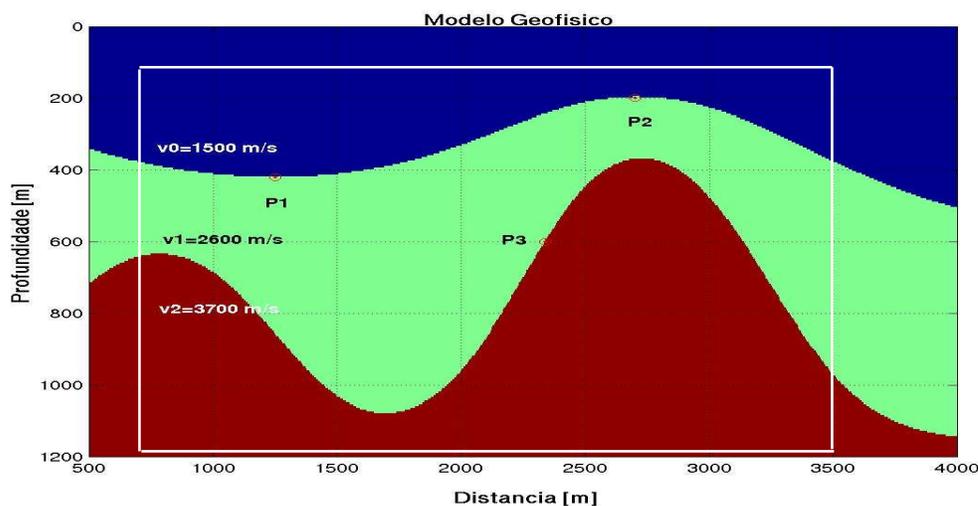


Figura 6.4 – Modelo simples composto por três camadas homogêneas separadas por interfaces curvas e suaves.

Neste modelo, estão representados três pontos  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  que repousam sobre os refletores curvos. Desta forma, na hipótese destes pontos serem pontos de reflexão, então, determinado o trio de parâmetros  $(\beta_0, R_{PIN}, R_N)$  fornecidos pelo empilhamento SRC, e sendo estes parâmetros ótimos, ter-se-á que a curva (ou superfície) de empilhamento construída para estes pontos se ajustará melhor sobre a superfície dos tempos de trânsito de reflexão correspondente ao dado de múltipla cobertura. Sendo  $P_0(x_0, t_0)$  um ponto de amostragem na

seção AN, no qual as amplitudes do dado sísmico são somadas e atribuídas, este ponto deve pertencer a uma região de tangência entre as curvas aproximadas e exatas (Figura 6.1). Desta forma, é definido um intervalo para o empilhamento do dado de múltipla cobertura, tendo como ponto central o ponto  $X_0$ . Em termos matemáticos, este intervalo é expresso por:

$$|x_m - x_0| \leq k, \quad (6.5)$$

sendo  $k$  um valor estabelecido pelo usuário. A figura 6.5 ilustra as curvas de empilhamento total e restrita a um dado intervalo predefinido.

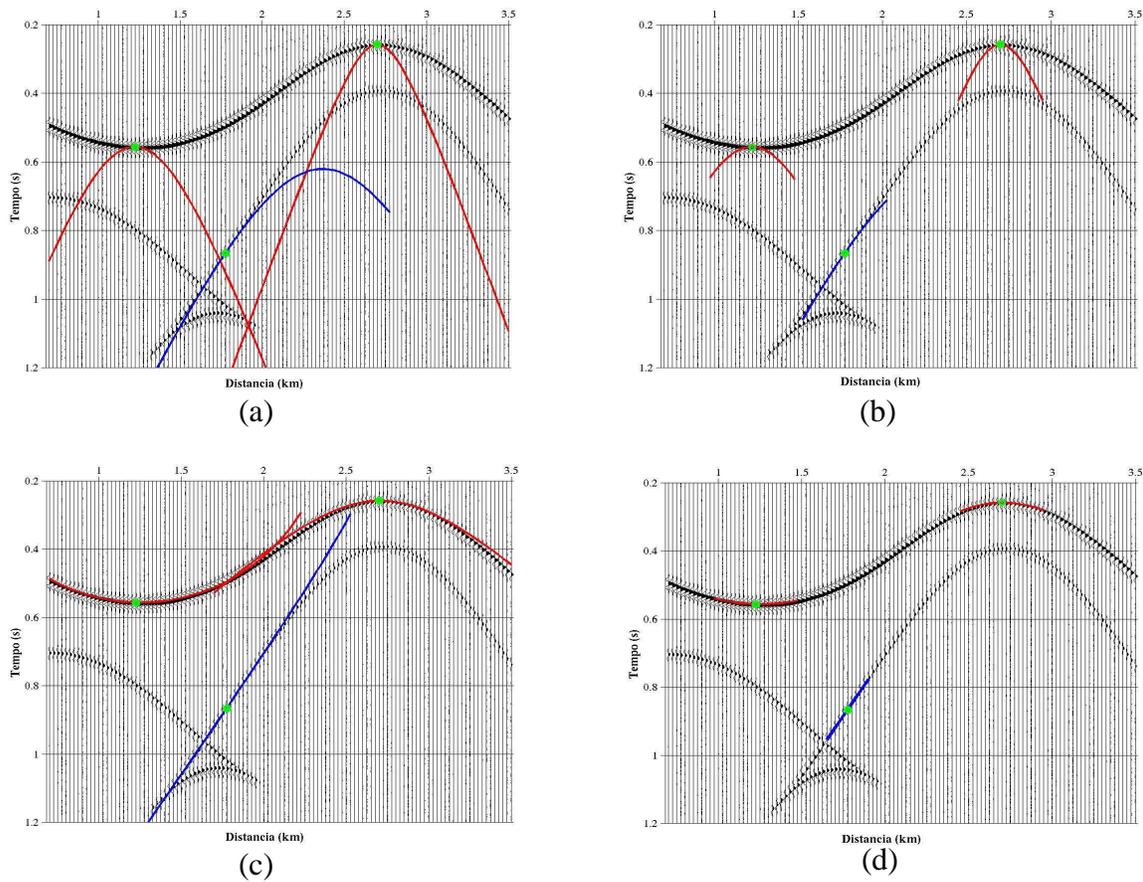


Figura 6.5 – Delimitação das curvas de empilhamento. Curvas de empilhamento total (a) e restrita (b) usando o operador SDC; Curvas de empilhamento total (c) e restrita (d) usando o operador SRC. O ponto de cor verde representa o ponto de amostragem  $P(x_0, t_0)$  para os pontos  $P_1, P_2$  e  $P_3$  sobre os refletores (Figura 6.4).

## 7 – EXEMPLOS NUMÉRICOS DE APLICAÇÃO DO MÉTODO CRS-PSDM

Neste capítulo é apresentada a aplicação do método CRS-PSDM em dados sintéticos, onde é realizada a migração pré-empilhamento dos dados sísmicos. São considerados dois modelos sintéticos para os testes: um modelo simples e o conhecido modelo Marmousi, que apresenta uma alta complexidade geológica. Como um item importante para a migração em profundidade, é apresentado um critério de discretização espacial que contribui para o melhoramento na resolução da imagem de subsuperfície migrada.

Em seguida é apresentada a possibilidade do uso das múltiplas chegadas na migração, enfatizando a importância de suas contribuições no melhoramento da imagem migrada. O capítulo é finalizado com um experimento que consiste em perturbar o modelo de velocidade e analisar a sensibilidade do método CRS-PSDM a esta perturbação provocada no modelo. Neste trabalho, os dados de entrada juntamente com as seções dos atributos sísmicos para os dois modelos foram gerados por Garabito (2001).

### 7.1 MODELO 1

Na figura 6.4 tem-se um modelo simples composto por três camadas homogêneas separadas por interfaces curvas e suaves. Como descrito no algoritmo CRS-PSDM, o dado de entrada para o procedimento da migração pré-empilhamento é composto por um conjunto de dados de múltipla cobertura contendo, por hipótese, apenas reflexões primárias. O conjunto de dados foi gerado através do programa de modelamento sísmico pela teoria do raio SEIS88 (ČERVENÝ & PŠENČIK, 1988), considerando-se 140 experimentos de fonte comum na superfície, cada qual contendo 48 receptores espaçados igualmente por um intervalo constante de 25m, sendo este intervalo igual para as fontes consecutivas. O afastamento mínimo entre a fonte e o primeiro receptor é de 100m, sendo a função Gabor o sinal da fonte considerada, com frequência dominante de 40Hz. O intervalo de amostragem em cada traço sísmico é de 2ms.

### 7.1.1 Critério de discretização espacial para migração em profundidade

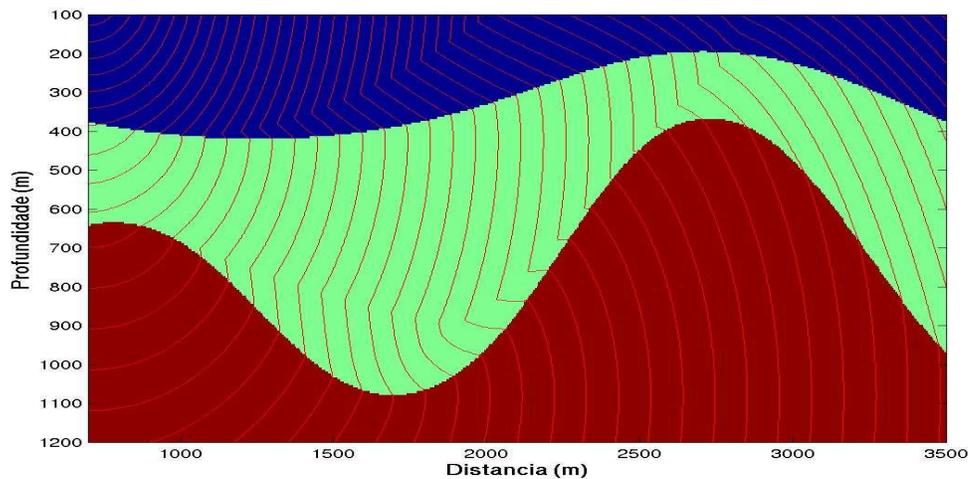
Um item importante na migração em profundidade que deve ser respeitado é com respeito aos espaçamentos escolhidos nas direções  $x$  e  $z$ , na malha regular predefinida para a migração. Estes espaçamentos devem ser escolhidos segundo determinado critério que permita a obtenção de uma boa qualidade na resolução da imagem migrada. De acordo com Yilmaz (1987), os espaçamentos em  $x$  e  $z$  estão relacionados com a velocidade mínima  $v$  do meio, o ângulo de inclinação máxima  $\theta$  do refletor e a frequência  $f$  do sinal, segundo as expressões abaixo:

- Espaçamento em  $x$ : 
$$\Delta x \leq \frac{v}{4f \sin \theta} \quad (7.1)$$

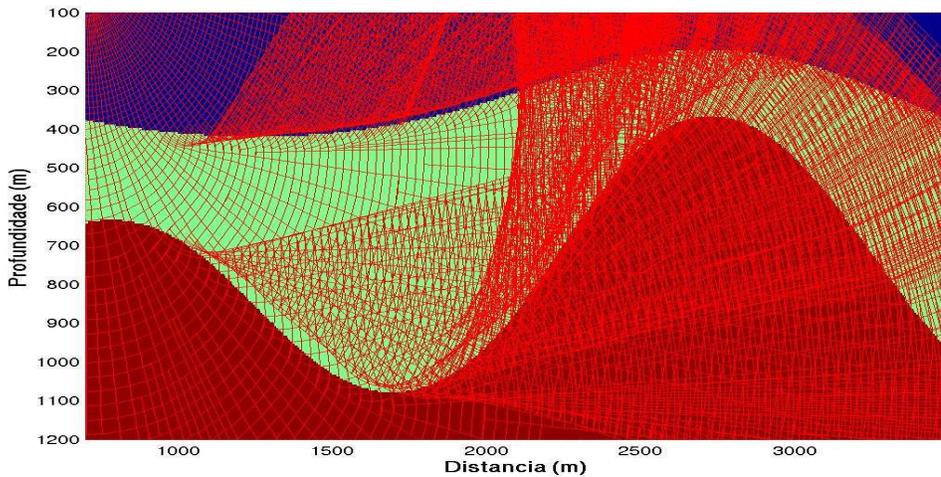
- Espaçamento em  $z$ : 
$$\Delta z \leq \frac{v}{2f} \quad (7.2)$$

### 7.1.2 Migração pós-empilhamento pelo método convencional de migração Kirchhoff

Como primeiro experimento, foi realizada a migração da seção afastamento nulo (Figura 7.2) simulada pelo empilhamento SRC, pelo método tradicional de migração Kirchhoff, considerando os tempos de trânsito obtidos pela solução da equação iconal (ZHAO, 1996) e pelo método CFO (PORTUGAL, 2002). A Figura 7.1 (a) e (b) mostra o modelo da Figura 6.4 coberto, no primeiro caso, pelas frentes de onda, e no segundo caso pelos raios e frentes de onda, considerando-se, respectivamente, os tempos de trânsito obtidos a partir da equação iconal e método CFO. A zona alvo de migração (retângulo branco na Figura 6.4) possui a seguinte extensão:  $700 \leq x \leq 3500 \text{ m}$  e  $100 \leq z \leq 1200 \text{ m}$ . Sendo a velocidade mínima do meio igual a  $1500 \text{ m/s}$ , a frequência do sinal  $40 \text{ Hz}$  e o ângulo de inclinação máxima do refletor, tomado como sendo  $45^\circ$ , então, de acordo com o critério de discretização espacial, visto na seção anterior, a malha alvo de migração possui uma discretização em  $x$  e  $z$  dada por:  $\Delta x = 5 \text{ m}$  e  $\Delta z = 2 \text{ m}$ .



(a)



(b)

Figura 7.1 – Modelo formado por três camadas homogêneas separadas por duas interfaces curvas e suaves coberto pelas frentes de onda obtidas (a) pela solução da equação iconal e (b) pelos raios e frentes de onda usando o método CFO (construção de frentes de onda).

Na Figura 7.1 (a) vê-se o modelo coberto pelas frentes de ondas que se propagam em todo meio. Neste caso, para a obtenção dos tempos de trânsito, representados pelas frentes de onda, foi utilizado um programa simples que resolve a equação iconal fornecendo apenas os tempos correspondentes às primeiras chegadas. Na Figura 7.1 (b), os raios e frentes de onda foram propagados no modelo usando o algoritmo de construção de frentes de onda, como já visto no capítulo 3 desta tese. Neste segundo caso, pode-se ver que o modelo é mais densamente coberto pelos raios e frentes de onda, além da existência de cáusticas, que neste caso, exige que novos raios sejam criados aumentando assim a densidade de raios em todo o meio.

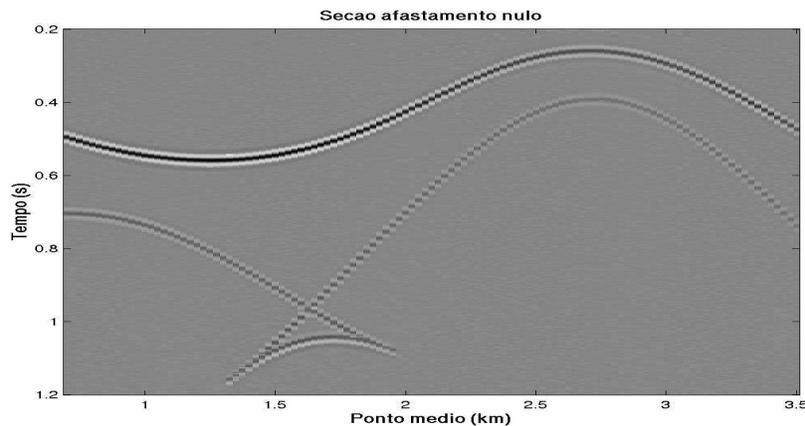


Figura 7.2 – Seção simulada afastamento nulo obtida pelo empilhamento SRC.

Nas Figuras (7.3) e (7.4) tem-se o resultado da migração em profundidade da seção afastamento nulo (Figura 7.2) simulada pelo empilhamento SRC. A migração da seção AN foi realizada pelo método convencional de migração Kirchhoff. Vê-se nos resultados da migração uma equivalência em ambas as imagens migradas, pois, devido a simplicidade do modelo, ambos os métodos de determinação de tempos de trânsito, iconal e CFO, mostraram-se eficientes e robustos na determinação de uma boa imagem dos refletores. Uma diferença notável entre as imagens migradas pelos dois métodos mencionados acima será vista com o modelo Marmousi, onde estará evidente a vantagem do método CFO na determinação dos tempos de trânsito, pois devido à sua grande complexidade geológica, muitas zonas de sombra existirão tornando-se necessário que sejam criados novos raios para aumentar a densidade dos mesmos no modelo, e permitindo que se tenha uma melhor precisão na determinação dos tempos de trânsito. Diante desta grande vantagem do método CFO na determinação dos tempos de trânsito, todos os resultados das seções migradas neste trabalho foram obtidos considerando-se este método, salvo no caso de ser mencionado o uso específico da equação iconal.

As seções migradas (Figuras (7.3) e (7.4)) apresentam alguns efeitos de Aliasing, devidos ao intervalo de discretização usado na zona alvo de migração. Estes efeitos, entretanto, podem ser reduzidos através da diminuição dos intervalos de discretização.

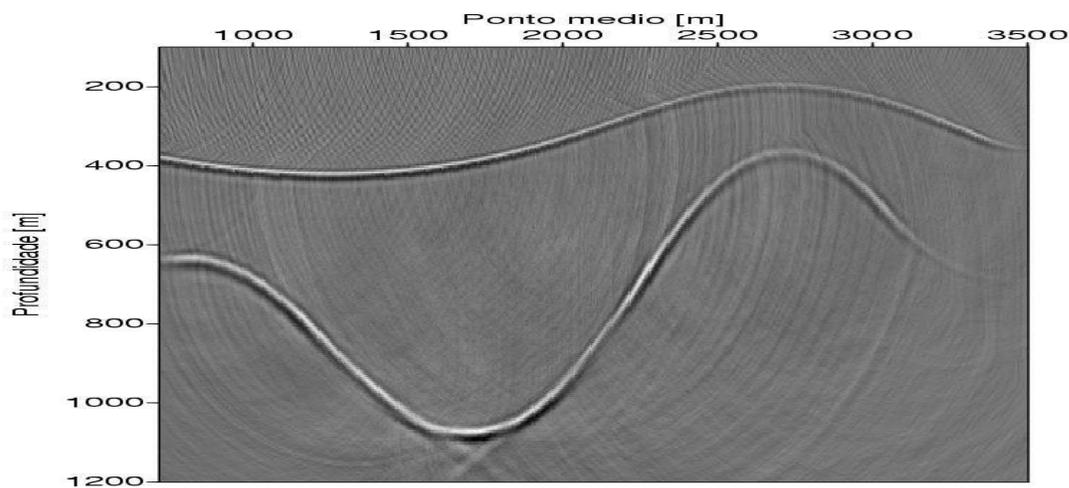


Figura 7.3 – Migração pós-empilhamento em profundidade da seção AN pelo método convencional de migração Kirchhoff. Os tempos de trânsito são obtidos pela solução da equação iconal (Zhao, 1996).

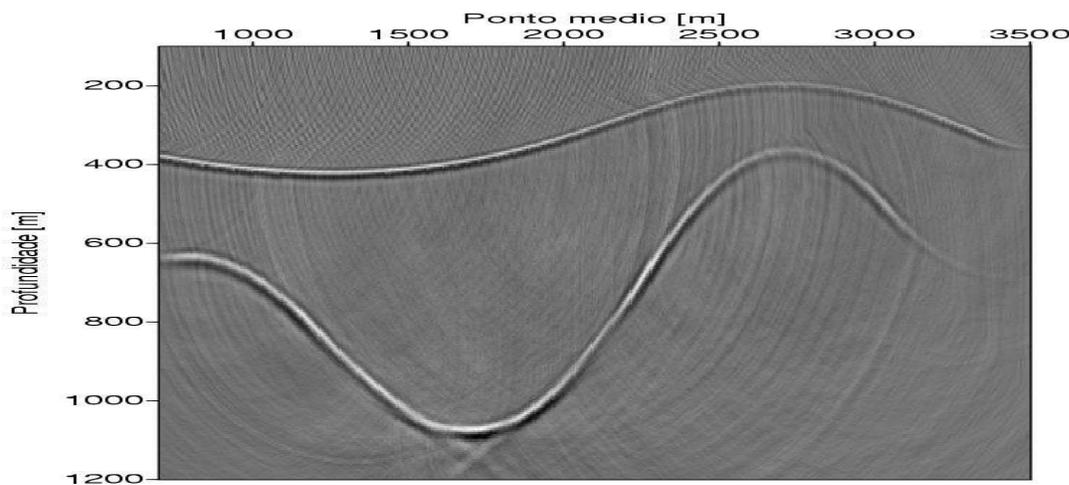


Figura 7.4 – Migração pós-empilhamento em profundidade da seção AN pelo método convencional de migração Kirchhoff. Os tempos de trânsito são obtidos pelo método CFO (PORTUGAL, 2002).

### 7.1.3 Migração pós-empilhamento pelo método CRS-PSDM

O segundo experimento consiste na migração da seção AN (Figura 7.2) pelo método CRS-PSDM, ou seja, utilizando as seções dos atributos sísmicos (Figura 7.5) do empilhamento SRC. Para este experimento, a migração pós-empilhamento foi realizada considerando-se as quatro curvas de empilhamento mostradas na Figura 6.5 e foram analisados os resultados obtidos por este método, considerando-se as quatro situações de limitação da abertura da migração.

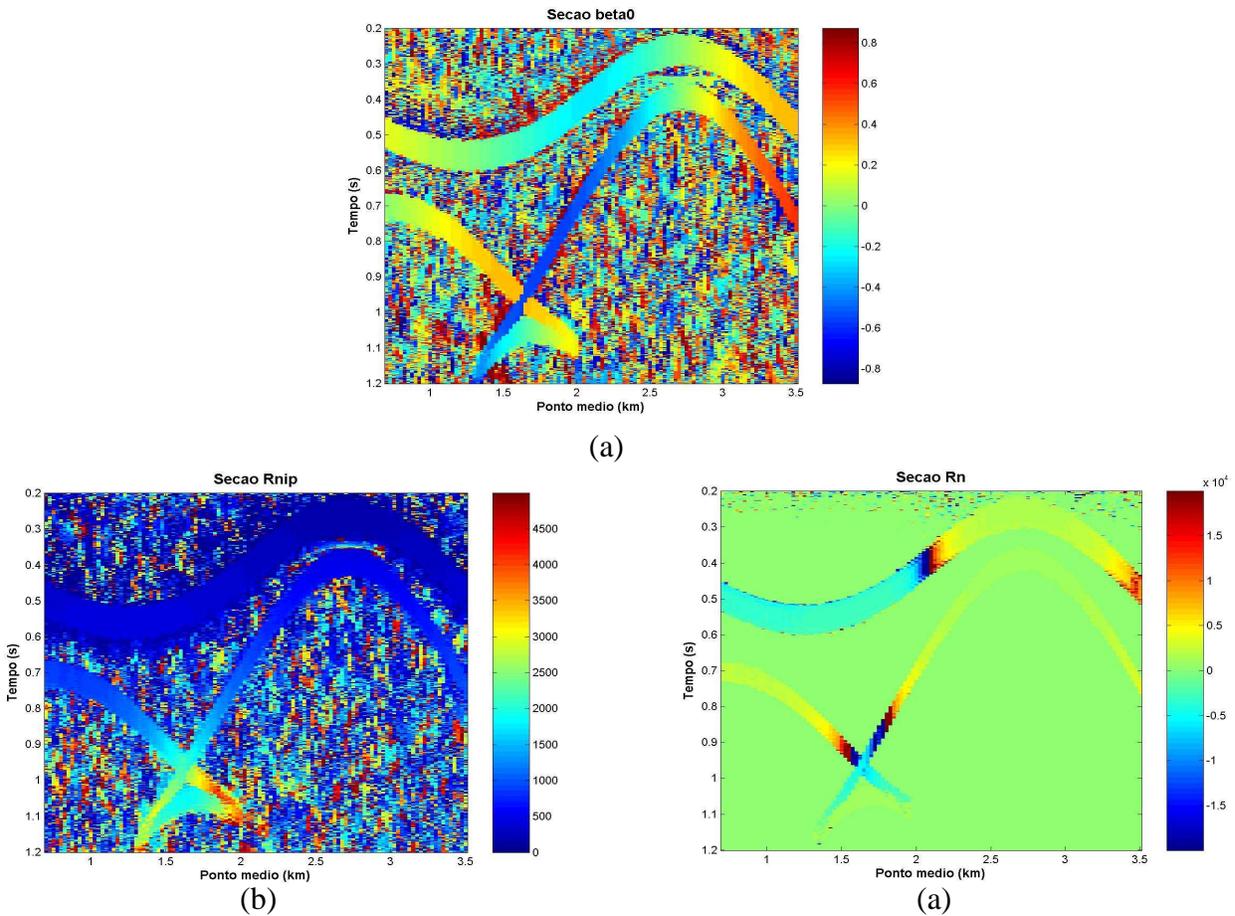


Figura 7.5 – Seções dos atributos sísmicos obtidos pelo empilhamento SRC (GARABITO, 2001). (a) Seção dos ângulos de emergência ( $\beta_0$ ). (b) Seção dos raios de curvaturas  $R_{PIN}$  das ondas PIN (ponto de incidência normal). (c) Seção dos raios  $R_N$  de curvaturas das ondas normais. As seções dos atributos sísmicos estão associadas à seção AN simulada da Figura 7.2.

A Figura 7.6 mostra o resultado da migração em profundidade da seção AN utilizando o operador de migração definido pela equação 6.5 na expressão (6.7), onde foram simulados eventos de tempos de difração. Para a migração da seção AN foram incluídos todos os traços sísmicos no processo de empilhamento. Contrariamente à seção sísmica migrada da Figura 7.6, foram simulados eventos de tempos de reflexão utilizando o operador definido pela equação 6.4 na expressão (6.7), resultando na imagem sísmica migrada da Figura 7.7. De forma análoga ao caso anterior, não foi feita nenhuma restrição à abertura usada para a migração do dado.

Comparando-se as imagens obtidas nos dois casos mencionados anteriormente, pode-se notar claramente que no primeiro caso, a seção migrada apresenta um elevado grau de ruído prejudicando desta forma a resolução da imagem, enquanto que no segundo caso, a seção migrada apresenta uma resolução da imagem mais bem definida. Com relação à continuidade dos refletores, observa-se também que o primeiro refletor, por exemplo, encontra-se mais nítido na seção migrada da Figura 7.7 comparada à seção migrada da Figura 7.6. Esta diferença notável nas seções migradas obtidas nos dois casos se dá devido às diferentes curvas de empilhamento consideradas na soma das amplitudes do dado, ou seja, de acordo com a Figura 6.5 (a) e (c), vê-se que a curva de empilhamento, simulando eventos de reflexão, se ajusta melhor aos dados, permitindo desta forma, que um número maior de traços sísmicos esteja envolvido no empilhamento e que se obtenha um valor de amplitude, resultante do empilhamento, mais significativo comparado ao obtido pela curva de empilhamento simulada para tempos de difração, que neste caso, envolve um grande número de traços desnecessários no empilhamento, prejudicando assim a imagem migrada.

Nas Figuras (7.8) e (7.9) temos as seções migradas com os operadores de migração dados pelas equações (6.5) e (6.4) simulando eventos de tempos de difração e reflexão, respectivamente, como no caso anteriormente mencionado. Entretanto, neste caso, a abertura usada para a migração do dado foi restrita a um dado intervalo previamente definido. Comparando-se a seção migrada da Figura (7.8) com a da Figura (7.6), ambas considerando-se os tempos de difração, vê-se que a limitação da abertura de migração permite consideravelmente uma melhora na resolução da imagem migrada (Figura 7.8), pois mesmo apesar de o operador de migração, neste caso, envolver traços sísmicos desnecessários no empilhamento, então, reduzindo-se o número de traços diminui-se o efeito causado na imagem. Considerando-se agora as seções migradas das Figuras (7.8) e (7.9), vê-se, por exemplo, que o primeiro refletor apresenta-se melhor definido na imagem migrada da Figura (7.9) comparado ao da Figura (7.8), devido ao fato da curva de empilhamento, dada pela equação (6.4), se ajustar melhor aos dados comparada à curva de empilhamento dada pela equação (6.5).

Finalmente, comparando-se agora a seção migrada da Figura (7.9) com a seção migrada pelo método convencional de migração Kirchhoff (Figura 6.4), vê-se que ambas as seções são praticamente semelhantes e que apresentam uma boa resolução da imagem, mostrando com isso que o operador descrito pela equação 6.4 (simulando tempos de reflexão e restrito à limitação da

abertura de migração), pode ser usado, na migração cinemática, para a obtenção de uma imagem de boa resolução de subsuperfície.

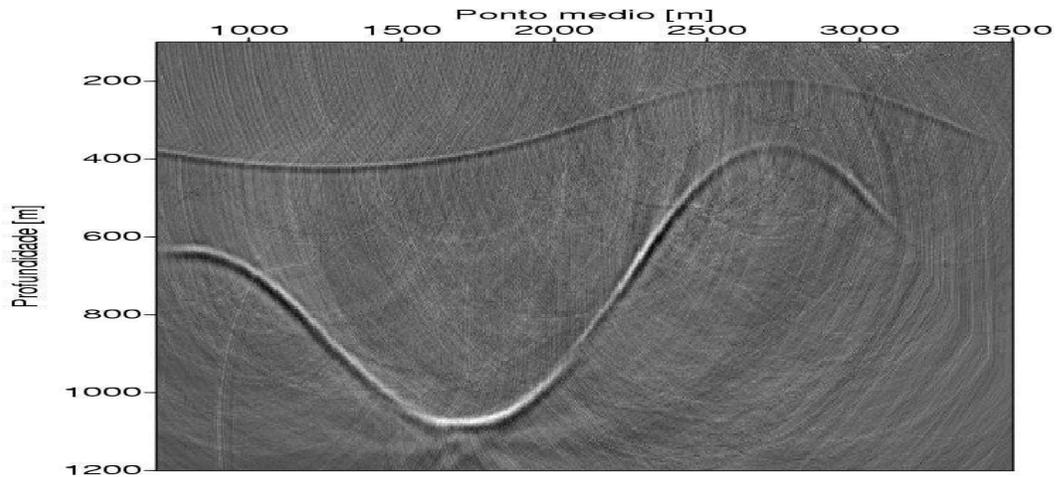


Figura 7.6 – Migração em profundidade da seção AN pelo método CRS-PSDM utilizando o operador de migração (Equação 6.5) na simulação de tempos de difração. A abertura para a migração inclui todos os traços sísmicos.

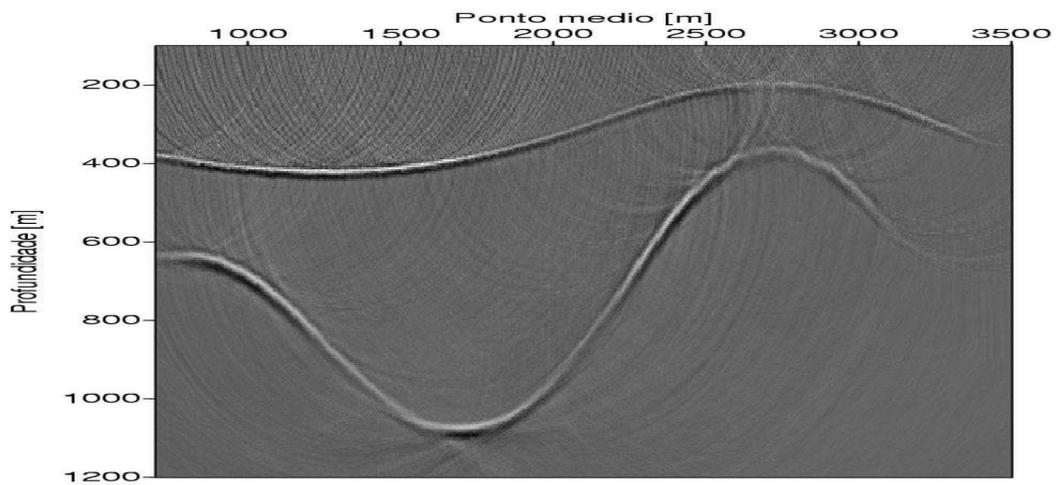


Figura 7.7 – Migração em profundidade da seção AN pelo método CRS-PSDM. Neste caso são simulados tempos de reflexão utilizando o operador de migração (Equação 6.4). A abertura para a migração inclui todos os traços sísmicos.

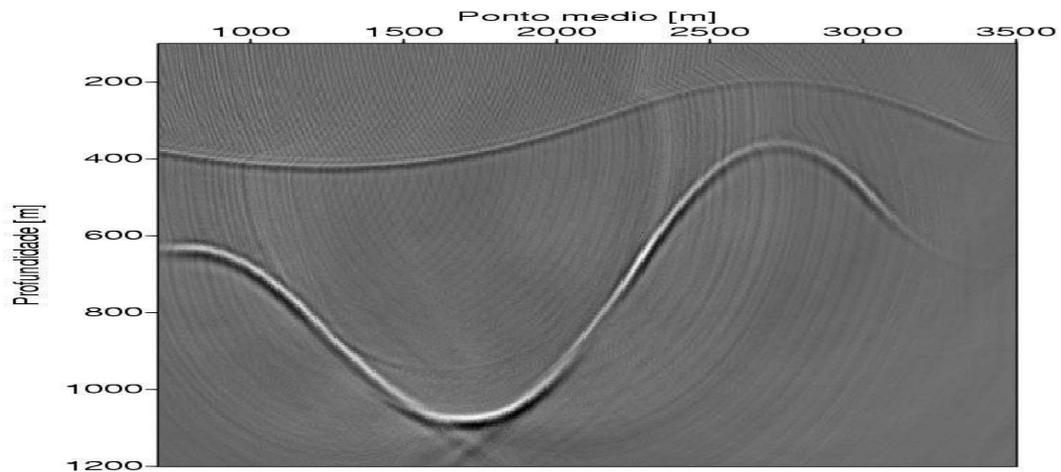


Figura 7.8 – Migração em profundidade da seção AN pelo método CRS-PSDM. Neste caso são simulados tempos de difração utilizando o operador de migração da equação (6.5). A abertura para a migração está restrita a um intervalo pré-definido.

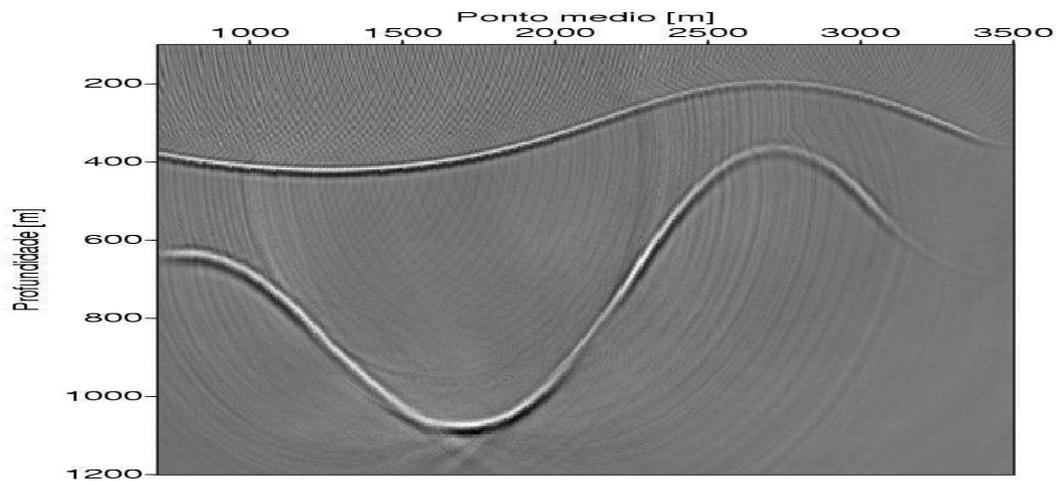


Figura 7.9 – Migração em profundidade da seção AN pelo método CRS-PSDM. Neste caso são simulados tempos de reflexão utilizando o operador de migração da equação (6.4). A abertura para a migração está restrita a um intervalo pré-definido.

#### 7.1.4 Migração pré-empilhamento pelos métodos convencional Kirchhoff e CRS-PSDM

O terceiro experimento consiste agora na migração pré-empilhamento do dado sísmico de múltipla cobertura com o propósito de verificar a influência da contribuição das seções afastamento comum (que compõem o dado de cobertura múltipla) na resolução da imagem migrada. Primeiramente, com o propósito de verificar a estabilidade dos métodos convencional Kirchhoff e CRS-PSDM ao ruído presente nos dados de entrada, foram gerados, com o programa de modelamento sísmico SEIS88, os dados de múltipla cobertura sem adição de ruído. Os dados de entrada fornecidos (GARABITO, 2001) contém um alto grau de ruído, cuja razão sinal/ruído é igual a 7.

Inicialmente, a partir do dado de múltipla cobertura sem ruído, foi considerada a seção com afastamento constante de 275m (Figura 7.10) e realizada a migração em profundidade pelos métodos: convencional de migração tipo Kirchhoff e CRS-PSDM, cujos resultados são mostrados pelas Figuras (7.12) e (7.13), respectivamente. Ambas as imagens permitem uma boa continuidade nos refletores sísmicos, diferindo apenas quanto à resolução das imagens, pois na Figura (7.12), pode-se notar uma presença mais intensa dos efeitos de bordas, por exemplo, abaixo do segundo refletor, sendo estes menos perceptíveis na seção migrada da Figura (7.13). Esta redução nos efeitos de bordas, Figura (7.13), se dá devido o uso do operador descrito pela equação (6.4) na expressão (6.7), permitindo uma delimitação na abertura de migração, o que não ocorre no resultado da migração pelo método convencional Kirchhoff, Figura (7.12), no qual todos os traços sísmicos são envolvidos no empilhamento do sinal.

Semelhantemente a este último procedimento realizado, foi extraído, agora, porém, do dado de múltipla cobertura com ruído, a seção com afastamento constante de 275m (Figura 7.11). Os resultados migrados são mostrados pelas Figuras (7.14) e (7.15). Pode-se ver claramente que o resultado da migração pelo método convencional Kirchhoff (Figura 7.14), foi mais intensamente afetado, devido à presença de ruído, comparado ao resultado obtido pelo método CRS-PSDM (Figura 7.15), o qual apresenta uma melhora com respeito à resolução da imagem e continuidade dos refletores. Esta melhora no resultado obtido pelo método CRS-PSDM foi devido à delimitação da abertura, permitida pelo operador da equação (6.4). Portanto, diante da presença de ruído no dado sísmico, a redução dos traços sísmicos para o processo de

empilhamento das amplitudes constitui-se em um passo importante para a migração em profundidade.

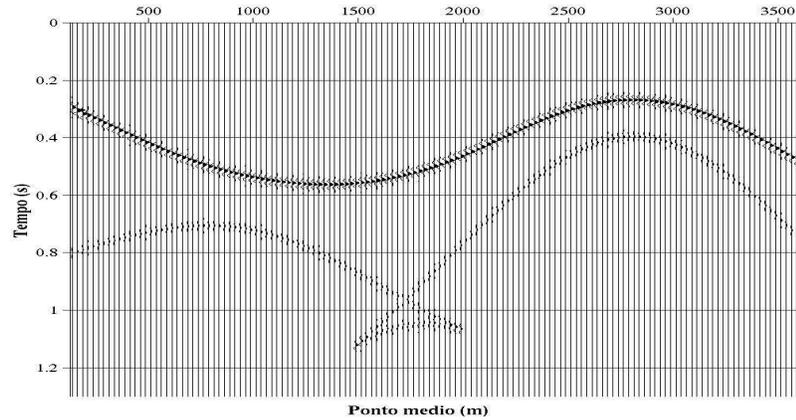


Figura 7.10 – Seção sísmica com afastamento constante de 275m extraída do dado sísmico de múltipla cobertura gerado sem ruído.

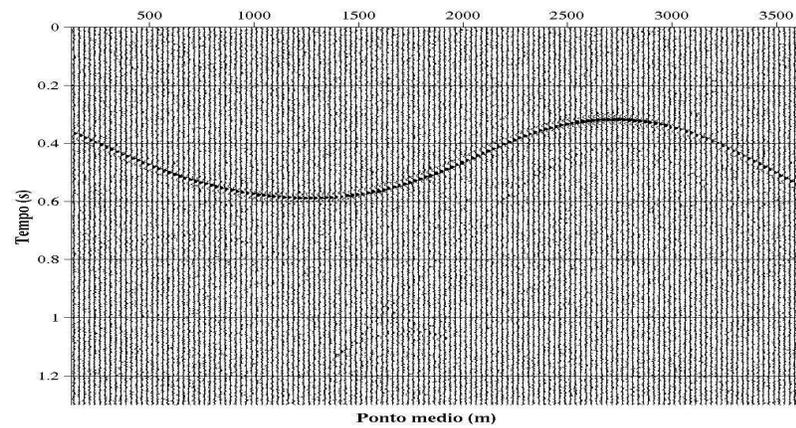


Figura 7.11 – Seção sísmica com afastamento constante de 275m extraída do dado sísmico de múltipla cobertura gerado com ruído, cuja razão sinal / ruído é igual a 7.

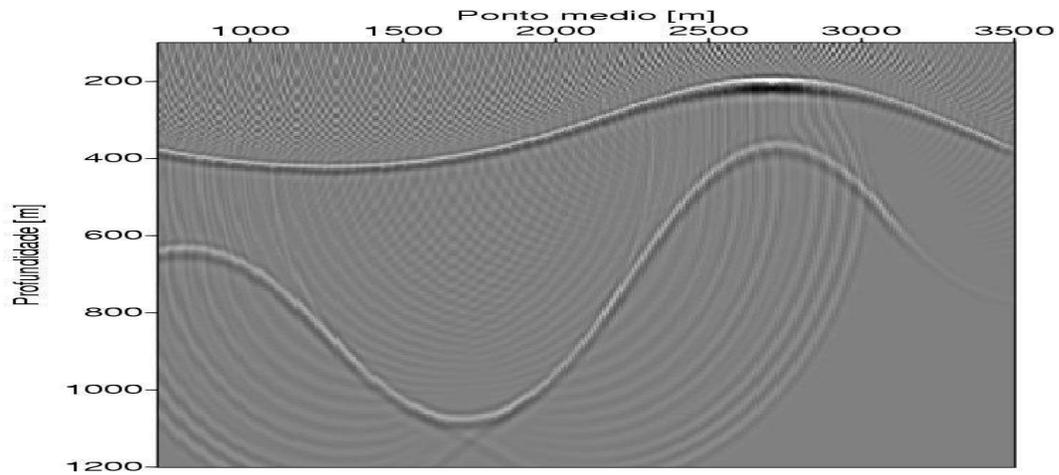


Figura 7.12 – Migração pré-empilhamento em profundidade pelo método convencional de migração Kirchhoff da seção AC sem ruído da Figura (7.10).

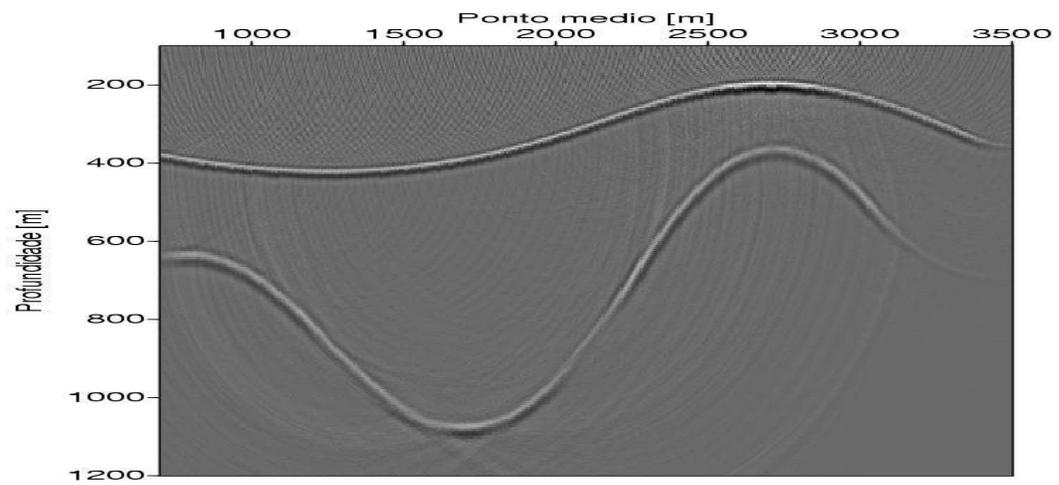


Figura 7.13 – Migração pré-empilhamento em profundidade pelo método CRS-PSDM da seção AC sem ruído da Figura (7.10).

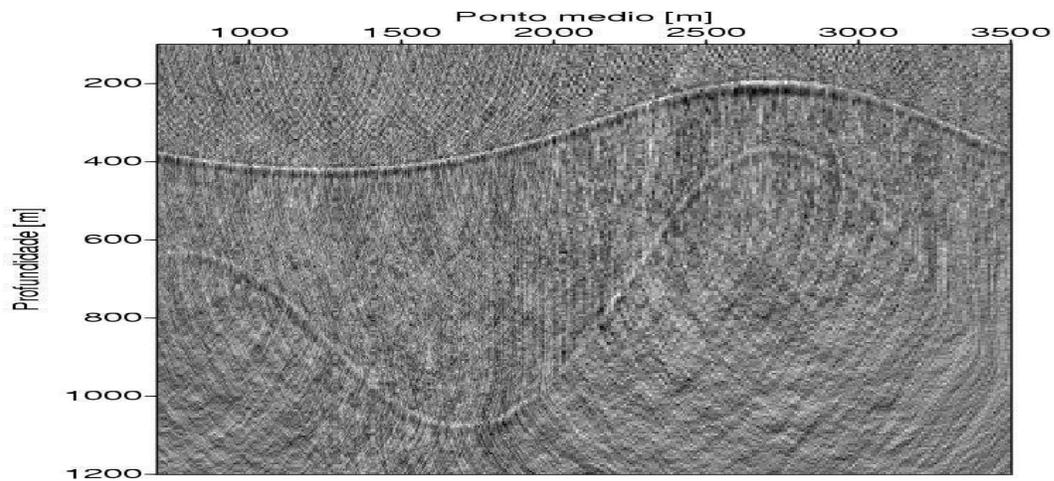


Figura 7.14 – Migração pré-empilhamento em profundidade pelo método convencional de migração Kirchhoff da seção AC com ruído da Figura (7.11).

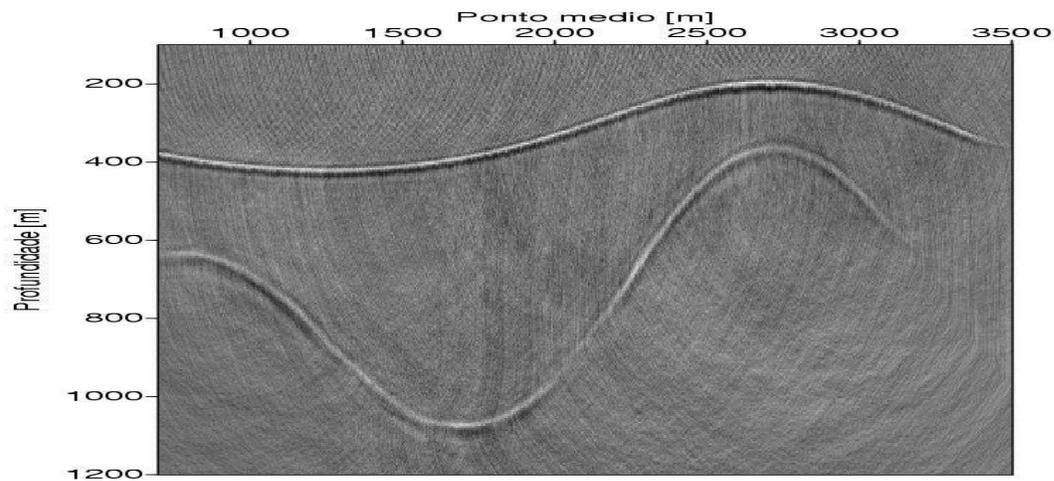


Figura 7.15 – Migração pré-empilhamento em profundidade pelo método CRS-PSDM da seção AC com ruído da Figura (7.11).

Finalmente, como último passo realizado neste experimento e visando agora analisar a contribuição das seções sísmicas do dado de múltipla cobertura no resultado da migração, foram consideradas 10 seções afastamento comum, extraídas do dado de múltipla cobertura, com e sem ruído, e realizada a migração pré-empilhamento pelos dois métodos.

Primeiramente, a partir do dado de múltipla cobertura sem ruído e considerando-se 10 seções, foi realizada a migração pré-empilhamento pelos métodos convencional Kirchhoff (usando o operador da equação 6.1) e CRS-PSDM (usando o operador da equação 6.4), respectivamente, sendo os resultados representados pelas Figuras (7.16) e (7.17). Os resultados mostram que ambas as imagens migradas apresentam uma boa continuidade dos refletores, diferindo, entretanto, quanto à resolução da imagem, pois neste aspecto, a imagem migrada da Figura (7.16), pelo método convencional Kirchhoff, apresenta-se mais limpa comparada ao resultado obtido pelo método CRS-PSDM, Figura (7.17), isto é, os efeitos de bordas presentes e vistos pela Figura (7.12), agora são quase que eliminados totalmente. Em outras palavras, a contribuição das 10 seções que compõem o dado permite que, no processo de empilhamento do sinal, os efeitos de bordas presentes na migração de cada seção, tomada individualmente, diminuam consideravelmente e que se obtenha uma imagem de boa resolução. Analisando-se agora a contribuição das 10 seções do dado nos resultados da migração obtida pelo método CRS-PSDM vê-se que, comparando-se as imagens migradas das Figuras (7.17) e (7.13), nota-se que os efeitos de bordas, que são quase que imperceptíveis na Figura (7.13), onde foi considerada apenas uma das seções que compõe o dado, mostram-se mais visíveis na Figura (7.17). Entretanto, com respeito à continuidade dos refletores, estes se apresentam mais bem definidos quando consideradas as 10 seções que compõe o dado sísmico.

Deseja-se chamar a atenção do leitor para dois aspectos importantes que devem ser levados em conta na migração pré-empilhamento: *o tempo computacional* gasto para migrar as seções afastamento comum (que compõem o dado de múltipla cobertura) e *a qualidade na resolução da imagem migrada*. Até aqui não foi feita nenhuma análise quanto ao aspecto computacional, sendo esta análise deixada para o final desta seção.

Com relação à qualidade na resolução da imagem migrada tem-se dois itens importantes a ser analisado: o primeiro está relacionado com a definição dos refletores sísmicos, ou seja, se os refletores apresentam-se bem definidos na seção migrada, enquanto que o segundo diz respeito à resolução da imagem migrada, ou seja, se a imagem migrada apresenta um grau de contaminação

devido à presença elevada de ruído no dado de entrada. Desta forma, levando-se em conta este segundo aspecto, é feita uma análise comparativa das imagens obtidas pelos dois métodos empregados neste experimento.

Semelhantemente ao caso anterior, considerando-se agora o dado de múltipla cobertura com ruído, foram migradas em profundidade as 10 seções que compõe o dado sísmico. As Figuras (7.18) e (7.19) mostram as seções migradas pelos métodos: convencional Kirchhoff e CRS-PSDM, respectivamente. Pode-se notar claramente que existe uma grande diferença quanto à resolução da imagem em ambas as seções migradas. Na seção migrada da Figura (7.18), por exemplo, vê-se um grau de contaminação maior da imagem, decorrente da baixa razão sinal/ruído presente no dado de entrada, comparada à seção migrada da Figura (7.19), que, apesar da presença dos efeitos de bordas, não sofre muito a influência dos ruídos presentes. Analisando-se agora a definição dos refletores, nota-se que ambos os refletores sísmicos apresentam-se mais bem definidos, quando da migração pelo método CRS-PSDM, comparados aqueles obtidos pelo método convencional Kirchhoff, que se mostra menos estável à presença de ruídos. Portanto, diante da presença de ruídos nos dados, o que constitui uma grande realidade nos dados obtidos nos levantamentos sísmicos, o método CRS-PSDM tem-se mostrado estável, apresentando um melhor desempenho na obtenção de uma imagem de boa resolução de subsuperfície comparado ao método convencional de migração Kirchhoff.

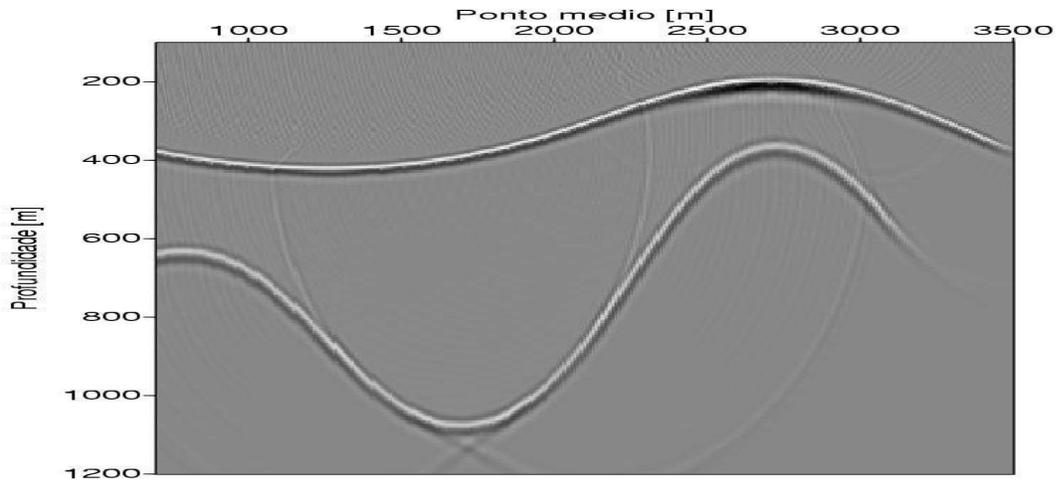


Figura 7.16 – Migração pré-empilhamento em profundidade pelo método convencional de migração Kirchhoff. Neste caso, o dado sísmico de múltipla cobertura não contém ruído.

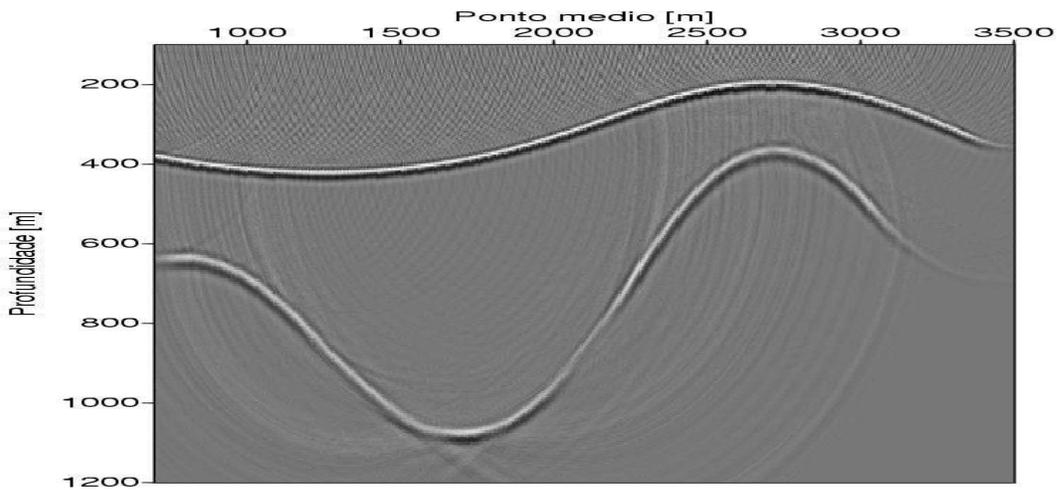


Figura 7.17 – Migração pré-empilhamento em profundidade pelo método CRS-PSDM. Neste caso, o dado sísmico de múltipla cobertura não contém ruído.

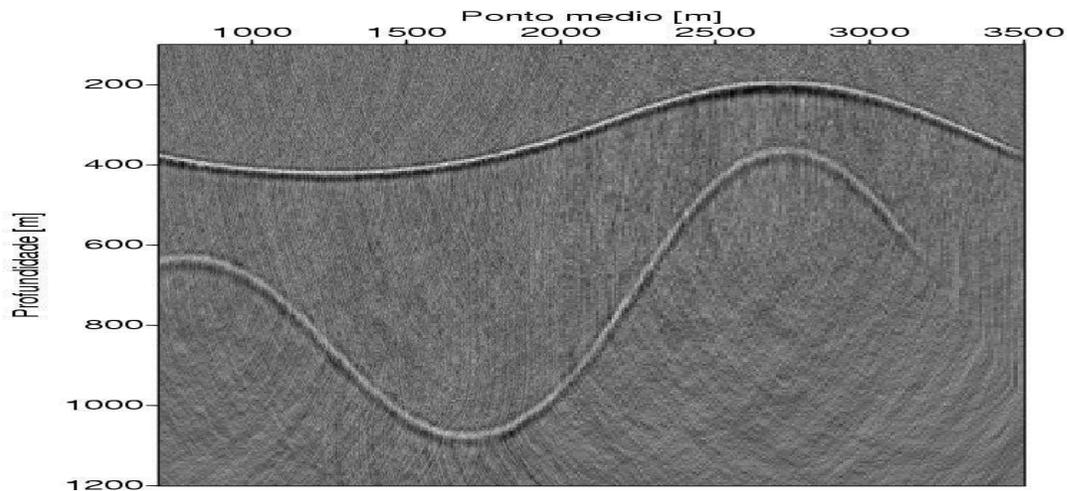


Figura 7.18 – Migração pré-empilhamento em profundidade pelo método convencional de migração Kirchhoff. Neste caso, o dado sísmico de múltipla cobertura contém ruído com razão sinal / ruído igual a 7.

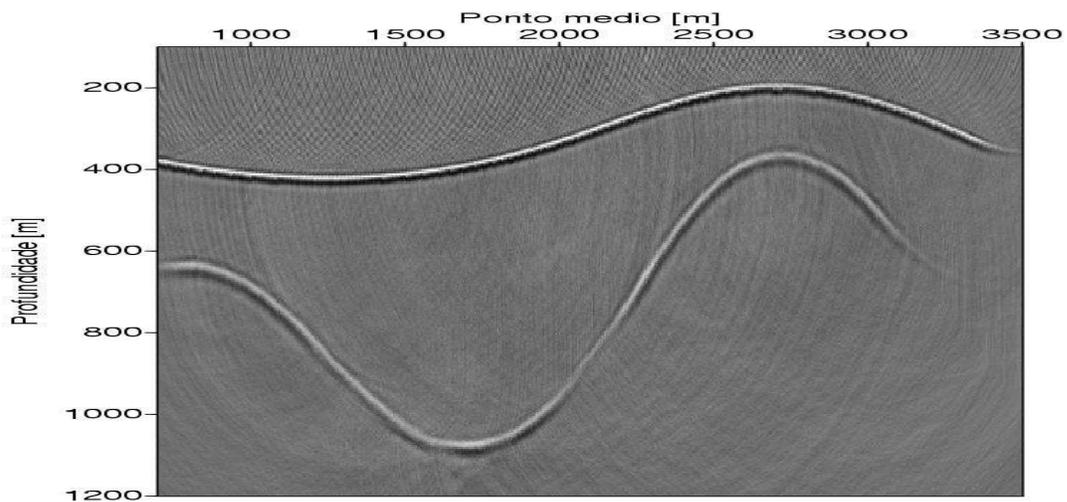


Figura 7.19 – Migração pré-empilhamento em profundidade pelo método CRS-PSDM. Neste caso, o dado sísmico de múltipla cobertura contém ruído com razão sinal / ruído igual a 7.

### 7.1.5 Explorando a possibilidade do uso das múltiplas chegadas na migração.

Nesta seção, será tratada a possibilidade do uso das múltiplas chegadas, isto é, primeiras, segundas e terceiras chegadas de tempos de trânsito, para obtenção de uma imagem de subsuperfície migrada em profundidade. Como foi visto no capítulo três desta tese, o método de construção de frentes de onda (CFO) apresenta duas principais grandes vantagens para a determinação dos tempos de trânsito, a saber: a criação de novos raios, permitindo um aumento em sua densidade em regiões conhecidas como “zonas de sombra” e permitindo assim uma melhor precisão no cálculo dos tempos, e a computação das chegadas posteriores, ou seja, as múltiplas chegadas, tendo sua grande importância, por exemplo, no imageamento de refletores sísmicos localizados em regiões com alta complexidade geológica (GEOLTRAIN e BRAC,1991).

No capítulo 3, na Figura 3.10, podem ser vistos três painéis correspondentes aos tempos de trânsito das primeiras, segundas e terceiras chegadas para um modelo contendo um foco de baixa velocidade enterrado no meio. Situações geológicas como esta são presentes, por exemplo, em modelos contendo um domo de sal ou fortes heterogeneidades no meio, de modo a permitir fortes alterações na trajetória da energia que se propaga no meio, e assim, a presença de triplicações nas frentes de onda. Entretanto, no modelo 1 da Figura 7.1 (b), pode-se ver, através dos raios e frentes de onda no modelo, a presença de cáusticas, ocasionando assim o dobramento da frentes de onda. Neste caso, apesar do modelo ser geologicamente simples, isto é, não apresentar fortes variações laterais de velocidade ou grandes heterogeneidades no meio, permitiu a existência de cáusticas devido à sua geometria, ou seja, à forte curvatura da estrutura sinclinal do segundo refletor. Em ambos os casos, isto é, diante de uma grande heterogeneidade no meio ou de fortes curvaturas nos refletores, permitindo assim o dobramento na frente de onda, o método CFO permitirá a determinação das chegadas posteriores.

O objetivo desta seção, como mencionado no início, é mostrar a possibilidade do uso dos painéis dos tempos de trânsito referentes às chegadas posteriores como uma boa ferramenta na determinação de uma imagem de boa resolução de subsuperfície. Até este momento, os resultados das seções migradas foram obtidos considerando-se apenas as primeiras chegadas.

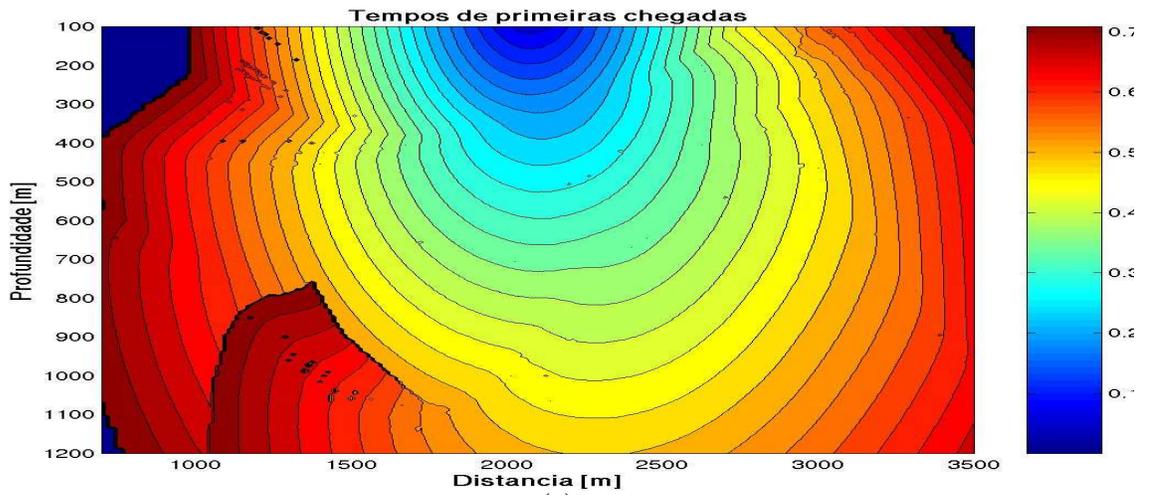
Com este propósito, foram gerados para o modelo da Figura 1 os três painéis de tempos correspondentes às primeiras, segundas e terceiras chegadas, respectivamente, como mostrados pela Figura 7.20 (a), (b) e (c) para uma fonte em superfície localizada na posição  $(2.25km, 0km)$ .

A idéia é gerar três imagens, cada uma correspondente a uma específica chegada de tempos de trânsito e em seguida somar (ou empilhar) as três imagens geradas obtendo assim uma imagem final de subsuperfície que leve em consideração as contribuições das múltiplas chegadas.

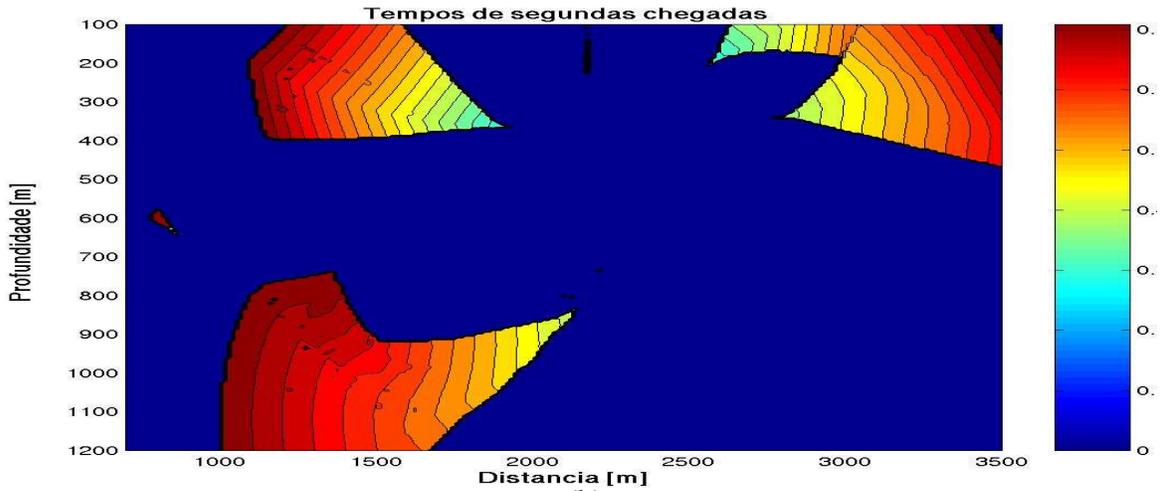
A Figura 7.21 (a), (b) e (c) mostra o resultado da migração considerando-se os três painéis de tempos para as primeiras, segundas e terceiras chegadas, respectivamente. O resultado da migração, considerando-se o painel referente às primeiras chegadas apenas (Figura 7,21 (a)) já foi confirmado através dos resultados anteriores. Na Figura 7.21 (b) e (c) tem-se os resultados da migração para os painéis de tempos referentes às múltiplas chegadas, isto é, segundas e terceiras chegadas, respectivamente (Figura 7.20 (b) e (c)). A geometria dos refletores (linhas vermelhas) é superposta às imagens obtidas pela migração. No primeiro refletor, por exemplo, vê-se através das setas (em branco) uma pequena parte da imagem reconstruída pela migração, além da presença de ruídos na imagem. Pode-se ver que as condições geológicas do modelo não permitem que se tenham informações mais precisas dos refletores sísmicos a partir do uso das múltiplas chegadas.

Como mencionado anteriormente, a partir das imagens migradas, referentes aos três painéis de tempos de trânsito, resta agora somá-las (ou empilhá-las), resultando assim na imagem da Figura 7.23. Comparando-se as imagens das Figuras 7.22 e 7.23, vê-se que ambas mostram-se semelhantes com respeito à continuidade dos refletores e resolução da imagem. Pode-se ver também que o ruído presente nas imagens obtidas a partir do uso das múltiplas chegadas (Figura 7.21 (b) e (c)) desaparecem quase que totalmente quando são somadas as imagens migradas, devido sua amplitude ser muito baixa.

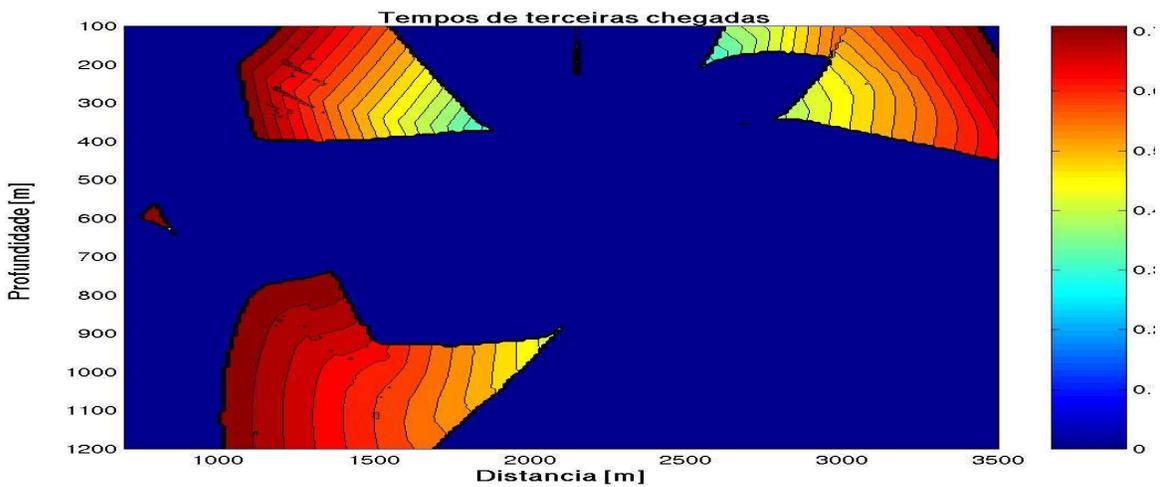
Este procedimento de utilizar as múltiplas chegadas no imageamento de refletores sísmicos, permitirá que se tenha uma confirmação da contribuição das múltiplas chegadas no melhoramento da imagem de subsuperfície dependendo das condições geológicas do modelo. Aplicar este procedimento a dados reais, por exemplo, constitui um experimento recomendável.



(a)



(b)



(c)

Figura 7.20 – Painéis de tempos de trânsito correspondente às (a) primeiras chegadas, (b) segundas chegadas e terceiras chegadas (c) Para o modelo simples da Figura 7.1.

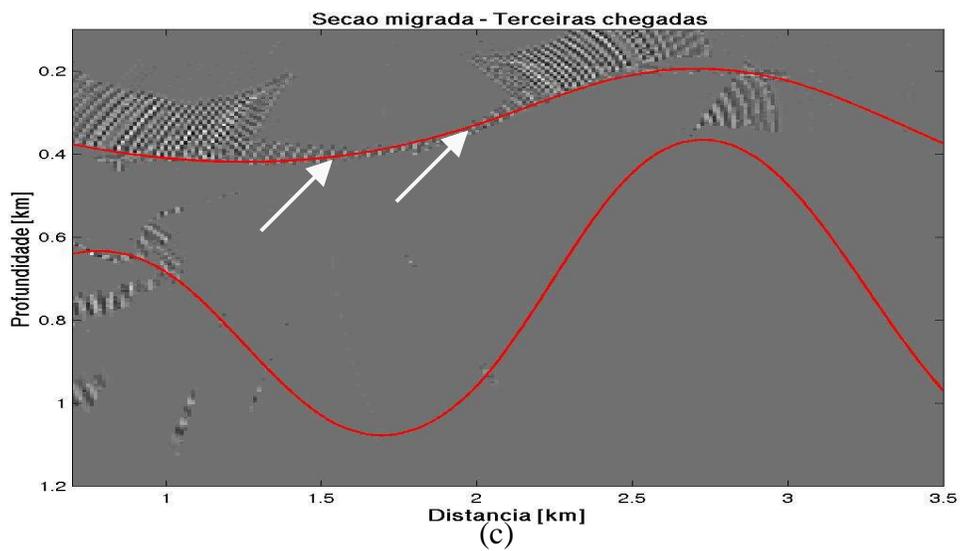
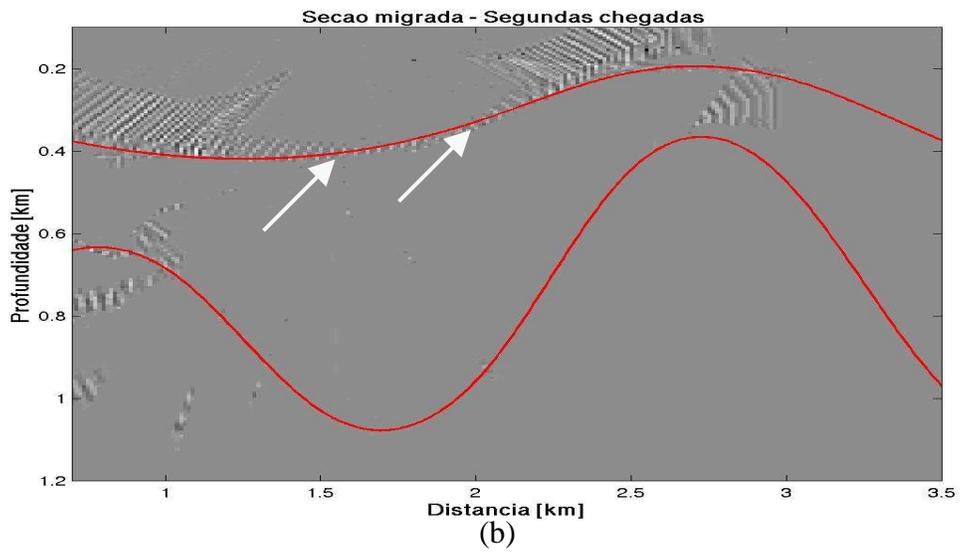
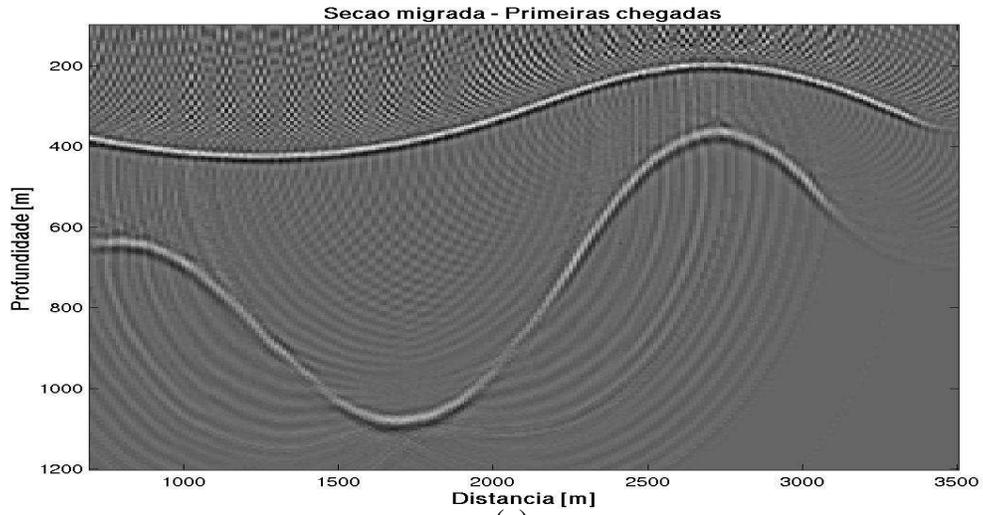


Figura 7.21 – Resultados da migração da seção sísmica da Figura 7.10 utilizando os painéis de tempos de trânsito (Figura 7.20) correspondentes às (a) primeiras chegadas, (b) segundas chegadas e terceiras chegadas (c).

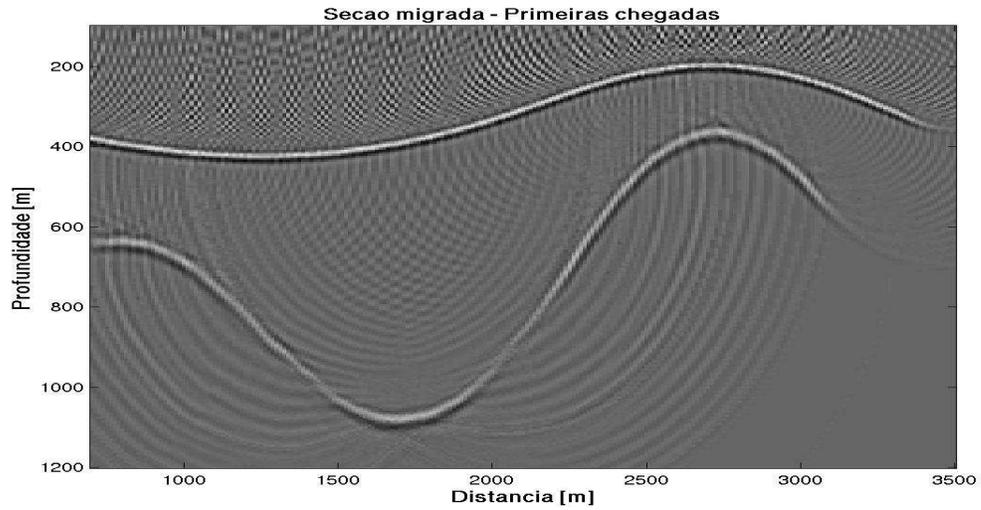


Figura 7.22 – Seção migrada utilizando o painel de tempos de trânsito correspondente às primeiras chegadas (Figura 7.20 (a)). A mesma da Figura 7.21 (a).

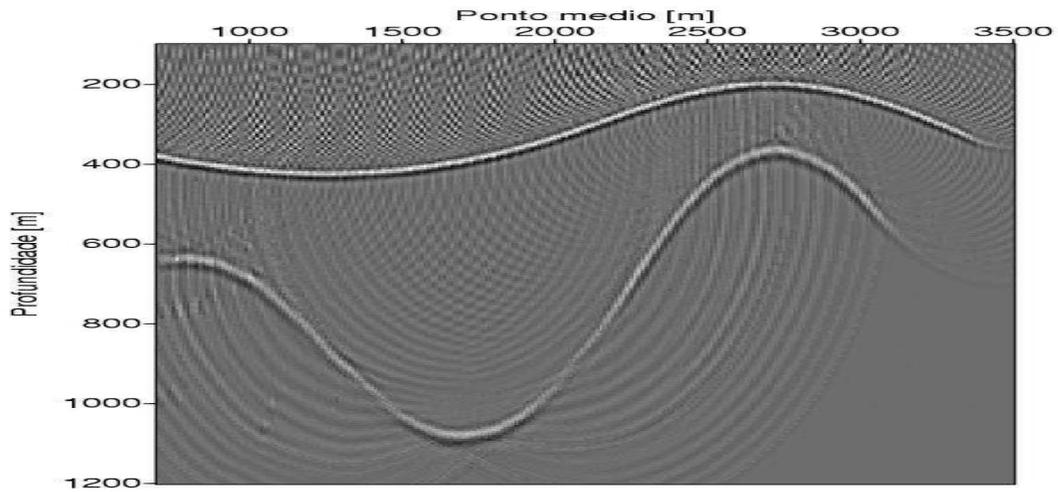


Figura 7.23 – Seção migrada correspondente à soma (ou empilhamento) das três seções migradas da Figura 7.21.

## 7.2 MODELO 2

Com o propósito de mostrar a eficiência e desempenho do método CRS-PSDM em um meio geologicamente complexo, foi considerado o conhecido Dado Marmousi, o qual tem sido usado por diversas técnicas de processamento por apresentar uma complexidade em sua estrutura geológica e uma distribuição tectônica de refletores bem realística. Este modelo é baseado em uma situação real e contém 60 refletores com alta inclinação e fortes variações laterais de velocidade. As seções sísmicas foram observadas a partir de um levantamento marítimo por meio de tiros realizados no sentido de oeste a leste do modelo. O conjunto de dados consiste de um total de 240 tiros (fonte comum), cada qual contendo 96 traços com intervalo de amostragem de 4 ms, sendo as distâncias entre fontes (e receptores) consecutivas iguais a 25m. O afastamento mínimo é de 200m e a posição da primeira fonte é 3000m a partir do canto oeste do modelo (Figura 7.24). O retângulo em vermelho é a zona alvo de migração e as velocidades representadas pela barra vertical de cores ao lado.

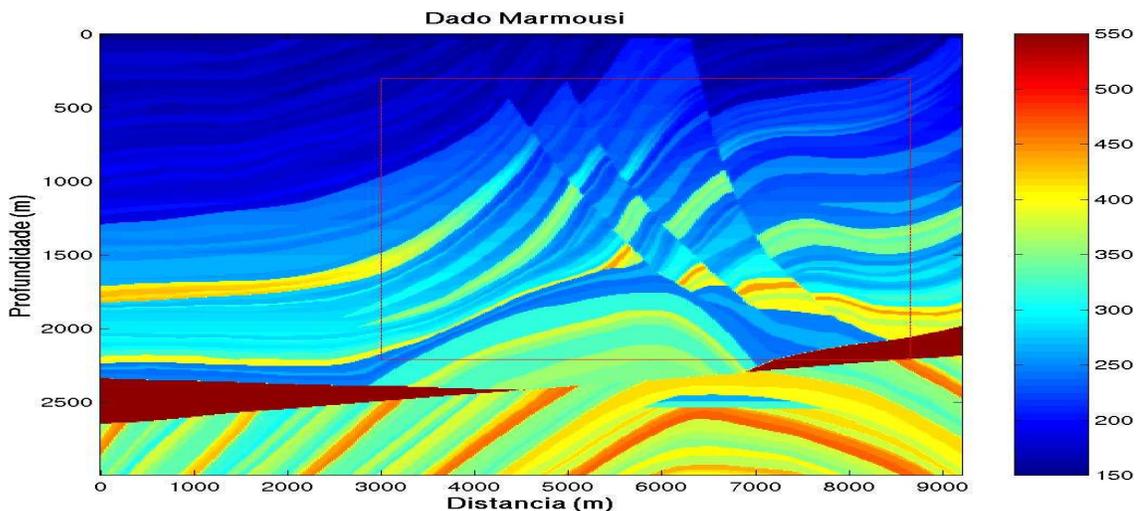


Figura 7.24 – Modelo Marmousi apresentando uma alta complexidade geológica em sua estrutura e uma distribuição tectônica de refletores realística.

### 7.2.1 Migração pós-empilhamento pelo método convencional de migração Kirchhoff

Analogamente ao procedimento realizado com o modelo 1, visando mostrar novamente a eficiência e robustez do método CFO, agora vista com mais clareza, foram computados os tempos por meio da equação iconal (Figura 7.25 (a)) e pelo método CFO (Figura 7.25 (b)) e feita a migração da seção AN (Figura 7.26).

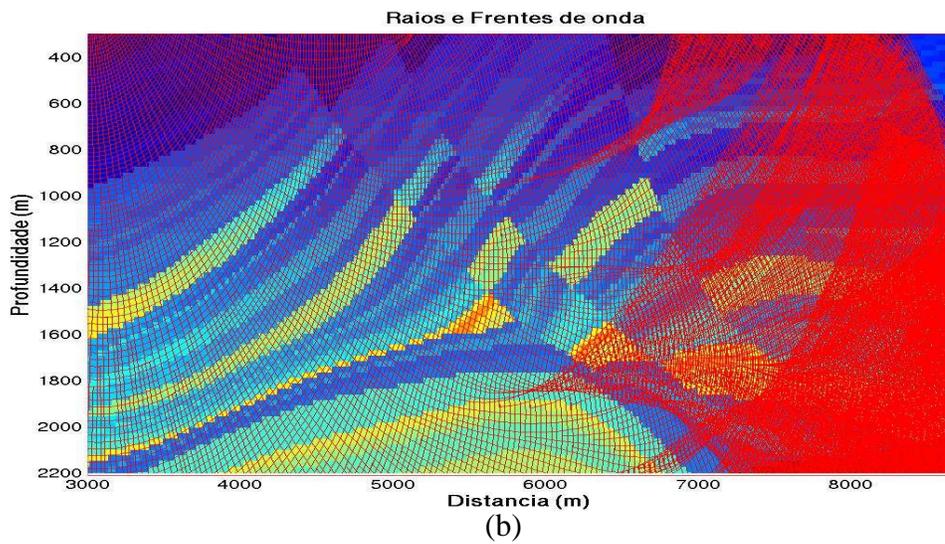
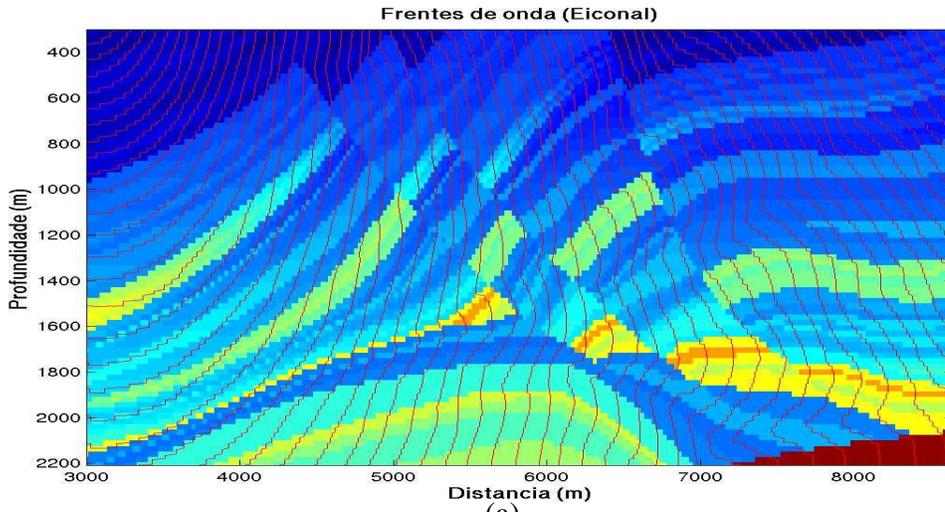


Figura 7.25 – Modelo Marmousi coberto por frentes de onda (a) e raios e frentes de onda (b).

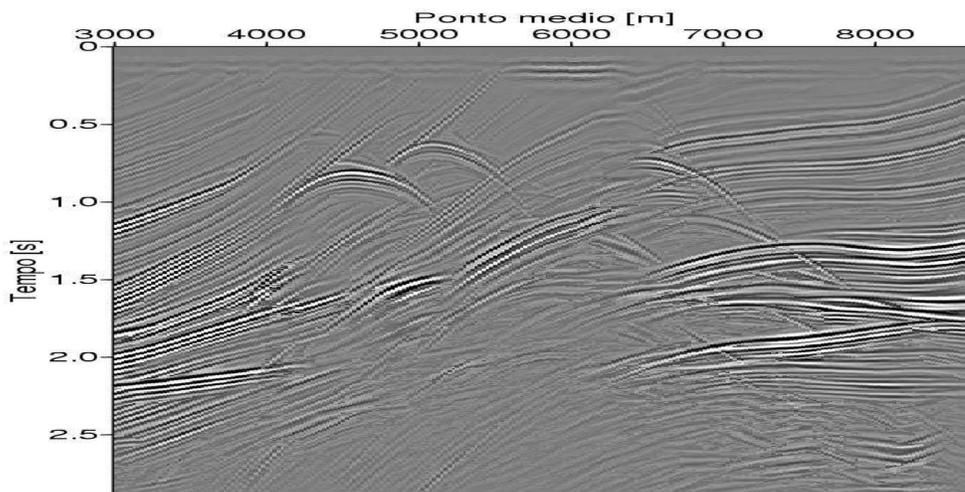
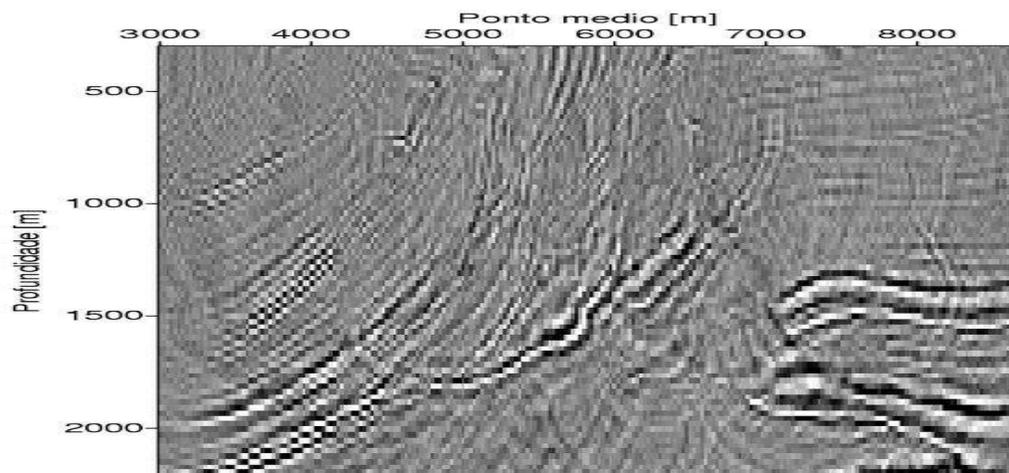
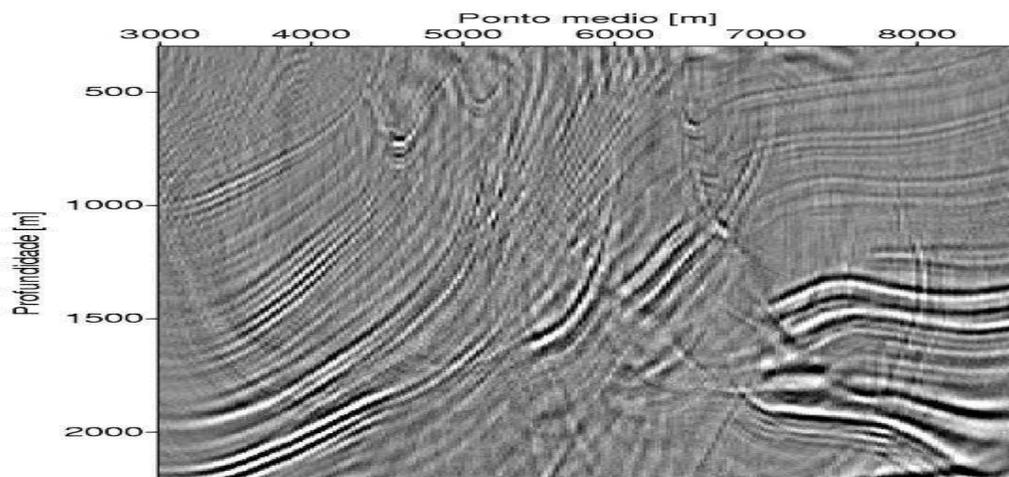


Figura 7.26 – Seção sísmica afastamento nulo simulada pelo empilhamento SRC.



(a)



(b)

Figura 7.27 – Migração em profundidade da seção AN (Figura 7.26) pelo método convencional Kirchhoff usando os tempos obtidos pela equação iconal (a) e pelo método CFO (b).

A zona alvo de migração possui a seguinte extensão:  $3000 \leq x \leq 8650m$  e  $300 \leq z \leq 2210$  m. Sendo a velocidade mínima do meio igual a  $1500$  m/s e a frequência do sinal  $40$  Hz, então, de acordo com o critério de discretização espacial, visto na seção 7.1.1 do capítulo 7, o intervalo de discretização escolhido para a malha alvo de migração é, nas direções x e z, dado por:  $\Delta x = 12.5m$  e  $\Delta z = 6.0m$ .

As Figuras 7.27 (a) e (b) mostram as seções migradas em profundidade pelo método convencional de migração Kirchhoff. Vê-se claramente uma melhora na resolução da imagem obtida quando computados os tempos de trânsito usando o método CFO. Como visto no capítulo 3 desta tese, o uso do critério de densidade de raios permite o aumento da densidade de raios em

zonas de sombra, e com isso uma boa precisão nos tempos de trânsito, proporcionando uma boa definição nos refletores sísmicos migrados e assim uma melhor resolução na imagem migrada de subsuperfície. Foram considerados apenas os tempos referentes às primeiras chegadas apenas para a migração.

### **7.2.2 Migração pré-empilhamento pelos métodos convencional Kirchhoff e CRS-PSDM**

A Figura 7.27 (b) e a Figura 7.28 (a) mostram os resultados da migração em profundidade da seção simulada AN (Figura 7.26), obtidas pelo método convencional Kirchhoff e CRS-PSDM, respectivamente. As imagens mostram-se semelhantes quanto à definição dos refletores sísmicos e resolução das imagens.

Nas Figuras 7.28 (b) e (c) tem-se os resultados da migração pré-empilhamento do dado de entrada pelos métodos convencional Kirchhoff e CRS-PSDM, respectivamente. A seção migrada pelo método Kirchhoff apresenta uma melhor definição nos refletores sísmicos comparada à seção obtida pelo método CRS-PSDM, entretanto, pode-se notar a presença de artefatos, assumindo a forma vertical, presentes na parte central e inferior da Figura (retângulo vermelho), comprometendo assim a resolução da mesma nesta região. Estes artefatos podem ser vistos, porém com menos intensidade, no resultado da migração pré-empilhamento (Figura 7.28 (c)) pelo método CRS-PSDM (retângulo vermelho).

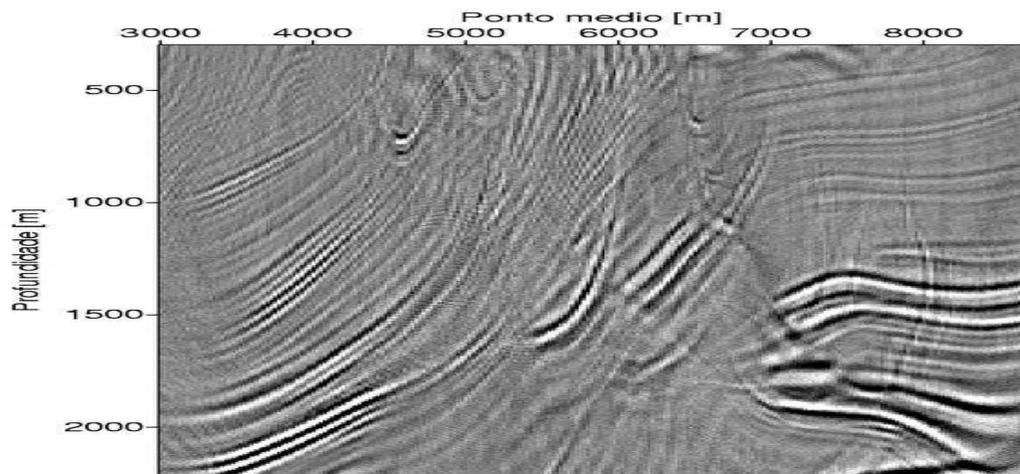
Comparando agora os resultados da migração pré-empilhamento (Figura 7.28 (c)) e pós-empilhamento (Figura 7.28 (a)) pelo método CRS-PSDM, vê-se uma pequena melhora na definição dos refletores sísmicos obtidos pela migração pré-empilhamento, pois estes apresentam-se melhor definidos, por exemplo, na parte superior da figura (setas de cor vermelha).

Como mencionado anteriormente e finalizando esta seção, será feita uma análise com respeito ao tempo computacional gasto no procedimento da migração pré-empilhamento. Deve-se enfatizar que para os resultados da migração foram considerados apenas os tempos referentes às primeiras chegadas apenas. Primeiramente, deve-se levar em conta as informações à priori, necessárias aos métodos de migração aplicados nesta tese. Por exemplo, para o método convencional de migração Kirchhoff, apenas o modelo de velocidade é necessário para que sejam obtidas as trajetórias de empilhamento, porém, para o método CRS-PSDM, além do

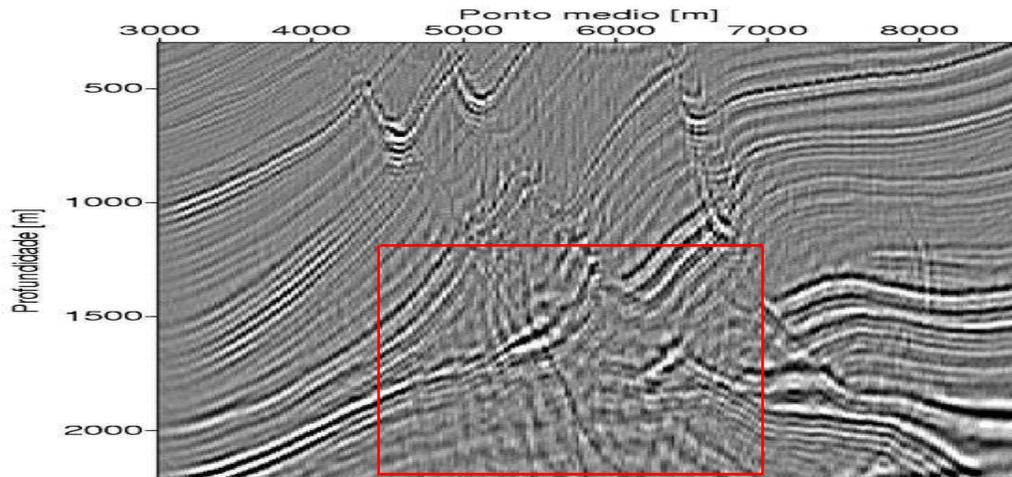
modelo de velocidade, são também necessárias, as seções dos parâmetros cinemáticos resultantes do empilhamento SRC para a construção da superfície (ou trajetória) de empilhamento. Portanto, está evidente a inclusão do tempo computacional de processamento do empilhamento SRC. Para o modelo 1 (modelo simples), o tempo computacional gasto no processamento SRC foi de aproximadamente 12 *hs*, enquanto que para o modelo 2 (dados Marmousi), o tempo foi de aproximadamente 38 *hs*, considerando-se uma máquina com as seguintes configurações: PC-Pentium 4, 2.4 *Mhz*, com 1.24 *GB* de memória Ram. Desta forma, considerando-se o modelo 1, o tempo computacional gasto para migrar 10 seções pelo método convencional Kirchhoff foi de aproximadamente 28*hs*, enquanto que pelo método CRS-PSDM o tempo foi de aproximadamente 15*hs* (12*hs* para o processamento SRC e 1.5*hs* para a migração). Para o modelo Marmousi, o tempo computacional gasto na migração pelo método convencional Kirchhoff foi de aproximadamente 24*hs*, enquanto que pelo método CRS-PSDM o tempo foi de 40.30*hs* (38*hs* para o processamento SRC e 2.30*hs* para a migração). Esta diferença considerável entre os tempos se dá devido à complexidade geológica do modelo Marmousi, tornando lento o processo de determinação e otimização dos parâmetros.

Semelhantemente ao procedimento feito para o modelo simples, com respeito ao uso das múltiplas chegadas na migração, agora, considerando-se o modelo Marmousi, foram geradas as imagens migradas, pelo método CRS-PSDM, considerando-se as chegadas posteriores, isto é, segundas e terceiras chegadas, e obtida uma imagem correspondente à soma (ou empilhamento) das imagens migradas.

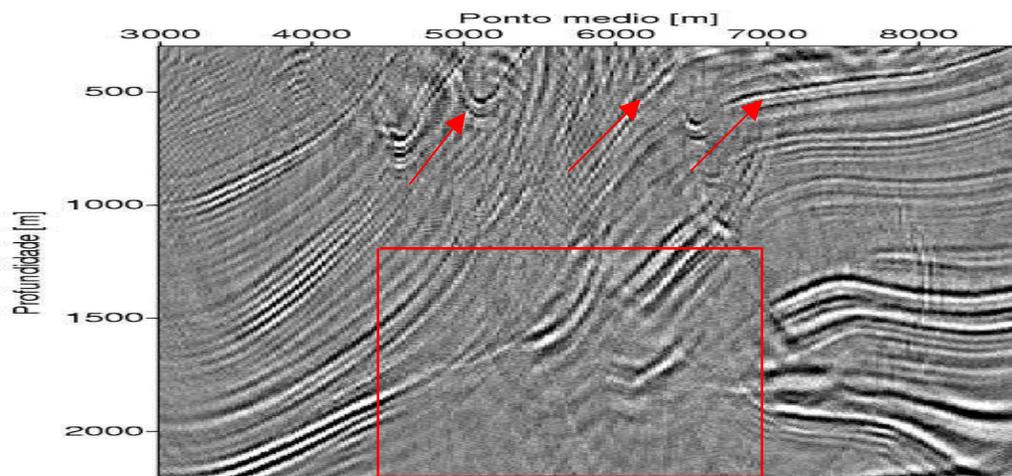
As Figuras (7.29) e (7.30) mostram, respectivamente, o resultado da migração considerando-se os tempos de trânsito das primeiras chegadas apenas (Figura 7.29) e a imagem obtida (Figura 7.30) como soma das imagens migradas utilizando-se as chegadas posteriores. Ambas as imagens são semelhantes, e este resultado já era esperado, pois o modelo Marmousi, apesar de sua complexidade geológica, possui suas camadas dispostas em ordem crescente com relação à velocidade nas mesmas, não apresentando, portanto, fortes heterogeneidades de modo a permitir triplicações nas frentes de onda computadas. Por esta razão, os resultados a seguir, semelhantes aos anteriores, são obtidos considerando-se apenas os tempos correspondentes às primeiras chegada apenas.



(a)



(b)



(c)

Figura 7.28 – Migração em profundidade da seção AN (Figura 7.26) pelo método CRS-PSDM (a). Migração em profundidade pré-empilhamento pelos métodos convencional Kirchhoff (b) e CRS-PSDM (c).

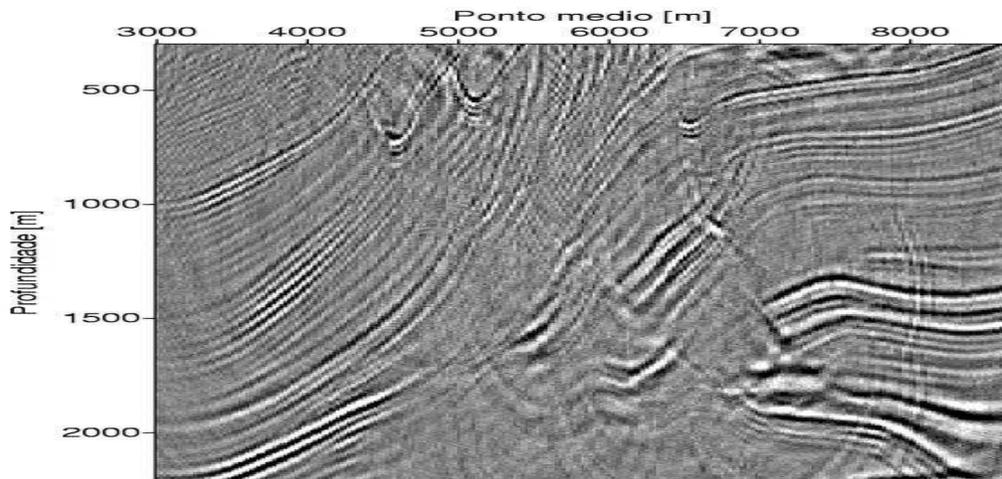


Figura 7.29 – Migração pré-empilhamento pelo método CRS-PSDM. Foram utilizados os tempos de trânsito correspondentes às primeiras chegadas apenas.

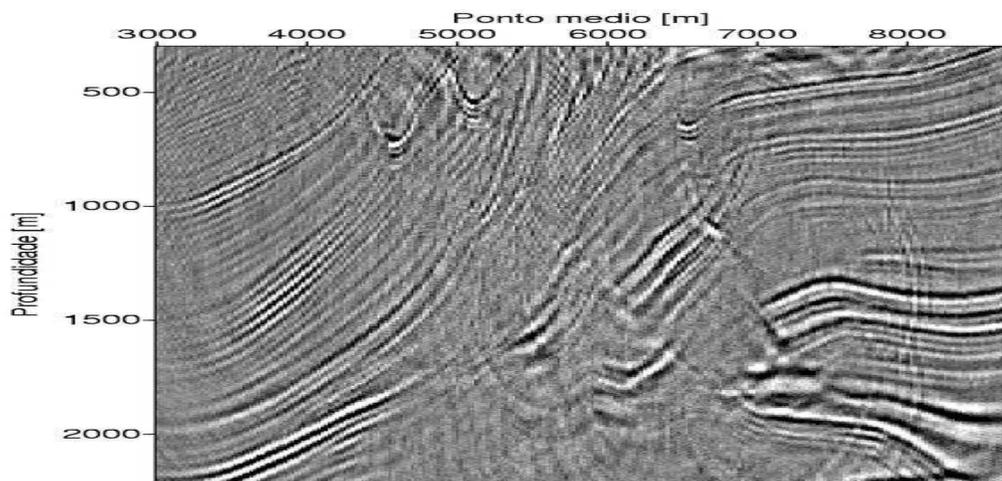


Figura 7.30 – Migração pré-empilhamento pelo método CRS-PSDM. Imagem obtida a partir da soma (ou empilhamento) das imagens migradas, considerando-se as chegadas posteriores.

O modelo de velocidade constitui um dos pontos críticos para a migração em profundidade, tornando-se uma tarefa muito difícil sua determinação com precisão. Como consequência deste fato, a imagem migrada em profundidade nunca representa uma imagem verdadeira, isto é, com os refletores sísmicos posicionados corretamente. Desta forma, torna-se necessário fazer uma análise da sensibilidade do método de migração ao modelo de velocidade. Com este propósito, e como último experimento numérico realizado, são feitos alguns testes verificando o comportamento do método CRS-PSDM a uma dada variação no modelo de velocidade, o qual será visto na seção seguinte.

### 7.2.3 Sensibilidade do método CRS-PSDM ao modelo de velocidade

Este último experimento consiste em verificar a sensibilidade do método CRS-PSDM a uma dada perturbação atribuída ao modelo de velocidade durante a migração pré-empilhamento do dado. Em outras palavras, a intenção é verificar como a propagação do erro cometido, devido o uso do modelo errado de velocidade, afeta a resolução da imagem migrada em profundidade.

Primeiramente, foi considerado o modelo simples, onde a velocidade em cada ponto do modelo sofreu um acréscimo de 5% e feita a migração pré-empilhamento do dado de entrada pelos dois métodos de migração. Obviamente, os refletores sísmicos nas imagens migradas não estão em suas posições corretas em profundidades em virtude de uma imprecisão no modelo de velocidade. As Figuras (7.31) e (7.32) mostram os resultados das seções migradas pelos métodos: convencional Kirchhoff e CRS-PSDM, respectivamente, juntamente com a geometria do modelo (Linhas vermelhas) superposta aos refletores. Pode-se ver que o segundo refletor, por exemplo, encontra-se melhor definido no resultado da migração pelo método convencional Kirchhoff (Figura 7.31), no entanto, o primeiro refletor sofre um efeito de “estiramento” em sua parte superior (seta branca), não ocorrendo tal efeito na seção migrada pelo método CRS-PSDM (Figura 7.32). Em seguida, foi atribuído um acréscimo de 10% ao modelo de velocidade e feita a migração, cujos resultados pelos dois métodos, seguindo a mesma ordem, são mostrados pelas Figuras (7.33) e (7.34). Pode-se ver claramente um aumento considerável em tal efeito, afetando assim a continuidade do refletor (Figura 7.33), quando da migração pelo método convencional Kirchhoff, não sendo presente no resultado obtido pelo método CRS-PSDM (Figura 7.34).

Finalmente, foi realizado o mesmo procedimento, agora com o modelo 2 (Marmousi) e analisada a sensibilidade de ambos os métodos de migração a uma dada perturbação atribuída ao modelo de velocidade. Como primeiro teste, foi atribuído o mesmo acréscimo de 5% no valor da velocidade e feita a migração do dado pelos dois métodos.

As Figuras 7.35 e 7.36 mostram as seções migradas em profundidade pelos métodos convencional Kirchhoff e CRS-PSDM, respectivamente. Comparando-se, inicialmente as seções migradas, resultantes da migração pré-empilhamento pelo método convencional Kirchhoff, usando o modelo de velocidade verdadeiro (Figura 7.28 (b)) e perturbado (Figura 7.33), nota-se que há um acréscimo nos artefatos presentes na seção migrada da Figura (7.33), comparada à seção da Figura 7.28 (b) (retângulo vermelho), devido o uso de um modelo de velocidade impreciso na migração. Comparando agora o resultado da seção migrada da Figura (7.35) com o da Figura (7.36), migrada pelo método CRS-PSDM, nota-se claramente neste último resultado uma existência mínima destes artefatos (retângulo vermelho) quando comparados à primeira seção.

Como último teste, foi atribuído agora ao modelo de velocidade um acréscimo alto de 15% no valor da velocidade e migrado o dado de entrada pelos métodos: convencional Kirchhoff e CRS-PSDM, sendo os resultados vistos pelas Figuras (7.37) e (7.38), respectivamente. É evidente, na seção migrada da Figura 7.37, a presença de um nível elevado nos artefatos (retângulo vermelho), causados pelo operador de Kirchhoff, comprometendo assim a resolução da imagem migrada de subsuperfície, sendo menos perceptível no resultado da seção migrada pelo método CRS-PSDM, Figura (7.38). Além destes artefatos, pode-se notar também uma espécie de “efeito de focagem” sofrido pelos pontos difratores, indicados pelas setas em vermelho, que são mais intensos nos resultados obtidos pelo método convencional Kirchhoff comparados com os obtidos pelo método CRS-PSDM.

Verifica-se que na migração pré-empilhamento, o operador de migração Kirchhoff permite que o erro cometido na determinação dos tempos de trânsito, devido a uma imprecisão no modelo de velocidade, se propague ao longo de cada seção afastamento comum que compõe o dado de cobertura múltipla, sendo visto na forma de artefatos ou efeitos de “focagem” como mostrado nos resultados. Em outras palavras, pelo fato deste método de migração apresentar uma dependência maior do modelo de velocidade, exigindo-se que os tempos sejam computados ao longo de duas trajetórias de raios, o erro cometido é teoricamente “duplicado”. Contrário a este

método, o método CRS-PSDM, por exigir o cálculo dos tempos de trânsito ao longo de uma única trajetória apenas, permite que se tenha uma porcentagem de erro menor comparada ao método convencional Kirchhoff.

Portanto, uma importante característica apresentada pelo método CRS-PSDM é que, mesmo sem o modelo de velocidade verdadeiro de migração, a imagem obtida dos refletores sísmicos em profundidade pode apresentar uma boa resolução devido o operador SRC não depender deste modelo de velocidade.

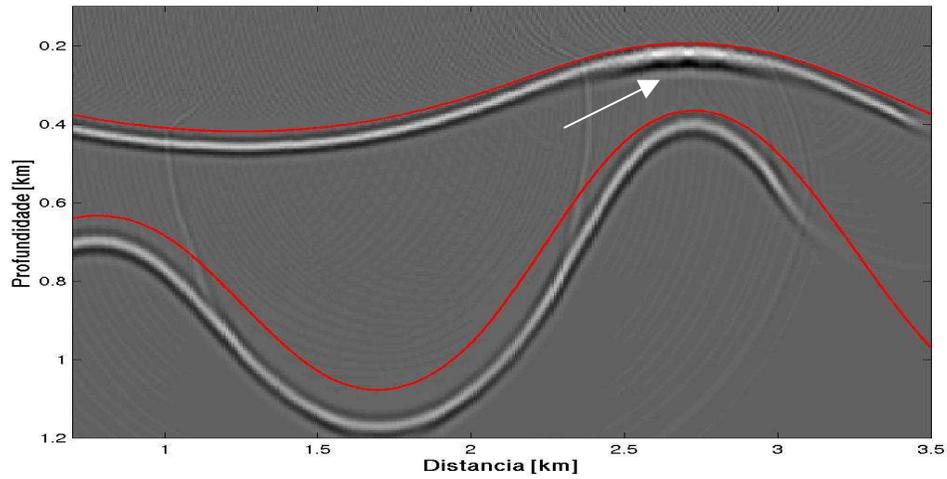


Figura 7.31 – Modelo simples. Migração em profundidade pré-empilhamento pelo método convencional de migração Kirchhoff. O modelo de velocidade sofreu um acréscimo de 5% no valor da velocidade.

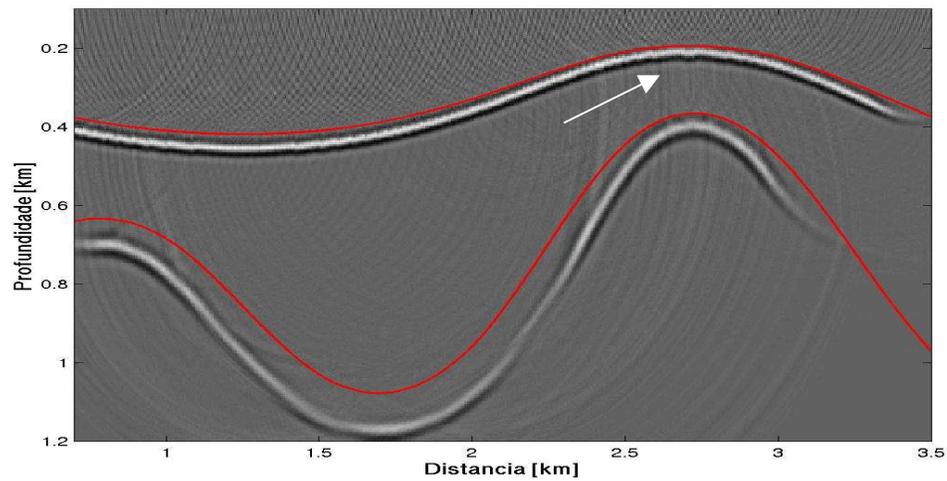


Figura 7.32 – Modelo simples. Migração em profundidade pré-empilhamento pelo método CRS-PSDM. O modelo de velocidade sofreu um acréscimo de 5% no valor da velocidade.

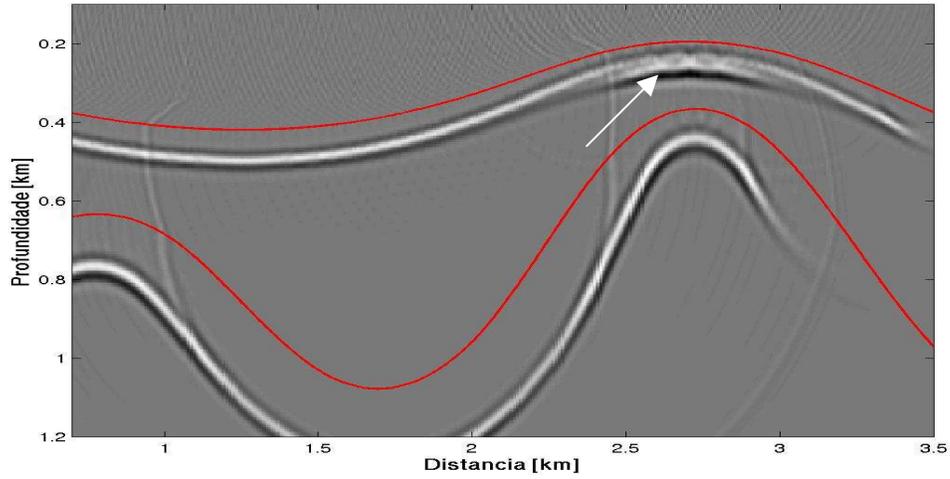


Figura 7.33 – Modelo simples. Migração em profundidade pré-empilhamento pelo método convencional de migração Kirchhoff. O modelo de velocidade sofreu um acréscimo de 10% no valor da velocidade.

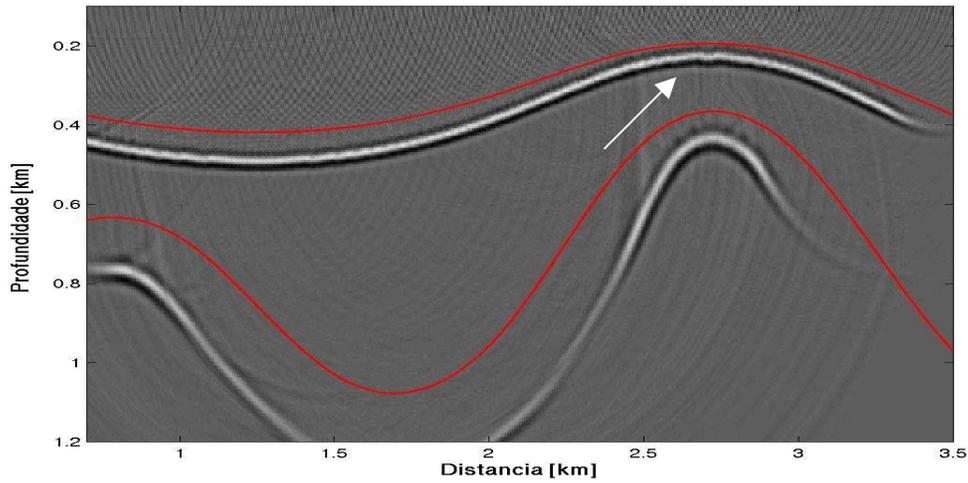


Figura 7.34 – Modelo simples. Migração em profundidade pré-empilhamento pelo método CRS-PSDM. O modelo de velocidade sofreu um acréscimo de 10% no valor da velocidade.

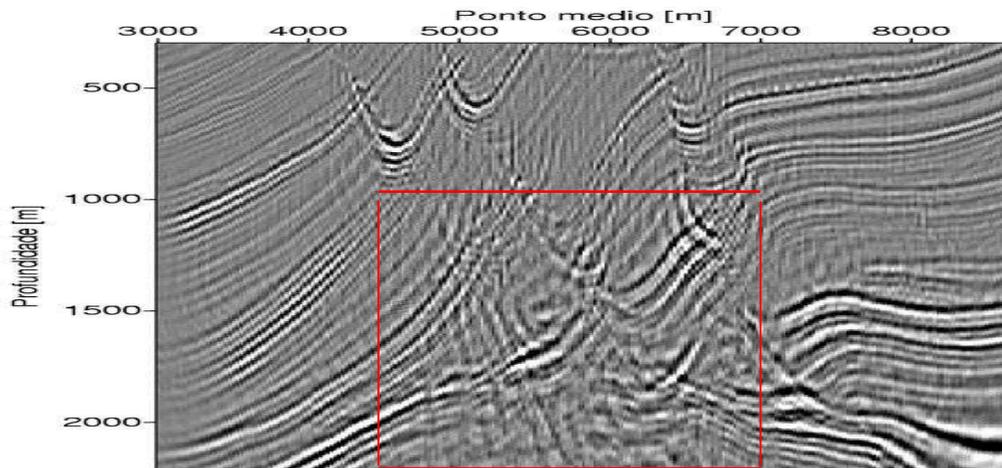


Figura 7.35 – Modelo Marmousi. Migração em profundidade pré-empilhamento pelo método convencional de migração Kirchhoff. O modelo de velocidade sofreu um acréscimo de 5% no valor da velocidade.

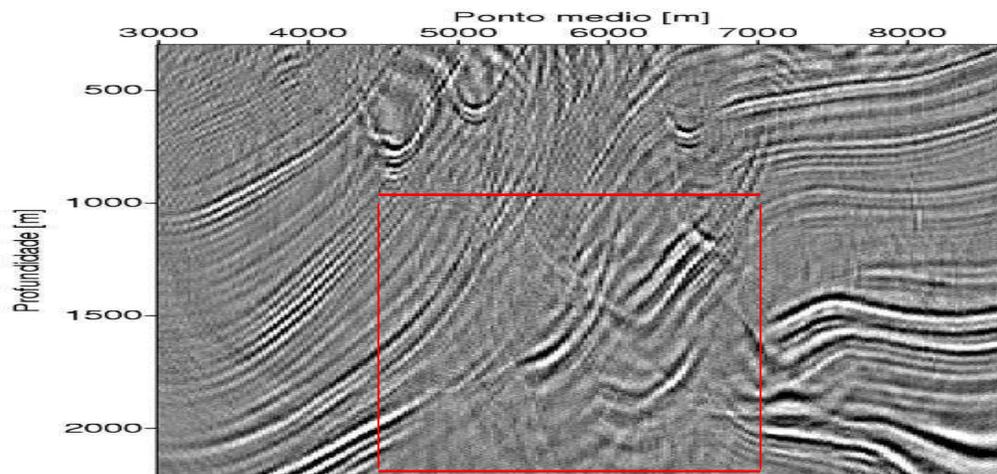


Figura 7.36 – Modelo Marmousi. Migração em profundidade pré-empilhamento pelo método CRS-PSDM. O modelo de velocidade sofreu um acréscimo de 5% no valor da velocidade.

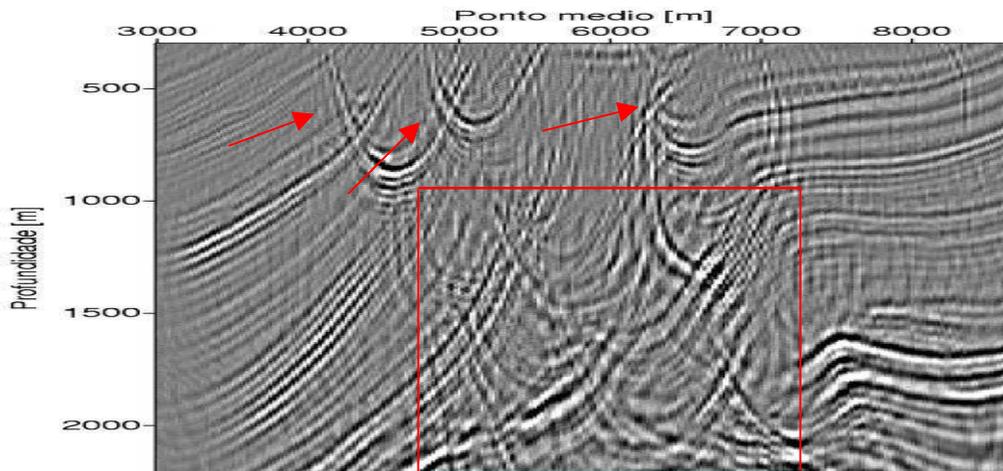


Figura 7.37 – Modelo Marmousi. Migração em profundidade pré-empilhamento pelo método convencional de migração Kirchhoff. O modelo de velocidade sofreu um acréscimo de 15% no valor da velocidade.

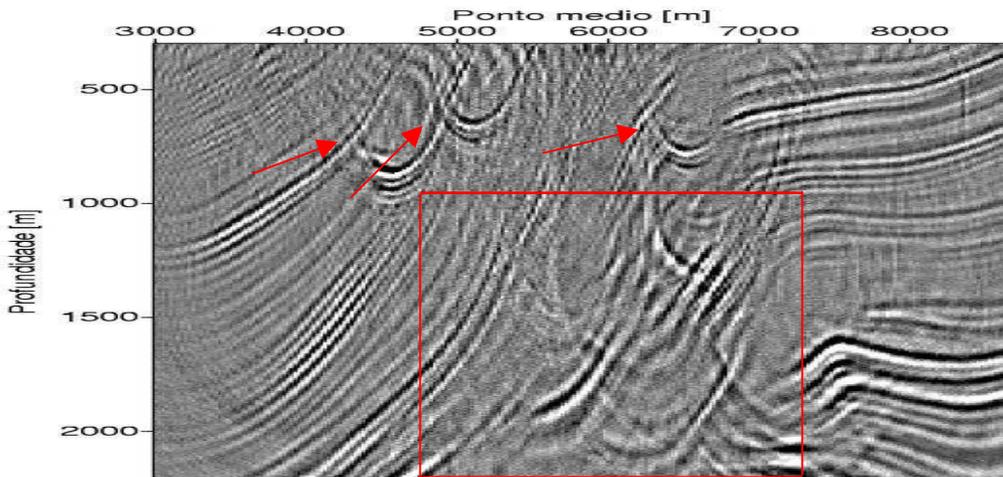


Figura 7.38 – Modelo Marmousi. Migração em profundidade pré-empilhamento pelo método CRS-PSDM. O modelo de velocidade sofreu um acréscimo de 15% no valor da velocidade.

## 8 – CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

Neste trabalho são apresentadas as conclusões obtidas resultantes da aplicação do método de migração CRS-PSDM a dados sintéticos com uma estrutura geológica simples e complexa. Também são apresentadas algumas perspectivas futuras podendo ser consideradas como de interesse para futuros trabalhos.

- **Conclusões**

Primeiramente, vistos como pré-requisitos para os capítulos subseqüentes, foram apresentados uma revisão teórica sobre os fundamentos matemáticos da teoria do raio para meios bidimensionais (capítulo 2) e o método da construção de frentes de onda (capítulo 3), visto como uma nova alternativa aos métodos tradicionais de determinação de tempos de trânsito e amplitudes. Ainda neste capítulo foram apresentados os principais critérios de densidade de raios permitindo uma boa amostragem nas zonas de sombras e com isso uma melhor precisão na determinação dos tempos de trânsito, sendo este capítulo finalizado com alguns exemplos numéricos justificando a eficácia e acurácia do método.

Em seguida, foram vistos os capítulos referentes às técnicas de imageamento sísmico tais como a migração tipo Kirchhoff (capítulo 4) e o método de empilhamento por superfície de reflexão comum (SRC) (capítulo 5).

No capítulo 4, foram apresentados os fundamentos teóricos da migração tipo Kirchhoff em profundidade, revendo os principais conceitos relacionados ao processo de empilhamento de difração e finalizando o capítulo com a apresentação da integral do operador convencional de migração Kirchhoff juntamente com o fluxograma exibindo todos os passos que compõem o processo de migração cinemática tipo Kirchhoff.

No capítulo 5 foi apresentada uma breve revisão teórica do método SRC, visto como uma nova alternativa aos métodos tradicionais de empilhamento para simulação de seções de afastamento-nulo de alta resolução. Neste capítulo foram apresentados os operadores de empilhamento SRC e SDC, sendo usados na simulação de tempos de reflexão e difração, respectivamente, para um dado ponto refletor. O capítulo foi finalizado com uma descrição do algoritmo e apresentação do fluxograma exibindo todos os passos necessários na determinação

dos atributos sísmicos, derivados do empilhamento SRC, juntamente com a seção simulada afastamento nulo.

Em seguida, constituindo-se no capítulo principal da tese (capítulo 6) e vista como uma nova alternativa ao imageamento sísmico de refletores em profundidade, foi apresentada uma nova estratégia, denominado “método CRS-PSDM” que usa os resultados obtidos pelo método SRC, juntamente com o modelo de velocidade, para fazer a migração pré-empilhamento do dado sísmico de múltipla cobertura. Foi visto neste capítulo que os operadores SRC e SDC podem ser usados para a obtenção de uma imagem de boa qualidade de subsuperfície, sendo que este último operador SDC constitui-se numa boa aproximação do operador convencional de migração Kirchhoff para migrar o dado sísmico. Ainda neste capítulo foi dada uma descrição do algoritmo do método CRS-PSDM juntamente com o fluxograma, ilustrando todo o processo. Finalizando o capítulo, foi apresentado um procedimento empírico delimitando a abertura da migração.

No capítulo 7, Foi mostrada a aplicação do método CRS-PSDM a dois modelos sintéticos: um geologicamente simples (constituído por três camadas separadas por interfaces curvas e suaves), e o outro apresentando uma estrutura geológica complexa e realística (modelo Marmousi).

Inicialmente, (com o modelo simples) para mostrar a eficácia do método CFO, foi feita a migração pós-empilhamento pelo método convencional Kirchhoff, comparando o resultado da migração com aquele obtido usando-se a equação iconal para o cálculo dos tempos de trânsito.

Em seguida, foi feita a migração da seção AN pelo método CRS-PSDM e considerando-se as curvas de empilhamento (operadores SRC e SDC) total e restrita, isto é, considerando-se todos os traços ou apenas um número determinado de traços para o empilhamento. Os resultados das seções migradas foram comparados entre si e a migração feita usando o operador SRC, restrito a um dado intervalo, proporcionou uma melhor definição dos refletores e boa resolução na imagem. Este resultado foi comparado com a seção migrada pós-empilhamento pelo método convencional Kirchhoff, e ambas as imagens mostraram-se aproximadas.

Como último experimento com o modelo simples, foi realizada a migração pré-empilhamento do dado de entrada pelos dois métodos mencionados anteriormente, considerando a presença e ausência de ruído no mesmo. No primeiro caso, o método convencional Kirchhoff apresentou um melhor resultado, comparado ao método CRS-PSDM, proporcionando uma melhor resolução e definição dos refletores sísmicos na imagem migrada. Entretanto, no segundo

caso, considerando-se agora a presença de ruído nos dados, o mesmo experimento foi realizado obtendo-se um melhor resultado pelo método CRS-PSDM que proporcionou uma melhor definição e resolução na imagem migrada. Neste caso, o operador de migração Kirchhoff mostrou-se mais instável à presença de ruído, permitindo uma contaminação elevada na imagem migrada. O próximo passo foi testar o algoritmo do método CRS-PSDM no dado Marmousi. Desta forma, similarmente ao caso anterior, foi feita a migração pós-empilhamento da seção AN pelo método convencional Kirchhoff, considerando-se os tempos de trânsito obtidos pela equação iconal e pelo método CFO. Agora, diante desta alta complexidade geológica no modelo, o último método proporcionou uma melhor definição nos refletores migrados.

Em seguida, foi realizada a migração pré-empilhamento do dado de entrada, pelo método convencional Kirchhoff e CRS-PSDM, onde o primeiro método proporcionou uma melhor definição nos refletores sísmicos comparada ao método CRS-PSDM. Entretanto, o uso do operador de migração Kirchhoff provocou a existência de artefatos (não causados pelo método CRS-PSDM), assumindo a forma vertical na imagem, comprometendo assim a resolução da mesma.

Finalmente, como último experimento, foram considerados os dois modelos: simples e Marmousi, visando agora analisar a sensibilidade do método CRS-PSDM ao modelo de velocidade, foram atribuídos dois acréscimos de 5% e 15% ao modelo de velocidade e feita a migração pré-empilhamento do dado pelos dois métodos. Verificou-se com os resultados migrados que a migração feita com o operador convencional Kirchhoff permitiu um aumento considerável nos artefatos além de outros efeitos como, por exemplo, “estiramento” no refletor, no modelo simples, ou “focagem” nos pontos difratores, no modelo Marmousi, comprometendo assim a resolução da imagem. Em outras palavras, na migração pré-empilhamento, o operador de migração Kirchhoff permite que o erro cometido na determinação dos tempos de trânsito, devido a uma imprecisão no modelo de velocidade, se propague ao longo de cada seção afastamento comum que compõe o dado de cobertura múltipla.

Portanto, as vantagens apresentadas pelo método CRS-PSDM sob o ponto de vista da qualidade dos resultados foram as seguintes:

- O método CRS-PSDM mostrou-se *estável* à presença de ruídos nos dados, permitindo a obtenção de uma imagem migrada com uma resolução melhor comparada à imagem

migrada obtida pelo método convencional Kirchhoff, que se mostrou instável à presença de ruídos, permitindo assim que a imagem apresentasse um grau de contaminação maior.

- O método CRS-PSDM mostrou-se mais *robusto* diante de uma imprecisão no modelo de velocidade comparado ao método convencional Kirchhoff, pois permitiu que a imagem migrada apresentasse menos artefatos, além de outros efeitos, comparada à imagem migrada pelo método convencional.
- Uma vez feita uma análise dos parâmetros SRC, a migração CRS-PSDM é muito mais econômica computacionalmente do que uma migração Kirchhoff convencional, permitindo assim uma construção rápida de uma imagem na profundidade.

Portanto, este trabalho apresenta uma grande praticidade, pois os dados reais além de apresentarem ruídos em alto grau, trazem consigo imprecisões com relação às propriedades físicas do meio, prejudicando desta forma os resultados obtidos.

- **Perspectivas**

Neste item, são propostas algumas sugestões para futuras pesquisas visando uma melhora nos resultados obtidos neste trabalho.

- Considerando-se que neste trabalho foi utilizado um procedimento “empírico” para limitação da abertura de migração, é proposto como um bom refinamento deste procedimento, a implementação da zona de Fresnel, visando o melhoramento na resolução da imagem migrada em profundidade.
- Utilização de uma função peso adequada no operador de migração CRS-PSDM para migrar o dado preservando a amplitude.
- Tendo em vista o bom desempenho do algoritmo CRS-PSDM diante de dados com ruído, é proposto a aplicação do algoritmo CRS-PSDM em dados reais visando o comportamento do mesmo diante de um dado contendo um alto grau de ruído.

- Tendo em vista a grande vantagem do método CFO na computação das chegadas posteriores e a importância destas no imageamento de refletores sísmicos em modelos geologicamente complexos, é proposta a aplicação do método CRS-PSDM a dados reais, explorando assim o uso das múltiplas chegadas.

Obs: Neste trabalho, e como pôde ser visto na descrição do algoritmo do método CRS-PSDM, o dado de entrada era composto por seções afastamento comum, todas contendo apenas, por hipótese, reflexões primárias. Entretanto, um dado real, como o próprio nome sugere, traz consigo informações de todos os tipos de eventos sísmicos, isto é, reflexões, difrações, múltiplas, etc..., presentes em subsuperfície. E como já mencionado na tese, todo e qualquer evento sísmico, presente no dado real, é tratado como sendo uma reflexão primária. Portanto, uma condição necessária para a aplicação do método CRS-PSDM a dados reais é que o dado seja submetido a uma etapa anterior, na qual sejam suprimidos aqueles eventos indesejáveis, como por exemplo, as múltiplas.

## REFERÊNCIAS

AKI, K.; RICHARDS, P. G. **Quantitative seismology: theory and methods**. New York: W. H. Freeman and Company, 1980. v. 1.

BARD, Y. **Nonlinear parameter estimation**. New York: Academic Press, 1974. 302p.

BERGLER, S. **Common-reflection-surface stack for common offset – theory and application**. Karlsruhe: University of Karlsruhe, 2001. Dissertation (Master).

BERGLER, S.; MARCHETTI, P. H. P.; CRISTINI, A.; CARDONE, G. 3D Common-reflection-surface stack and kinematic wavefield attributes. **The Leading Edge**, v. 21, n.10, p. 1010-1015, 2002.

BIRGIN, E. G. et. al. Restricted optimization: a clue to a fast and accurate implementation of the Common Reflection Surface Stack method. **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, p.143-155, 1999.

BLEISTEIN, N. **Mathematics methods of wave phenomena**. London: Academic Press, 1984.

BLEISTEIN, N. **Two-and-one-half dimensional in-plane wave propagation: Geophysical Prospecting**, v. 34, p. 686-703, 1986.

BLEISTEIN, N. On the imaging of reflectors in the earth. **Geophysics**, v. 52, p. 931 – 942, 1987.

BLEISTEIN, N.; COHEN, J.; STOCKWELL, Jr. J. **Mathematic of multidimensional seismic migration, imaging and inversion**: [S.l.]: Springer, 2001.

BRONSTEIN, I. N.; SEMENDJAJEW, K. A. **Taschenbuch der Mathematik**: [S.l.]: B.G.Teubner Verlagsgesellschaft, 1991.

BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D.; REYNOLDS, A. C. **Numerical analysis**. 2. ed. Prindle, Weber & Schmidt, 1981.

ČERVENÝ, V. The application of ray tracing to the numerical modeling of seismic wavefields in complex structures. In: DOHR, G. P. (Ed.). **Seismic shear waves**. London: Geophysical Press, 1985. Parte A: Theory. p.1-124 (Handbook of Geophysical Exploration).

ČERVENÝ, V. **Ray methods for three-dimensional seismic modeling**. Norwegian Institute for Technology, 1987. (Petroleum Industry Course)

ČERVENÝ, V. **Seismic ray theory**. Cambridge: University Press, 2001.

ČERVENÝ, V.; MOLOTKOV, I.; PŠENČIK, I. **Ray method in seismology**. Karlova: Univerzita Praha, 1977.

ČERVENÝ, V.; PŠENČIK, I. **SEIS88, Ray tracing program package**. [S.l.:s.n.], 1988.

CLAERBOUT, J. F. **Basic earth imaging**: Stanford: Exploration Project, United States of America. [S.l.:s.n.], 1993.

de BAZELAIRE, E. Normal moveout revisited\_inhomogeneous media and curved interfaces. In: ANNUAL INTERNAT. MTG., 56., 1986. **Expanded Abstracts** [S.l.]: SOC. EXPL. GEOPHYS, 1986. Session POS2.4.

GARABITO, G. **Empilhamento sísmico por superfície de reflexão comum**: um novo algoritmo usando otimização global e local. Belém: Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 2001. Tese (Doutorado em geofísica).

GARABITO, G. et al. **Common reflection surface stack: a new parameter search strategy by global optimization**: Expanded abstracts. Texas: SEG, 2001.

GARABITO, G.; CRUZ, J. C.; LUZ, S., L. Depth mapping of stacked amplitudes along an attribute based ZO stacking operator. In: INTERNATIONAL EXPOSITION AND ANNUAL MEETING, 76., Louisiana, 2006. **Expanded Abstracts**. Louisiana: Society of Exploration Geophysicists, 2006.

GELCHINSKY, B. The common reflection element (CRE) method (non-uniform asymmetric multifold system). In: ASEG/SEG CONFERENCE, 19., Adelaide, 1988. **Extended Abstracts**. Adelaide: ASEG/SEG, 1988. p. 71-75.

GEO TRAIN, S.; BRAC, J. Can we image complex structures with finite-difference traveltimes?: In: ANN. INT. MTG., 61., 1991. **Expanded Abstracts**. [S.l.]: Soc. Expl. Geoph. 1991. p. 1110-1113.

GILL, P. E.; MURRAY, W.; WRIGHT, M.H. **Practical optimization**. New York: Academic Press, Inc. 1981. 401p.

GRAY, S. H. et al. Seismic migration problems and solutions. **Geophysics**, v. 66, p. 1622-1640, 2001.

HALE, D. **Dip moveout processing**: [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1991. (Course Notes Series, 5).

HANITZSCH, C.; SCHLEICHER, J.; HUBRAL, P. True-amplitude migration of 2D synthetic data, **Geophysical Prospecting**, v. 42, p. 445 – 462, 1992.

HEILMANN, Z. Extensions of the Common-reflection-surface stack considering the surface topography and the near-surface velocity gradient. In Ext. Abstr. INTERNATIONAL CONGRESS, SOC. BRAS. GEOFÍSICA, 8. Rio de Janeiro, 2003. **Ext. Abstr.** Rio de Janeiro: SBGf, 2003.

HERTWECK, T. **Practical aspects of the unified approach to seismic imaging**. Karlsruhe: University of Karlsruhe, 2000. Thesis (PhD).

HERTWECK, T.; JÄGER, C. Various aspects of Kirchhoff migration. In: ANNUAL WIT REPORT, **Short note**. [S.l.:s.n.], 2002. p.133-142.

HERTWECK, T. et al. Aperture effects in 2.5D Kirchhoff migration: a geometrical explanation. **Geophysics**, v. 68, p. 1673-1684, 2003.

HÖCHT, G.; de BAZELAIRE, E.; MAJER, P.; HUBRAL, P. Seismic and optics: hyperbolic and curvatures: **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, p. 261-281, 1999.

HUBRAL, P. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth: **Geophysics**, v. 48, n.8, p. 1051-1062, 1983.

HUBRAL, P. (Ed). Macro-modeling dependent seismic reflection imaging, **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, n.3,4, 1999.

HUBRAL, P.; KREY, T. **Interval velocity from seismic reflection time measurements**. Tulsa: SEG monograph, 1980.

HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J; TYGEL, M. Three-dimensional paraxial ray properties. Parte I. Basic relations: **J. Seis. Expl.**, v.1, p. 265-279, 1992a.

HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J; TYGEL, M. Three-dimensional paraxial ray properties. Parte II. Applications: **J. Seis. Expl.**, v.1, p. 347-362, 1992b.

JÄGER, C. Minimum-aperture Kirchhoff migration by means of CRS attributes. In: CONF. EAGE., 66., 2005. **Extended Abstracts**. [S.l.]: Geosci Eng. Session F042.

JÄGER, R. **The Common Reflection Surface Stack**. Theory and Application., Germany: University of Karlsruhe, 1999. Dissertation (Master).

JÄGER, R. et al. Common-Reflection-Surface Stack: Image and attributes. **Geophysics**. V. 66 n.1: p. 97-109, 2001.

JULIAN, B. R.; GUBBINS, D. Three-dimensional seismic ray tracing: **J. Geophysics**, v. 43, p. 95-114. 1977.

KEHO, T.H.; BEYDOUN, W. B. Paraxial ray Kirchhoff migration. **Geophysics**, v. 53, p. 1540 – 1546, 1988.

KELLY, K. R. et al. Synthetic seismograms: A finite-difference approach: **Geophysics**, v. 41, n. 1, p. 2-27, 1976.

LAMBARÉ, G.; LUCIO, P. S.; HANYGA, A. Two-dimensional multivalued traveltime and amplitude maps by uniform sampling of a ray field. **Geophys. J. Int.**, v. 125, p. 584 - 598, 1996.

LUCIO, P. S., LAMBARÉ, G.; HANYGA, A. 3D multivalued traveltime and amplitude map. In: EAEG MEETG, 57., 1995, Netherlands. **Expanded Abstracts**, Netherlands: EAEG, 1995. p. 147.

MANN, J. Common-reflection-surface stack and conflicting dips. In: SEG MEETING, 71., 2001, San Antonio, **Expanded Abstracts**, [S.l.:s.n.], 2001.

MANN, J. **Extensions and applications of the Common-Reflection-Surface Stack method**. Berlin: Logos Verlag, 2002.

MANN, J. Common-reflection-surface stack: a real data example. **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, p. 301-318, 1999.

MAURCH, R. **Coherency analysis of seismic data**. Karlsruhe: University of Karlsruhe, 1999. Dissertation (Master).

MAYNE, W. H. Common reflection point horizontal data stacking techniques. **Geophysics**, v. 27, n. 6, p. 927-938, 1962.

MÜLLER, T. **The Common Reflection Surface Stack Method** - Seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model. Karlsruhe: University of Karlsruhe, 1999. Thesis (Ph.D).

NEIDELL, N.; TANER, M. Semblance and other coherency measures for multichannel data. **Geophysics**, v. 36, p. 482-497, 1971.

NEWMAN, P. Divergence effects in a layered earth: **Geophysics**, v. 38, n.3, p. 481-488, 1973.

PODVIN, P.; LECOMTE, I. Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools. **Geophys. J. Int.**, v. 105, p. 271-284, 1991.

POPOV, M. M.; PŠENČIK, I. Computation of ray amplitudes in inhomogeneous media with curved interfaces: **Studia Geophy. et Geod.**, v. 22, p. 248-258, 1978.

PORTUGAL, R. S. **Construção de imagens sísmicas em verdadeira amplitude por dados de reflexão**: formulação matemática e construção de algoritmos. Campinas. Universidade Estadual de Campinas, 2002. Tese (Doutorado em matemática aplicada).

RESHEF, M.; KOSLOFF, D. Migration of Common Shot Gathers. **Geophysics**, v. 51, p. 324-331, 1986.

SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. 3-D true-amplitude finite-offset migration. **Geophysics**, v. 58, p. 1112-1126, 1993.

SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. 3-D Parabolic and hyperbolic two-point traveltimes in 3-D media. **Geophysical Prospecting**, v. 41, p. 495-514, 1993b.

SCHLEICHER, J. Minimum apertures and Fresnel zones in migration and demigration. **Geophysics**, v. 62: p. 183-194, 1997.

SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. **Seismic true amplitude imaging**. [S.l.:s.n.], 2001. (SEG Monograph).

SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. **True-amplitude seismic imaging**. Monografia, Society of Exploration Geophysicists. Submetido, 2004.

SEM, M.; STOFFA, L. P. **Global optimization methods in geophysical inversion**. Netherlands: Elsevier Science, 1995.

SHERIF, R. E. Factors affecting seismic amplitudes. **Geophysical Prospecting**, v. 23, p. 125-138, 1975.

STRANG, G.; FIX, G. **An analysis of the finite element method**. [S.l.]: Prentice Hall, 1973.

SUN, J. Limited-aperture migration. **Geophysics**, v. 65, p. 584-595, 2000.

SUN, J. On the limited aperture migration in two dimensions: **Geophysics**, v. 63, p. 984-994, 1998.

TABTI, H.; GELIUS, L. J.; HELLMAN, T. **Fresnel aperture prestack depth migration**. First Break, v. 22, p. 39-46, 2004.

TYGEL, M. Seismic Amplitudes. **Journal of Seismic Exploration**. Special Issue, 279 p., 2001.

TYGEL, M.; SCHLEICHER, J.; HUBRAL, P.; HANTZSCH, C. Multiple weights in diffracting stack migration. **Geophysics**, v. 58, p. 1820-1830, 1993.

TYGEL, M.; SCHLEICHER, J.; HUBRAL, P. An unified approach to 3D seismic reflection imaging – Part II: Theory. **Geophysics**, v. 61, p. 759-775, 1996.

TYGEL, M. Eigenwave based multiparameter traveltime expansions. In: ANNUAL INTERNAT. MTG., SOC. EXPL. GEOPHYS., 67., 1997. **Expanded Abstracts**. [S. 1.]: SEG, 1997. p. 1770-1773.

URBAN, J. **Two-dimensional true-amplitude migration and introduction to 2.5-D case**. Belém: Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1999. Dissertação (Mestrado em geofísica).

URSIN, B. Quadratic wave front and traveltime approximations in inhomogeneous layered media curves interfaces: **Geophysics**, v. 47, n.7, p. 1012-1021, 1982.

VAN TRIER, J.; SYMES, W. W. Upwind finite-difference calculation of seismic traveltimes. In: ANN. INTERNAT. MTG., SOC. EXPL. GEOPHYS., 60., 1990. **Expanded Abstracts**. [S.1.]: SEG, 1990. p.1000-1002.

VIDALE, J. E. Finite-difference calculation of Traveletimes. **Bull. Seis. Soc. Am.**, v. 78: n. 6, p. 2062-2076, 1988.

VIETH, K. U. **Kinematic wavefield attributes in seismic imaging**. Karlsruhe: University of Karlsruhe, 2001. Thesis (PhD).

VINJE, V. A new interpolation criterion for controlling accuracy in wavefront constructing. In: MEETING OF EUR. ASSN, OF EXPL. GEOPHYS. 67., 1997. **Expanded Abstracts**. [S.1.]: ASSN, OF EXPL. GEOPHYS, 1997. p. 1723-1726.

VINJE, V.; IVERSEN, E.; GJOYSTDAL, H. Traveltime and amplitude estimation using wavefront construction: **Geophysics**, v. 58, n. 8, p. 1157-1166, 1993.

YILMAZ, O. **Seismic data analysis**. [S.l.]: Soc Exp. Geophys, 2001.

YILMAZ, O. **Seismic data processing**. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1987. (Investigations in Geophysics, 2).

ZHAO, P. An efficient computer program for wave front calculation: Computers & Geosciences. **Geophysics** v. 22, p. 239-251, 1996.