

Este exemplar corresponde a relação final  
da tese defendida por José Fernando  
Gamboa Penaloza e aprovada  
pela comissão julgadora em 10/10/03

M. Y.  
Orientador

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

## **Caracterização e Eliminação de Múltiplas pelo Método da Superfície Comum de Reflexão (CRS)**

*Autor:* ENG. FERNANDO GAMBOA

*Orientador:* PROF. DR. MARTIN TYGEL

*Co-orientador:* DR. EDUARDO FILPO

37/2003

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
DESENVOLVIMENTO DE COLEÇÕES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Caracterização e Eliminação de Múltiplas pelo Método da  
Superfície Comum de Reflexão (CRS)**

*Autor:* ENG. FERNANDO GAMBOA

*Orientador:* PROF. DR. MARTIN TYGEL

*Co-orientador:* DR. EDUARDO FILPO

Curso: Ciências e Engenharia de Petróleo

Dissertação de mestrado apresentada à Subcomissão de Pós-Graduação Interdisciplinar de Ciências e Engenharia de Petróleo (FEM e IG), como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo.

Campinas, 2003

SP - Brasil

Nº CHAMADA	
F/Unicamp	
G144c	
V	EX
TOMBO, BC/ 61008	
PROC. 16.117-04	
C <input type="checkbox"/>	D <input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO 11,00	
DATA 18.11.04	
Nº CPD	

3b Id 332106

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP**

Gamboa Fernando

G144c      Caracterização e Eliminação de Múltiplas pelo Método da Superfície  
Comum de Reflexão (CRS) / Fernando Gamboa. – Campinas, SP:[s.n.],  
2003.

Orientadores: Martin Tygel e Eduardo Filpo.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas,  
Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências.

1. Geofísica. 2. Método sísmico de reflexão. 3. Ondas sísmicas. I.  
Tygel, Martin. II. Filpo, Eduardo. III. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Instituto de Geociências. V. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Caracterização e Eliminação de Múltiplas pelo Método da  
Superfície Comum de Reflexão (CRS)**

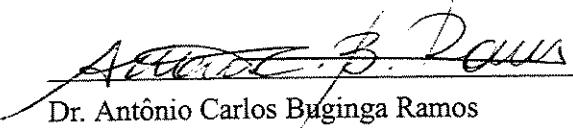
*Autor:* ENG. FERNANDO GAMBOA

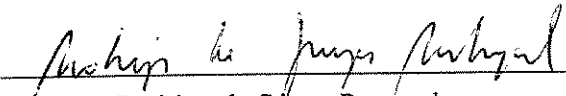
*Orientador:* PROF. DR. MARTIN TYGEL

*Co-orientador:* DR. EDUARDO FILPO

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Martin Tygel, Presidente  
UNICAMP / IMECC / DMA

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Antônio Carlos Buginga Ramos  
PETROBRAS / RJ

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rodrigo de Souza Portugal  
UNICAMP / IG

Campinas, 10 de Outubro de 2003

# Dedicatória

— ——— Dedico este trabalho a meus pais, minha família e todos meus amigos por terem me ajudado

# Agradecimentos

Este trabalho não seria concluído sem ajuda de diversas pessoas às quais expresso meus agradecimentos:

Aos meus pais, pelo incentivo em todas os momentos da minha vida;

A meu orientador e co-orientador, que me mostraram os caminhos a serem seguidos;

Ao Cláudio Guerra e a Tânia Santiago, pelas dicas e conselhos durante todo meu processo de aprendizagem;

Ao Centro de Estudos de Petróleo (CEPETRO), pela bolsa de estudos fornecida;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), auxílio 01/01068-0;

Ao Conselho Nacional para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), auxílio 300927/82-7;

Ao Consórcio *Wave Inversion Technology* (WIT);

À Agência Nacional do Petróleo (ANP);

À *LandMark Graphics Corporation*, Aliança estratégica 2002-COM-014331;

E a todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Tenha cuidado com o que você deseja,  
pois pode lhe ser concedido.

# Resumo

GAMBOA, Fernando. *Caracterização e Eliminação de Múltiplas pelo Método da Superfície Comum de Reflexão (CRS)*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidad Estadual de Campinas, 2003. 100p. Dissertação (Mestrado)

Aplicado a dados de multicobertura, o método da Superfície Comum de Reflexão (CRS) obtém, além de uma seção empilhada mais limpa e bem definida, uma série de parâmetros ou atributos da equação do tempo de trânsito definidos em cada ponto da seção de afastamento nulo. Os parâmetros da equação do tempo de trânsito proporcionam informação útil para uma variedade de processos sísmicos. Aqui, investigamos o papel dos atributos CRS na importante tarefa de identificar e atenuar reflexões múltiplas. Consideramos a situação 2D na qual o método CRS fornece três parâmetros, a saber, o ângulo de emergência do raio normal e os raios de curvatura das frentes de ondas associadas a duas ondas fictícias, denominadas onda N e onda NIP. Essas abreviações significam onda normal (N) e onda de ponto de incidência normal (NIP). Nesta dissertação apresentamos e discutimos um algoritmo desenvolvido para identificar os atributos CRS de reflexões múltiplas e, num próximo estágio, atenuar ou eliminar a energia, não desejada, deste tipo de evento. Os atributos CRS das múltiplas são obtidos, segundo relações encontradas, a partir dos correspondentes atributos das primárias. Primeiros experimentos mostram que estes algoritmos têm potencial favorável de substituir consagrados métodos de supressão.

## *Palavras chave*

Geofísica, Método sísmico de reflexão, Ondas sísmicas.



# Abstract

GAMBOA, Fernando. *Caracterização e Eliminação de Múltiplas pelo Método da Superfície Comum de Reflexão (CRS)*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidad Estadual de Campinas, 2003. 100p. Dissertação (Mestrado)

Applied to multicoverage data, the Common-Reflection-Surface (CRS) method obtains, besides a clear and well-defined stacked section, also a number of traveltimes attributes defined at each point of that zero-offset (stacked) section. The CRS traveltimes parameters provide useful information for a variety of seismic processing purposes. Here we investigate the role of CRS attributes in the important task of multiple identification and attenuation. We consider the 2D situation in which the CRS method produces three parameters associated to the propagation of the wave front, namely, the angle of emergency of the normal ray and radii of curvature of the so-called N and NIP wavefronts. The abbreviations N and NIP stand for normal and normal-incident-point waves, respectively. We propose and discuss simple algorithms designed to identify the CRS attributes of the multiple reflections and, as a next stage, to attenuate or eliminate the energy of this type of undesirable event. The CRS attributes of the multiple are obtained, according to relations found, from the corresponding attributes of primary events. First experiments show that these algorithms have the potential of favorably replace well-established multiple suppression methods.

## *Key Words*

Geophysics, Reflection seismic method, Seismic waves.

# Conteúdo

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiv</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	6
1.2 Estrutura da Dissertação . . . . .	6
<b>2 Teoria</b>	<b>8</b>
2.1 Método de Empilhamento CMP . . . . .	8
2.2 O Método da Superfície Comum de Reflexão (CRS) . . . . .	10
2.3 Reflexões Múltiplas . . . . .	16
2.4 Propriedades Fundamentais das Múltiplas . . . . .	20
2.5 Algumas Técnicas Para a Atenuação e/ou Eliminação das Múltiplas . . . . .	21
<b>3 O Método CRS e as Múltiplas</b>	<b>26</b>
3.1 Observações básicas do método de CRS . . . . .	26
3.2 Identificação de Reflexões Primárias e Múltiplas . . . . .	29
3.3 Predição das Reflexões Múltiplas . . . . .	31
3.4 Métodos para a Atenuação e/ou Eliminação de Múltiplas . . . . .	44
3.5 Descrição do Algoritmo . . . . .	51
<b>4 Discussão dos Resultados</b>	<b>59</b>
4.1 Modelo com interfaces planas mergulhantes . . . . .	59

4.2 Modelos com interfaces curvas . . . . .	60
<b>5 Observações e Conclusões</b>	<b>66</b>
<b>A Modelos Sintéticos Usados</b>	<b>71</b>
<b>B Processamento NMO</b>	<b>76</b>
B.1 Sequência de Processamento . . . . .	76
<b>C Tempos de Trânsito NMO</b>	<b>87</b>
C.1 Caso 1: Camada Plana e Horizontal . . . . .	87
C.2 Caso 2: Camada Plana com Mergulho . . . . .	90
<b>D Leis de Curvatura de Frente de Onda</b>	<b>95</b>
D.1 Lei de Propagação . . . . .	95
D.2 Lei de Transmissão . . . . .	97
D.3 Lei de Reflexão . . . . .	97
D.4 Convenção de Sinais . . . . .	98
<b>E Hardware e Software Usados</b>	<b>100</b>

# Lista de Figuras

<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Principais configurações sísmicas . . . . .	3
1.2 Configuração CDP em refletor mergulhante . . . . .	4
<b>Teoria</b>	<b>8</b>
2.1 Superfície Comum de Reflexão . . . . .	11
2.2 Descrição dos parâmetros CRS . . . . .	13
2.3 Definição das múltiplas . . . . .	17
2.4 Classificação das múltiplas segundo seu percurso . . . . .	19
2.5 Classificação das múltiplas segundo sua trajetória . . . . .	19
2.6 Classificação das múltiplas segundo as camadas onde elas ocorrem . . . . .	20
<b>O Método CRS e as Múltiplas</b>	<b>26</b>
3.1 Empilhamento NMO . . . . .	28
3.2 Interpretação dos parâmetros CRS das reflexões primárias e múltiplas . . . . .	30
3.3 Múltiplas da superfície livre em uma interface curva . . . . .	35
3.4 Cálculo do parâmetro $R_{NIP}$ para múltiplas intercamadas em interfaces planas hor- izontais . . . . .	38
3.5 Cálculo do parâmetro $R_{NIP}$ para múltiplas intercamadas em interfaces planas com mergulho . . . . .	39
3.6 Primária e uma múltipla concorrentes em profundidade ou tempo de trânsito . . . . .	41

3.7	Empilhamento usando somente os parâmetros CRS das reflexões primárias . . . . .	46
3.8	Modelamento de múltiplas utilizando os parâmetros CRS . . . . .	47
3.9	Dados multicobertura no domínio CMP . . . . .	49
3.10	Modelamento de múltiplas nos domínios CMP e CO, utilizando-se os parâmetros CRS . . . . .	50
3.11	Algoritmo para eliminar eventos previamente identificados . . . . .	52
3.12	Algoritmo de busca automática . . . . .	53
<b>Discussão dos Resultados</b>		<b>59</b>
4.1	Seção ZO do modelo com interfaces planas mergulhantes criada com o Cshot. . . . .	61
4.2	Seção ZO do modelo com interfaces planas mergulhantes após a atenuação das reflexões múltiplas usando os parâmetros CRS. . . . .	61
4.3	Seção ZO do modelo com interfaces planas mergulhantes após a atenuação das reflexões múltiplas usando a filtragem <i>fk</i> . . . . .	62
4.4	Seção ZO do modelo com interfaces planas mergulhantes após a atenuação das reflexões múltiplas usando a filtragem <i>Radon</i> . . . . .	62
4.5	Seção ZO do modelo com interfaces curvas criada com o Cshot. . . . .	64
4.6	Seção ZO do modelo com interfaces curvas após a atenuação das reflexões múltiplas usando os parâmetros CRS. . . . .	64
4.7	Seção ZO do modelo com interfaces curvas após a atenuação das reflexões múltiplas usando a filtragem <i>fk</i> . . . . .	65
4.8	Seção ZO do modelo com interfaces curvas após a atenuação das reflexões múltiplas usando a filtragem <i>Radon</i> . . . . .	65
<b>Modelos Sintéticos Usados</b>		<b>71</b>
A.1	Modelo sintéticos . . . . .	73
A.2	Tipos de reflexões múltiplas modeladas . . . . .	74
A.3	Seções de afastamento nulo simuladas . . . . .	75

<b>Processamento NMO</b>	<b>76</b>
B.1 Dados empilhados com NMO, sem atenuação de múltiplas . . . . .	78
B.2 Dados com atenuação de múltiplas por filtragem <i>fk</i> - Modelo com interfaces planas e com mergulho . . . . .	79
B.3 Empilhamento NMO após a atenuação das múltiplas por filtragem <i>fk</i> - Modelo com interfaces planas e com mergulho . . . . .	80
B.4 Dados com atenuação de múltiplas por filtragem <i>fk</i> - Modelo com interfaces curvas	81
B.5 Empilhamento NMO após a atenuação das múltiplas por filtragem <i>fk</i> - Modelo com interfaces curvas . . . . .	82
B.6 Dados com atenuação de múltiplas por filtragem <i>Radon</i> - Modelo com interfaces planas e com mergulho . . . . .	83
B.7 Empilhamento NMO após da atenuação das múltiplas por filtragem <i>Radon</i> - Mod- elo com interfaces planas e com mergulho . . . . .	84
B.8 Dados com atenuação de múltiplas por filtragem <i>Radon</i> - Modelo com interfaces curvas . . . . .	85
B.9 Empilhamento NMO após a atenuação das múltiplas por filtragem <i>Radon</i> - Modelo com interfaces curvas . . . . .	86
<b>Tempos de Trânsito NMO</b>	<b>87</b>
C.1 Tempo de trânsito em camada plana horizontal . . . . .	88
C.2 Tempo de trânsito em camada plana com mergulho . . . . .	91
C.3 Relação entre reflexão primária e múltipla no caso de uma camada plana com mergulho . . . . .	94
<b>Leis de Curvatura de Frente de Onda</b>	<b>95</b>
D.1 Propagação do raio de curvatura da frente de onda . . . . .	96
D.2 Convenção de sinais das curvaturas . . . . .	99

# Nomenclatura

## Letras Latinas

$C$	Vetor da correlação cruzada $S(t)$ e $U(t)$ .
$F$	Vetor com as amostras do filtro adaptador.
$G$	Matriz tipo Toeplitz.
$H$	Profundidade.
$R$	Radio de curvatura.
$h$	Meio-afastamento.
$n$	Ordem da múltipla.
$q$	Parâmetro combinado obtido na busca no domínio CMP.
$t$	Tempo de trânsito.
$v, V$	Velocidade.
$x$	Coordenada de um ponto.

## Letras Gregas

$\alpha$	Ângulo de saia do raio na interface.
$\beta$	Ângulo de chegada do raio na interface.
$\gamma$	Valor restante da operação indicada.
$\mu$	Parâmetro combinado obtido na busca no domínio CS.
$\phi$	Ângulo (mergulho) do refletor.

## Superescritos

- N Referente à camada número N.  
+ Referente ao ponto depois da interface.  
- Referente ao ponto antes da interface.

## Subscritos

- N Referente à onda N.  
NIP Referente à onda NIP.  
P Referente ao raio Propagado.  
R Referente ao raio Refletido.  
T Referente ao raio Transmitido.  
g Referente ao receptor.  
m Referente à múltipla.  
p Referente à primária.  
s Referente à fonte.

## Siglas

- CDP Ponto Comum em Profundidade (Do inglês *Common Depth Point*).  
CMP Ponto Meio Comum (Do inglês *Common Mid Point*).  
CO Afastamento Comum (Do inglês *Common Offset*).  
CRS Superfície Comum de Reflexão (Do inglês *Common Reflection Surface*).  
CS Tiro Comum (Do inglês *Common Shot*).  
NIP Ponto Normal de Incidência (Do inglês *Normal Incident Point*).  
NMO Sobre Tempo Normal (Do inglês *Normal MoveOut*).  
RMS Do Inglês *Root Mean Square*.  
ZO Afastamento Nulo (Do inglês *Zero Offset*).



## Outros

$\mathcal{F}(t)$	Filtro adaptador.
$\mathcal{P}(t)$	Traço sísmico de referência.
$\mathcal{S}(t)$	Traço que contém a múltipla simulada.
$\mathcal{U}(t)$	Múltipla presente no traço de referência.
$\tilde{\mathcal{U}}(t)$	sinal parecido com $\mathcal{U}(t)$ .
$\mathcal{V}(t)$	Função resíduo.
$R_F$	Raio de curvatura da Interface.
$t_0$	Tempo de trânsito no afastamento nulo.
$v_0$	Velocidade perto dos receptores.
$x_m$	Coordenada do ponto CMP.
$x_0$	Coordenada do ponto avaliado pelo CRS.
$\Phi_{SS}(t)$	Representa a autocorrelação de $\mathcal{S}(t)$ .
$\Phi_{SU}(t)$	Correlação cruzada de $\mathcal{S}(t)$ e $\mathcal{U}(t)$ .

# Capítulo 1

## Introdução

O objetivo da sísmica de reflexão é fornecer uma imagem da subsuperfície a partir de dados sísmicos de reflexão multicobertura, tanto por aumento de sinais de reflexão desejados, quanto pela atenuação de energia de sinais não desejados e de ruído coerente e aleatório.

A aquisição de dados sísmicos em sísmica de reflexão é feita principalmente na configuração do *tiro comum* (CS)<sup>1</sup>. Supondo, por simplicidade uma linha sísmica horizontal como na Figura 1.1(a), cada família CS é definida pela coordenada da fonte comum,  $x_s$ , sendo os traços sísmicos definidos pelas coordenadas,  $x_g$ , dos vários receptores. Após a excitação da fonte comum, as ondas sísmicas refletidas são registradas nos receptores que constituem a chamada família CS.

O sismograma registrado contém traços que são ordenados com respeito ao *afastamento* ou *meio-afastamento*,  $h$ . O meio-afastamento,  $h$ , representa a metade da distância entre a posição da fonte e a posição do receptor para cada par fonte-receptor. Relacionada a esta distância está a coordenada,  $x_m$ , que representa o ponto médio entre a posição da fonte e a posição do receptor. A onda gerada é transmitida e refletida<sup>2</sup> nas discontinuidades da subsuperfície. Essas representam saltos dos parâmetros elásticos das rochas em subsuperfície. Uma suposição básica, válida para as chamadas bacias sedimentares que são objeto dos estudos de prospecção de petróleo, é que as

---

<sup>1</sup>Do Inglês *Common Source*

<sup>2</sup>Outros fenômenos de propagação, tais como ondas refratadas, difratadas, etc., também ocorrem e são registrados. Esses fenômenos não serão tratados neste trabalho.

descontinuidades ocorrem em interfaces, denominadas refletores sísmicos. As bacias sedimentares seriam, então, meios constituídos por camadas mais ou menos homogêneas, separadas por interfaces curvas e mais ou menos suaves. Neste trabalho, consideraremos a chamada situação 2D na qual a propagação de ondas sísmicas é suposta restrita ao plano vertical verticalmente abaixo da linha sísmica. Nesta situação, as interfaces sísmicas (refletores) são consideradas curvas bidimensionais neste plano de propagação.

Parte da energia refletida pelas interfaces em subsuperfície emerge nos receptores onde é gravada durante um certo intervalo de tempo decorrido relativamente ao começo da emissão da fonte. O tempo de registro de um sinal sísmico, denominado *tempo de trânsito*, é denotado pela variável,  $t$ . Na presente situação 2D, a configuração CS é movida ao longo da linha sísmica, resultando na obtenção de muitas seções CS, as quais contêm reflexões dos mesmos refletores na região da subsuperfície que é iluminada pelos sinais emitidos. A série total de dados registrados é chamada de *dados multicobertura* e possui redundância de informação, pois um mesmo ponto em profundidade é iluminado várias vezes.

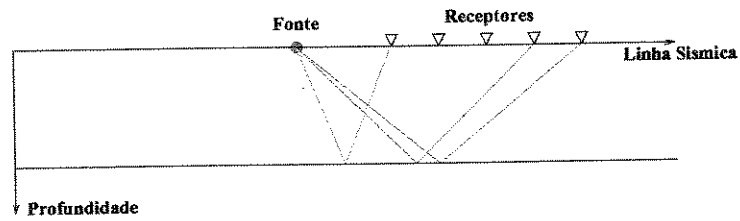
Diversas configurações dos traços gravados podem ser realizadas de acordo com um reordenamento dos traços. Uma destas configurações é obtida ordenando os traços em *afastamento comum* (CO)<sup>3</sup>. Outra importante configuração consiste da ordenação dos registros em *ponto médio comum* (CMP)<sup>4</sup>. Uma família CO contém todos os traços com um certo afastamento constante que são ordenados por suas coordenadas de ponto médio (Figura 1.1(b)), e pode ser pensada como uma coleção de traços que foram adquiridos deslocando um único par fonte-receptor com um afastamento constante ao longo da linha sísmica.

A família CMP combina todos os traços com o mesmo ponto médio e classifica-os com crescente afastamento (Figura 1.1(d)). Na literatura mais antiga, a família CMP é chamada também de

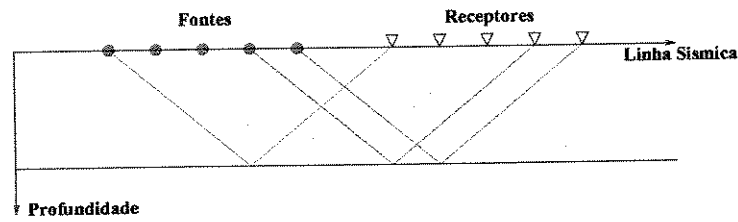
---

<sup>3</sup>Do Inglês *Common Offset*.

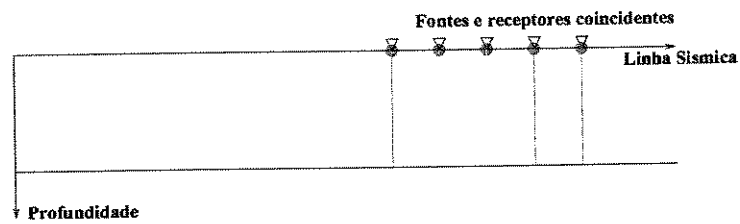
<sup>4</sup>Do Inglês *Common Midpoint*.



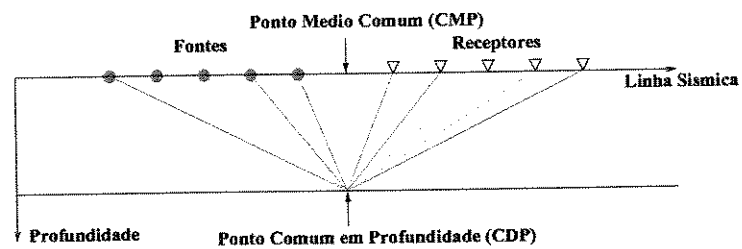
(a) *Configuração CSP*: Todos os raios começam no mesmo ponto.



(b) *Configuração CO*: Cada par fonte-receptor tem o mesmo afastamento.



(c) *Configuração ZO*: A posição das fontes e dos receptores são coincidentes.



(d) *Configuração CMP*: Todos os pares fonte-receptor têm o mesmo ponto médio comum.

Figura 1.1: As quatro partes da figura ilustram a trajetória de raios que pertencem às configurações mais usadas, para o caso de um refletor horizontal e com velocidade constante na camada.

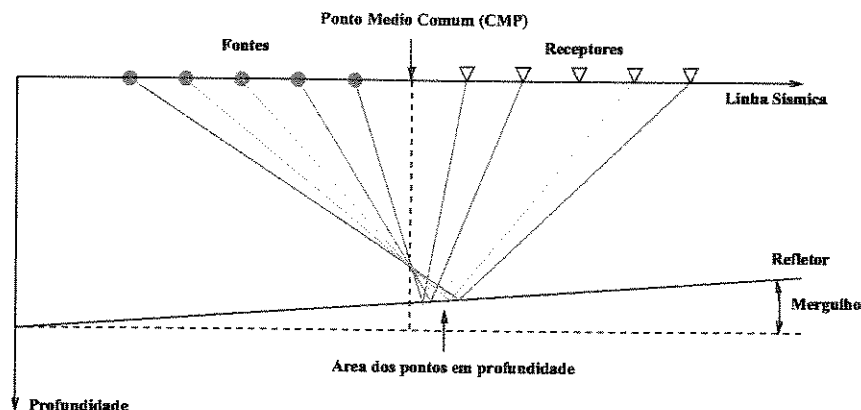


Figura 1.2: Raios na configuração CMP no caso de um refletor com mergulho, a coordenada do CDP não é mais a mesma coordenada do CMP.

família do *ponto comum em profundidade (CDP)*<sup>5</sup>. Esta terminologia é, a rigor, somente correta no caso de modelos geológicos de multicamadas homogêneas, planas e horizontais. Neste caso, como ilustrado pela Figura 1.2, as coordenadas horizontais dos pontos CMP e CDP são coincidentes. No entanto, quando estas condições não são satisfeitas, as coordenadas dos pontos CMP e CDP diferem. Esta situação é ilustrada pela Figura 1.2

Uma família CO especial é a chamada família de *afastamento nulo (ZO)*<sup>6</sup>. Aqui, o afastamento é zero, isto é, as coordenadas  $x_s$  e  $x_g$  para um par fonte-receptor são iguais (Figura 1.1(c)). Não obstante sua importância no processamento, a configuração de ZO não pode ser realizada nas aquisições sísmicas. Isto porque a fonte, quando detonada, destruiria o receptor coincidente. Conforme veremos adiante, a seção de ZO geralmente pode ser simulada através dos chamados métodos de empilhamento.

Dentre os diversos processos aplicados aos dados sísmicos multicobertura durante o processamento, com o objetivo de melhorar a razão sinal/ruído (coerente ou aleatório), destaca-se o chamado *empilhamento sísmico*. Empilhar significa somar todas as amplitudes em partes ou

<sup>5</sup>Do Inglês *Common Depth Point*.

<sup>6</sup>Do Inglês *Zero Offset*.

seções do volume de dados sísmicos, ao longo de curvas ou superfícies de tempo de trânsito auxiliares. Conforme descrito nos próximos capítulos, as curvas de empilhamento são construídas artificialmente por vários métodos e procuram simular tempos de trânsito de eventos de reflexão de interesse.

Neste trabalho, consideraremos curvas ou superfícies de empilhamento destinadas a simular reflexões devidas a pares de fonte e receptor na vizinhança de traços da seção ZO a ser construída. Se a curva de empilhamento, associada a um ponto (isto é, posição do traço e amostra temporal) da seção ZO a ser construída, concorda (é tangente) com um evento de reflexão registrado nos dados sísmicos, então as amplitudes coerentes são somadas construtivamente. O resultado é posicionado no correspondente ponto na seção ZO a ser simulada. O benefício é uma razão sinal-ruído (S/N) mais elevada que melhora a identificação dos eventos de reflexão<sup>7</sup>

A seção simulada ZO é a base para que muitos procedimentos de inversão obtenham uma imagem mais confiável da subsuperfície. Por exemplo, Landa et al. (1998) mostraram a importância na escolha do modelo geológico para os resultados nos processos de inversão. Nestes processos, o número de camadas do modelo geológico é usualmente determinado pela interpretação da seção empilhada. Dentro da seção (empilhada) ZO, muitos eventos de reflexão, e seus atributos correspondentes, são escolhidos. Por esta razão, a seção ZO deve estar o mais limpa possível de ruído coerente e aleatório.

---

<sup>7</sup>A relação S/N é definida como o quociente da amplitude máxima de todos os eventos da reflexão dentro de uma série de dados sobre a raiz quadrada da média dos quadrados da amplitude do ruído. Uma relação S/N menor que a unidade significa que os sinais dos eventos da reflexão não podem, na maior parte, ser distinguidos visualmente do ruído porque sua amplitude é menor do que aquelas existentes no ruído. Desta forma, valores elevados da razão S/N são desejadas nas seções provenientes do processamento sísmico.

## 1.1 Objetivos

Esta dissertação de mestrado visa resolver o problema de atenuação de ruído coerente do tipo *Reflexões Múltiplas*, que é um dos grandes problemas da sismica de reflexão ainda não inteiramente resolvido. As reflexões múltiplas presentes nos sismogramas podem ocultar alguma informação importante sobre os refletores na subsuperfície. A energia das reflexões múltiplas pode chegar a ser maior que a energia das reflexões primárias concorrentes fazendo com que as reflexões primárias fiquem completamente invisíveis. Por tudo isto, a atenuação e/ou eliminação de Reflexões Múltiplas tem sido motivo de várias pesquisas.

Conforme mencionado anteriormente, nosso trabalho será restrito à situação 2D. As premissas básicas a serem cumpridas são que as interfaces, a superfície de medição, e o campo de velocidades (pelo menos numa vizinhança dos refletores) sejam suaves o suficiente para que a Teoria do Raio de Ordem Zero (Červený (2000)) descreva adequadamente as reflexões, e que as variações do meio e a propagação aconteçam somente no plano da seção.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

Além desta introdução serão apresentados os seguintes capítulos:

No Capítulo 2 serão apresentados os conceitos e propriedades do método de empilhamento da Superfície Comum de Reflexão (CRS)<sup>8</sup> necessários para o bom entendimento do trabalho, bem como algumas definições e características dos eventos de reflexão múltipla, segundo as quais estão baseadas as formulações matemáticas desenvolvidas nesta dissertação.

O Capítulo 3 contém o desenvolvimento matemático e as metodologias propostas para a atenuação e/ou eliminação das reflexões múltiplas. Ainda neste capítulo são mostrados os algorit-

---

<sup>8</sup>Do Inglês *Common Reflection Surface*.

mos projetados para esta tarefa.

No Capítulo 4 é feita uma comparação entre os resultados dos algoritmos descritos no Capítulo 3 e alguns métodos de atenuação de múltiplas (*Filtragem  $f_k$*  e *Filtragem Radon*) consagrados na literatura.

No Capítulo 5 são expostas as conclusões, recomendações e algumas perspectivas para futuras pesquisas.

A dissertação conta ainda com cinco apêndices, nos quais são apresentadas algumas demonstrações matemáticas e outros detalhes considerados necessários para o completo entendimento do trabalho.



# Capítulo 2

## Teoria

### 2.1 Método de Empilhamento CMP

A chamada técnica CMP, introduzida por Mayne (1962)<sup>1</sup>, que será chamada de *Empilhamento CMP*, foi projetada visando produzir seções em afastamento nulo (ZO) de boa qualidade S/N e a extração de um parâmetro empilhamento, denominado velocidade NMO<sup>2</sup>. O empilhamento utiliza tão somente os dados sísmicos de entrada na configuração CMP, daí o seu nome.

O empilhamento CMP tem como pré-condição a redundância na amostragem em subsuperfície (isto é, a região da superfície sob consideração deve ser alvo de iluminação simultânea por muitos pares de fontes e receptores). O empilhamento consiste basicamente das seguintes etapas: (a) Reorganização dos dados no domínio CMP; (b) Correção de tempo de trânsito NMO e (c) Soma (empilhamento) dos traços pertencentes ao mesmo CMP. Um subproduto dessa técnica é a obtenção do mapa de um mapa de velocidades de NMO.

As premissas teóricas segundo as quais a correção NMO deve dar os melhores resultados

---

<sup>1</sup>Na terminologia original de Mayne, técnica é denominada de CDP. A diferença de terminologias foi explicada no Capítulo anterior.

<sup>2</sup>Do Inglês *Normal Moveout*. Conforme será explicado mais adiante, a chamada correção de tempo NMO consiste da diferença entre os tempos de trânsito em afastamento dado e o tempo em afastamento nulo. Em Português, adota-se para o NMO a terminologia *sobretempo de trânsito normal*.

são as de que o meio geológico seja constituído de camadas razoavelmente planas, com mergulhos pequenos e onde a velocidade de propagação não varie muito lateralmente na região em subsuperfície amostrada pelas trajetórias que compõem o CMP. A operação de empilhamento é executada no domínio CMP com base na velocidade NMO avaliada para alguns CMPs e alguns eventos (reflexões) selecionados pelo usuário ou intérprete. Para cada evento selecionado, a correspondente velocidade NMO é estimada por meio de análises de coerência de um único parâmetro. Este processo é conhecido na literatura como Análise de Velocidades. O mapa completo da velocidade NMO resulta da interpolação apropriada, no tempo e posição do CMP, das velocidades NMO previamente obtidas.

### 2.1.1 Equação do tempo de trânsito NMO

Consideramos a situação 2D, em que todos os pares fonte-receptor estão situados em uma única linha sísmica, suposta horizontal, e que as variações de velocidades e das estruturas em subsuperfície sejam restritas ao plano vertical que contém a linha. Dado um CMP com coordenada  $x_m$  contendo uma reflexão com tempo de trânsito no afastamento nulo,  $t_0$ , a análise de coerência e a correção do NMO para esse evento são realizadas usando a equação de tempo de trânsito,

$$t(h)^2 = t_0^2 + \frac{4h^2}{V_{NMO}^2} . \quad (2.1)$$

Como função do meio-afastamento,  $h$ , o tempo de trânsito,  $t(h)$ , representa a aproximação hiperbólica de segunda ordem do tempo de trânsito ao longo do raio, da reflexão, que conecta o par fonte-receptor,  $(x_m - h, x_m + h)$ , da família CMP na posição  $x_m$ . A demonstração desta equação no caso simples de uma camada plana sem ou com mergulho pode ser obtida no Apêndice C (ver seções C.1.1 e C.2.1, respectivamente).

O método de empilhamento CMP é parte integrante de praticamente todas seqüências de processamento sísmico, possuindo também abundante literatura. Uma descrição mais detalhada

do método CMP está, entretanto, fora do escopo do presente trabalho. Para uma descrição geral e também mais considerações práticas da técnica CMP, o leitor pode consultar Yilmaz (2000) e referências correspondentes.

## 2.2 O Método da Superfície Comum de Reflexão (CRS)

Em anos recentes, as premissas para o empilhamento NMO, a saber: (a) sua limitação aos dados no domínio CMP, (b) eventos selecionados pelo intérprete e (c) extração de um único atributo (a velocidade NMO) dos dados, começaram a ser questionadas pela comunidade geofísica. Como uma resposta a estas limitações, algumas aproximações mais gerais aos problemas do empilhamento e a extração de parâmetros do tempo de trânsito dos dados multicobertura foram propostas. Na literatura sísmica, as novas propostas são referidas como métodos independentes do macro modelo de velocidades ou tempo-dirigidas pela imagem. A característica comum das novas propostas é a utilização de tempos de trânsito gerais que podem empilhar dados de pares fonte-receptor que pertençam a um maior número de domínios, isto é, o empilhamento pode extrapolar o domínio CMP. O método da Superfície Comum de Reflexão (CRS), usado neste trabalho, é uma delas.

Da mesma forma que o método CMP, o método CRS destina-se a empilhar dados sísmicos de reflexão para produzir uma seção simulada de afastamento nulo (ZO), independente do macro-modelo de velocidades fornecido pelo usuário.

Em contraposição ao método CMP, o método CRS utiliza uma equação de tempo trânsito multiparamétrica. Esta equação representa uma extensão natural do tempo de trânsito NMO dado pela equação (2.1), chamada de tempo hiperbólico geral. O tempo de trânsito geral hiperbólico é válido para configurações arbitrárias de pares fonte-receptor numa vizinhança de um dado ponto  $x_0$ , denominado *ponto central*. Na maioria dos casos, o ponto central é simplesmente uma posição CMP. Tendo em vista a aceitação de pares fonte-receptor em localizações arbitrárias relativamente ao ponto central, o método CRS tem a capacidade de empilhar uma quantidade significativamente

maior de traços para simular cada traço ZO, do que o método CMP. Isto explica o caráter mais bem definido e claro das seções obtidas pelo método CRS.

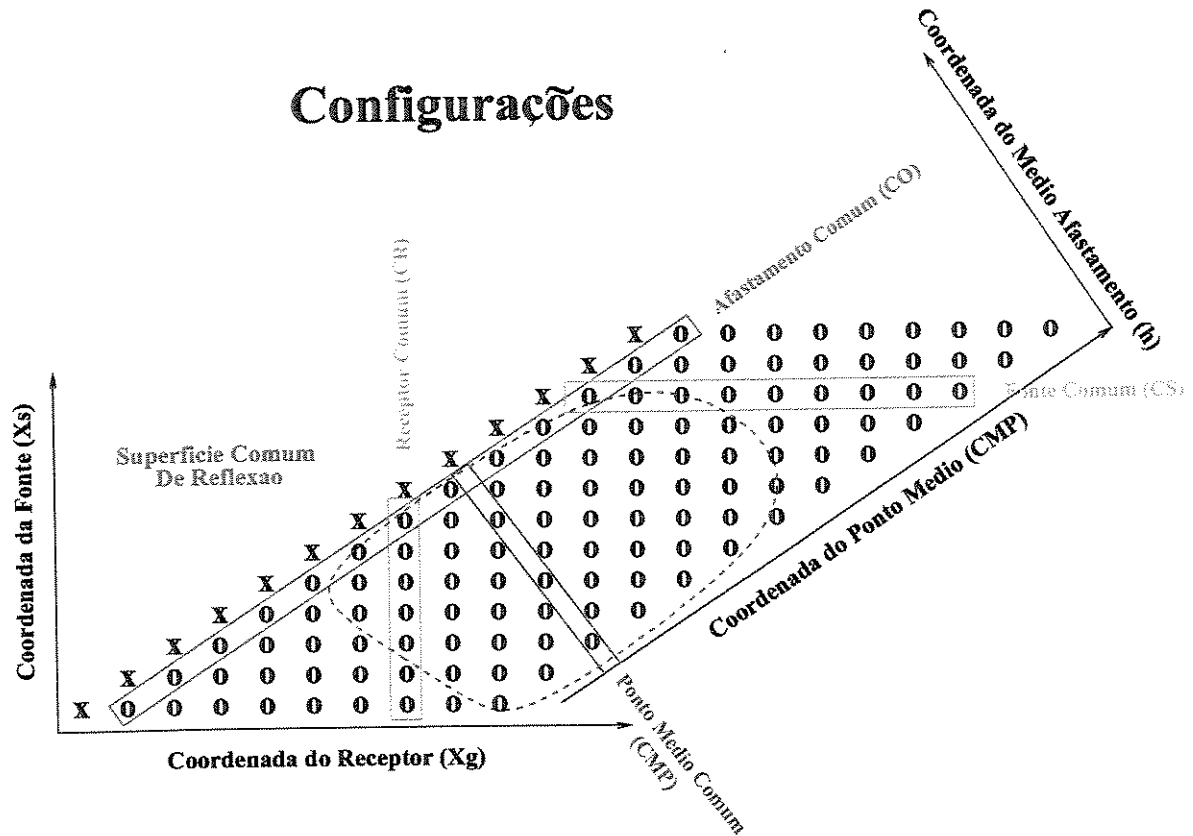


Figura 2.1: A família CRS está formada por todos os traços (de diferentes configurações) que estão dentro da abertura definida para a busca.

Da mesma maneira que o método NMO, um dos resultados do método CRS é seção ZO simulada. Entretanto, ao contrário do método NMO que produz um único parâmetro estimado de uma família CMP, o método de CRS produz um trio de parâmetros estimados de uma família multicobertura ou *família CRS*, que está definida por todos os traços que formam a superfície comum de reflexão (área formada pela linha tracejada de cor vermelha na Figura 2.1). Para uma descrição geral de métodos independentes do macro modelo de velocidades, o leitor pode-se referir a Hubral (1999) (Veja também mais referências naquele lugar).

### 2.2.1 Tempo de trânsito hiperbólico

No caso de uma linha sísmica horizontal, se o ponto ZO estiver localizado pela coordenada  $x_0$  na linha sísmica, se  $v_0$  é a velocidade do meio no ponto em questão, e  $x_m$  é o ponto médio do par fonte-receptor avaliado, o tempo de trânsito (geral) hiperbólico pode ser escrito como

$$t(h)^2 = \left[ t_0 + \frac{2 \sin \beta}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta}{v_0} \left[ \frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right]. \quad (2.2)$$

Pode-se notar que o tempo de trânsito hiperbólico depende de três atributos ( $\beta$ ,  $R_N$ ,  $R_{NIP}$ ), conhecidos como “parâmetros CRS” e definidos para cada posição ZO,  $x_0$ , e tempo de trânsito,  $t_0$ . O parâmetro  $\beta$  denota o ângulo que o raio ZO faz com a normal da superfície em  $x_0$  (Figura 2.2(a)) e,  $R_N$  e  $R_{NIP}$  são os raios de curvatura das ondas N e NIP, respectivamente. Como descrito em Hubral (1983), a onda N (Normal) (Figura 2.2(c)) é uma onda fictícia que parte de uma vizinhança do ponto NIP com a forma<sup>3</sup> do refletor e viaja para cima com a metade da velocidade do meio. Vale lembrar que o ponto NIP é aquele definido como o ponto de incidência do raio normal ao refletor que emerge em  $x_0$ . Da mesma maneira, a onda NIP (Figura 2.2(b)), é definida como aquela que começa como uma fonte pontual no ponto NIP, e viaja para cima com a metade da velocidade do meio sendo registrada em  $x_0$ .

Para uma malha de pontos predeterminados  $(x_0, t_0)$ , e supondo que a velocidade perto da superfície,  $v_0$  é conhecida em cada ponto  $x_0$ , o método de CRS produz mapas dos parâmetros  $\beta = \beta(x_0, t_0)$ ,  $R_N = R_N(x_0, t_0)$  e  $R_{NIP} = R_{NIP}(x_0, t_0)$ , bem como a correspondente seção ZO simulada  $u = u(x_0, t_0)$  e a seção de coerência  $c = c(x_0, t_0)$ .

É fácil verificar agora que o tempo de trânsito NMO (2.1) é um caso particular do tempo hiperbólico (2.2) no caso de configuração CMP centrado em  $x_0$ . Podemos ainda encontrar a relação que descreve a velocidade NMO em função dos parâmetros CRS, a saber

$$V_{NMO}^2 = \frac{2v_0 R_{NIP}}{t_0 \cos^2 \beta}. \quad (2.3)$$

---

<sup>3</sup>Mais especificamente, a curvatura da frente de onda N coincide com a curvatura do refletor no ponto NIP

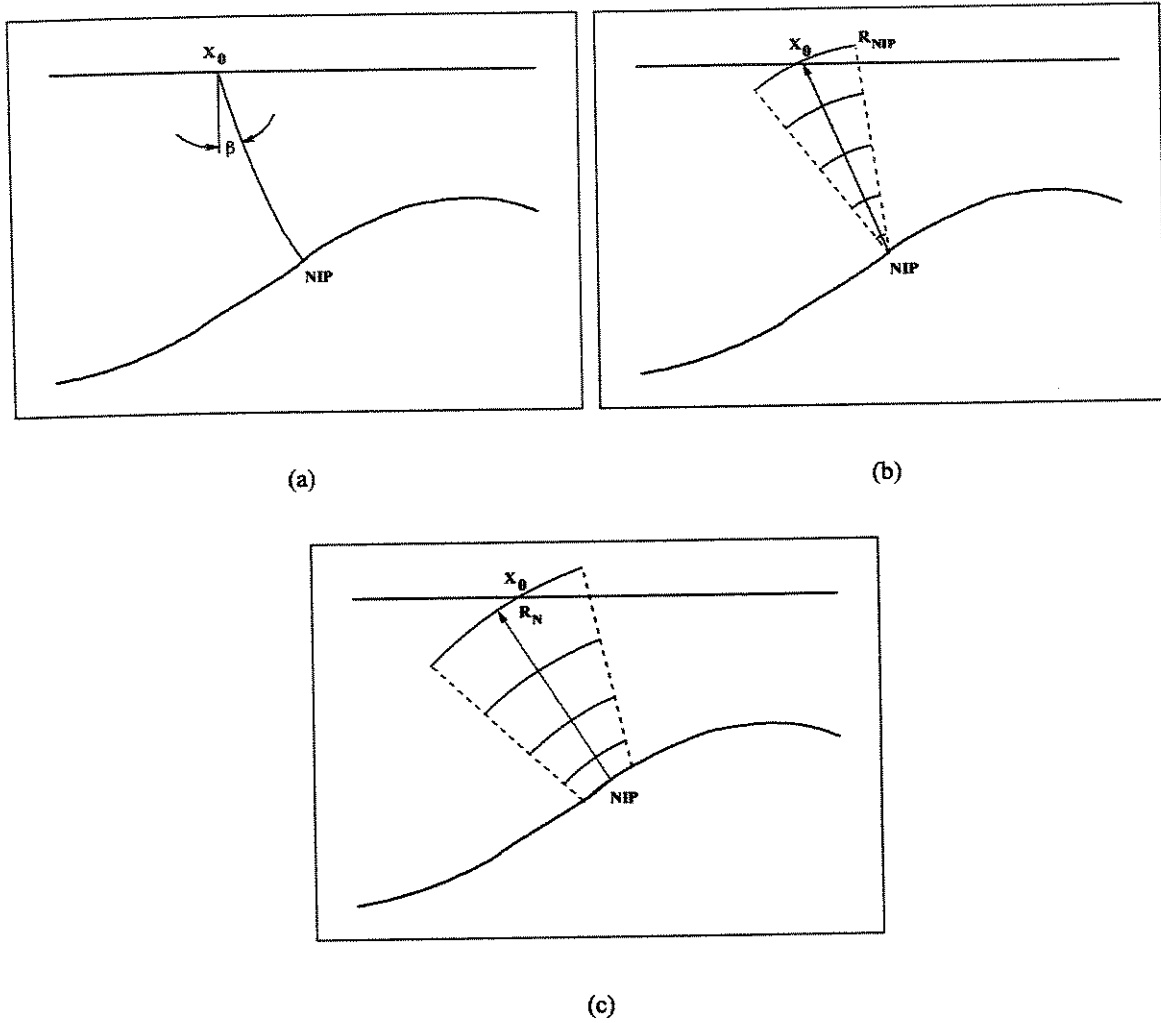


Figura 2.2: Descrição dos parâmetros CRS: (a) ângulo de incidência ( $\beta$ ), (b) Raio de curvatura da onda NIP ( $R_{NIP}$ ) e (c) Raio de curvatura da onda N ( $R_N$ ).

### 2.2.2 Procedimento para a procura dos parâmetros CRS

A busca dos três parâmetros CRS pode ser feita em uma etapa só, com uma busca dos três parâmetros em todos os dados multicobertura. Não obstante, isto requer um alto custo computacional, mesmo nos sistemas computacionais de hoje em dia. Por essa razão, Muller et al. (1998) sugerem executar três buscas, procurando um parâmetro por vez. Esta estratégia não requer uma suposição inicial dos parâmetros, mas os limites para a procura devem ser definidos pelo usuário. Opcionalmente, uma otimização local pode ser executada no domínio tridimensional dos atributos onde o trio inicial (parâmetros procurados nas etapas anteriores) determinaram o ponto inicial. Assim, os valores otimizados são obtidos posteriormente ao processo de busca inicial através de uma única etapa adicional (denominada de refinamento), com um custo computacional menor. As três etapas que definem o trio de parâmetros iniciais são:

**Primeira Etapa:** Busca do parâmetro combinado  $q$ . Esta etapa é chamada *empilhamento CMP Automático*. A busca é feita no domínio CMP, onde  $x_m = x_0$ . A equação (2.2) pode ser então reescrita

$$t(h)^2 = t_0^2 + \frac{2t_0}{v_0} q h^2, \quad (2.4)$$

onde o chamado *parâmetro combinado*,  $q$ , é dado por

$$q = \frac{\cos^2 \beta}{R_{NIP}}. \quad (2.5)$$

Após a determinação da seção de parâmetros combinados, realiza-se o empilhamento dos dados na configuração CMP, obtendo-se como resultado uma seção simulada (empilhada)

ZO. Observe a semelhança entre esse procedimento e o método CMP. Vale salientar, entretanto, que o empilhamento é realizado em todos os pontos centrais,  $x_0$  e em todas as amostras de tempo,  $t_0$ .

**Segunda Etapa:** Busca do parâmetro  $\beta$ . Esta etapa pode ser chamada *Busca de Onda Plana na seção ZO*. A busca é feita no domínio ZO (seção obtida na primeira etapa). Para a determinação dos parâmetros, é utilizada equação do tempo de trânsito hiperbólico considerando-se  $h = 0$ , e supondo que,  $R_N = \infty$ . Em outras palavras, a equação utilizada é linear e dada simplesmente por

$$t(h) = t_0 + \frac{2 \sin \beta}{v_0} (x_m - x_0) . \quad (2.6)$$

Inserindo o parâmetro  $\beta$ , obtido nesta etapa, na equação (2.5), o parâmetro  $R_{NIP}$  é estimado.

**Terceira Etapa:** Busca do parâmetro  $R_N$ . Esta etapa é chamada *Busca hiperbólica na seção ZO*.

A busca é feita ainda no domínio ZO (isto é, considerando-se  $h = 0$ , mas agora com a inserção dos parâmetros  $\beta$  e  $R_{NIP}$ . A equação utilizada é dada por

$$t(h)^2 = \left[ t_0 + \frac{2 \sin \beta}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta}{v_0} \left[ \frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} \right] . \quad (2.7)$$

**Empilhamento Inicial CRS:** Uma vez conhecidos os três parâmetros para um dado ponto ZO, eles podem ser usados para calcular o tempo de trânsito com a equação (2.2). A palavra *inicial* é usada para enfatizar que os parâmetros conseguidos com este procedimento podem ser usados como valores iniciais para o processo de otimização que forneceria o *Empilhamento Otimizado CRS*.



O parâmetro  $R_{NIP}$ , calculado a partir do ângulo de emergência e do parâmetro combinado  $q$  (segunda e primeira etapas, respectivamente) não é determinante em situações com mergulho conflitante (*conflicting dips*). Conseqüentemente, uma busca adicional para os vários parâmetros  $R_{NIP}$  é requerida neste caso. A nova busca é feita no domínio do tiro comum (CS). Como pode ser rapidamente verificado, a condição de tiro comum (considerando o tiro comum no ponto central,  $x_0$ ) é expressa matematicamente pela relação  $h = x_m - x_0$ . A equação do tempo de trânsito (2.2) com a condição acima é dada por

$$t(h)^2 = \left[ t_0 + \frac{2 \sin \beta}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta}{v_0} \mu (x_m - x_0)^2, \quad \text{com } \mu = \frac{1}{R_N} + \frac{1}{R_{NIP}}. \quad (2.8)$$

Considerando o prévio conhecimento do parâmetros  $\beta$ , obtido da segunda etapa, utiliza-se a equação acima para a determinação do parâmetro  $\mu$ . Em seguida, como também o parâmetro  $R_N$  é conhecido da segunda etapa, determina-se o parâmetro  $R_{NIP}$ . O conhecimento dos três parâmetros permite a discriminação da ambigüidade do parâmetro combinado,  $q$ , característica do fenômeno de mergulhos conflitantes.

## 2.3 Reflexões Múltiplas

Uma reflexão múltipla pode ser definida como um evento sísmico que sofreu mais de uma reflexão ascendente (Figura 2.3(a)). A energia das múltiplas resulta, entre outros fatores, da intensidade dos coeficientes de reflexão: quanto maior for o contraste de impedância entre as interfaces envolvidas, mais fortes serão as múltiplas geradas. Em ambientes de aquisição sísmica marinha, Weglein et al. (1997) definem múltiplas relacionadas à superfície livre (superfície do mar) como aquelas que possuem pelo menos uma reflexão descendente na superfície livre entre duas reflexões ascendentes (Figura 2.3(b)).

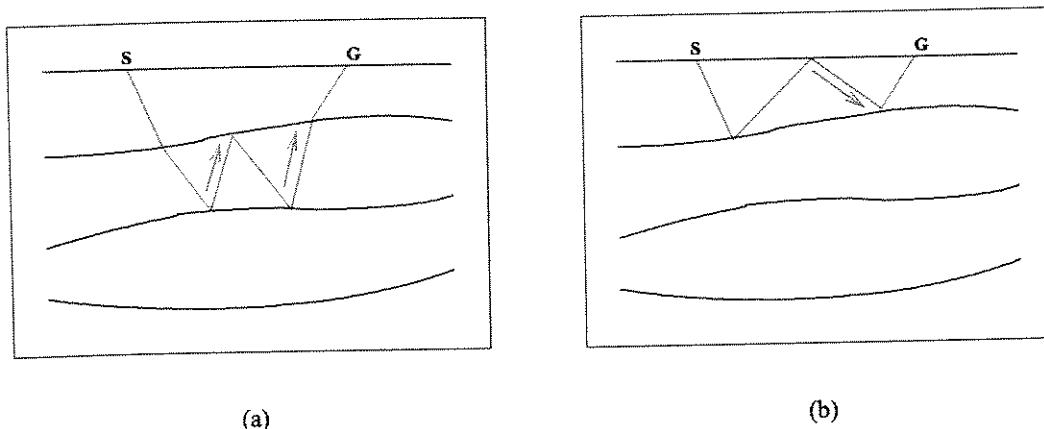


Figura 2.3: Definição das múltiplas: (a) Evento sísmico com duas reflexões ascendentes, e (b) Evento sísmico com uma reflexão descendente na superfície livre.

As técnicas de imageamento mais utilizadas na indústria supõem que os dados sísmicos são compostos de reflexões primárias. Além disso, a maioria das técnicas populares para a estimativa das velocidades intervalares são baseados num modelo de camadas da subsuperfície, sendo que, usualmente, os modelos utilizados são baseados na interpretação dos dados sísmicos em tempo. O número de camadas deste modelo é interpretado pelo número de reflexões (primárias) e refrações presentes na seção (empilhada) ZO. Como as reflexões múltiplas são, via de regra, consideradas indesejadas (ou ruído) no método sísmico de reflexão, a sua atenuação ou, quando possível, sua total supressão, sempre foi um objetivo a ser perseguido.

Desde as primeiras considerações das reflexões múltiplas dadas por Dix (1948), até o surgimento dos conceitos da técnica CMP (ou CDP) propostos por Mayne (1962), bem como do processamento sísmico digital, ambos na década de 60, aos geofísicos era bastante difícil formular métodos que viessem a tratar adequadamente os eventos de reflexões múltiplas. Assim, em meados da década de 60, surgiram os primeiros trabalhos voltados à descrição físico-matemática do fenômeno e à atenuação de reflexões múltiplas (principalmente as que ocorrem na sísmica marítima).

Atualmente, os métodos de eliminação de múltiplas dividem-se em dois grupos principais: a) filtragem e b) predição/subtração. O primeiro método explora as diferentes características entre as primárias e as múltiplas que as discriminem e elimina as múltiplas por meio de alguma filtragem. O segundo método simula a múltipla a partir de um modelo ou dos próprios dados sísmicos.

Os métodos que envolvem a predição/subtração da múltipla surgiram a partir da década de 80. Esses métodos partem de um modelo em profundidade ou dos dados sísmicos. Um problema comum a esses métodos é a estimativa da assinatura da fonte para determinação das amplitudes da múltipla, o que geralmente é contornado pela aplicação de algum tipo de filtro adaptativo das amplitudes.

Há ainda métodos que utilizam de forma combinada ambas as características de filtragem e de predição. Entre eles pode ser citado o trabalho de Landa et al. (1999) que, baseado no fato de que as múltiplas podem ser consideradas como um conjunto de primárias distintas, calcula os parâmetros da frente de onda das primárias, prediz os tempo de trânsito das múltiplas e realiza a subtração no domínio  $\tau - p$  parabólico.

### 2.3.1 Classes ou classificação das múltiplas

As múltiplas podem ser classificadas de acordo com o seu percurso em múltiplas de curto e longo percurso, veja as figuras 2.4(a) e 2.4(b) respectivamente. Múltiplas de curto percurso (*peg-legs*) são associadas às reflexões primárias, pois surgem logo após as mesmas. As múltiplas de longo percurso são aquelas que possuem uma trajetória longa quando comparada à trajetória das reflexões primárias.

As reflexões múltiplas podem ser simétricas (Figura 2.5(a)) ou assimétricas (Figura 2.5(b)). Uma reflexão múltipla é chamada de simétrica quando seus segmentos de raio elementares refletem e transmitem em trajetórias idênticas de ida e volta. Caso contrário a múltipla é chamada de

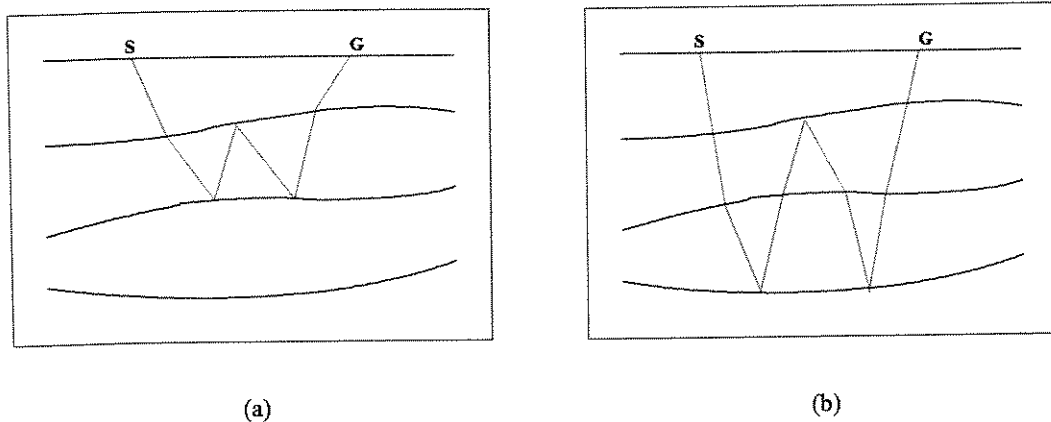


Figura 2.4: Classificação das múltiplas segundo seu percurso: (a) de curto percurso e (b) de longo percurso

assimétrica. Nesta tese trabalharemos só múltiplas de tipo simétrico (Hubral e Krey (1980)).

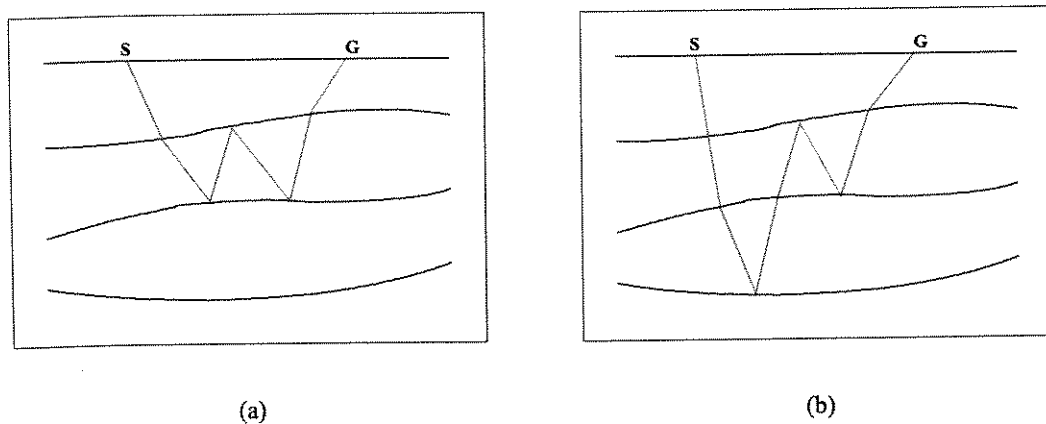


Figura 2.5: Classificação das múltiplas segundo sua trajetória: (a) simétricas e (b) assimétricas

Existem também as múltiplas da superfície livre (Figura 2.6(a)) e as internas (Figura 2.6(b)). Múltipla da superfície livre é aquela que reflete-se na interface terra/ar ou água/ar. Um tipo especial deste tipo de múltipla é a chamada *Múltipla do fundo do mar*, devida aos altos coeficientes de reflexão nas interfaces água/ar e água/fundo do mar. Múltiplas internas (ou intercadas) são as que ocorrem em camadas mais profundas.

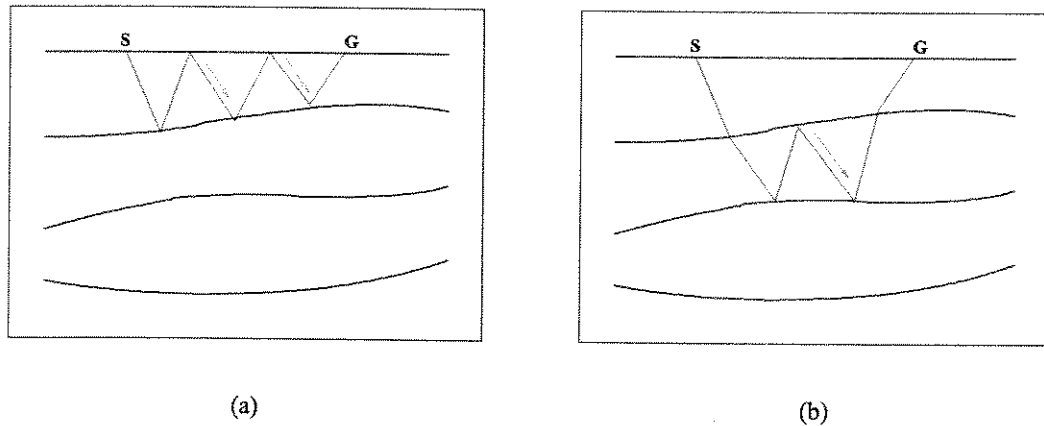


Figura 2.6: Classificação das múltiplas segundo as camadas onde elas ocorrem: (a) Múltipla da superfície livre de segunda ordem, e (b) Múltipla interna (intercamadas) de primeira ordem

Uma outra classificação das múltiplas pode-se dar pela ordem. A ordem das múltiplas relacionadas à superfície livre é definida como o número de reflexões descendentes que ela sofreu nessa superfície (Figura 2.6(a)). Já a ordem de uma múltipla interna é definida pelo número de reflexões descendentes que ela sofreu (Figura 2.6(b)). Uma reflexão primária pode ser considerada como uma reflexão múltipla de ordem zero.

## 2.4 Propriedades Fundamentais das Múltiplas

Uma das características mais importantes das múltiplas é o tempo de trânsito ou *moveout*<sup>4</sup> que estes eventos apresentam. Para um mesmo tempo de reflexão de referência (o tempo ZO), as múltiplas apresentam *moveout* maior do que as primárias. Desta forma, pode-se falar que as

<sup>4</sup>Na literatura sísmica, utiliza-se a expressão *sobretempo* que é a tradução do Inglês *moveout* para se referir ao tempo de trânsito de um evento. O sobretempo tem significado de variação do tempo de trânsito com o afastamento fonte-receptor. Quanto maior esse afastamento mais o tempo de trânsito *se desvia* do tempo de trânsito de referência, em geral o tempo de afastamento nulo. Em outras palavras, o *moveout* traz embutido o significado de uma *correção* a ser aplicada ao tempo de trânsito de um evento de modo a trazê-lo para o tempo de referência.

múltiplas apresentam velocidade mais baixa que uma primária concorrente em tempo. A partir dessa característica estão baseados vários dos métodos de atenuação e/ou eliminação das múltiplas, a saber, filtragem  $f_k$ , filtragem Radon, filtragem  $t-x$ .

Outra característica é o maior conteúdo de frequências apresentado pelas reflexões múltiplas, relativamente às primárias. No caso particular das múltiplas do fundo do mar, o efeito da absorção na camada de água é menor do que nas rochas. Como o coeficiente de absorção possui uma relação inversamente proporcional à frequência, espera-se que o conteúdo de frequências das múltiplas superficiais seja superior ao das primárias num mesmo tempo de reflexão. Também, relacionado à propagação (trajetória) das reflexões primárias e múltiplas, o espalhamento geométrico (ou divergência esférica) é menor nas múltiplas, especialmente superficiais, que em uma primária concorrente. No processamento de dados sísmicos, aplica-se uma função única para a correção do espalhamento geométrico, com base na velocidade NMO das primárias, desconsiderando-se a presença de múltiplas. Dessa forma, ocorre uma super-correção do efeito do espalhamento geométrico para as amplitudes das múltiplas superficiais.

Por último, podemos mencionar duas propriedades adicionais também usadas por alguns métodos: Considerando a seção ZO (empilhada), podemos observar a periodicidade das múltiplas, bem como suas diferentes inclinações quando as interfaces possuem mergulho.

## **2.5 Algumas Técnicas Para a Atenuação e/ou Eliminação das Múltiplas**

Listamos abaixo, algumas das técnicas mais importantes, ou mais utilizadas na indústria, para eliminação e/ou atenuação das reflexões múltiplas. Informações detalhadas sobre estas técnicas, e também outras, podem ser encontradas em Yilmaz (1987) ou Yilmaz (2000) (veja mais referências lá).

### 2.5.1 Deconvolução Preditiva

Trabalha com a periodicidade da múltipla. O resultado depende da escolha certa da distância de predição e do tamanho do operador da deconvolução. A deconvolução preditiva é aplicada na seção empilhada. Seu desempenho pode não ser satisfatório, uma vez que, freqüentemente, as relações de amplitude entre múltiplas são totalmente alteradas pelo processo de empilhamento, principalmente por causa da diferença da velocidade entre primárias e múltiplas. Também, a compensação do espalhamento geométrico usando a função de velocidade das primárias tem efeito adverso nas amplitudes das múltiplas nos afastamentos não nulos.

### 2.5.2 Empilhamento CMP

Mayne (1962) idealizou a técnica CMP de levantamentos de reflexão, a qual, como subproduto da correção de NMO com base na velocidade das reflexões primárias e empilhamento dos traços. Este empilhamento atenua reflexões múltiplas devido a correção de NMO inadequada das reflexões múltiplas, enquanto as primárias se somam em fase. O resultado depende da experiência do intérprete, quem pode distinguir entre as primárias (geralmente com velocidade aparente maior) das múltiplas (geralmente com velocidade aparente menor).

### 2.5.3 Filtragem $f_k$

A idéia do método é corrigir os dados com uma velocidade NMO intermediária entre as velocidades das reflexões primárias e das múltiplas. Assim, as múltiplas são sub-corrigidas enquanto as primárias são sobre-corrigidas. Numa próxima etapa, os dados são levados ao domínio  $f_k$  (Frequência-Número de onda), onde a energia das primárias e múltiplas pode ser separada nos diferentes quadrantes do plano  $f_k$ . A exceção a esta separação é a energia (das múltiplas e primárias) dos afastamentos curtos, traços mais próximos da fonte, que fica situada quase que inteiramente ao longo do eixo da frequência. As múltiplas podem ser suprimidas zerando o quadrante que corresponde à energia da múltipla no domínio  $f_k$ . A correção inversa de NMO, utilizando

a mesma função de velocidade intermediária (entre primárias e múltiplas), restaura as reflexões primárias.

#### 2.5.4 Filtragem Radon

A técnica normalmente é usada modelando as múltiplas e subtraindo-as dos dados sísmicos. O filtro sw Radon transforma os dados ao domínio *time-moveout* onde se pode zerar a energia das primárias. A energia restante das múltiplas, pode então ser subtraída dos dados. A transformada de Radon distingue as primárias das múltiplas com base na diferença entre os *moveouts* que apresentam os dois tipos de reflexão. A transformada é aplicada aos dados na configuração CMP e com correção NMO usando a velocidade das reflexões primárias. O benefício desta técnica é que não requer nenhum conhecimento do mecanismo (interfaces) que gerou a múltipla. Ao contrário dos processos de eliminação de múltiplas *fk*, atenua múltiplas, igualmente, em todos os afastamentos. Um mínimo *moveout* é requerido, a longo de todos os traços da família CMP, para que esta técnica seja efetiva. Mais informações sobre a atenuação de reflexões múltiplas usando a transformada de Radon podem ser encontradas em Foster e Mosher (1992).

#### 2.5.5 Filtragem t-x

Uma outra proposta para a supressão das múltipla opera-se no domínio do t-x. A correção NMO é aplicada, desta vez usando a função de velocidades dada pelas múltiplas seguida de empilhamento dos dados. Os traços resultantes são chamados de traços modelo para múltiplas, a saber, os traços empilhados contêm quase que inteiramente a energia das múltiplas. Esses traços são subtraídos dos correspondentes traços que contêm as primárias e múltiplas, da família corrigida de NMO. Desta forma, os traços resultantes, essencialmente, devem conter somente a energia das primárias. O problema principal desta técnica está em construir um traço modelo que contenha somente a energia das múltiplas. Por causa das mudanças do frente de onda e das ligeiras variações de *moveout* entre primárias e múltiplas com o afastamento, o traço modelo para múltiplas pode não



representar bem as múltiplas de modo igual para cada um dos afastamentos. Finalmente, porque há relativamente menos diferença entre os *moveout* das primárias e das múltiplas nos afastamentos mais próximos, um silenciamento (*mute*) interno (ou algum tipo de empilhamento com pesos) pode ajudar a suprimir as múltiplas.

### 2.5.6 Série de Espalhamento Inverso

A teoria do espalhamento *scattering* considera o relacionamento entre as propriedades físicas de um meio perturbado e as propriedades físicas de um meio de referência, obtendo a resposta impulsiva para o meio perturbado a partir da correspondente resposta no meio de referência. A diferença entre o meio perturbado e o meio de referência é caracterizada pelo “operador de perturbação” e a correspondente diferença entre o campo de onda perturbado e o de referência é chamado “campo dispersado”. O chamado espalhamento inverso (*Inverse scattering*) toma como entrada o meio de referência, o campo de referência, e os valores do campo real na superfície de medida, considerado como um campo perturbado, devido a um meio perturbado. A diferença entre as propriedades do meio real e de referência através do “operador de perturbação”. A chamada série inversa de espalhamento permite mostrar o “todo” como uma soma infinita de termos permitindo que cada um seja examinado. A teoria do espalhamento tem sido aplicada O método de espalhamento inverso é aplicado em duas etapas: Num primeira etapa, são eliminados os chamados *fantasmas* (reverberações da superfície livre), sendo, a seguir, eliminadas as múltiplas relacionadas à superfície livre, de uma ordem a cada vez. Os dados sem fantasmas e múltiplas da superfície livre são a entrada para a segunda etapa, onde é realizada a eliminação das múltiplas inter-camadas. O método expressa o campo de onda total como a soma dos campos de onda produzidos pelas primárias e pelas múltiplas. As múltiplas contribuem nos termos de maior ordem da série que representa o campo total, podendo ser separada a sua contribuição nestes termos. Os algoritmos propostos requerem o conhecimento da assinatura da fonte e de traços próximos da fonte. Informações detalhadas deste método podem ser encontrada em Weglein et al. (1997).

### 2.5.7 Slant-Stack

Este método também trabalha com a periodicidade das múltiplas, mas sua aplicação é realizada em dados pré-empilhados. As múltiplas não são periódicas em tempo para um dado fora do afastamento nulo, isto é, a periodicidade é somente bem notada no traço de afastamento nulo (ZO). Taner (1980) reconheceu pela primeira vez que a separação em tempo entre duas chegadas (primária e múltipla de primeira ordem, por exemplo) são iguais ao longo de uma direção de onda plana ( $\tau - p$ ). Com os dados levados ao domínio ( $\tau - p$ ) é aplicada uma deconvolução preditiva, a qual, como já foi mencionado, pode eliminar os eventos periódicos.

Outras técnicas interessantes que são relacionadas com este trabalho são baseadas no método Multifocus. Uma delas é apresentada a seguir.

### 2.5.8 Eliminação de Múltiplas no domínio do tiro comum

Uma interessante e promissora técnica de eliminação de múltiplas foi apresentada em Landa et al. (1999) no contexto teórico do método Multifocus. Similar ao CRS, o método Multifocus usa uma equação de tempo de trânsito diferente, que também depende de três parâmetros  $\beta$ ,  $R_{NIP}$  e  $R_N$ . Para uma descrição do método Multifocus, e além disso, seu relacionamento com o método CRS e outros métodos de imagem, o leitor pode consultar Hubral (1999). Em Landa et al. (1999), é mostrado que o tempo de trânsito de cada múltipla pode ser decomposto como uma soma dos tempos de trânsito de um número de primárias. Os parâmetros CRS (ou Multifocus) de cada uma destas primárias são examinados para satisfazer uma chamada “Condição de Múltipla” (a saber, uma relação entre os ângulos emergentes das primárias que compõem a múltipla). O procedimento é realizado no domínio do tiro comum ou do receptor comum. Uma filtragem destes eventos é realizada posteriormente no domínio  $\tau - p$ .

## Capítulo 3

### O Método CRS e as Múltiplas

No que segue, consideramos que, para uma série de dados multicobertura (descritos no Apêndice A), o método CRS já tenha sido aplicado. Conseqüentemente, os mapas dos parâmetros CRS, a seção de coerência, assim como a seção empilhada CRS estão disponíveis. Consideraremos então o uso dos parâmetros obtidos do método CRS com a finalidade de atenuar as reflexões múltiplas.

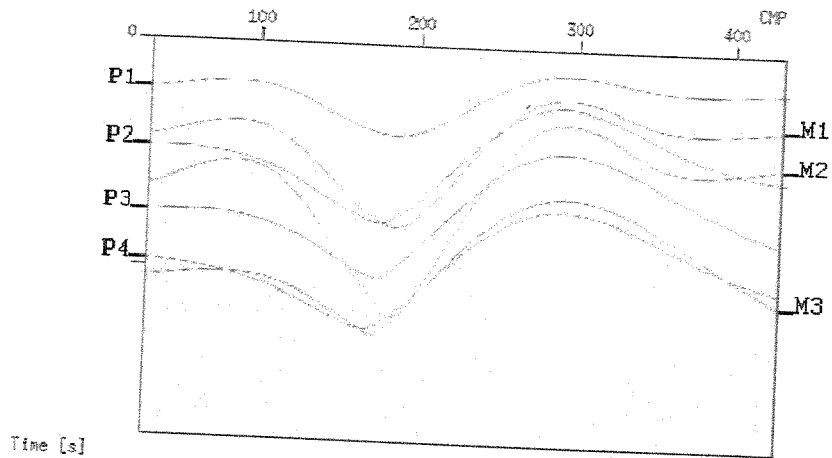
#### 3.1 Observações básicas do método de CRS

Começaremos por listar algumas propriedades que consideramos como características essenciais do método CRS:

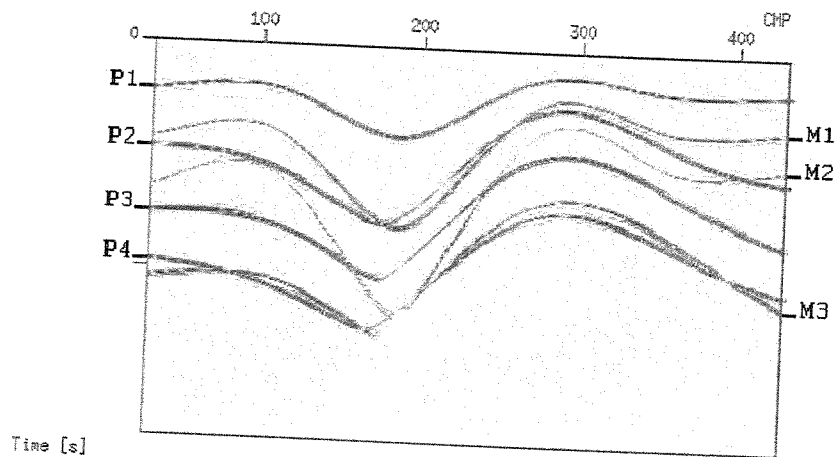
- A. A equação geral do tempo de trânsito fornece três parâmetros,  $(\beta, R_{NIP}, R_N)$ , em contraposição ao único-parâmetro,  $V_{NMO}$ , obtido pelo método NMO. Os três parâmetros permitem uma identificação ou discriminação melhor das reflexões (primárias ou múltiplas). Note que, além disso, a relação (2.3) determina a velocidade NMO por meio dos dois parâmetros CRS,  $\beta$  e  $R_{NIP}$ . De modo ilustrativo, por enquanto, podemos considerar a Figura 3.1 e 3.2 contendo reflexões primárias e múltiplas e a Figura 3.1, visualizando os parâmetros CRS, neste caso  $\beta$  e  $R_{NIP}$ , e a velocidade NMO (obtida pela combinação destes parâmetros). Nesta última figura, pode-se ver melhor alguns comportamentos particulares para cada evento (reflexão).

B. No método NMO, a velocidade,  $V_{NMO}$ , é estimada em alguns eventos selecionados pelo intérprete e visando interpretar velocidades tão somente para eventos de reflexões primárias, sendo interpolada em todos os pontos restantes. O método CRS, ao contrário, estima automaticamente seus parâmetros  $(\beta, R_{NIP}, R_N)$ , em cada ponto da seção simulada (empilhada) ZO. O método CRS é, assim, capaz de gerar mapas mais detalhados e mais precisos da velocidade de empilhamento. Entretanto, como descrito em Perroud e Tygel (2003), vale observar que as velocidades obtidas pelo método CRS em cada amostra devem ser objeto de posterior análise antes da inversão para velocidades intervalares. Devido às interpolações envolvidas, o método NMO em muitos casos fornece velocidades que não são as mais apropriadas para fazer a correção do *moveout* das reflexões primárias. Além disso, pode ocorrer que, nos afastamentos mais próximos, as reflexões múltiplas seja também corrigidas (embora em menor grau) pelo *moveout*, fazendo que no empilhamento as amplitudes desta sejam somadas e não atenuadas (Figura 3.1). Por outra parte, o método NMO apresenta a vantagem da experiência do intérprete, quem respeita melhor as condições geológicas do problema.

C. Quando os parâmetros CRS de uma reflexão múltipla são identificados ao longo da seção (para cada posição  $x_m$ ), a múltipla pode ser modelada e eliminada em qualquer domínio. Isto porque a equação de tempo de trânsito multiparamétrica, equação (2.2), pode-se ajustar a qualquer configuração. Além disso, no caso em que a amplitude de uma primária é alterada pela chegada simultânea de uma múltipla, a continuidade do evento pode ser recuperada usando a informação dos traços de CMPs próximos, já que o método CRS utiliza traços de vários CMPs vizinhos para formar um traço da seção ZO. Na Figura 3.8 pode-se ver que, depois da atenuação das reflexões múltiplas, onde existia um cruzamento entre as reflexões primárias e múltiplas a continuidade nos eventos não foi perdida.



(a)



(b)

Figura 3.1: Empilhamento NMO: (a) Seção ZO modelada com reflexões primárias (P1, P2, P3 e P4) e múltiplas (M1, M2 e M3), e (b) Seção empilhada NMO usando as velocidades das reflexões primárias. Note-se que, mesmo que as múltiplas não sejam completamente horizontalizadas pela análise da velocidade NMO, elas aparecem na seção empilhada (conforme discutido na Seção 2.5). O modelo utilizado e as múltiplas modeladas estão descritas no Apêndice A

## 3.2 Identificação de Reflexões Primárias e Múltiplas

Com o propósito de diferenciar ou identificar o tipo de reflexão, primária ou múltipla, daremos uma interpretação geométrica dos parâmetros CRS.

Para facilitar o entendimento e simplificar a interpretação geométrica dos parâmetros CRS consideramos o caso de um único refletor em um meio homogêneo (Figura 2.2). Nesta situação, a mais simples, vemos que os parâmetros  $\beta$ ,  $R_{NIP}$  e  $R_N$  nos informam (de maneira aproximada e qualitativa) sobre o mergulho, a profundidade e a forma do refletor, respectivamente. Usaremos esta informação qualitativa para nos guiar no uso dos atributos do CRS na identificação ou discriminação das reflexões múltiplas e primárias. Por exemplo, se um ponto  $(x_0, t_0)$  na seção empilhada CRS está situado sobre um determinado evento, e seus parâmetros CRS têm valores  $R_N = \infty$  ( $R_N$  muito grande) e  $\beta = 0$  ( $\beta$  muito pequeno), o evento pode ser associado a uma reflexão (primária ou múltipla) devida a um refletor plano e horizontal. Como um segundo exemplo, suponha que para a mesma posição do traço,  $x_0$ , temos dois eventos nos tempos de trânsito  $t_{0,1} < t_{0,2}$ , e que os parâmetros  $R_{NIP}$  correspondentes satisfazem  $R_{NIP,1} > R_{NIP,2}$ . Isto indica que o segundo evento está a uma profundidade menor e com um tempo de trânsito maior, o que nos leva a concluir que este evento é uma reflexão múltipla, já que a tendência do parâmetro  $R_{NIP}$  é de aumentar com a profundidade. A extensão dos conceitos apresentados para um maior número de refletores é natural.

Para a seção ilustrativa da Figura 3.2, que contém reflexões primárias e múltiplas, estão representados três painéis, mostrando o comportamento dos parâmetros  $\beta$ ,  $R_{NIP}$ , bem como a velocidade NMO, obtida pela combinação dos dois parâmetros anteriores. Esta situação ilustra bem um exemplo sintético de dados marítimos. O modelo em profundidade (não mostrado neste trabalho) consiste de quatro interfaces curvas, A, B, C e D, abaixo da superfície do mar, denotada por S. As primárias de todas as interfaces são denotadas por Ap, Bp, Cp e Dp, respectivamente. Os eventos Am1 e Am2 são múltiplas de primeira e segunda ordem relativas à superfície livre e à primeira interface A. Também, CAM é a múltipla de primeira ordem, de trajetória SCSAS, da

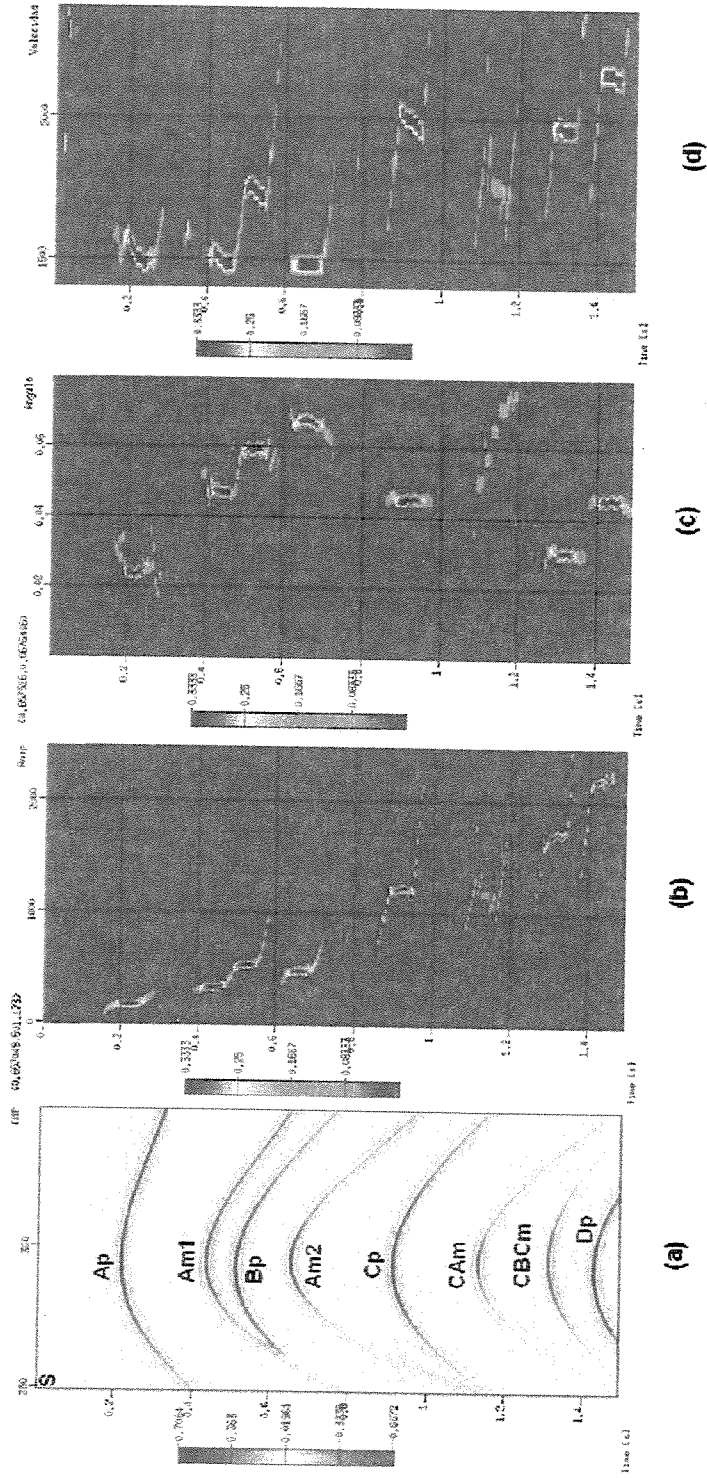


Figura 3.2: Atributos CRS para reflexões primárias e múltiplas numa seção ZO: (a) Parte de uma seção ZO, identifique-se as primárias Ap, Bp, Cp e Dp e das múltiplas Am1, Am2, CAim e CBCm; (b) valores de  $R_{NIP}$  para o traço (CMP) 300 da seção ZO (a); (c) valores de  $\beta$  para o traço (CMP) 300 da seção ZO (a), e (d) a velocidade NMO para o traço (CMP) 300 obtida de  $R_{NIP}$  e  $\beta$ .

interface C com respeito à superfície da água S. Finalmente, CBCm representa a múltipla interna, de trajetória SCBCS, isto é, começa em S, reflete em C, reflete em B, reflete em C e retorna a S.

Observando os eventos Ap, Am1 e Am2 na Figura 3.2(a), bem como suas respostas nos painéis de parâmetros CRS (Figuras 3.2(b) e 3.2(c)) e o painel de velocidades (Figura 3.2(d)), podemos prontamente verificar sua periodicidade e incremento quase constante dos valores dos parâmetros  $R_{NIP}$  e  $\beta$ . Isto, por sua vez, conduz a valores muito parecidos da velocidade NMO para estes eventos, de acordo com o comportamento previsto como múltiplas da superfície livre. Notemos agora que os valores do parâmetro  $R_{NIP}$  das múltiplas Am2 e CAm são significativamente menores do que os correspondentes valores de  $R_{NIP}$  das primárias previamente identificadas, Bp e Cp, com  $t_0$  imediatamente inferior. Em ambos os casos, observamos a combinação de um maior tempo da chegada com valores menores de  $R_{NIP}$ , a saber, um comportamento previsto de uma múltipla.

Consideramos finalmente a múltipla CBCm. Embora seus parâmetros de  $R_{NIP}$  e  $\beta$  não apresentem nenhum comportamento particular, a velocidade NMO (obtida pela combinação destes parâmetros) é menor do que a velocidade NMO da primária Cp. Este é, também, um comportamento característico das múltiplas. Vale lembrar que mudanças negativas no gradiente de velocidades NMO, inversão de velocidades, não necessariamente estão ligadas a ocorrências de múltiplas.

### 3.3 Predição das Reflexões Múltiplas

Nesta seção consideraremos expressões matemáticas analíticas capazes de expressar tempos de trânsito de primárias e múltiplas em algumas situações específicas.



### 3.3.1 Múltiplas da Superfície Livre

Consideramos a situação marítima, onde ocorrem as reflexões múltiplas da superfície livre ou da camada de água, na qual o fundo do mar é formado por uma interface plana com mergulho. Como foi mostrado por Levin (1971) (Veja apêndice C), num agrupamento (*gather*) CMP, o tempo de trânsito de uma reflexão primária pode ser escrito como

$$t_p(h)^2 = (t_{0,p}^2)^2 + \frac{4h^2}{V_{NMO,p}^2} . \quad (3.1)$$

onde  $t_{0,p}$  é o tempo de trânsito do raio ZO da reflexão primária na posição do CMP e  $V_{NMO,p}$  é a sua velocidade NMO. O tempo  $t_{0,p}$ , como está mostrado no Apêndice C, Seção C.2.1, depende da distância,  $D$ , entre o ponto médio (CMP) do par fonte-receptor e o ponto (NIP) onde o raio de ZO incide no refletor. O ponto NIP depende do mergulho do refletor. Note que, na situação atual de um único refletor e velocidade constante na camada, a distância  $D$  e o mergulho do refletor,  $\phi$ , são equivalentes aos parâmetros CRS  $R_{NIP,p}$  e  $\beta_p$ , isto é,

$$\beta_p = \phi , \quad \text{e} \quad R_{NIP,p} = D . \quad (3.2)$$

Desta forma, pela equação (??), se o parâmetro  $R_{NIP}$  de uma reflexão primária no ponto  $x_0$  é conhecido, pode-se calcular o tempo de trânsito do raio de ZO,  $t_0$ , no ponto em questão, pela equação

$$t_0 = \frac{2R_{NIP,p}}{v_0} , \quad (3.3)$$

onde  $v_0$  é a velocidade média da camada (no caso, a camada de água).

Para o mesmo agrupamento CMP, o tempo de trânsito de uma múltipla da superfície livre, de qualquer ordem, tem uma expressão análoga (ver Seção C.2.2)

$$t_m(h)^2 = t_{0,m}^2 + \frac{4h^2}{V_{NMO,m}^2}, \quad (3.4)$$

onde  $t_{0,m}$  e  $V_{NMO,m}$  são, respectivamente, o tempo de trânsito de um raio ZO e a velocidade NMO da múltipla. Se a múltipla é considerada como uma primária equivalente, também podem-se encontrar relações entre o mergulho do refletor equivalente  $\phi'$  e o parâmetro  $\beta$ , bem como entre a distância  $D'$  (do ponto médio (CMP) ao ponto NIP no refletor equivalente) e o parâmetro  $R_{NIP}$ , a saber,

$$\beta_m = \phi' = 2\phi, \quad \text{e} \quad R_{NIP,m} = D'. \quad (3.5)$$

Aqui,  $\beta_m$  e  $R_{NIP,m}$  representam, respectivamente, o ângulo de emergência (do raio ZO) e o raio de curvatura NIP da reflexão múltipla.

Da mesma forma que nas reflexões primárias, quando o parâmetro  $R_{NIP}$  da múltipla (denotado por  $R_{NIP,m}$ ) é conhecido, o tempo de trânsito do raio ZO no ponto  $x_0$  pode ser determinado pela relação

$$t_0 = \frac{2R_{NIP,m}}{v_0}, \quad (3.6)$$

onde, mais uma vez,  $v_0$  é a velocidade média da camada de água. Finalmente, baseado nas relações encontradas na Seção C.2.3, podem-se calcular os parâmetros  $\beta_m$  e  $R_{NIP,m}$ , o tempo de trânsito  $t_{0,m}$ , e a velocidade NMO  $V_{NMO,m}$ , da reflexão múltipla da superfície livre de ordem  $m$ , em função de seu correspondente evento de reflexão primária desta superfície, a saber,

$$\begin{aligned}
\beta_m &= (m+1)\beta_p, \quad R_{NIP,m} = \frac{\sin \beta_m}{\sin \beta_p} R_{NIP,p}, \\
t_{0,m} &= \frac{\sin \beta_m}{\sin \beta_p} t_{0,p}, \quad v_{NMO,m} = \frac{\cos \beta_p}{\cos \beta_m} v_{NMO,p},
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Observe-se que no caso de uma camada sem mergulho (fundo do mar formado por uma interface plana e horizontal), temos que  $\phi = 0^\circ$  e as equações anteriores se reduzem às encontradas na seção C.2.2.

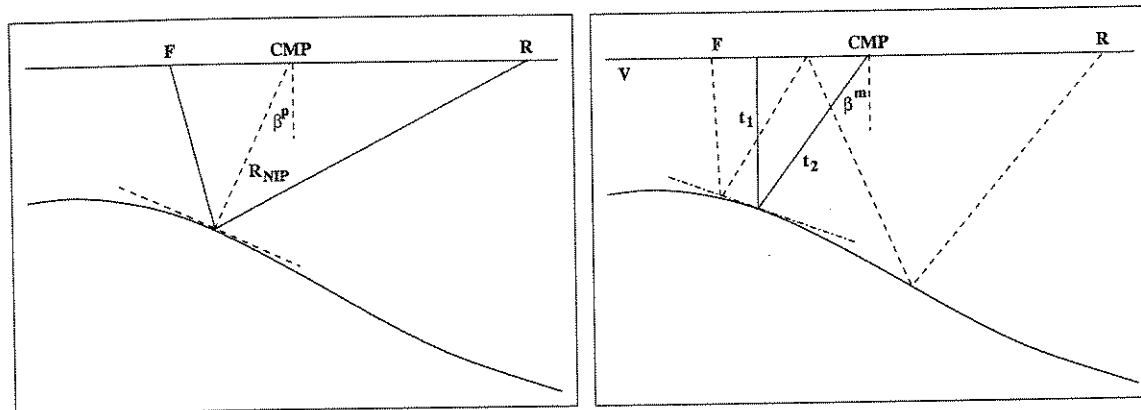
Por outro lado, considerando-se o caso em que o fundo do mar (para continuar com o exemplo marinho) é formado por uma interface não plana (ver Figura 3.3), então, pela lei de reflexão (Apêndice D), a curvatura da interface água/terra tem de ser incluída nas equações. Para a obtenção de uma relação direta entre a reflexão primária e suas reflexões múltiplas, necessitamos, portanto, da curvatura do refletor, a qual é geralmente desconhecida. Mesmo assim, podemos obter uma relação de recursividade para os parâmetros  $R_{NIP}$  das primárias e múltiplas no caso de um refletor curvo abaixo de uma camada homogênea. Considerando as Figuras 3.3(a), 3.3(b) e 3.3(c), obtemos as seguintes expressões:

*Reflexão Primária:* (ver Figura 3.3(a)).

$$t(h)^2 \approx \left( \frac{2R_{NIP,p}}{v} \right)^2 + \frac{4h^2}{v} \cos^2(\beta_p), \tag{3.8a}$$

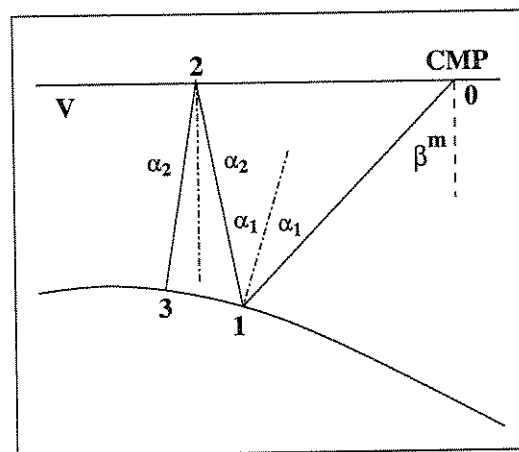
$$R_{NIP,p} = vt_1, \tag{3.8b}$$

$$\phi = \beta_p \tag{3.8c}$$



(a)

(b)



(c)

Figura 3.3: Múltiplas da superfície livre em interface curva. (a) reflexão primária, (b) reflexão múltipla de primeira ordem, e (c) reflexão múltipla de segunda ordem.

*Reflexão Múltipla de Primeira Ordem:* (ver Figura 3.3(b))

$$t(h)^2 \approx \left( \frac{2R_{NIP,m}}{v} \right)^2 + \frac{4h^2}{v} \cos^2(\beta_m), \quad (3.9a)$$

$$R_{NIP,m} = \left[ (vt_2)^{-1} + \frac{2}{\cos(\beta_m/2)} \frac{1}{R_{f,1}} \right]^{-1} + vt_1, \quad (3.9b)$$

$$\phi = \frac{\beta_m}{2} \quad (3.9c)$$

*Reflexão Múltipla de Segunda Ordem:* (ver Figura 3.3(c))

$$t(h)^2 \approx \left( \frac{2R_{NIP,m}}{v} \right)^2 + \frac{4h^2}{v} \cos^2(\beta_m), \quad (3.10a)$$

$$R_{NIP,m} = \left\{ \left[ (vt_3)^{-1} + \frac{2}{\cos \alpha_2} \frac{1}{R_{f,1}} \right]^{-1} + vt_2 \right\}^{-1} + vt_1, \quad (3.10b)$$

$$\alpha_1 = \beta_m - \phi; \quad \alpha_2 = \beta_m - 2\phi. \quad (3.10c)$$

Nas equações acima,  $R_{f,1}$  representa a curvatura do refletor no ponto 1 da figura correspondente. Em analogia às equações anteriores,  $v$  representa a velocidade da camada homogênea acima do refletor,  $(\beta, R_{NIP})$  e  $(\beta_m, R_{NIP,m})$  representam pares de parâmetros de primária e múltipla, respectivamente. Finalmente,  $t_i$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) representam tempos de trânsito ao longo de segmentos de raio indicados diretamente nas figuras.

Espera-se que, com um estudo mais avançado desta recursividade e algumas relações entre os ângulos e trajetórias dos segmentos do raio, em pesquisas futuras, possam ser determinadas relações mais efetivas que liguem os parâmetro  $R_{NIP,m}$  da reflexão múltipla e seu correspondente  $R_{NIP}$  da primária.

### 3.3.2 Múltiplas Intercamadas

No caso das camadas homogêneas horizontais planas ( $\beta = 0^\circ$  para todas as interfaces), o parâmetro do raio de curvatura NIP da reflexão primária na  $N$ -ésima interface,  $R_{NIP,p}^N$ , pode ser expresso como (Hubral e Krey (1980))

$$R_{NIP,p}^N = \frac{1}{v_0} \sum_{i=0}^N v_i^2 t_i . \quad (3.11)$$

Consideramos uma múltipla simétrica<sup>1</sup> entre as interfaces  $N$  e  $N'$ , ( $N' < N$ ) (ver Figura 3.4). Para calcular seu parâmetro  $R_{NIP,m}^{N,N'}$ , com base no correspondente parâmetro  $R_{NIP}$  da primária em  $N$ , temos de considerar a propagação extra da onda entre as interfaces  $N'$  e  $N$ . O valor do parâmetro  $R_{NIP}$  desta múltipla é dado por

$$R_{NIP,m}^{N,N'} = \frac{1}{v_0} \sum_{i=0}^N v_i^2 t_i + \frac{1}{v_0} \sum_{j=N'}^N v_j^2 t_j , \quad (3.12)$$

ou, por uma simples operação matemática, segundo a forma alternativa

$$R_{NIP,m}^{N,N'} = 2R_{NIP,p}^N - R_{NIP,p}^{N'} . \quad (3.13)$$

Com o conhecimento do  $R_{NIP,m}^{N,N'}$  e tendo em conta que  $\beta = 0^\circ$  (para todas as interfaces), podemos determinar a velocidade  $NMO$ , neste caso a velocidade  $RMS$ , em função da velocidade próxima aos receptores  $v_0$ , e do tempo de trânsito ao ZO,  $t_0$ , através da relação

$$V_{NMO}^2 = \frac{2v_0}{t_0} R_{NIP}^{N,N'} . \quad (3.14)$$

---

<sup>1</sup>Como foi mencionado na Seção 2.3.1 serão trabalhadas as reflexões múltiplas de tipo simétricas.

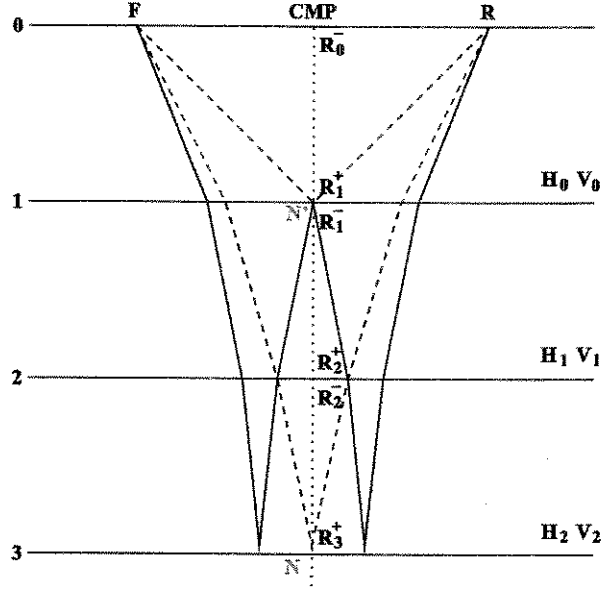


Figura 3.4: Cálculo do parâmetro  $R_{NIP}$  para múltiplas intercamadas em interfaces planas horizontais. Na figura pode-se observar a primária da interface  $N'$  (interface 1), a primária da interface  $N$  (interface 3), e a múltipla entre as camadas  $N'$  e  $N$ .

Deve-se notar que, no caso de interfaces planas com mergulho (Figura 3.5), expressões análogas para  $R_{NIP,m}^{N,N'}$  e  $V_{NMO}$  podem ser obtidas. Não obstante, estas dependem do mergulho de cada refletor.

As equações para o parâmetro  $R_{NIP}$  e a velocidade  $V_{NMO}$  em interfaces planas com mergulho, para o caso de uma reflexão primária na camada  $N$ , podem ser encontradas em Hubral e Krey (1980):

$$R_{NIP,p} = \frac{1}{v_0} \sum_{i=0}^N v_i^2 t_i \prod_{k=1}^i \left( \frac{\cos^2 \alpha_k}{\cos^2 \beta_k} \right), \quad (3.15)$$

$$V_{NMO,p}^2 = \frac{2v_0 R_{NIP}^0}{t_0 \cos^2 \beta_0} \quad (3.16)$$

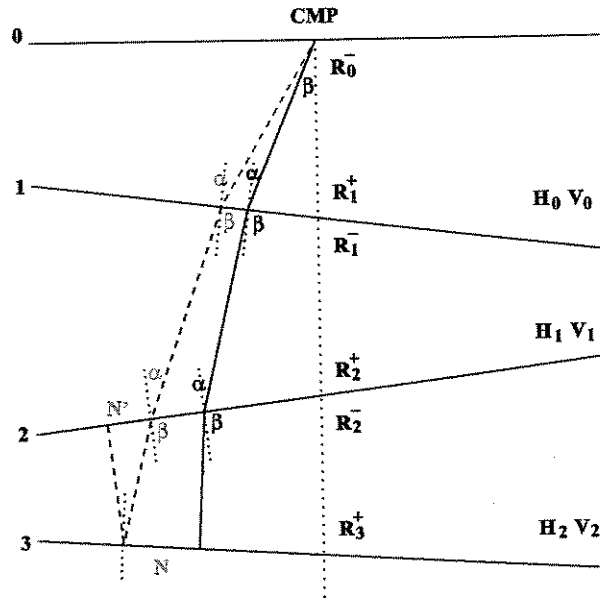


Figura 3.5: Cálculo do parâmetro  $R_{NIP}$  para múltiplas intercamadas em interfaces planas com mergulho. Na figura pode-se observar a reflexão primária da interface N (interface 3), e a múltipla entre as camadas N' e N.

Na equação acima,  $\beta_k$  e  $\alpha_k$  representam os ângulos de chegada e saída da interface  $k$ ,  $R_{NIP}^0$  e  $\beta_0$  são os valores do parâmetro NIP e do ângulo de chegada na interface 0 ou superfície, e supondo a convenção

$$\prod_{k=1}^0 = 1 .$$

Agora, estudando a múltipla entre as interfaces  $N$  e  $N'$ , ( $N' < N$ ) (ver Figura 3.5), pode-se notar que o caminho do raio da reflexão múltipla é diferente daquele percorrido pelo raio da reflexão primária. Assim, os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  (chegada e saída em cada interface) são diferentes em cada uma das reflexões. Não obstante, pode-se relacionar os parâmetros NIP da reflexão primária e múltipla por um processo recursivo que começa com os valores de  $\beta_{0,p}$  e  $\beta_{0,m}$ , sendo necessário



conhecer o mergulho de cada interface relacionada à trajetória da primária e sua múltipla correspondente. O parâmetro  $R_{NIP}$  da reflexão múltipla entre as interfaces  $N$  e  $N'$  é dado pela equação

$$R_{NIP,m} = \frac{1}{v_0} \sum_{i=0}^N v_i^2 t_i \prod_{k=1}^i \left( \frac{\cos^2 \alpha_{k,m}}{\cos^2 \beta_{k,m}} \right). \quad (3.17)$$

O valor da velocidade NMO da múltipla pode ser calculado pela equação (3.16), mas os valores de  $R_{NIP}^0$ ,  $t_0$  e  $\beta_0$  têm de ser substituídos pelos valores da múltipla correspondentes.

Finalmente, para o caso de reflexões múltiplas intercadas com interfaces curvas não foi terminado o desenvolvimento das equações que relacionam o parâmetro  $R_{NIP}$  da reflexão primária e suas múltiplas. Pela complexidade destas equações, pelo alto grau de liberdade geométrico das interfaces curvas, e pela possibilidade (como no caso de interfaces planas com mergulho) que estas equações ficassem em função de mais de um parâmetro geométrico ou propriedade da camada, opta-se por trabalhar estas reflexões múltiplas como uma aproximação dos casos anteriores na qual o filtro adaptativo<sup>2</sup> atua como otimizador desta aproximação.

As equações acima permitem prever ou calcular os parâmetros  $R_{NIP}$  e  $\beta$ , das reflexões múltiplas a partir dos correspondentes parâmetros das primárias. No caso de camadas homogêneas planas e horizontais, o ângulo de emergência é nulo para primárias e múltiplas ZO. É importante verificar se, nesta situação, o parâmetro  $R_{NIP}$  (o mais usado na identificação das múltiplas) consegue discriminar, sozinho, as reflexões múltiplas das primárias. É o que faremos abaixo.

### 3.3.3 Caso particular de identificação de múltiplas em modelos de camadas homogêneas e horizontais

Para avaliar a capacidade do parâmetro  $R_{NIP}$  de discriminação entre primárias e múltiplas em modelos de variação vertical de velocidade (por exemplo, modelos de camadas homogêneas

---

<sup>2</sup>Este tipo de filtro adapta ou cria a “wavelet” que será usada para o modelagem. Na Seção 3.5 é melhor descrito este tipo de filtros.

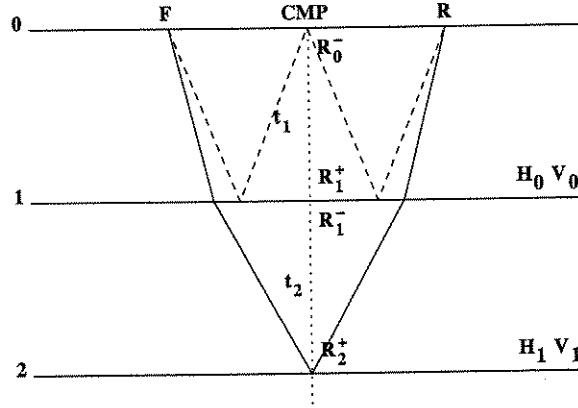


Figura 3.6: Relação entre uma reflexão primária e uma múltipla concorrentes em profundidade ou tempo de trânsito. Na figura pode-se observar um modelo simples de duas camadas planas horizontais, a reflexão primária (linha contínua) na interface 2, e a reflexão múltipla da primeira camada (linha tracejada) na interface 1.

e horizontais), considera-se o modelo simples de duas camadas planas horizontais da Figura 3.6. Nesta figura é mostrada uma reflexão primária na interface 2 e uma múltipla na interface 1. Dois casos podem dar problemas na utilização do parâmetro  $R_{NIP}$  na identificação das múltiplas: o primeiro é quando a profundidade equivalente da múltipla (ao ser interpretada como uma primária) concorre na mesma profundidade que da primária; o segundo caso é quando os dois tempos de trânsito do raio ZO são iguais. A seguir serão estudados esses dois casos:

**Caso 1:** Comparação entre uma primária na interface 2 e uma múltipla na interface 1, no caso em que  $H_0 = H_1 = H$  (ver Figura 3.6). Nesta situação, a profundidade aparente da múltipla (em sua primária equivalente) é igual à de uma primária.

O  $R_{NIP}$  da reflexão primária na interface 2, baseado na equação (3.11), é dado por

$$R_{NIP,p} = \frac{1}{v_0} (v_1^2 t_2 + v_0^2 t_1) . \quad (3.18)$$

Como  $H_0 = H_1$ , temos  $v_0 t_1 = v_1 t_2$  e podemos escrever o tempo  $t_2$  em função das duas velocidades e o tempo  $t_1$

$$t_2 = \frac{v_0}{v_1} t_1 . \quad (3.19)$$

Juntando as equações (3.18) e (3.19), obtemos para o parâmetro  $R_{NIP,p}$  a expressão

$$\begin{aligned} R_{NIP,p} &= \frac{1}{v_0} \left[ v_1^2 \left( \frac{v_0}{v_1} t_1 \right) + v_0^2 t_1 \right] \\ &= (v_1 + v_0) t_1 . \end{aligned} \quad (3.20)$$

Pela natureza do problema geofísico, em condições normais de interfaces suaves e contínuas, a velocidade nas camadas aumenta à medida em que a profundidade aumenta (não consideradas as condições complexas onde a geologia gera inversão de velocidades). Baseados nesta condição, temos que  $v_1 > v_0$ , ou seja, podemos dizer que  $v_1 = v_0 + \Delta v$ , onde  $\Delta v > 0$ . Como consequência, a equação (3.20) pode ser reescrita como

$$\begin{aligned} R_{NIP,p} &= (2v_0 + \Delta v) t_1 \\ &= 2v_0 t_1 + (\Delta v) t_1 , \end{aligned} \quad (3.21)$$

onde  $2v_0 t_1$  é o valor  $R_{NIP}$  da reflexão múltipla da primeira camada.

Como conclusão deste primeiro caso, pode-se dizer que, para uma reflexão múltipla cuja profundidade equivalente (ao ser estudada como uma primária) coincide com a profundi-

dade de uma reflexão primária, o parâmetro  $R_{NIP}$  consegue descriminá-las. A diferença encontrada entre os dois valores  $R_{NIP}$  depende do incremento na velocidade

$$R_{NIP,p} = R_{NIP,m} + (\Delta v) t_1 . \quad (3.22)$$

**Caso 2:** Comparação de uma primária na interface 2 e uma múltipla na interface 1, no caso em que  $t_{0,p} = t_{0,m} = t_0$  (Figura 3.6). Isto é, o tempo de trânsito da múltipla, do raio ZO, é igual ao da primária.

Com a condição de  $t_{0,p} = t_{0,m}$ , pode-se encontrar uma relação entre as velocidades das duas camadas em função de suas espessuras  $H_1$  e  $H_2$ , a saber,

$$t_0 = \frac{H_0}{v_0} = \frac{H_1}{v_1} \Rightarrow v_1 = \frac{H_1}{H_0} v_0 .$$

Utilizando esta relação na equação (3.18), encontra-se uma expressão para o parâmetro  $R_{NIP}$  da reflexão primária na interface 2 dada por

$$\begin{aligned} R_{NIP,p} &= \frac{t_0}{v_0} \left[ \left( \frac{H_1}{H_0} v_0 \right)^2 + v_0^2 \right] \\ &= v_0 t_0 \left[ \left( \frac{H_1}{H_0} \right)^2 + 1 \right] . \end{aligned} \quad (3.23)$$

Se usamos de novo a condição de que  $v_1 > v_0$ , e tendo em vista que  $t_1 = t_2$ , as espessuras das duas camadas obedecem à relação  $H_1 > H_0$ . Segue-se que

$$\frac{H_1}{H_0} > 1, \quad \rightarrow \left( \frac{H_1}{H_0} \right)^2 = 1 + \gamma ,$$

onde  $\gamma > 0$ . Retornando à equação (3.23), e tendo em conta a relação anterior entre as espessuras, podemos reescrevê-la como

$$\begin{aligned} R_{NIP,p} &= 2v_0t_0 + \gamma(v_0t_0) \\ &= R_{NIP,m} + \gamma(v_0t_0) . \end{aligned} \tag{3.24}$$

Mais uma vez pode-se concluir que o parâmetro  $R_{NIP}$ , no caso onde o tempo de trânsito  $t_0$  do raio ao ZO da reflexão múltipla e da primária são coincidentes, consegue discriminar os dois tipos de reflexão. Neste caso, a diferença entre os  $R_{NIP}$  depende da espessura de cada camada.

### 3.4 Métodos para a Atenuação e/ou Eliminação de Múltiplas

Uma vez realizada a descrição das várias relações existentes entre os parâmetros CRS de primárias e múltiplas, estamos aptos a propor alguns métodos de atenuação/eliminação de múltiplas que utilizam tais relações. A formulação das relações entre parâmetros de primárias e múltiplas, bem como sua aplicação a métodos de atenuação/eliminação de múltiplas constituem os principais objetivos desta dissertação.

#### 3.4.1 Empilhamento CRS Utilizando os Parâmetros CRS das Primárias

O método consiste em fazer com que o empilhamento CRS utilize somente os parâmetros que, por meio de uma prévia identificação (manual ou automática), pertençam às reflexões primárias.

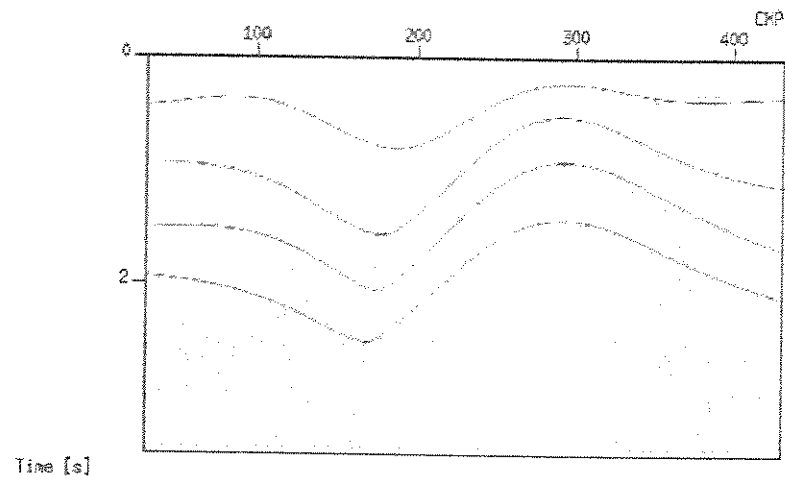
Com a adição de uma condição adequada ao algoritmo que faz a busca dos parâmetros CRS e posterior empilhamento, pode-se conseguir que o algoritmo escolha outros parâmetros se os encontrados foram identificados como parâmetros CRS de uma reflexão múltipla. Um resultado deste procedimento é mostrado na Figura 3.7.

### 3.4.2 Atenuação e/ou Eliminação de Múltiplas por Modelamento

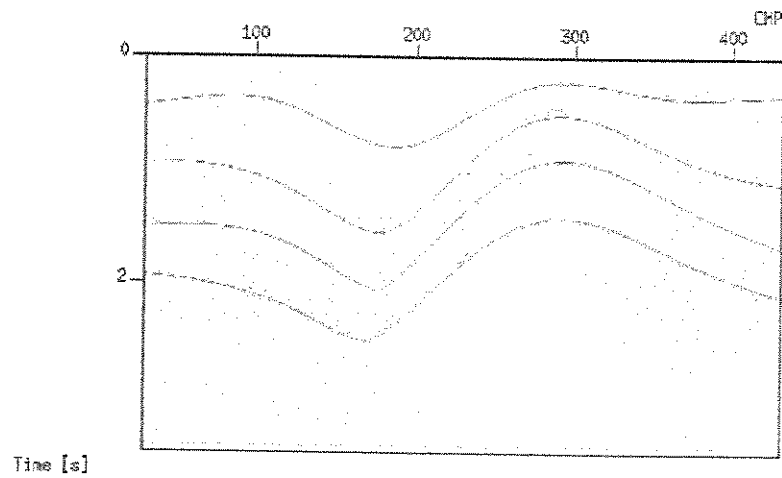
Se os três parâmetros de uma múltipla forem conhecidos, sua modelagem, em qualquer configuração, pode ser feita pela equação (2.2). Isto permite uma determinação mais precisa do tempo de trânsito da múltipla no caso em que, por exemplo, no domínio CMP, a múltipla e a primária sejam concorrentes. Conseqüentemente, ao modelar e subtrair em outro domínio, obtém-se uma discriminação melhor dos eventos simultâneos.

Observemos que os parâmetros CRS de uma múltipla podem ser obtidos pela simples inspeção na seção empilhada CRS (seção 3.2) ou pelo uso dos relacionamentos apropriados entre os parâmetros das primárias e das múltiplas. Exemplos dessas relações foram descritas na Seção 3.3 para os exemplos específicos de múltiplas da superfície livre e múltiplas simétricas intercadas.

Na Figura 3.8(a) é mostrada uma seção ZO, do modelo A.1(a), obtida pelo empilhamento CRS, na qual pode-se ver quatro reflexões primárias, P1, P2, P3 e P4, bem como as reflexões múltiplas M1, M2 e M3. As reflexões M1 e M2 (múltiplas de superfície livre) são múltiplas de primeira e segunda ordem, respectivamente, da primária P1. A reflexão M3 (múltipla simétrica intercadas) é a múltipla de primeira ordem que parte da superfície, reflete na interface da primária P3, reflete na interface da primária P2, reflete na interface da primária P3 e volta à superfície. Conforme mostrado na Figura 3.8(b), as múltiplas M1 e M2 foram atenuadas usando uma modelagem no domínio CMP, enquanto que a múltipla M3, ao ser modelada neste domínio, apresentou um problema com a aplicação do filtro adaptativo. No domínio CMP e ao longo de toda a linha sísmica, os tempos de trânsito da reflexão primária e da múltipla estão próximos um do outro,

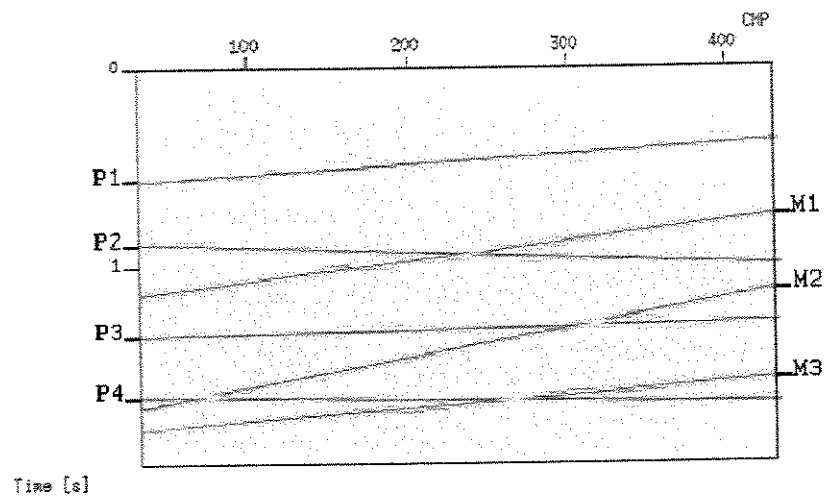


(a)

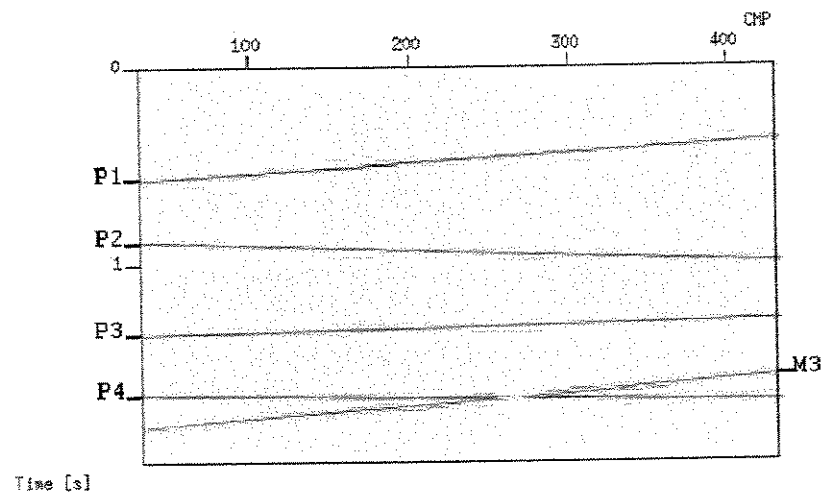


(b)

Figura 3.7: Empilhamento usando somente os parâmetros CRS das reflexões primárias: (a) Seção ZO modelada (somente com primárias), e (b) seção empilhada pelo CRS (dos dados com primárias e múltiplas) usando somente os parâmetros da reflexões primária. Note a semelhança entre as duas seções ZO, isto é, a boa atenuação das múltiplas.



(a)



(b)

Figura 3.8: Modelamento de múltiplas utilizando os parâmetros CRS: (a) Seção ZO, simulada com reflexões primárias e múltiplas, resultante do empilhamento CRS; (b) seção ZO após a eliminação das múltiplas M1 e M2 por modelamento.



além do que as duas reflexões apresentam um *moveout* muito semelhante (ver Figura 3.9). O filtro adaptador, nesse caso, ajustou (ou criou) a “wavelet” usada no modelamento tendo em conta as amplitudes da reflexão primária P4, o que causou a eliminação (ou atenuação) de parte da reflexão primária P4 (Figura 3.10(a)).

Baseado no fato de que a equação hiperbólica do tempo de trânsito (2.2), utilizada no método CRS e que permite o ajuste em qualquer configuração, foi feita uma modelagem e posterior atenuação da reflexão múltipla M3 no domínio do afastamento comum (CO). Como resultado, conseguiu-se uma boa diferença entre os tempos de trânsito das duas reflexões em quase todas as famílias CO. Na Figura 3.10 pode-se notar a vantagem de modelar e atenuar as reflexões múltiplas em outras configurações, diferentes do domínio CMP.

Todo o trabalho de modelagem realizado nesta seção foi realizado através da aplicação de um algoritmo desenhado em função das relações entre as reflexões primárias e múltiplas apresentadas na seção anterior. Este algoritmo está descrito na Seção 3.5.

### 3.4.3 Extensão para meios não homogêneos com interfaces curvas

No caso de um modelo geral não homogêneo e interfaces curvas, a modelagem e a supressão de uma reflexão múltipla podem ser executadas de maneira análoga aos métodos apresentados nesta seção. Em outras palavras, se a múltipla estiver identificada (seus parâmetros CRS conhecidos) então sua eliminação pode ser realizada através do procedimento de modelamento descrito acima. No caso em que as primárias são identificadas (seus parâmetros CRS conhecidos), os correspondentes parâmetros CRS e a velocidade NMO das múltiplas associadas podem ser aproximados por meio das equações (3.7). Note que, embora tenham sido obtidas utilizando suposições simples, estas equações podem fornecer valores de parâmetro iniciais úteis em algum esquema de otimização.

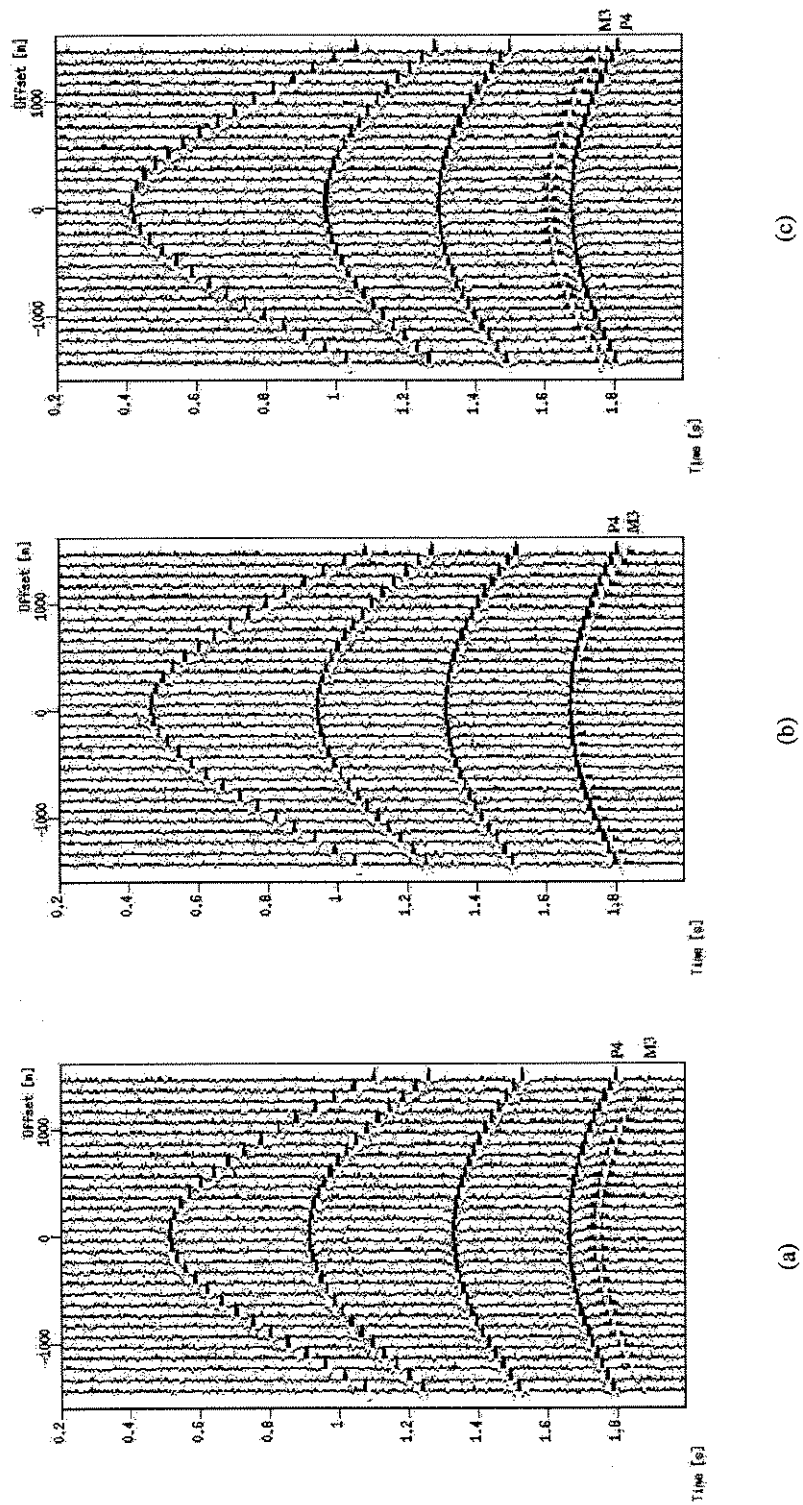
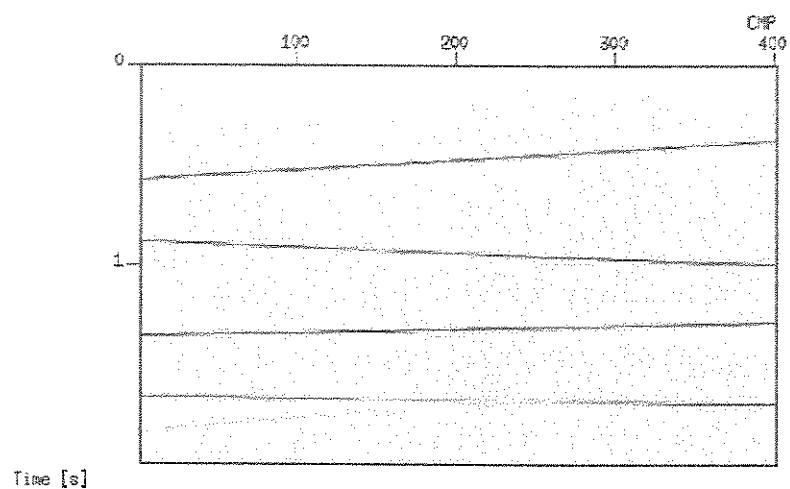
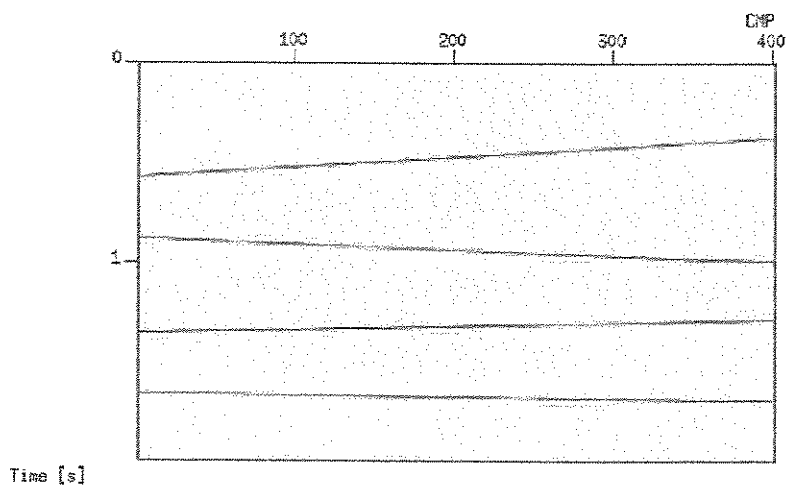


Figura 3.9: Dados multicobertura no domínio CMP. Note que os tempos de trânsito e *moveout* da reflexão primária P4 e da múltipla M3 são muito semelhantes ao início (a) e no final da linha (c), e praticamente iguais na metade da linha (b)



(a)



(b)

Figura 3.10: Modelamento de múltiplas nos domínios CMP e CO, utilizando-se os parâmetros CRS: (a) Seção ZO com a reflexão múltipla M3 modelada e atenuada no domínio CMP; (b) seção ZO com a múltipla M3 modelada e atenuada no domínio CO. Note a diferença na preservação da reflexão primária P4.

### 3.5 Descrição do Algoritmo

O método proposto para a atenuação das reflexões múltiplas por modelagem, usando os parâmetros CRS, envolve as seguintes etapas:

- A. Simulação da múltipla em qualquer domínio<sup>3</sup> através da adequada extrapolação de tempo de trânsito, levando em conta a configuração (domínio) envolvida e utilizando as seções dos atributos  $R_{NIP}$ ,  $R_N$  e  $\beta$ , além das seções de afastamento nulo e coerência;
- B. Ajuste das amplitudes e forma do sinal da múltipla simulada através da aplicação de um filtro adaptador; e
- C. Subtração da múltipla ajustada dos dados de entrada.

Como resultado do algoritmo obtém-se um conjunto de traços que formam um dado multicobertura que somente contem a(s) reflexão(ões) múltipla(s) a ser(em) subtraída(s) posteriormente dos dados originais. Fluxogramas dos algoritmos nos dois casos, a saber, (a) com identificação de múltiplas fornecida a priori e (b) com identificação automática de múltiplas através de relações entre parâmetros das primárias, são mostrados nas Figuras 3.12 e 3.11, respectivamente.

#### 3.5.1 Modelamento da Múltipla

O modelamento da reflexão múltipla pode ser feito a partir dos parâmetros CRS da(s) reflexão(ões) primária(s) que a(s) gerou(geraram) (Seção 3.3), ou pelos parâmetros CRS da múltipla, se ela já está identificada.

No primeiro caso, se a reflexão múltipla foi identificada na seção de afastamento nulo utilizando conhecimentos *a priori*, os parâmetros desta múltipla podem ser obtidos por uma avaliação direta nas seções  $R_{NIP}$ ,  $R_N$  e  $\beta$  nos tempos de trânsito  $t_0$  identificados. Utilizando a seguir a

---

<sup>3</sup>Quando os três parâmetros CRS são conhecidos.

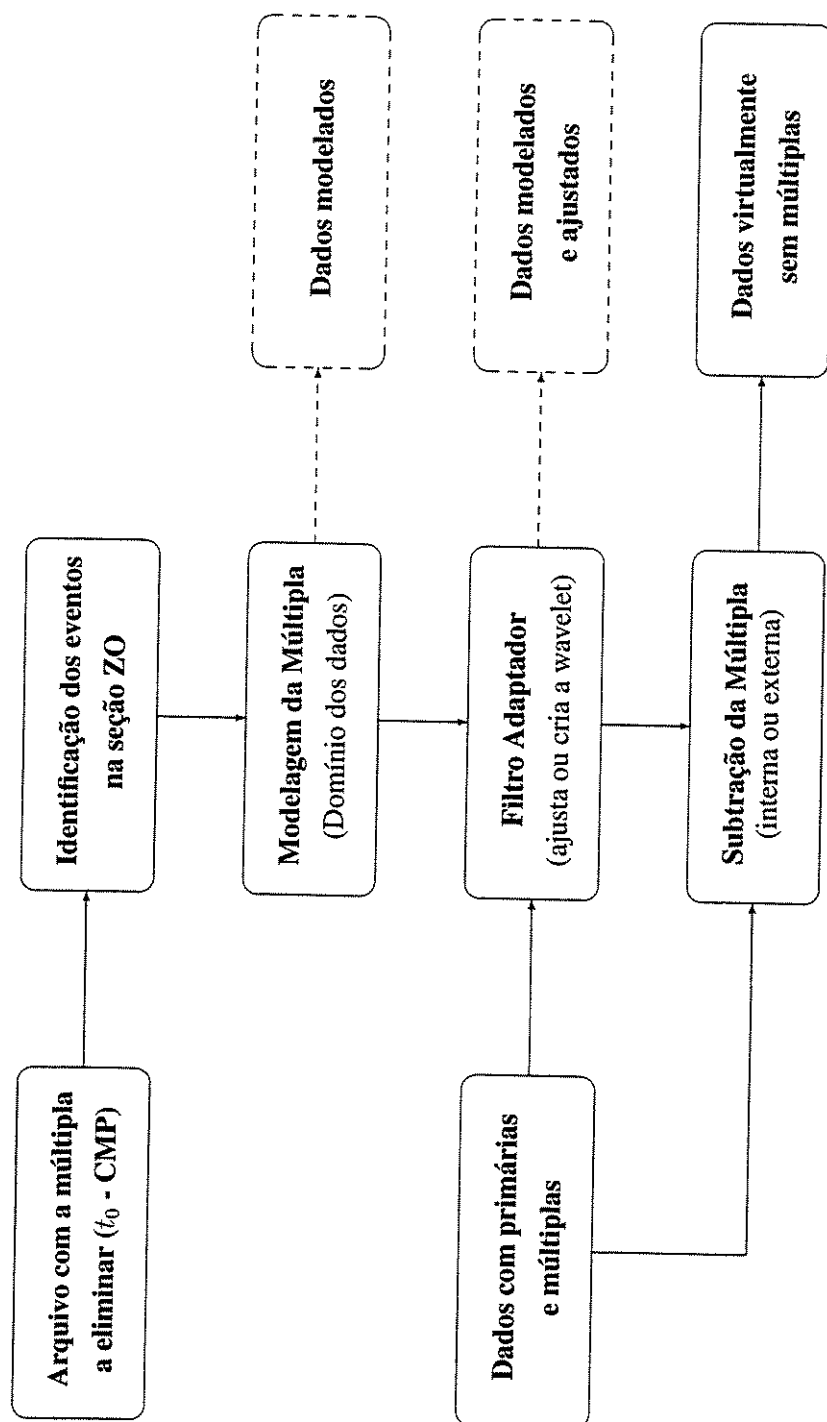


Figura 3.11: Algoritmo para eliminar eventos previamente identificados: Os eventos são identificados e fornecidos ao algoritmo num arquivo com duas colunas: a primeira com o tempo  $t_0$  e a segunda com a configuração (domínio) correspondente. Na figura, o domínio considerado foi o CMP.

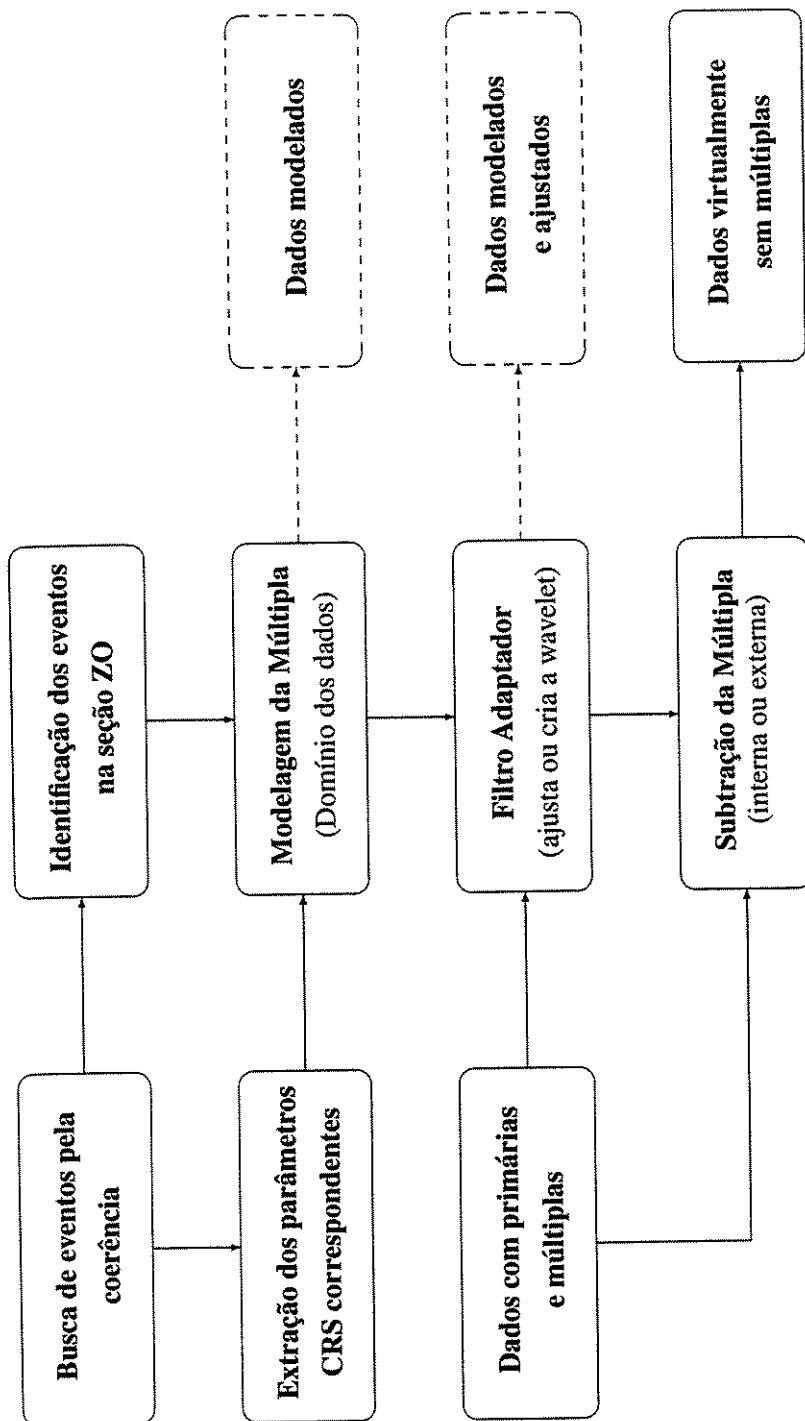


Figura 3.12: Algoritmo de busca automática: Os eventos são identificados em função do nível de coerência. Note-se que o usuário pode criar dados multicobertura contendo somente as múltiplas (modeladas ou modeladas e ajustadas)

equação de tempo hiperbólico (2.2), pode-se modelá-la no domínio escolhido pelo usuário.

No segundo caso, modelamento usando os parâmetros da primária, o algoritmo faz uma procura automática da reflexão primária do fundo do mar baseada na coerência<sup>4</sup>. Dada a seção de coerência e uma *coerência mínima* a avaliar, o algoritmo procura ao longo das seções  $R_{NIP}$ ,  $R_N$  e  $\beta$  correspondentes, nos tempos de trânsito  $t_0$  dados pela seção de coerência, os valores dos parâmetros CRS desta primária. Conhecida a informação que caracteriza a primária e utilizando as equações (3.7) para encontrar os parâmetros da múltipla, pode-se utilizar a equação (2.2) para calcular, como no caso anterior, os tempos de trânsito na configuração, ou domínio, que o usuário tenha escolhido para fazer a modelagem. Note-se que as equações usadas para encontrar os parâmetros CRS da reflexão múltipla, além de outras operações realizadas dentro do algoritmo, têm como base as chamadas leis de propagação, transmissão e reflexão de frente de onda, indicadas no Apêndice D.

Um ajuste nas amplitudes obtidas no processo de modelamento para diminuir as diferenças, na amplitude e na fase, entre a múltipla simulada e a múltipla dos dados de entrada é realizado pela aplicação de um filtro adaptador, como explicado a seguir.

### 3.5.2 Filtro Adaptador das Amplitudes

Como mostrado em Guerra (1999), para que as amplitudes e o estiramento do pulso das múltiplas modelados sejam ajustadas a valores próximos aos da múltipla dos dados de entrada, e assim poder-se subtrair somente a energia da múltipla, é necessário aplicar um *filtro adaptador de conformação* (*shaping filter*).

Considere um traço sísmico<sup>5</sup> de referência,  $\mathcal{P}(t)$ , que contém primárias e múltiplas. A múltipla presente no traço de referência será denominada  $\mathcal{U}(t)$ . Após a simulação da múltipla,

---

<sup>4</sup>Lembremos que esta foi a situação do exemplo envolvendo a atenuação de múltiplas do fundo do mar.

<sup>5</sup>O traço representa um dos vários traços do dado de entrada para a simulação da múltipla.

o traço que contém a múltipla simulada correlata à múltipla de referência é  $S(t)$ . O objetivo do filtro adaptador,  $\mathcal{F}(t)$ , é minimizar as diferenças de amplitude entre a múltipla de referência e a simulada. Em outras palavras, deve-se aplicar um filtro na múltipla simulada, de tal modo que suas amplitudes estejam o mais próximo possível da múltipla de referência. Essa operação pode ser expressa sob a forma de uma convolução

$$S(t) * \mathcal{F}(t) = \tilde{\mathcal{U}}(t) + \mathcal{V}(t) \cong \mathcal{U}(t) , \quad (3.25)$$

onde a função  $\mathcal{V}(t)$  é um resíduo e  $\tilde{\mathcal{U}}(t)$  é uma sinal que se assemelha a  $\mathcal{U}(t)$ . Se o resíduo for zero,  $\tilde{\mathcal{U}}(t)$  possui os mesmos valores que  $\mathcal{U}(t)$ . Assim, o papel que o filtro deve desempenhar é agir de tal forma em  $S(t)$  de modo a minimizar  $\mathcal{V}(t)$ . A questão que se coloca é, portanto: “Qual a forma do filtro  $\mathcal{F}(t)$ ?”. Esse problema pode ser resolvido pelo método dos quadrados mínimos, que leva à teoria dos filtros tipo Wiener. Conforme essa teoria, tem-se que

$$\Phi_{SS}(t) * \mathcal{F}(t) = \Phi_{SU} , \quad (3.26)$$

onde  $\Phi_{SS}(t)$  representa a autocorrelação de  $S(t)$  e  $\Phi_{SU}(t)$  a correlação cruzada de  $S(t)$  e  $\mathcal{U}(t)$ .

Discretizando a equação (3.26), pode-se reescrevê-la de forma matricial

$$\mathbf{G} \mathbf{F} = \mathbf{C} , \quad (3.27)$$

onde  $\mathbf{G}$  é a matriz tipo Toeplitz de autocorrelação  $\Phi_{SS}(t)$ , cuja construção permite representar a convolução na equação (3.26) como um produto de matrizes,  $\mathbf{F}$  é o vetor com as amostras do filtro e  $\mathbf{C}$  é o vetor da correlação cruzada de  $\Phi_{SU}$ .



A correlação cruzada discreta,  $C[i]$ , entre  $S(t)$  e  $\mathcal{U}(t)$  pode ser calculada pela equação

$$C[i] = \sum_{j=0}^{n-1} S[j] \cdot \mathcal{U}[i+j], \quad (i = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad (3.28)$$

e a autocorrelação, também discreta, de  $S(t)$  é dada por

$$\phi_i = \sum_{j=0}^{n-1} S[j] \cdot S[i+j], \quad (i = 0, 1, 2, 3, \dots). \quad (3.29)$$

A matriz  $\mathbf{G}$ , obtida pelo vetor autocorrelação de  $S(t)$ , tem a forma (ver, por exemplo, Guerra (1999))

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \phi_0 & \phi_1 & \phi_2 & \dots & \phi_{n-2} & \phi_{n-1} & \phi_n \\ \phi_1 & \phi_0 & \phi_1 & \dots & \phi_{n-3} & \phi_{n-2} & \phi_{n-1} \\ \phi_2 & \phi_1 & \phi_0 & \dots & \phi_{n-4} & \phi_{n-3} & \phi_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{n-2} & \phi_{n-3} & \phi_{n-4} & \dots & \phi_0 & \phi_1 & \phi_2 \\ \phi_{n-1} & \phi_{n-2} & \phi_{n-3} & \dots & \phi_1 & \phi_0 & \phi_1 \\ \phi_n & \phi_{n-1} & \phi_{n-2} & \dots & \phi_2 & \phi_1 & \phi_0 \end{pmatrix}, \quad (3.30)$$

onde  $\phi_i$  são as diversas amostras da função da autocorrelação, equação (3.29). A matriz  $\mathbf{G}$  possui dimensão  $n \times n$ , onde  $n$  é o número de amostras do filtro adaptador. Assim, se  $\mathbf{G}$  for inversível, o filtro  $F$  é dado por

$$F = \mathbf{G}^{-1} C. \quad (3.31)$$

Com o intuito de, inicialmente, diminuir os valores do resíduo  $\mathcal{V}(t)$ , deve-se limitar os dados de entrada do filtro adaptador numa janela em torno da múltipla de referência. Essa mesma janela

deve ser aplicada aos dados que contém a múltipla simulada.

Note que o cálculo do filtro adaptador tem a capacidade de gerar uma “wavelet” que, ao ser convolvida com um pulso (*spike*) na posição  $t(h)$  da múltipla simulada, apresente a menor diferença entre as amplitudes, e fase, entre a múltipla ajustada e a real. Deixando o trabalho do desenho da “wavelet” para o filtro adaptador, o usuário não necessita fornecer os parâmetros necessários (comprimento em tempo e frequências) para seu cálculo, mas tão somente deve fornecer o comprimento (em tempo) do filtro adaptador.

### 3.5.3 Subtração da Múltipla

O resultado do algoritmo aplicado para o modelagem das reflexões múltiplas é um conjunto de dados multicobertura que contém a(s) reflexão(ões) múltipla(s) simulada(s) e ajustada(s) a ser(em) subtraída(s). Portanto, um processo de subtração tem que ser realizado para se obter os dados, virtualmente, sem múltiplas.

O processo de subtração pode ser realizado no domínio em que foi modelada a múltipla ou em algum outro domínio escolhido pelo usuário. O processo de filtragem descrito acima pode ser realizado através de programas existentes na literatura, por exemplo os programa *SUOP2* ou *SUDIFF* constantes do pacote Seismic Unix, desenvolvido e mantido pela *Center of Wave Phenomena* da *Colorado School of Mines*. Estes programas realizam operações entre dois conjuntos de dados sísmicos<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup>Para obter mais informações sobre estes e outros programas do *CWP/SU Seismic Unix (SU)* pode-se consultar a auto-documentação que contém cada programa.

### 3.5.4 Limitações do Algoritmo

Os algoritmos descritos acima apresentam duas limitações importantes, a saber:

**Dependência da coerência obtida nas reflexões, principalmente das primárias:** O processo de busca automática está baseado completamente na seção de coerência. Se ela não define bem o evento, a identificação do tempo de trânsito no ZO,  $t_0$ , e dos parâmetros CRS,  $R_{NIP}$ ,  $R_N$  e  $\beta$ , das reflexões primárias não será a melhor. Portanto, os parâmetros calculados, correspondentes à(s) reflexão(ões) múltipla(s) a ser(em) eliminada(s), estariam errados.

**Efeitos de bordas da seção (comum a todos os métodos de imageamento):** A linha sísmica deve ser programada de forma que ao tirar as bordas, para não atrapalhar nos processos de busca e cálculo da múltipla, não interfira numa reflexão objetivo, ou seja, para determinar o comprimento da linha sísmica a ser registrada deve-se levar em conta as bordas necessárias para o correto imageamento do objetivo geológico.

## Capítulo 4

### Discussão dos Resultados

Este capítulo tem o objetivo de, através de exemplos em dados sintéticos, mostrar a aplicação do algoritmo proposto para a modelagem e posterior atenuação das reflexões múltiplas. Os dados sintéticos foram criados com o programa traçador de raios *Cshot* do *Center of Wave Phenomena* da *Colorado School of Mines*. Os parâmetros de entrada da modelagem e o tipo de reflexões (múltiplas e primárias) geradas são apresentados no Apêndice A. Os dados sintéticos foram processados com o pacote ProMAX aplicando-lhes a sequência indicado no Apêndice B, resultados deste processamento y da aplicação dos filtragens *fk* e *Radon* podem ser visto ainda nesse apêndice.

#### 4.1 Modelo com interfaces planas mergulhantes

Aqui é realizada a comparação entre a seção de afastamento nulo (ZO) modelada, somente com as reflexões primárias, pelo programa *Cshot* (Figura 4.1) e as seções correspondentes ZO submetidas à atenuação das reflexões múltiplas pela aplicação: (a) do algoritmo proposto nesta dissertação (Figura 4.2); (b) da filtragem *fk* (Figura 4.3) e (c) da filtragem *Radon* (Figura 4.4) sobre uma série de dados multicobertura com reflexões primárias e múltiplas. Observamos que a seção obtida pela aplicação do algoritmo proposto consegue uma melhor aproximação da seção livre de múltiplas, modelada pelo *Cshot*.

Na atenuação das múltiplas da superfície livre de primeira e segunda ordem, a aplicação do algoritmo proposto e da filtragem *Radon* apresentam resultados similares. Não obstante, o bom resultado do *Radon Parabólico* foi por este ter trabalhado com velocidades muito próximas às verdadeiras, deixando de eliminar aquelas reflexões com *moveout* maior do que 5% da velocidade das primárias, (ver a Figura B.6). Vale notar que um valor considerado normal deste porcentagem é de 20%. A pouca atenuação das múltiplas em questão, observada na seção obtida depois da filtragem *fk*, é devida à quantidade de energia que restou nos afastamentos mais curtos (ver Figura B.2). Esta energia é difícil de ser eliminada sem que o polígono do filtro *fk* elimine parte das primárias.

Quanto à última múltipla modelada, múltipla intercamadas simétrica de primeira ordem, pode-se ver que existe uma grande diferença entre as três seções, modelamento CRS, filtragem *fk* e filtragem *Radon*. É bom lembrar que esta múltipla teve de ser modelada no domínio CO para se conseguir ter bons resultados (Figura 3.10). Embora tenha-se trabalhado com as velocidades NMO quase reais, a pequena diferença entre os *moveouts* (ou nas velocidades) da reflexão múltipla e da primária, além do fato de que os tempos de trânsito dos dois eventos são quase concorrentes ao longo de toda a seção (veja as Figuras 3.9, B.2 e B.6), faz que as técnicas de filtragem que trabalham em função da velocidade não consigam bons resultados.

## 4.2 Modelos com interfaces curvas

Novamente pode-se ver que a seção obtida após a atenuação das reflexões múltiplas pelo algoritmo proposto (Figura 4.6), quando comparada com as seções obtidas depois da filtragem *fk* (Figura 4.7) ou da filtragem *Radon* (Figura 4.8), é a que melhor se aproxima da seção ZO modelada pelo programa *Cshot* (Figura 4.5).

Lembremos que as equações usadas no algoritmo foram deduzidas para interfaces planas mergulhantes, e que elas foram propostas como uma boa aproximação para o caso de interfaces com curvaturas, aproximação que, em princípio, deve poder ser melhorada com algum processo

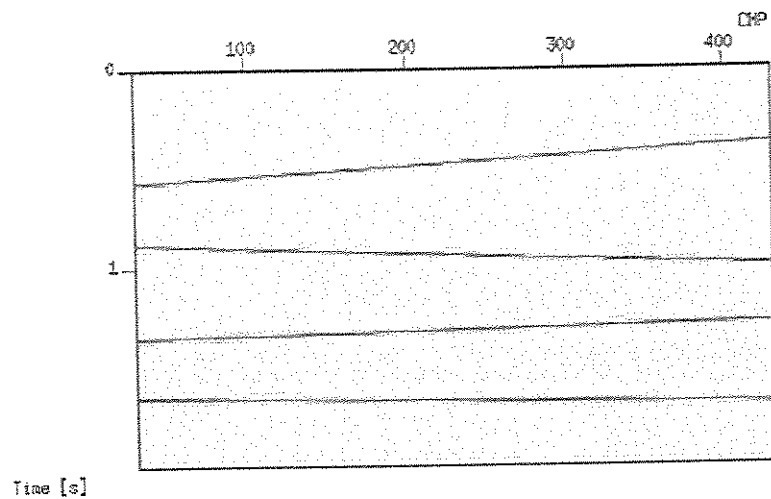


Figura 4.1: Seção ZO do modelo com interfaces planas mergulhantes criada com o Cshot. Note-se que somente foram modeladas as reflexões primárias.

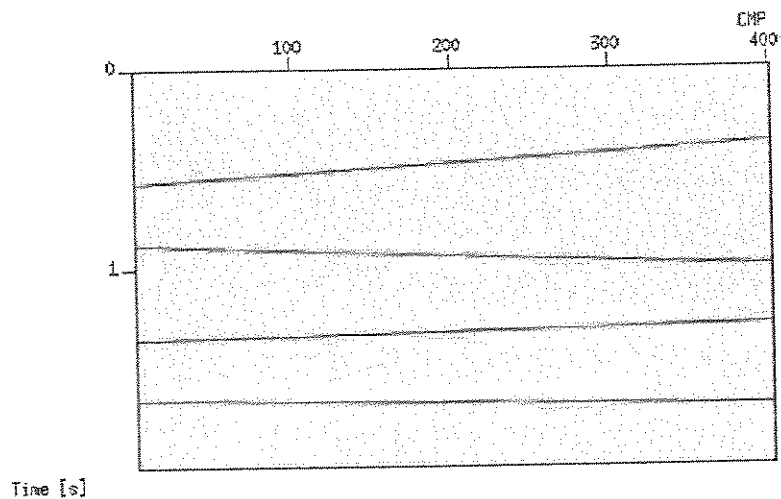


Figura 4.2: Seção ZO do modelo com interfaces planas mergulhantes após a atenuação das reflexões múltiplas usando os parâmetros CRS.

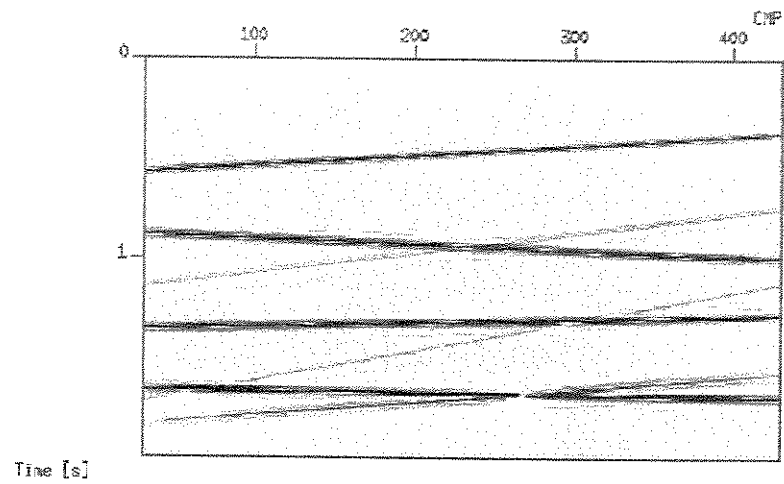


Figura 4.3: Seção ZO do modelo com interfaces planas mergulhantes após a atenuação das reflexões múltiplas usando a filtragem  $f/k$ .

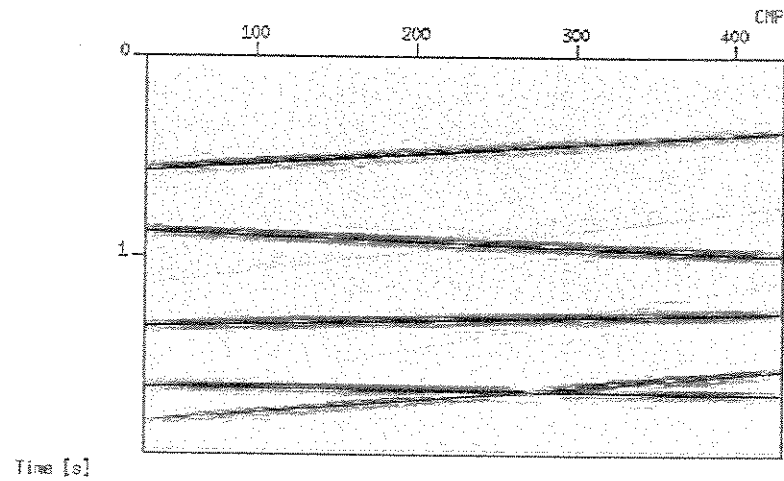


Figura 4.4: Seção ZO do modelo com interfaces planas mergulhantes após a atenuação das reflexões múltiplas usando a filtragem *Radon*.

de otimização. Tendo em vista esta metodologia, foram calculados os tempos de trânsito das três reflexões múltiplas, uma de cada vez, deixando-se, a seguir, que o filtro adaptador determinasse a forma (amplitude e fase) da “wavelet” usada na modelagem. Em outras palavras, delegou-se ao filtro adaptador o papel de otimizador do processo, incluindo o ajuste dos tempos de trânsito. Trabalhando desta maneira, foram obtidos bons resultados em quase toda a seção. Somente entre os CMPs 125 e 225 da Figura 4.6, as múltiplas não foram atenuadas o suficiente. Note que estes CMPs correspondem à parte onde as interfaces apresentam a maior curvatura.

Ao comparar este resultado com os obtidos pela aplicação dos filtros *fk* e *Radon* pode-se notar que nesta mesma região os filtros apresentaram problemas na atenuação das múltiplas, possivelmente pela curvatura e posterior inclinação exagerada que foi dada às interfaces. No restante da seção pode-se ver que o algoritmo supera os resultados das outras duas técnicas. Mais uma vez deve-se ressaltar que a modelagem da terceira múltipla, múltipla simétrica intercamadas de primeira ordem, foi feita no domínio CO e as correspondentes filtragens, *fk* e *Radon*, foram feitas no domínio CMP.

Os resultados apresentados mostram que o método e o algoritmo proposto, pelo menos nesses casos mais simples, são capazes de determinar a posição das múltiplas e recuperar a continuidade dos eventos, inclusive nos casos em que as reflexões múltiplas alteram as amplitudes das primárias pela sua chegada simultânea. Lembremos que os métodos de *Radon* e *fk* são baseados na discriminação do *moveout* após a correção NMO, ou seja, eles são baseados em um único parâmetro, diferentemente dos três parâmetros CRS utilizados pelas metodologias propostas.



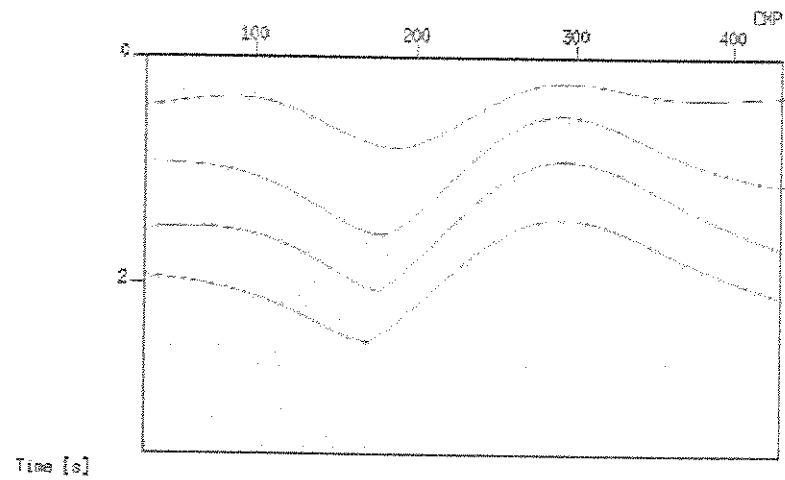


Figura 4.5: Seção ZO do modelo com interfaces curvas criada com o Cshot. Note-se que somente foram modeladas as reflexões primárias.

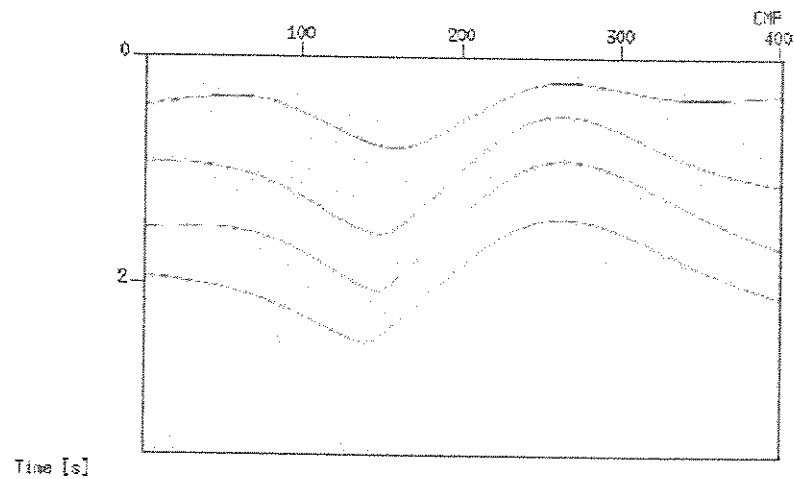


Figura 4.6: Seção ZO do modelo com interfaces curvas após a atenuação das reflexões múltiplas usando os parâmetros CRS.

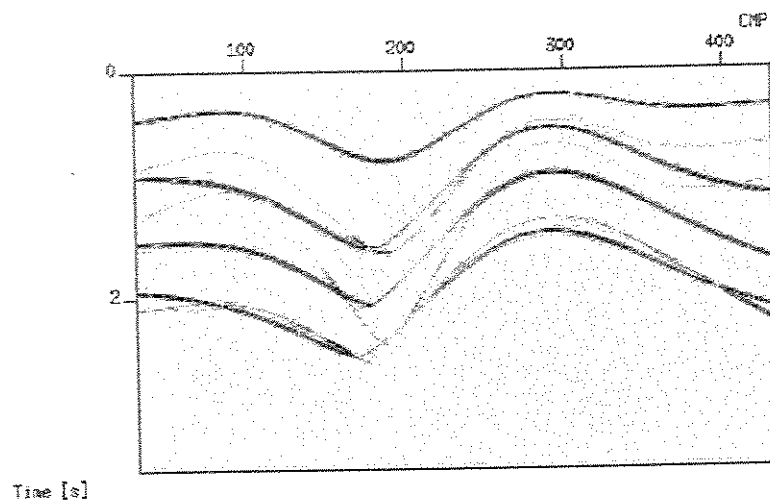


Figura 4.7: Seção ZO do modelo com interfaces curvas após a atenuação das reflexões múltiplas usando a filtragem  $f/k$ .

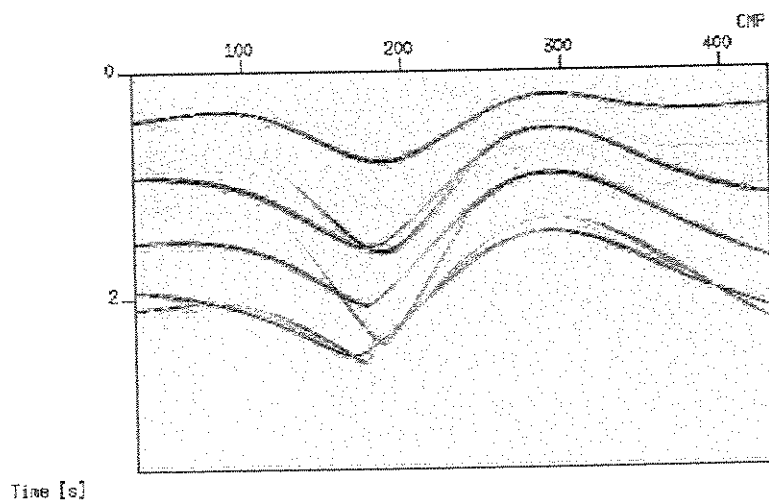


Figura 4.8: Seção ZO do modelo com interfaces curvas após a atenuação das reflexões múltiplas usando a filtragem *Radon*.

## Capítulo 5

### Observações e Conclusões

O método CRS oferece uma boa alternativa para tratar um número crescente de tarefas no processamento sísmico. A principal razão está no uso de todos os dados disponíveis e também da extração automática de vários parâmetros que são relacionados com a propagação sísmica envolvida. No caso de uma única linha sísmica, e considerando a chamada situação 2D, o número de parâmetros extraídos são três:  $R_{NIP}$ ,  $R_N$  e  $\beta$ . Isto contrasta com o único parâmetro que o método NMO extrai dos dados no domínio CMP, a saber, velocidade NMO.

O empilhamento CRS é um método que se destina ao imageamento sísmico, dependendo tão somente do conhecimento *a priori* da velocidade próxima à superfície. No caso de dados marinhos, esta velocidade é a do mar. No caso de levantamentos terrestres, a informação de velocidades próximas à superfície também costuma ser fornecida em muitos casos. Os trios de parâmetros correspondentes a cada reflexão existente nos dados sísmicos são obtidos através de análises de coerência realizadas diretamente nos dados multicobertura. Na extração dos parâmetros pelo método CRS não há nenhuma restrição referente ao fato de um trio de parâmetros referir-se a uma reflexão primária ou múltipla. O método simplesmente procura, para cada par  $(t_0, x_0)$ , eventos do tipo hiperbólico e com bom nível de coerência. Como é conhecido na literatura, e apresentado nesta dissertação, as reflexões múltiplas exibem o mesmo comportamento hiperbólico que as reflexões primárias. Dessa forma, o empilhamento CRS tende a empilhar todos esses eventos.

Neste trabalho, foi discutido o uso dos parâmetros e seções empilhadas pelo método CRS para identificar e eliminar reflexões múltiplas. Foram consideradas duas situações, a saber: (a) a eliminação de múltiplas previamente identificadas na seção empilhada CRS (b) a identificação e eliminação das múltiplas por meio do comportamento de seus parâmetros CRS. O último caso foi restrito à situação particular das múltiplas de superfície livre e das chamadas múltiplas intercambiadas simétricas.

Como é comum na geofísica, toda a análise teórica foi baseada em modelos simples, camadas homogêneas separadas por interfaces planas ou com mergulho. Estes modelos fornecem uma boa primeira aproximação para o caso de interfaces com curvatura, a qual pode necessitar ser aperfeiçoada por algum processo de otimização. Os resultados apresentados nesta dissertação foram muito animadores. Espera-se, não obstante, que, sob aproximações mais apropriadas, os resultados deste trabalho podem ser estendidos a casos mais complexos e realistas ou em dados reais. Isto é o que se pretende fazer em trabalhos futuros.

Uma possibilidade da aplicação das análises, metodologias e resultados propostos neste trabalho, é a implementação de um processo de modelagem baseado em métodos de inversão que utilizem os parâmetros CRS para determinar as velocidades das camadas e a forma das interfaces. Algoritmos com essas características já existem na literatura (ver, por exemplo, Majer (2000), Koglin (2001) e Biloti (2001)). Neste métodos usam De posse do modelo de velocidades, podem ser obtidas, seja por meio de formulações matemáticas ou de modelagem direta, simulações de reflexões múltiplas (do tipo simétricas), associadas a estas interfaces, bem como seus correspondentes parâmetros CRS. Com essas informações, podemos alimentar os algoritmos propostos nesse trabalho, ampliando seu escopo.

Uma outra linha de pesquisa futura consiste do estudo e implementação do trabalho proposto por Lu et al. (2003), onde são identificadas reflexões múltiplas e primárias com base na coerência, velocidade e variação da amplitude com o afastamento (AVO). O método CRS fornece as seções de coerência e velocidade como parte da busca de seus parâmetros. A avaliação da mudança das

amplitudes com o afastamento feita pelo CRS é ainda um problema aberto.

Nossa última observação, cujo estudo não é do escopo deste trabalho, refere-se à diferença entre a forma das “wavelets” obtidas, após empilhamento, nas seções ZO processadas com o método CRS e as processadas através da análise de velocidades NMO do método CMP. Como é bem sabido, a correção do *moveout* dos dados sísmicos realizado pelo processamento CMP faz com que a “wavelet” que define um evento sofra um estiramento que aumenta com o afastamento. Durante o empilhamento CRS, não é realizada a correção do *moveout*, sendo o empilhamento realizado ao longo das curvas que melhor definem o evento em cada amostra  $t_0$ . Resultados recentes (Perroud e Tygel (2003)) mostram que o empilhamento produzido pelo método CRS apresenta estiramento significativamente menor que o convencional. Esta característica pode ser de valia também no problema de atenuação/eliminação de múltiplas, uma vez que afastamentos maiores podem ser utilizados sem perda de qualidade devido ao estiramento.

## Referências

- Biloti, R., 2001, Tempos de trânsito multiparamétricos: Estimção e inversão: Ph.D. thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- Červený, V., 2000, Seismic ray method: Cambridge University Press.
- Dix, C. H., 1948, The existence of multiple reflections: *Geophysics*, **13**, no. 01, 49–50.
- Foster, D. J., and Mosher, C. C., 1992, Suppression of multiple reflections using the Radon transform: *Geophysics*, **57**, no. 03, 386–395.
- Guerra, C., 1999, Eliminação de reflexões múltiplas por empilhamento tipo kirchhoff em configuração de afastamento comum: Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- Hubral, P., and Krey, T., 1980, Interval velocities from seismic reflection time measurements: Society of Exploration Geophysicists, western geophysical company houston, texas edition.
- Hubral, P., 1983, Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth: *Geophysics*, **48**, no. 08, 1051–1062.
- Hubral, P., 1999, Macro-model independent seismic reflection imaging: *J. Appl. Geophysics*, **42**, no. 3, 4.
- Koglin, I., 2001, Picking and smoothing of seismic events and CRS attributes, application for inversion: Ph.D. thesis, Universidade de Karlsruhe.
- Landa, E., Keydar, S., and Reshef, M., 1998, How far is the seismic image correct?: *The Leading Edge*, **17**, no. 07, 919–922.

- Landa, E., Belfer, I., and Keydar, S., 1999, Multiple attenuation in the parabolic  $\tau-p$  domain using wavefront characteristics of multiple generating primaries: *Geophysics*, **64**, no. 6, 1806–1815.
- Levin, F. K., 1971, Apparent velocity from dipping interface reflections: *Geophysics*, **36**, no. 03, 510–516.
- Lu, W., Zhang, X., and Li, Y., 2003, Multiple removal based on detection and estimation of localized coherent signal: *Geophysics*, **68**, no. 02, 745–750.
- Majer, P., 2000, Inversion of seismic parameters: Determination of the 2D iso-velocity layer model: Ph.D. thesis, Universidade de Karlsruhe.
- Mayne, W. H., 1962, Common reflection point horizontal data stacking techniques: *Geophysics*, **27**, no. 06, 927–938.
- Muller, T., Jaeger, R., and Hoecht, G., 1998, Common Reflection Surface Stacking Method - Imaging with an unknown velocity model: 68th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1764–1767.
- Perroud, H., and Tygel, M., 2003, Velocity estimation by the CRS method: A GPR real data example: 8th. International Congress of Brazilian Geophysical Society.
- Taner, M. T., 1980, Long-period sea-floor multiples and their suppression: *Geophys. Prosp.*, **28**, no. 01, 30–48.
- Weglein, A. B., Gasparotto, F. A., Carvalho, P. M., and Stolt, R. H., 1997, An inverse-scattering series method for attenuating multiples in seismic reflection data: *Geophysics*, **62**, no. 06, 1975–1989.
- Yilmaz, O., 1987, Seismic data processing: Soc. Expl. Geophys.
- Yilmaz, O., 2000, Seismic data analysis, in cooper, m. r. and doherty, s. m., ed., seismic data analysis vol. 1, 01: Soc. of expl. geophys., 1000: Society of Exploration Geophysicists.

# Apêndice A

## Modelos Sintéticos Usados

Foram criados dois modelos 2D, de diferentes complexidades, com velocidade de propagação da onda compressional constante em cada camada e seus correspondentes dados sísmicos multi-cobertura.

Cada um dos dados sísmicos tem 200 tiros de 60 traços na configuração *lanço bipartido simétrico*, fonte entre os traços 30 e 31.

A distância entre cada um dos receptores (traços) é de 50 m, tendo a separação entre tiros o mesmo valor. O afastamento mínimo é de 25m e o máximo 1475m.

A velocidade e profundidade de cada camada está indicada na figura correspondente a cada modelo (ver Figura A.1).

O modelamento dos dados sísmicos foi realizado por traçado de raios (*Ray Tracing*) usando o pacote **Cshot**<sup>1</sup>, constante do pacote computacional livre *Seismic Unix (SU)* da Colorado School of Mines. Foram modeladas as reflexões primárias de cada interface, além das reflexões múltiplas de primeira (Figura A.2(a)) e segunda (Figura A.2(b)) ordem da superfície livre (ou primeira camada) e a múltipla simétrica intercamadas de primeira ordem entre as interfaces da terceira camada

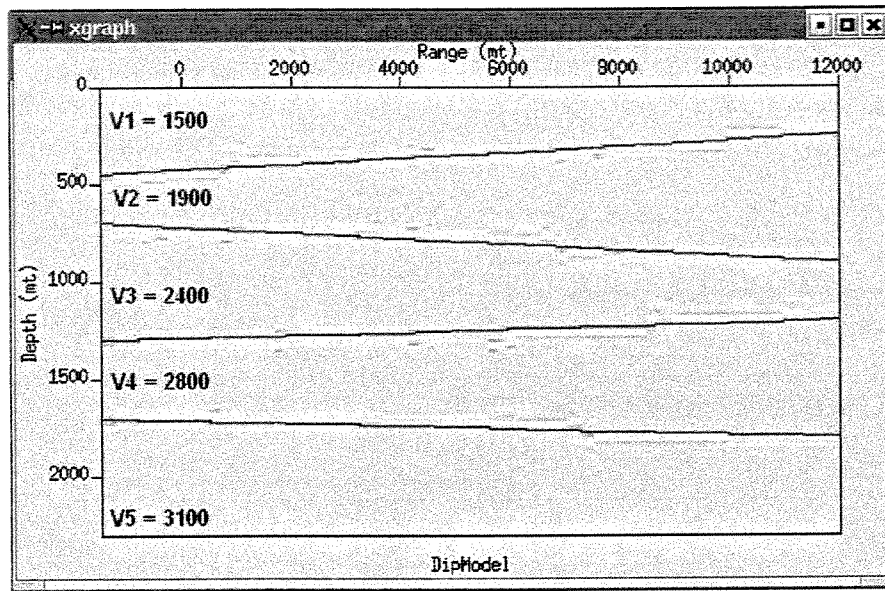
---

<sup>1</sup>Pacote traçador de raios em meios 2.5D

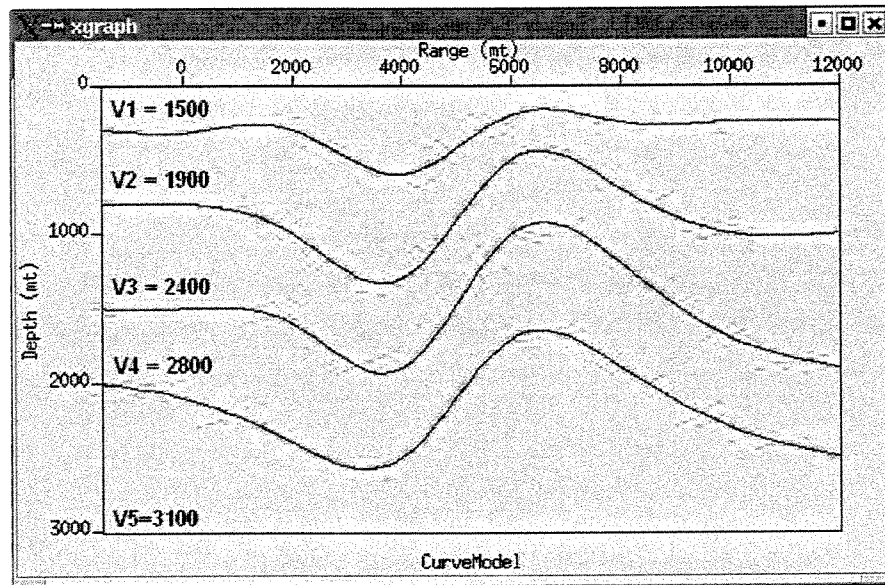


(Figura A.2(c)). O resultado desta modelagem pode ser visto na Figura A.3.

O intervalo de amostragem temporal dos dados multicobertura gerados, assim como da “wavelet”, é de 4ms. A “wavelet” tem um comprimento de 148ms e foi formada por um filtro passa banda com frequências 1-25-25-100Hz.

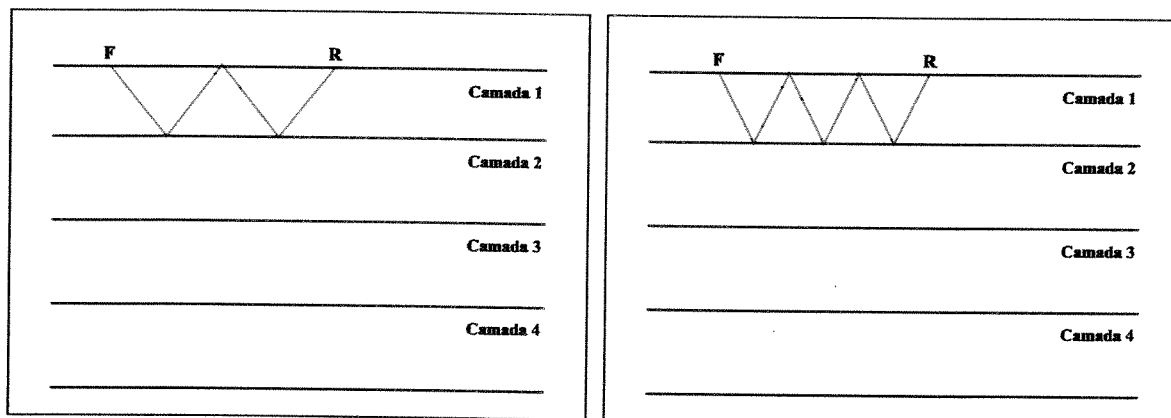


(a)



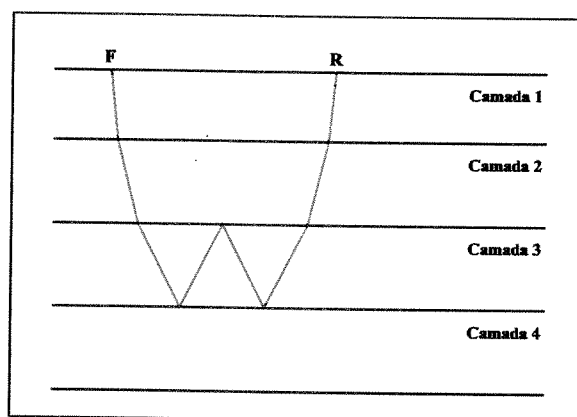
(b)

Figura A.1: Modelos sintéticos criados para testar o algoritmo e as metodologias propostas nesta dissertação: (a) Modelo com interfaces planas e mergulhantes, (b) Modelo com interfaces curvas.



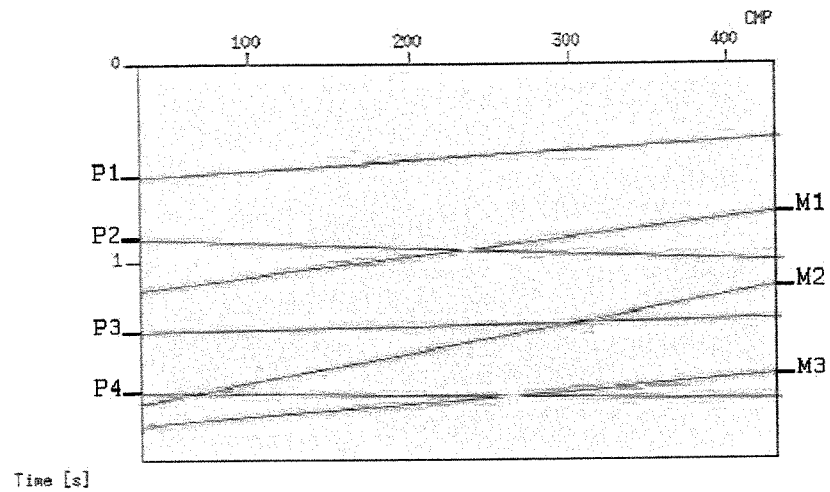
(a)

(b)

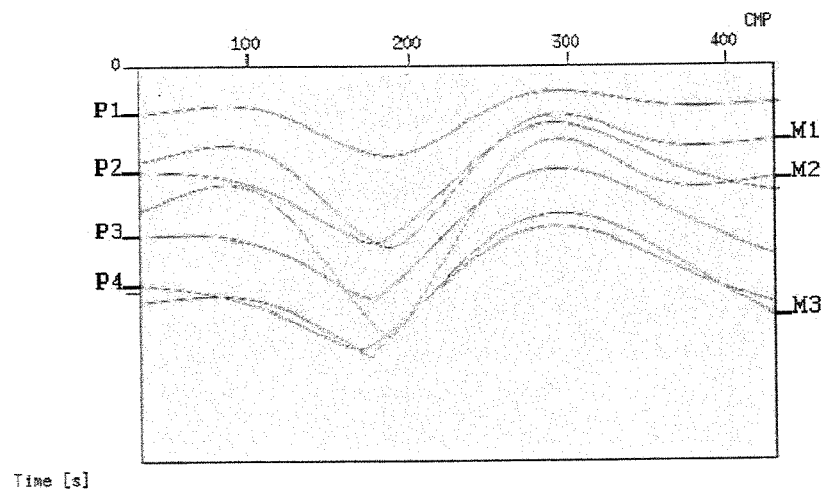


(c)

Figura A.2: Tipos de reflexões múltiplas modeladas: (a) múltipla de primeira ordem da superfície livre, (b) múltipla de segunda ordem da mesma superfície, e (c) múltipla intercamadas simétrica de primeira ordem



(a)



(b)

Figura A.3: Seções de afastamento nulo simuladas. Foram modeladas as reflexões indicadas na Figura A.2: (a) Seção ZO do modelo com interfaces planas e mergulhantes, e (b) seção ZO do modelo com interfaces curvas.

## Apêndice B

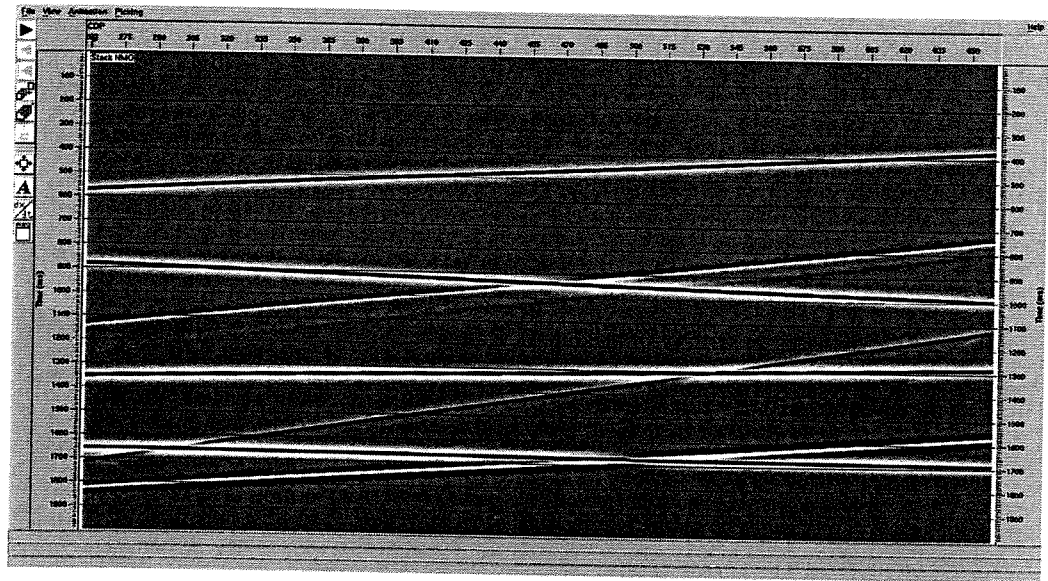
### Processamento NMO

O processamento dos dados sísmicos pelo método NMO foi feito com o pacote ProMAX, desenvolvido e mantido pela empresa Landmark Graphics Corporation, segundo o acordo de utilização Strategic University Alliance Grant no. 2002-COM-014331. A sequência de processamento das linhas foi convencional, a saber:

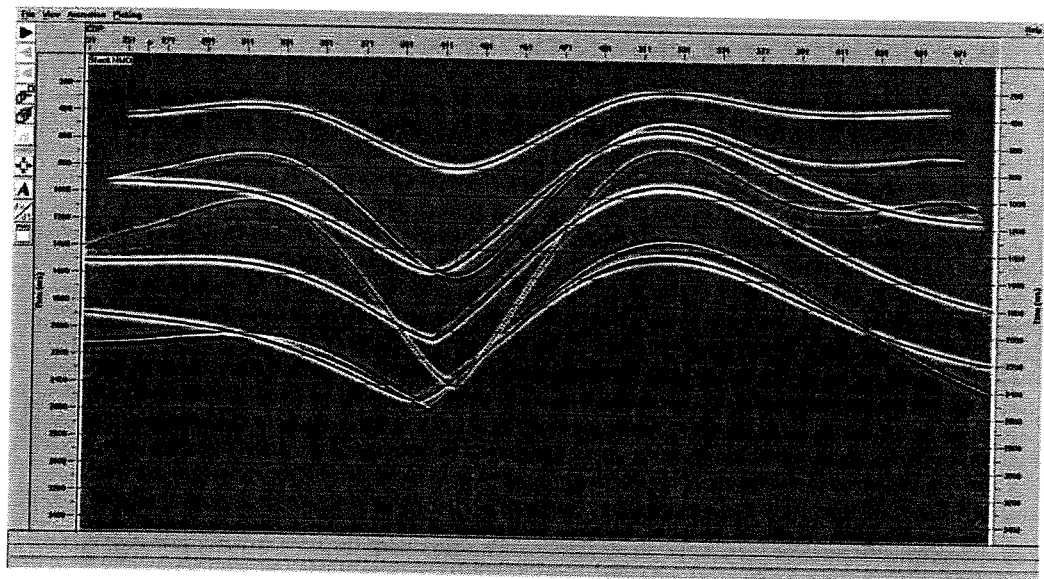
#### B.1 Sequência de Processamento

1. **Conversão de formato.** Os dados em formato SEG-Y foram levados ao formato interno do pacote ProMAX.
2. **Criação da Geometria.** Foi preenchida a informação necessária nas tabelas correspondentes. Estas tabelas contêm informação da quantidade, localização e configuração dos receptores ligados em cada um dos tiros.
3. **Carga da Geometria.** Neste passo relacionam-se os traços com a base de dados criada no item anterior.
4. **Edição de Traço.** Não foi necessário fazer edição de traço. O ruído incluído nos dados é do tipo aleatório e com amplitude de no máximo 20% da amplitude das reflexões.

5. **Correção de Estáticas.** Também não foi necessário fazer a correção de estáticas já que a topografia da linha é plana.
6. **Recuperação de Amplitude.** Correção do espalhamento geométrico, usando Recuperação de Amplitude Verdadeira (TAR).
7. **Deconvolução.** O processo de deconvolução não foi realizado para poder trabalhar com a mesma “wavelet” usada no método CRS.
8. **Análise de Velocidade.** No caso do modelo com interfaces planas foi feito a cada 850m. Para o modelo com interfaces com curvatura, a cada 425m.
9. **Atenuação das Múltiplas.** Foram aplicadas duas técnicas diferentes: Filtragem  $f/k$  e filtragem Radon.
10. **Empilhamento.** Os dados filtrados foram empilhados utilizando as velocidades das reflexões primárias.



(a)



(b)

Figura B.1: Dados empilhados com NMO, sem atenuação de múltiplas: (a) Modelo com as interfaces planas e com mergulho, (b) Modelo com interfaces curvas.

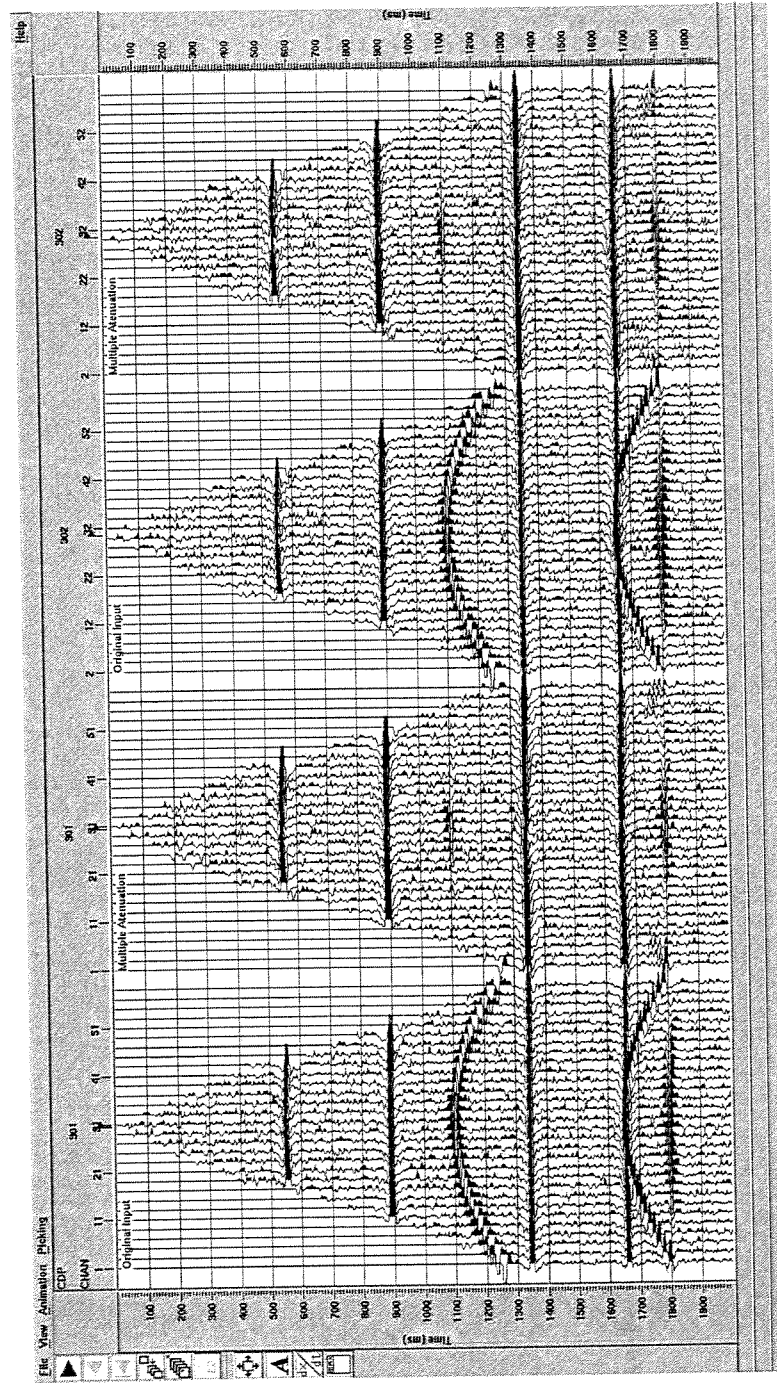


Figura B.2: Dados, do modelo com interfaces planas mergulhantes, com atenuação de múltiplas por filtragem  $f_k$ : Famílias CMP 301 e 302 com correção NMO com as velocidades das primárias. Dados antes (esquerda para cada família) e depois (direita para cada família) de aplicar a filtragem  $f_k$ .



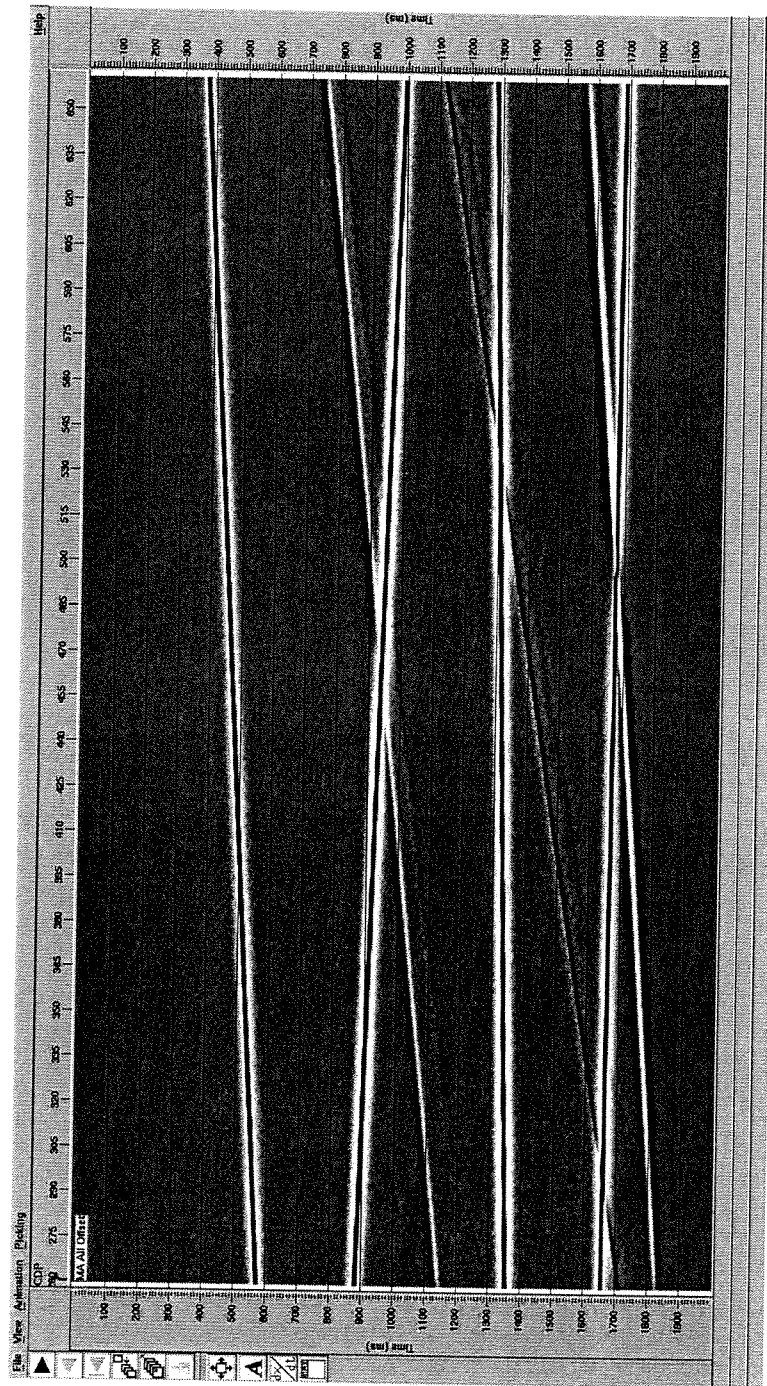


Figura B.3: Dados do modelo com interfaces planas mergulhantes empilhados com NMO após a atenuação de múltiplas por filtragem  $f_k$ .

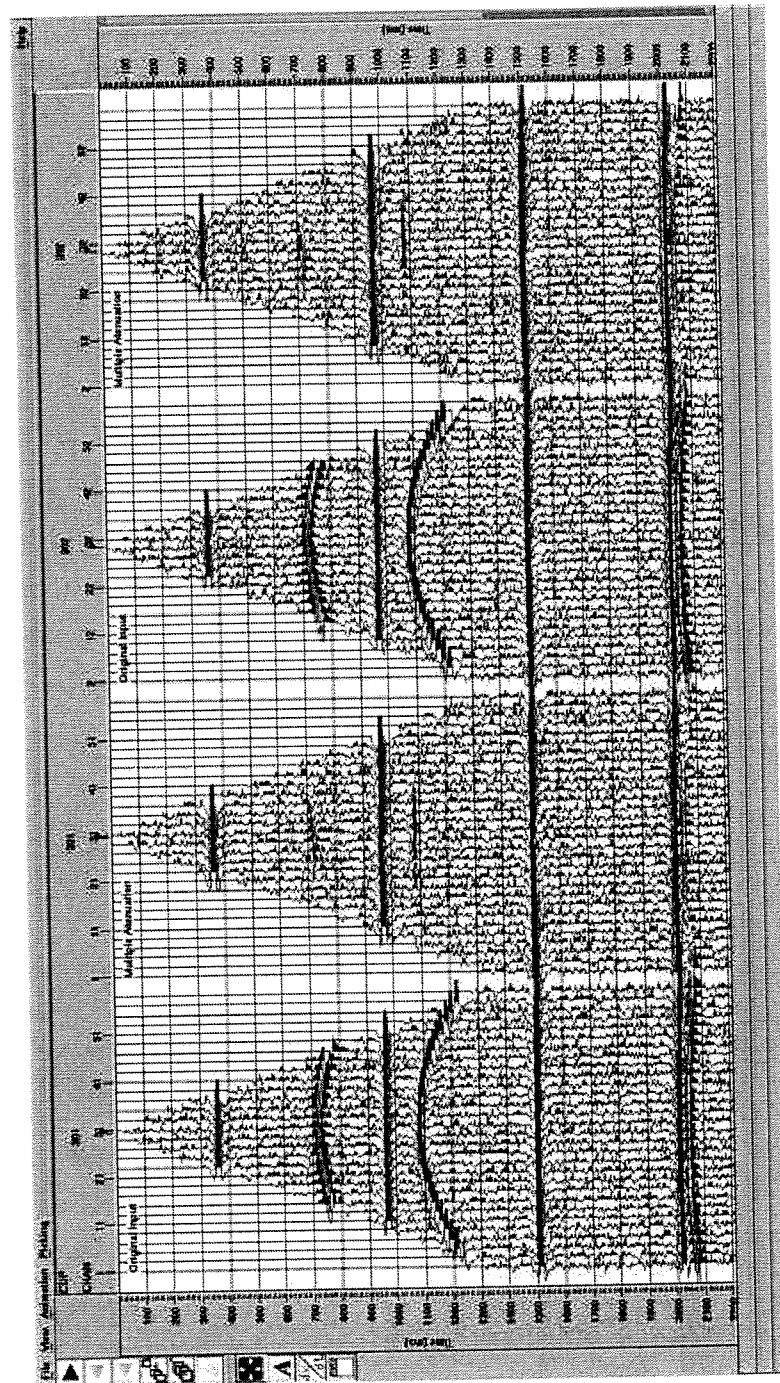


Figura B.4: Dados, do modelo com as interfaces curvas, com atenuação de múltiplas por filtragem  $fk$  : Famílias CMP 301 e 302 com correção do NMO com as velocidades das primárias. Dados antes (esquerda para cada família) e depois (direita para cada família) de aplicar a filtragem  $fk$ .

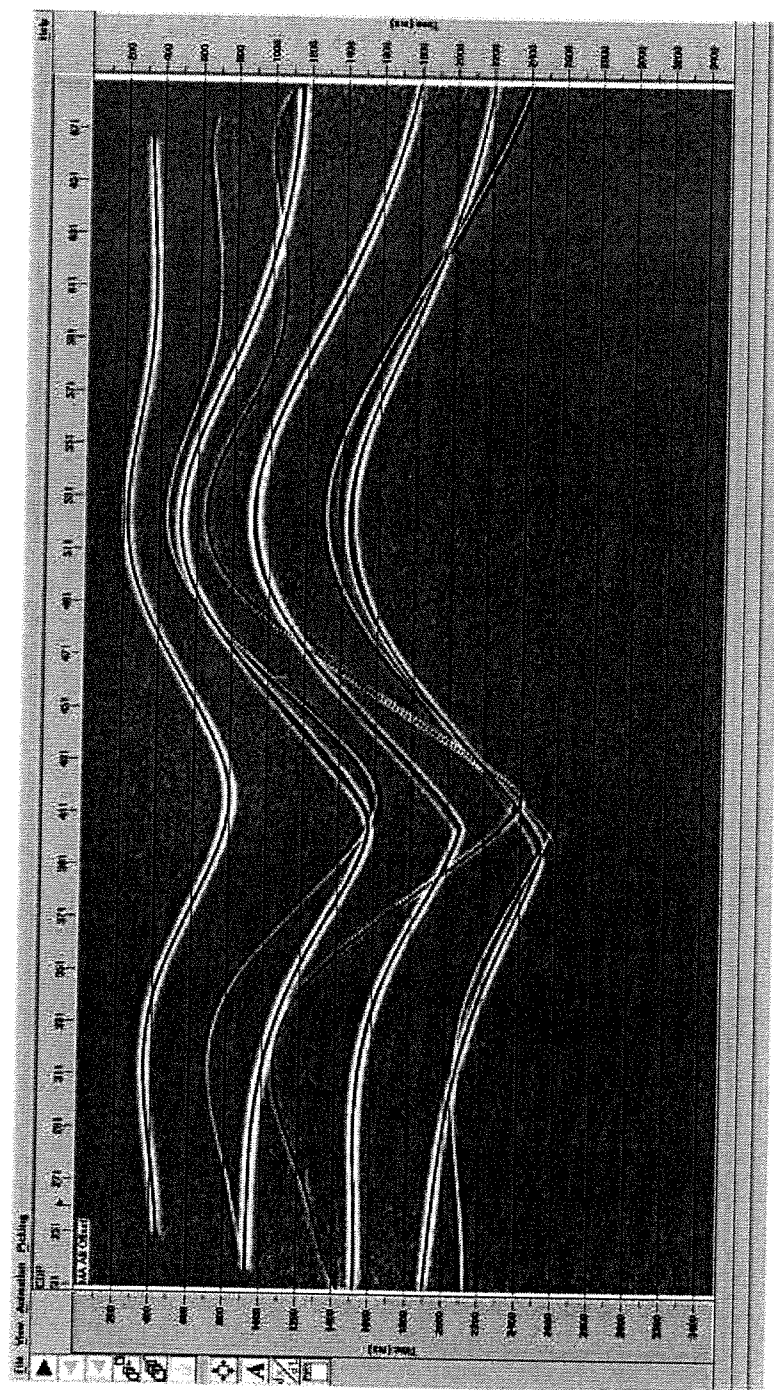


Figura B.5: Dados do modelo com interfaces curvas empilhados com NMO após a atenuação das múltiplas por filtragem  $f_k$ .

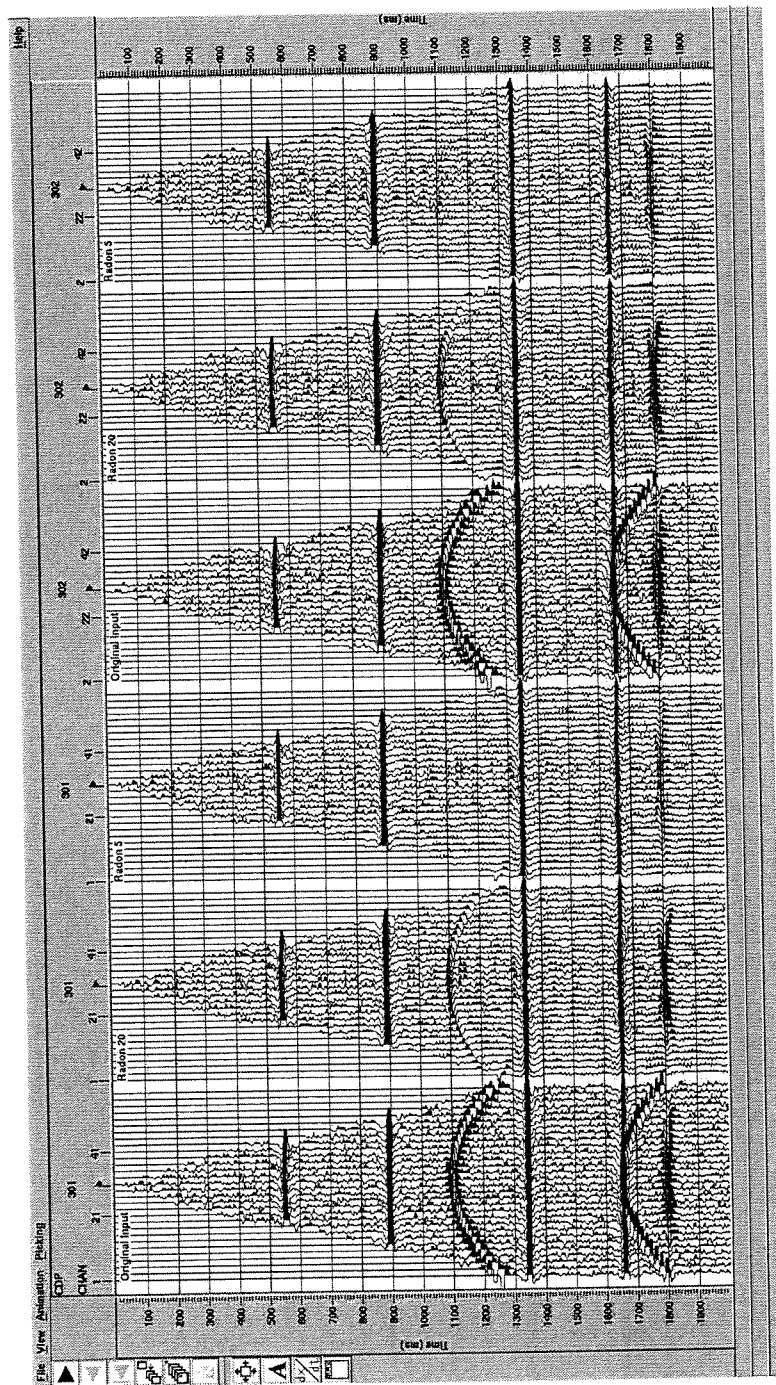


Figura B.6: Dados, do modelo com interfaces planas mergulhantes, com atenuação de múltiplas por filtragem *Radon*: Famílias CMP 301 e 302 com correção do NMO com as velocidades das primárias. Dados antes (esquerda para cada família), depois de aplicar a filtragem Radon de 20% (centro para cada família) e depois de aplicar a filtragem Radon de 5% (direita para cada família).

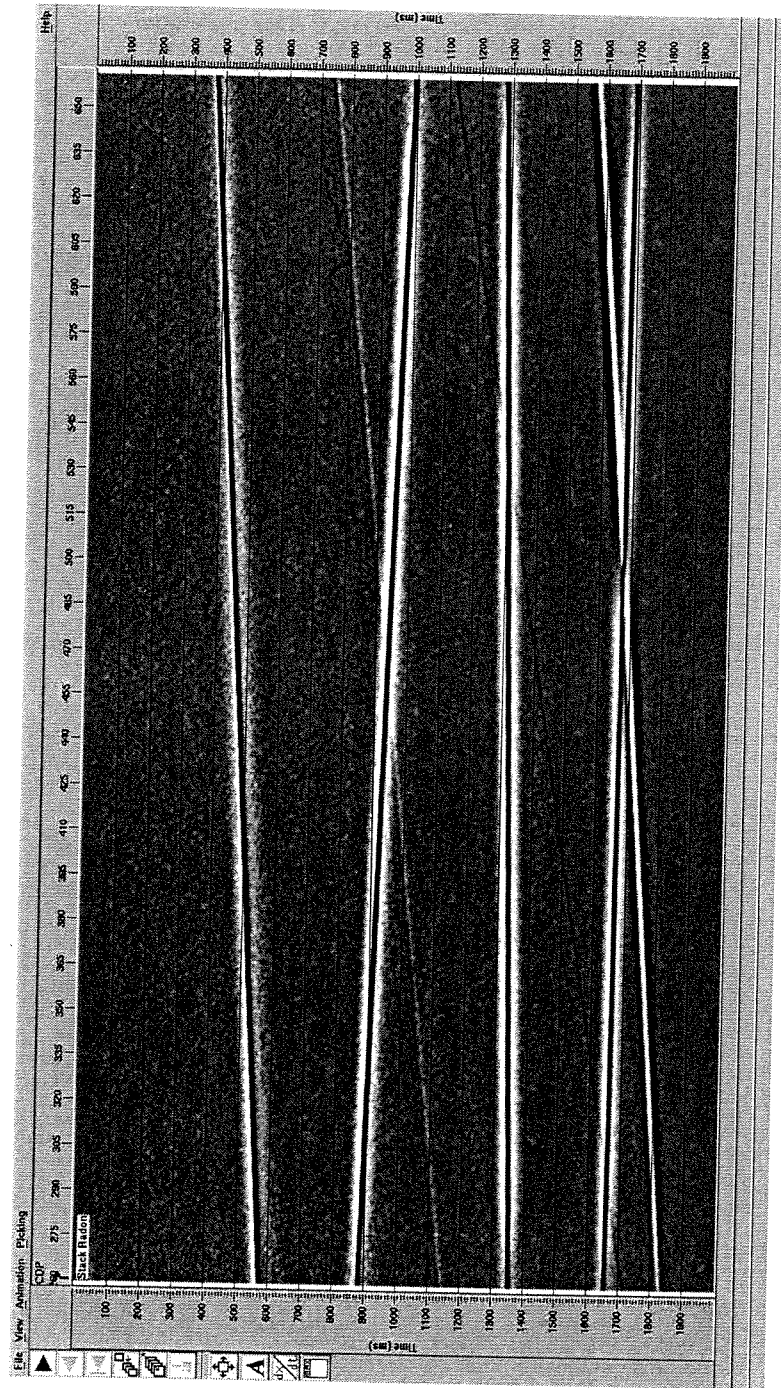


Figura B.7: Dados do modelo com interfaces planas e com mergulho empilhados NMO e com atenuação de múltiplas por filtragem *Radon* de 5%.



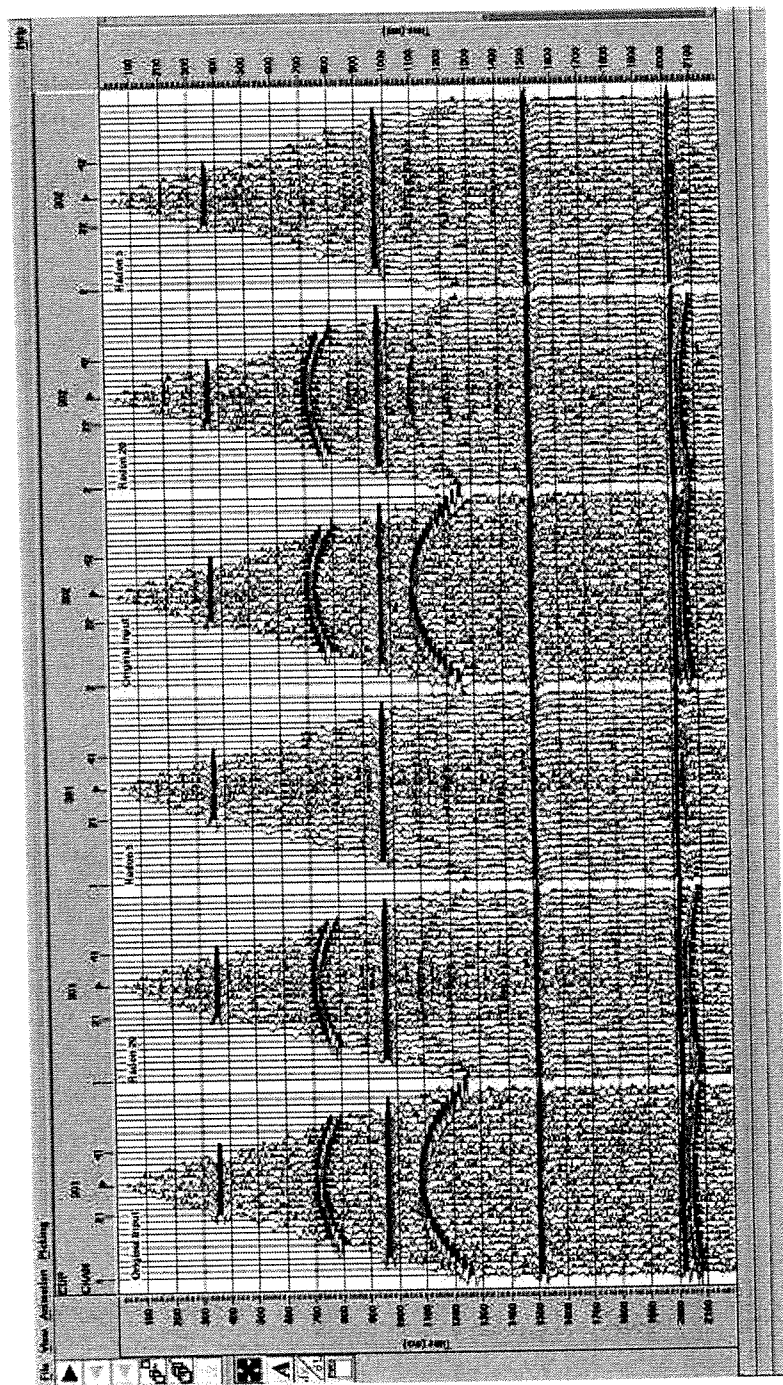


Figura B.8: Dados, do modelo com interfaces curvas, com atenuação de múltiplas por filtragem *Radon*: Famílias CMP 301 e 302 com correção de NMO com as velocidades das primárias. Dados antes (esquerda para cada família), depois de aplicar a filtragem Radon de 20% (centro para cada família) e depois de aplicar a filtragem Radon de 5% (direita para cada família).

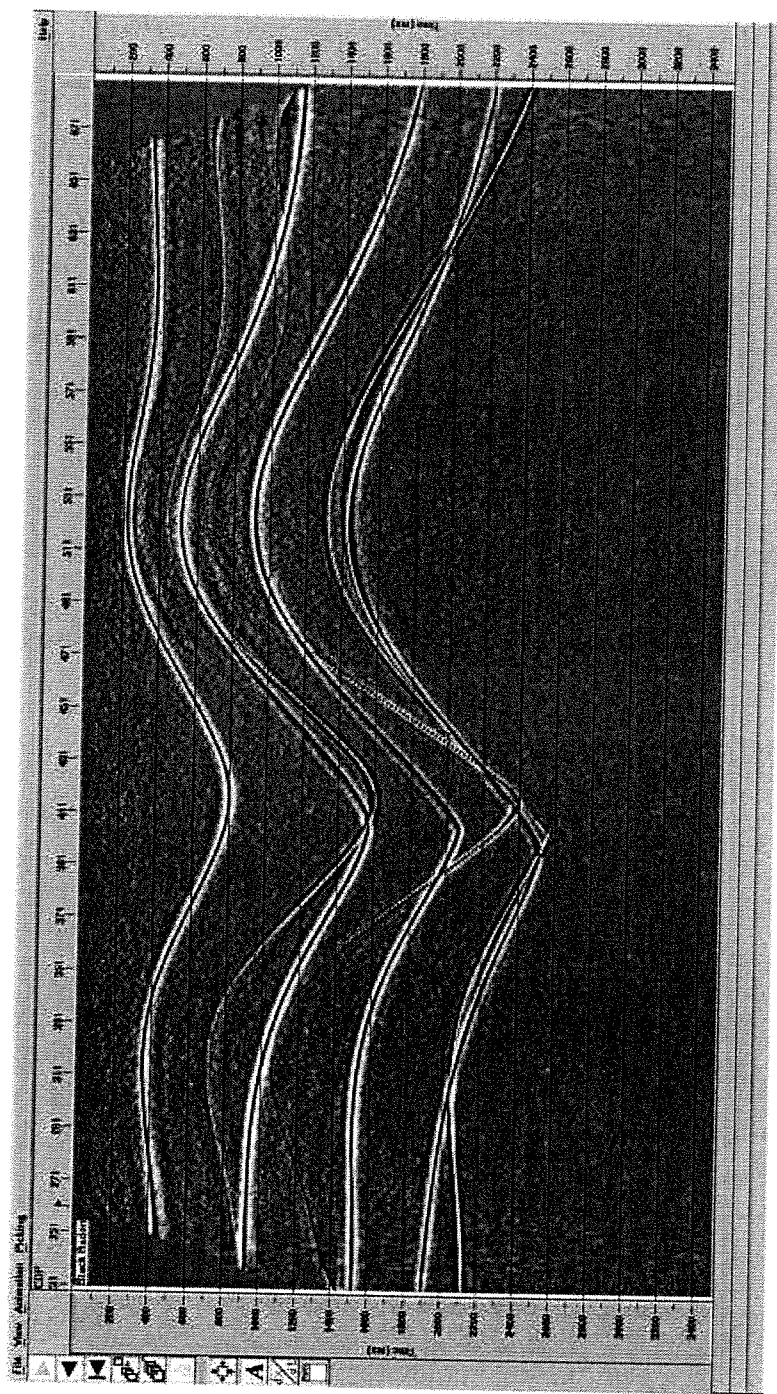


Figura B.9: Dados do modelo com interfaces curvas empilhados NMO e com atenuação de múltiplas por filtragem *Radon* de 5%.

## Apêndice C

### Tempos de Trânsito NMO

O objetivo deste apêndice é apresentar os cálculos do tempo de trânsito da onda, para reflexões primárias e múltiplas, no caso simples de uma camada plana horizontal e camada plana com mergulho, considerando a velocidade constante na camada. O *tempo de trânsito* é o tempo que a onda leva para se propagar da fonte ao refletor e retornar à superfície, onde é registrada no receptor. Não será apresentado um estudo detalhado, ou mesmo completo, sobre o assunto, o qual é bem conhecido na literatura. As demonstrações estão limitadas somente ao necessário para compreender como podem ser obtidas estas equações. Para um estudo melhor do tema, recomendam-se, por exemplo, as referências Levin (1971) e Yilmaz (2000).

#### C.1 Caso 1: Camada Plana e Horizontal

##### C.1.1 Reflexão Primária

A Figura C.1(a) mostra o exemplo simples de uma única camada horizontal. Em uma dada posição de um CMP (ponto médio), o tempo de trânsito ao longo do trajeto de raio desde a posição  $F$  do tiro ao ponto de reflexão,  $P$ , na interface, e retornando a posição  $R$  é  $t(h)$ . Usando o teorema de Pitágoras a equação do tempo de trânsito em função do meio-afastamento é

$$t(h) = \frac{2L}{V}, \quad (\text{C.1})$$



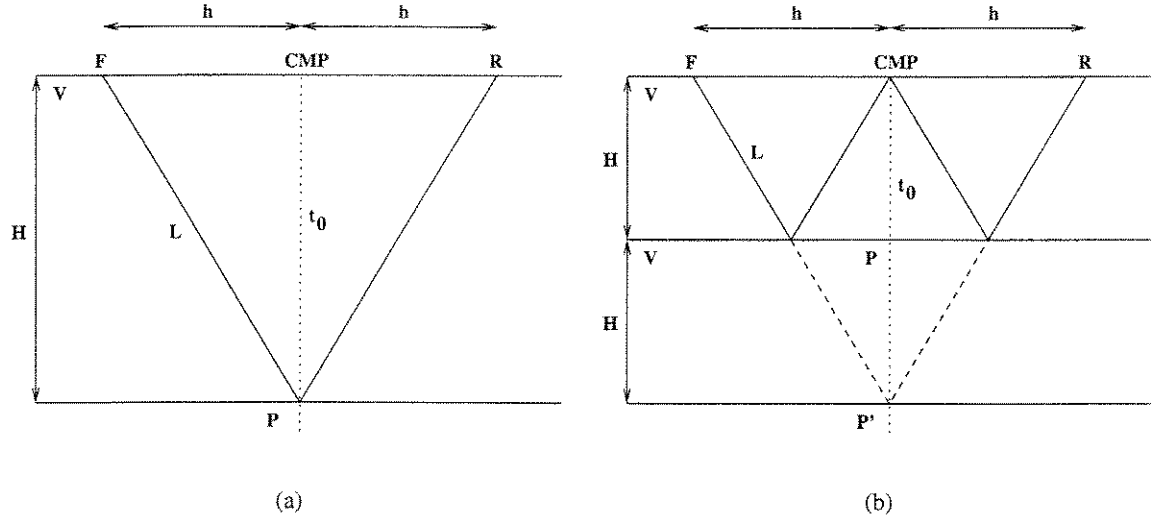


Figura C.1: Tempo de trânsito em camada plana horizontal: (a) Reflexão primária na primeira camada, (b) Reflexão múltipla de primeira ordem na primeira camada.

onde  $L$  é dado por

$$L = \sqrt{h^2 + H^2} . \quad (\text{C.2})$$

Juntando as equações (C.1) e (C.2) obtém-se o tempo de trânsito hiperbólico no domínio CMP,

$$t(h)^2 = \left(\frac{2}{V}\right)^2 [h^2 + H^2] \quad (\text{C.3a})$$

$$= \left(\frac{2H}{V}\right)^2 + \frac{4h^2}{V^2} \quad (\text{C.3b})$$

$$= (t_0)^2 + \frac{4h^2}{V^2} , \quad (\text{C.3c})$$

onde  $t_0$  é duas vezes o tempo de trânsito ao longo do trajeto vertical CMP-P.

### C.1.2 Reflexão Múltipla

Consideremos agora a reflexão múltipla representada na Figura C.1(b). Utilizando, mais uma vez, o teorema de Pitágoras, temos

$$t(h) = \frac{4L}{V} , \quad (\text{C.4})$$

mas neste caso  $L$  é dado por

$$L = \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + H^2} . \quad (\text{C.5})$$

Das equações (C.4) e (C.5), calcula-se o tempo de trânsito para a reflexão múltipla de primeira ordem

$$\begin{aligned} t(h)^2 &= \left(\frac{4}{V}\right)^2 \left(\frac{h^2}{4} + H^2\right) \\ &= \left(2\frac{2H}{V}\right)^2 + \frac{4h^2}{V^2} \\ &= (2t_0)^2 + \frac{4h^2}{V^2} . \end{aligned} \quad (\text{C.6})$$

A extensão para o caso geral de uma múltipla de ordem qualquer é dada por

$$t(h)^2 = ((n+1)t_0)^2 + \frac{4h^2}{V^2} , \quad (\text{C.7})$$

onde  $n$  é a ordem da múltipla ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ). Vale observar que, para  $n = 0$ , obtemos a representação de uma reflexão primária.

## C.2 Caso 2: Camada Plana com Mergulho

### C.2.1 Reflexão Primária

Consideremos o caso de uma reflexão primária na interface da camada plana com mergulho mostrada na Figura C.2(a). Uma simples aplicação da chamada Lei dos co-senos dá origem à relação

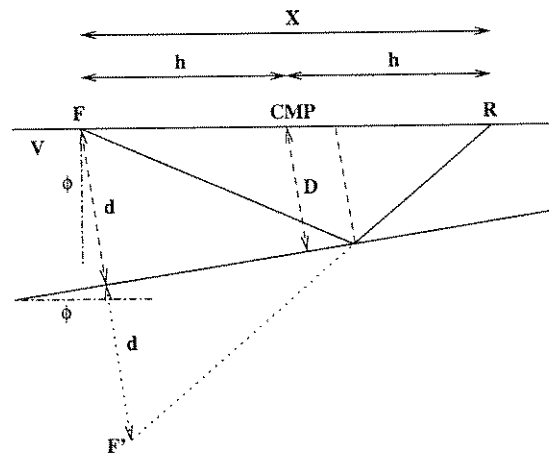
$$(\overline{F'R})^2 = (2d)^2 + X^2 - 2(2d)X \sin \phi , \quad (\text{C.8})$$

além das equivalências

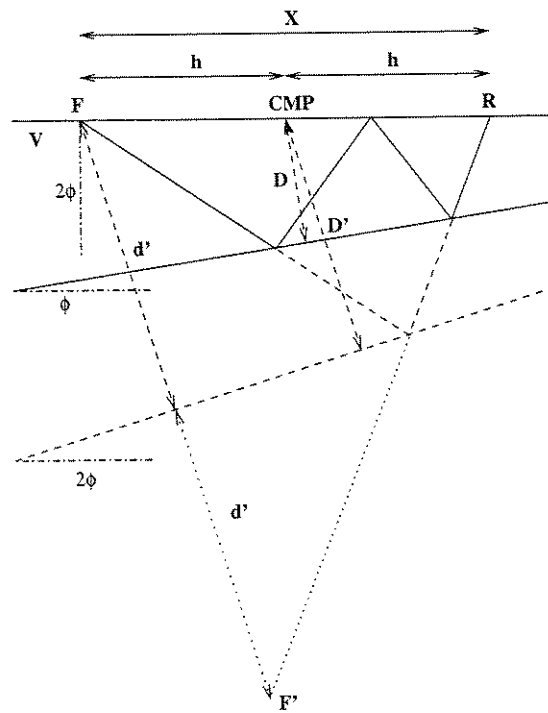
$$\begin{aligned} d &= D + h \sin \phi , \\ \overline{F'R} &= Vt , \\ h &= \frac{X}{2} . \end{aligned} \quad (\text{C.9})$$

Juntando as equações (C.8) e (C.9), temos que

$$(Vt)^2 = [2(D + h \sin \phi)]^2 + (2h)^2 - 2(D + h \sin \phi)(2h) \sin \phi , \quad (\text{C.10})$$



(a)



(b)

Figura C.2: Tempo de trânsito em camada plana com mergulho: (a) Reflexão primária na primeira camada, (b) Reflexão múltipla de primeira ordem na primeira camada.

Colocando  $t^2$  em evidência, como uma função do meio-afastamento  $h$ , encontramos, após algumas manipulações simples,

$$t(h)^2 = \left(\frac{2D}{V}\right)^2 + \frac{(2h)^2}{V^2} \cos^2 \phi . \quad (\text{C.11})$$

Tendo em vista as relações

$$t_0 = \frac{2D}{V} , \quad \text{bem como} \quad V_{NMO} = \frac{V}{\cos \phi} , \quad (\text{C.12})$$

A equação acima pode ser, finalmente, reescrita na forma

$$t(h)^2 = t_0^2 + \frac{4h^2}{V_{NMO}^2} , \quad (\text{C.13})$$

a qual representa a expressão procurada do tempo de trânsito de uma reflexão primária em uma interface plana mergulhante em um meio homogêneo.

### C.2.2 Reflexão Múltipla

Para calcular o tempo de trânsito da reflexão múltipla de primeira ordem, como a mostrada na Figura C.2(b), usaremos a primária equivalente desta múltipla, mostrada na mesma figura (linhas tracejadas). Desta forma, podemos seguir a mesma seqüência de operações utilizada no cálculo anterior relativo à reflexão primária.

Pela Lei dos co-senos, temos

$$(\overline{F'R})^2 = (2d')^2 + X^2 - 2(2d')X \sin(2\phi) \quad (\text{C.14})$$

$$d' = D' + h \sin(2\phi) , \quad \overline{F'G} = Vt \quad \text{e} \quad h = \frac{X}{2} \quad (\text{C.15})$$

Da junção dessas equações, segue-se que

$$(Vt)^2 = [2(D' + h \sin(2\phi))]^2 + (2h)^2 - 2(D' + h \sin(2\phi))(2h) \sin(2\phi) , \quad (\text{C.16a})$$

$$V^2 t^2 = 4D^2 + (2h)^2(1 - \sin^2(2\phi)) . \quad (\text{C.16b})$$

Deixando  $t^2$  em evidência, como uma função de  $h$ , obtemos

$$t(h)^2 = \left(\frac{2D'}{V}\right)^2 + \frac{(2h)^2}{V^2} \cos^2(2\phi) , \quad (\text{C.17a})$$

$$t(h)^2 = (t_0)^2 + \frac{4h^2}{V_{NMO}^2} , \quad (\text{C.17b})$$

onde foram utilizadas as relações

$$t_0 = \frac{2D'}{V} \quad \text{e} \quad V_{NMO} = \frac{V}{\cos(2\phi)} .$$

### C.2.3 Relação entre a reflexão primária e a múltipla

Relacionando os dois triângulos da Figura C.3, temos que

$$X = \frac{D}{\sin(\phi)} = \frac{D'}{\sin(2\phi)} , \quad (\text{C.18})$$

seguindo-se uma relação entre as distâncias  $D$  e  $D'$ ,

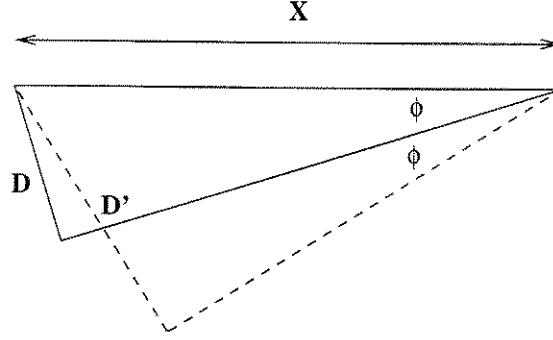


Figura C.3: Relação entre reflexão primária e múltipla no caso de uma camada plana com mergulho.

$$D' = D \frac{\sin(2\phi)}{\sin(\phi)} , \quad (C.19)$$

a qual permite descrever o tempo de trânsito da reflexão múltipla em função da quantidade,  $D$ , da primária.

Se juntamos as equações (C.17a) e (C.19) obtemos a equação de tempo de trânsito da reflexão múltipla em função da quantidade  $D$  da reflexão primária

$$t_m(h)^2 = \left( \frac{2D \sin(2\phi)}{V \sin(\phi)} \right)^2 + \frac{4h^2}{V^2} \cos^2(2\phi) . \quad (C.20)$$

Em forma geral, o tempo de trânsito da reflexão múltipla de ordem  $n$ , ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) é dado por

$$t_m(h)^2 = \left( \frac{2D \sin(n+1)\phi}{V \sin(\phi)} \right)^2 + \frac{4h^2}{V^2} \cos^2(n+1)\phi \quad (C.21)$$

## Apêndice D

### Leis de Curvatura de Frente de Onda

As curvaturas da frente de onda podem ser expressas analiticamente em termos dos parâmetros ao longo da trajetória do raio conforme Hubral e Krey (1980). O cálculo destas curvaturas em qualquer ponto de um raio arbitrário está intrinsecamente associado às leis de Transmissão e Reflexão, pois a curvatura da frente de onda que se propaga em subsuperfície, pode mudar devido à propagação dentro da camada (Figura D.1(a)), e devido a transmissões (Figura D.1(b)) e reflexões (Figura D.1(c)) nas interfaces.

As leis de transformação das curvaturas serão descritas na situação de propagação em um meio 2D que consiste de camadas homogêneas separados por interfaces (refletores) de curvatura suave. Tais meios são conhecidos na literatura como *sistemas sísmicos*. Para mais detalhes sobre a demonstração dos resultados abaixo, inclusive no caso de sistemas sísmicos 3D, recomendamos a referência Hubral e Krey (1980).

#### D.1 Lei de Propagação

A chamada lei de propagação informa como o raio de curvatura da frente de onda varia devido à propagação no interior de uma camada homogênea, podendo ser escrita na forma

$$R_{P_2} = R_{P_1} + v\Delta T, \quad (D.1)$$



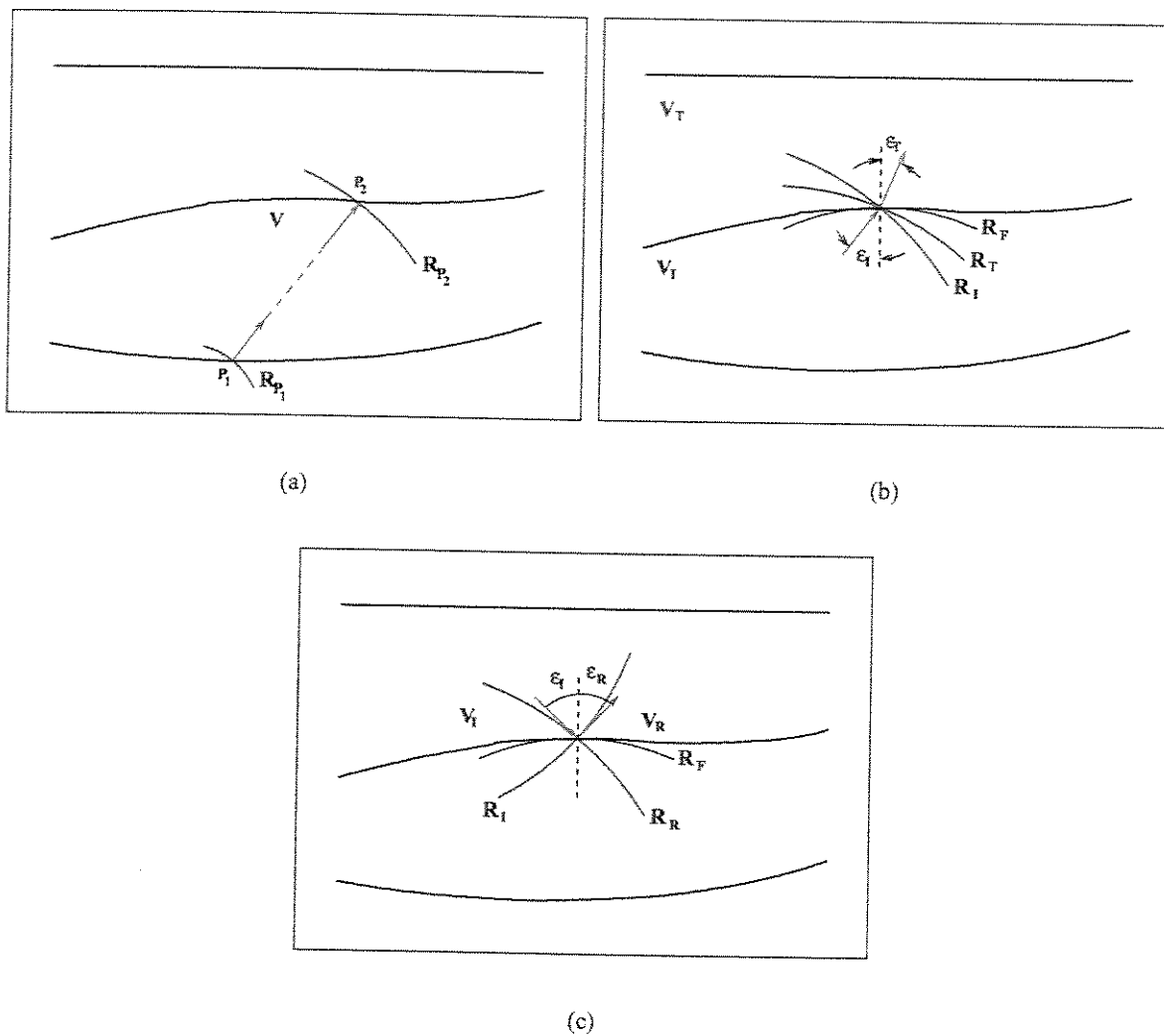


Figura D.1: Propagação do raio de curvatura da frente de onda

onde  $R_{P_1}$  e  $R_{P_2}$  (Figura D.1(a)) denotam os raios de curvatura das frentes de onda nos pontos  $P_1$  e  $P_2$  respectivamente,  $v$  é a velocidade constante da camada e  $\Delta T$  é o tempo de trânsito requerido pela onda para se propagar de  $P_1$  até  $P_2$ .

## D.2 Lei de Transmissão

A lei de transmissão de curvatura refere-se à mudança do raio de curvatura da frente de onda devido a sua passagem através de uma interface que separa duas camadas. Esta lei pode ser escrita

$$\frac{1}{R_T} = \frac{v_T \cos^2 \epsilon_I}{v_I \cos^2 \epsilon_T} \frac{1}{R_I} + \frac{1}{\cos^2 \epsilon_T} \left( \frac{v_T}{v_I} \cos \epsilon_I - \cos \epsilon_T \right) \frac{1}{R_F}, \quad (\text{D.2})$$

onde  $R_T$  e  $R_I$  (Figura D.1(b)) são os raios de curvatura da frente de onda transmitida (velocidade  $v_T$ ) e incidente (velocidade  $v_I$ ), respectivamente. Além disso,  $R_F$  representa o raio de curvatura da interface na interseção do raio incidente. Finalmente, temos que  $\epsilon_I$  e  $\epsilon_T$  denotam, respectivamente, os ângulos de incidência e transmissão do raio, relativamente à normal à interface no ponto de incidência.

Vale observar que o primeiro termo da equação (D.2) descreve a alteração da curvatura da frente de onda relacionada à mudança de meio e o segundo descreve a alteração devido à curvatura da interface.

## D.3 Lei de Reflexão

A lei de reflexão descreve como varia a curvatura da frente de onda pela sua reflexão numa interface

$$\frac{1}{R_R} = \frac{v_R \cos^2 \epsilon_I}{v_I \cos^2 \epsilon_R} \frac{1}{R_I} + \frac{1}{\cos^2 \epsilon_R} \left( \frac{v_R}{v_I} \cos \epsilon_I + \cos \epsilon_R \right) \frac{1}{R_F}. \quad (\text{D.3})$$

Na equação acima,  $R_R$  (Figura D.1(c)) representa o raio de curvatura da frente de onda refletida no ponto de reflexão. Além disso,  $v_I$  e  $v_R$  representam as velocidades dos meios antes e após a reflexão. Finalmente,  $\epsilon_I$  e  $\epsilon_R$  representam, respectivamente, os ângulos de incidência e reflexão relativos à normal à interface no ponto de reflexão.

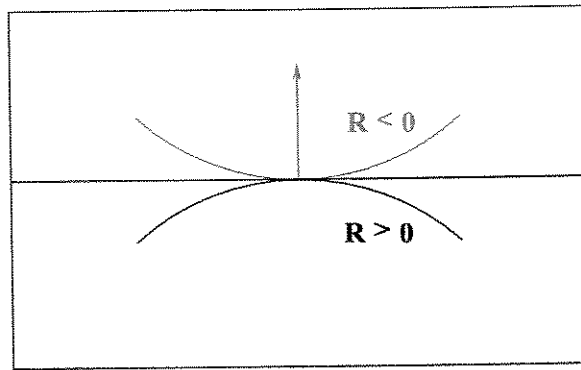
De forma análoga ao caso da transmissão, vale notar que o primeiro termo da equação (D.4) descreve a mudança da frente de onda pela reflexão e o segundo descreve a mudança devido à curvatura da interface. Note que no caso de não haver mudança no tipo de onda e nas propriedades do meio,  $v_R = v_I$  ( $\epsilon_R = \epsilon_I$ ) a equação (D.4) fica

$$\frac{1}{R_R} = \frac{1}{R_I} + \frac{2}{\cos \epsilon} \frac{1}{R_F}. \quad (\text{D.4})$$

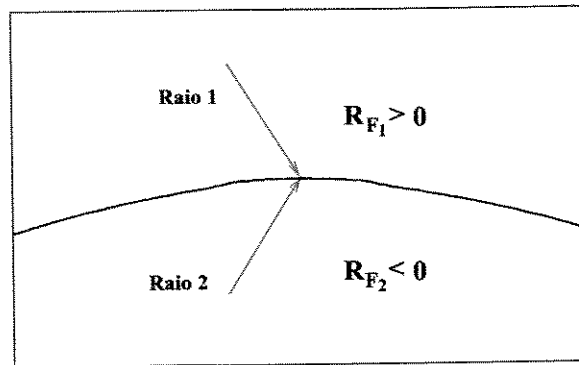
## D.4 Convenção de Sinais

A convenção de sinais trabalhada é a mesma adotada por Hubral e Krey (1980), definida por:

- Quando uma frente de onda se apresenta atrás de seu plano tangente relativamente à propagação (Figura D.2(a)), então o raio de curvatura é positivo (linha vermelha, traço contínuo). Caso contrário, o raio de curvatura é negativo (linha azul, traço tracejado).
- O raio de curvatura da interface,  $R_F$ , é positivo se a interface aparece como convexa ao raio incidente (Figura D.2(b)) e negativo se aparece como côncava.



(a)



(b)

Figura D.2: Convenção de sinais das curvaturas: (a) das frentes de onda, e (b) das interfaces

## Apêndice E

### Hardware e Software Usados

Os algoritmos para o modelamento das múltiplas e cálculo do filtro adaptador foram implementados em C, eles usam as bibliotecas do pacote **Seismic Unix (Center of Wave Phenomena, Colorado School of Mines)**.

Os dados sísmicos sintéticos foram produzidos pelo programa de traçado de raios **Cshot**. Este programa é livremente distribuído com o pacote **Seismic Unix**.

O processamento NMO/DMO dos modelos sintéticos foi realizado com pacote ProMAX 2D (Versão 2003), através de acordo de utilização Landmark Graphics Corporation - Strategic University Alliance Grant no. 2002-COM-014331).

Esta tese foi escrita num PC (Linux RedHat 7.3) usando o processador de texto (de distribuição livre)  $\text{\TeX}$ , e o pacote macro  $\text{\LaTeX}$ , e diversas extensões. A bibliografia foi gerada com  $\text{\BIBTeX}$ . As figuras foram construídas principalmente com Xfig 3.2.