

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

Construção de Imagens Sísmicas pelo Método de Superfície de Reflexão Comum (CRS)

Autor : Sérgio da Silva Araújo

Orientador: Martin Tygel

Co-orientador: Eduardo Filpo Ferreira da Silva

Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração:

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia do Petróleo.

Campinas, 2000

S.P. - Brasil

UNIDADE	BE
Nº CHAMADA	T/UNICAMP
	Ar15c
V	48877
	16.837102
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	08/05/02
Nº CPD	

CM00167134-9

BIB ID 239279

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

Ar15c	<p>Araújo, Sérgio da Silva Construção de imagens sísmicas pelo método de superfície de reflexão comum (CRS) / Sérgio da Silva Araújo.--Campinas, SP: [s.n.], 2000.</p> <p>Orientadores: Martin Tygel, Eduardo Filpo Ferreira da Silva Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Reflexão acústica. 2. Método sísmico de reflexão. 3. Ondas sísmicas. I. Tygel, Martin. II. Silva Eduardo Filpo Ferreira da. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.</p>
-------	---

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Construção de Imagens Sísmicas pelo Método de
Superfície de Reflexão Comum (CRS)**

Autor : **Sérgio da Silva Araújo**

Orientador: **Martin Tygel**

Co-orientador: **Eduardo Filpo Ferreira da Silva**

84/00

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Sérgio da Silva Araújo
E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 21/12/00
M. Tygel
ORIENTADOR

i

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

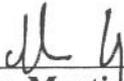
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Construção de Imagens Sísmicas pelo Método de Superfície de Reflexão Comum (CRS)

Autor : Sérgio da Silva Araújo

Orientador: Martin Tygel

Co-orientador: Eduardo Filpo Ferreira da Silva



Prof. Dr. Martin Tygel, Presidente
Instituto de Matematica, Estatística e Ciências da Computação



Prof. Dr. Jörg Schleicher
Instituto de Matematica, Estatística e Ciências da Computação



Prof. Dr. Saul Barisnik Suslick
Instituto de Geociências

Campinas, 21 de dezembro de 2000

000219645



Dedicatória:

Estas páginas são dedicadas a quem os sonhos são esperanças e o despertar é quase uma ilusão. Minha esposa e meus filhos, que souberam compreender a minha ausência durante este período

Agradecimentos:

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais expresso meus agradecimentos:

À minha família pelo incentivo e o conforto em todos os momentos em que deles necessitei.

Aos meus orientadores, que me mostraram os caminhos a serem seguidos.

A todos os professores e colegas do LGM, em especial à Valéria e ao Ricardo, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

A todos os professores e colegas do DEP, especialmente aos colegas José Acurcio, Marcos Gonçalves e Daniel Steagall que apoiaram em questões técnicas.

À Petrobras por fornecer suporte técnico e financeiro à realização desta tese.

À colega Neiva Zago pelo auxílio prestado e pelas relevantes discussões durante a execução desta dissertação.

*Sempre é tempo
De ousar
Ser, simplesmente
E... viver!*

(Fernando Pessoa)

Resumo

ARAUJO, Sérgio Silva. *Construção de Imagens Sísmicas pelo Método de Superfície de Reflexão Comum (CRS)*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 110 p. Tese (Mestrado).

Cada vez mais, a sísmica de reflexão vem ganhando importância nos trabalhos de exploração e caracterização de reservatórios de petróleo. Seu objetivo é o fornecimento de uma imagem em profundidade a partir de dados de reflexão multicobertura, que permita a interpretação de um modelo geológico, gerando subsídios para uma correta caracterização do reservatório. O imageamento sísmico convencional (empilhamento NMO/DMO) é um processo que exige um macro-modelo de velocidades suficientemente preciso, para produzir resultados corretos. Este trabalho descreve um conceito de imageamento recentemente desenvolvido, denominado Empilhamento por Superfície de Reflexão Comum (CRS) no qual apenas a velocidade próxima à superfície precisa ser conhecida. O operador de empilhamento CRS depende de um trio de parâmetros de empilhamento que é determinado de um modo automático por meio de procedimento de busca e análise de coerência. O método é aplicado a dados sintéticos e reais. Para dados sintéticos, ou seja, para um determinado modelo, os atributos de frente de onda obtidos mostram uma grande concordância com os resultados esperados. Para os dados reais, a seção empilhada CRS é comparada com a convencional, mostrando uma boa qualidade da imagem final, além de fornecer atributos de campo de onda importantes para vários propósitos: determinação do modelo de macro-velocidades, imageamento em verdadeira-amplitude e caracterização das camadas.

Palavras Chave

- Imagem sísmica, dados multicobertura, Superfície de Reflexão Comum, atributos.

Abstract

ARAUJO, Sérgio Silva. *Construção de Imagens Sísmicas pelo Método de Superfície de Reflexão Comum (CRS)*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 110 p. Tese (Mestrado).

The importance of seismic reflection in the exploration work and petroleum reservoir characterization has been greatly increasing. Its objective is to provide a depth image from multicoverage reflection data sets, which are used by geophysicists to interpret a geological model, creating subsidies for a correct reservoir characterization. The conventional seismic imaging method (NMO/DMO stack) is a process that demands a sufficiently accurate velocity macro-model to produce correct results. This work describes a recently developed imaging concept, named the Common Reflection Surface (CRS) Stack in which only the near-surface velocity needs to be previously known. The CRS stacking operator depends on a stacking triplet parameter that is determined in an automatic way through a search and coherence analysis procedure. The method is submitted to synthetic and real data sets. For synthetic data set, i.e., a certain model, the wavefront attributes obtained showed a great agreement with the expected results. For the real data set, the CRS stacking section is compared with the conventional one, showing a good final image quality. The CRS method provide, not only a good quality section, but also important wavefield attributes that can be used for several purposes: macro-model velocity determination, true-amplitude imaging and layers characterization.

Keywords

- Seismic image, multicoverage data set, Common Reflection Surface, attributes.

Índice

Dedicatória:.....	iv
Agradecimentos:	v
Resumo	vii
Abstract.....	viii
Índice	ix
Lista de Figuras.....	xii
Lista de Tabelas	xviii
Nomenclatura.....	xix
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Estrutura da tese.....	7
Capítulo 2.....	9

Métodos para Imageamento Sísmico	9
2.1 Empilhamento NMO/DMO	9
2.1.1 Empilhamento CMP	10
2.1.2 Correção de DMO	16
2.2 Métodos Independentes de Modelo de velocidades	20
2.2.1 <i>PolyStack</i>	20
2.2.2 Expansões Tri-paramétricas	21
2.3 Comentários	29
Capítulo 3	31
Empilhamento por Superfície de Reflexão Comum:	31
3.1 A superfície de empilhamento CRS	32
3.2 Procedimento de empilhamento CRS	33
3.2.1 Busca na configuração de ponto médio-comum (CMP)	35
3.2.2 Busca na configuração de afastamento-nulo	37
Capítulo 4	39
Aplicações do método CRS	39

4.1 Modelos Sintéticos.....	39
4.1.1 Modelo Tipo-Talude.....	40
4.1.2 Modelo Tipo-Domo com Capa de Gás.....	56
4.2 Dado Real	67
Capítulo 5.....	85
Conclusões e Perspectivas	85

Lista de Figuras

- Figura 1.1: Relações entre as coordenadas x_S , x_G , x_m , h e os diferentes agrupamentos. Cada símbolo “o” indica um traço sísmico (modificado de Scales, 1994).3
- Figura 1.2: Representação de uma geometria 2D em ponto de tiro comum com 2 tiros e 3 receptores, com intervalo de tiro igual à metade do intervalo de receptores. O modelo consiste em um único refletor horizontal.4
- Figura 1.3: Uma família CMP associada a 6 pares fonte-receptor. A curva hiperbólica pontilhada representa o tempo de percurso para uma camada horizontal, de velocidade constante.4
- Figura 2.1: Modelo com múltiplas camadas horizontais (Yilmaz, 1987).12
- Figura 2.2: Uma geometria de ponto de tiro comum em a) e uma geometria de CMP em b) são mostradas para um único refletor mergulhante com velocidades constantes..... 12
- Figura 2.3: Análise de Velocidades, mostrando um espectro de velocidades, à esquerda e painéis compostos por uma família CMP corrigida de NMO, com várias velocidades constantes (Lindseth, 1982).13
- Figura 2.4: a) uma família CMP para 5 camadas de velocidades constantes b) corrigida de NMO, com Δt_{NMO} e t_0 indicando, respectivamente, o *moveout* normal e o tempo de percurso em afastamento nulo para a segunda interface. O silenciamento (mute) dos dados estirados, para 2 valores diferentes para o fator de estiramento. (Yilmaz, 1987) 14

Figura 2.5: Para construir uma reflexão ZO na seção empilhada desejada, a reflexão de afastamento qualquer registrada no tempo $t = \tau$ deve ser movida até o tempo de percurso $t = \tau_0$, sendo que, por este processo, um pequeno intervalo de tempo $\delta\tau$ no afastamento original é reproduzido em um novo intervalo de tempo $\delta\tau_0$ na seção empilhada construída, o pulso sísmico correspondente sofre, então, um estiramento de $\delta\tau_0 / \delta\tau$ (modificado de Cruz et al., 2000).....	15
Figura 2.6: a) Deslocamento do ponto de reflexão para um refletor inclinado. b) Resposta impulsiva do DMO, ou seja, uma amostra não-nula em afastamento comum é traçada (cinematicamente) ao longo de uma elipse. Cada ponto na elipse de DMO corresponde a um mergulho particular (modificado de Müller, 1999).....	16
Figura 2.7: Fluxo de Processamento básico para empilhamento NMO/DMO de dados marítimos.	19
Figura 2.8: Hipérbole atrasada ou deslocada. Seu centro de simetria C não coincide com a origem O do sistema de coordenadas (modificado de Müller, 1999).....	20
Figura 2.9: Representação da onda focal. Observa-se o raio normal de X_0 até NIP . Também é definido um, entre todos os possíveis raios paraxiais SRG , que intercepta o raio central em um ponto de foco comum P . Este conjunto de raios define uma onda fictícia chamada onda focal que começa em X_0 com frente de onda Σ_S , focaliza em P , é refletida no refletor Σ e emerge novamente em X_0 , agora com a frente de onda Σ_G (Müller, 1999).....	22
Figura 2.10: Interpretação dos três parâmetros envolvidos nas expansões de tempo de percurso baseadas na teoria de raios paraxiais (modificado de Müller, 1999).	23
Figura 2.11: Metade inferior: Modelo tipo-domo mostrando o refletor sendo tocado no ponto R pela isócrona ZO associada ao ponto P_0 . Metade superior: Curva de tempo de reflexão CO (azul) tangenciada pela curva de empilhamento NMO/DMO, ou MZO (azul-clara) e pela curva de empilhamento CRS (verde), para um meio-afastamento arbitrário h	26

Figura 2.12: Visualização do operador de empilhamento NMO/DMO para meios de velocidade constante. Mesma situação da Figura 2.11, com a metade inferior mostrando a superfície de tempo de reflexão CO (azul) tangenciada pela superfície de empilhamento NMO/DMO (azul-clara) ao longo da trajetória CRP (linha verde-grossa) para o ponto refletor R (modificado de Jäger, 1999).....	27
Figura 2.13: Metade inferior: Mesmo modelo da Figura 2.11, com raios de incidência normal (ZO) ao segmento de refletor C_R (vermelho) em R . A orientação do segmento de refletor é definida pela direção do raio de X_0 a R . Metade superior: Superfície de tempo de reflexão CO (azul) e superfície de empilhamento CRS (verde) para o segmento de refletor em R (modificado de Jäger, 1999).....	28
Figura 3.1: Fluxograma para o empilhamento CRS. Em azul são mostrados os fluxos dos dados de entrada. Em verde aparecem as seções obtidas com o método.	35
Figura 4.1: Modelo tipo-talude, ilustrando a transição de plataforma rasa para águas profundas. É composto por 4 camadas homogêneas de densidade unitária separadas por interfaces curvas, onde as velocidades da onda P são representadas por α , com a velocidade $v_0=1,5$ km/s (lâmina d'água).	40
Figura 4.2: Três famílias CMP típicas, evidenciando a razão sinal/ruído.....	41
Figura 4.3: Seção de afastamento comum de 200 m.....	42
Figura 4.4: Seção empilhada CMP automática.	44
Figura 4.5: Seção de parâmetros q obtidos no empilhamento CMP automático.	45
Figura 4.6: Velocidades de empilhamento iniciais v_{NMO} , empilhamento CMP automático.....	45
Figura 4.7: Seção empilhada CRS inicial.....	47

Figura 4.8: Seção de coerência.....	48
Figura 4.9: Seção empilhada CRS otimizada.....	49
Figura 4.10: Seção de ângulo de emergência β_0	50
Figura 4.11: Seção de curvatura da frente de <i>onda-N</i> K_N	51
Figura 4.12: Seção de raio de curvatura da frente de <i>onda-NIP</i> R_{NIP}	51
Figura 4.13: Número de traços usados para imagear cada amostra ZO para o empilhamento CMP automático (a) e para o empilhamento CRS (b).....	52
Figura 4.14: Ângulo de emergência β_0 : Curva teórica em azul e os valores otimizados obtidos pelo empilhamento CRS (“+” vermelhos).	53
Figura 4.15: Curvatura da frente de <i>onda-N</i> K_N : Curva teórica em azul e os valores otimizados obtidos pelo empilhamento CRS (“+” vermelhos).....	54
Figura 4.16: Curvatura da frente de <i>onda-NIP</i> K_{NIP} : Curva teórica em azul e os valores otimizados obtidos pelo empilhamento CRS (“+” vermelhos).	55
Figura 4.17: Modelo tipo-domo com capa de gás, ilustrando a diminuição na velocidade da camada na presença de gás. As velocidades da onda <i>P</i> são representadas por α , com a velocidade $v_0=1500$ m/s (lâmina d’água).....	56
Figura 4.18: Família de tiro comum, apresentando inversão de polaridade.	57
Figura 4.19: Seção empilhada CMP convencional, sem adição de ruído.	58
Figura 4.20: Modelo de velocidades utilizado para o empilhamento.	58

Figura 4.21: Migração para afastamento nulo com afastamentos de 80 m.	59
Figura 4.22: Seções ZO obtidas por MZO a partir de afastamentos de 1040 m e 2000 m.	60
Figura 4.23: Seção empilhada CMP automática.	61
Figura 4.24: Seção empilhada CRS inicial.....	62
Figura 4.25: Seção empilhada CRS otimizada.....	63
Figura 4.26: Seção de coerência calculada durante a otimização.	64
Figura 4.27: Seção de ângulo de emergência β_0	65
Figura 4.28: Seção de curvatura da frente de <i>onda-N</i> K_N	65
Figura 4.29: Seção de curvatura da frente de <i>onda-NIP</i> K_{NIP}	66
Figura 4.30: Seção de curvatura da frente de <i>onda-NIP</i> K_{NIP} em detalhe da segunda camada.	66
Figura 4.31: Exemplos de famílias CMP extraídas do dado marítimo.	69
Figura 4.32: Seção empilhada NMO convencional para os dados marítimos sem múltiplas.	70
Figura 4.33: Seção empilhada CMP automática para os dados marítimos sem múltiplas.....	72
Figura 4.34: Seção empilhada CRS inicial para os dados marítimos sem múltiplas.	73
Figura 4.35: Seção empilhada CRS otimizada para os dados marítimos sem múltiplas.	74
Figura 4.36: Seção empilhada CRS otimizada para os dados marítimos sem múltiplas (nova versão do WIT).....	76

Figura 4.37: Seção de coerência para os dados marítimos sem múltiplas.	77
Figura 4.38: Seção de ângulos de emergência otimizados.	78
Figura 4.39: Seção de curvatura da frente de <i>onda-N</i> após otimização.	79
Figura 4.40: Seção de curvatura da frente de <i>onda-NIP</i> após otimização.	79
Figura 4.41: Número de traços usados para imagear cada amostra ZO para o empilhamento CMP automático (a) e para o empilhamento CRS (b).	80
Figura 4.42: Seção empilhada CRS otimizada para os dados marítimos com múltiplas.	81
Figura 4.43: Seção de coerência para os dados marítimos com múltiplas.	82

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Parâmetros de aquisição para o modelo tipo-talude.....	41
Tabela 4.2: Parâmetros de aquisição para o modelo tipo-domo com capa de gás.	57
Tabela 4.3: Parâmetros de aquisição para o dado marítimo real.....	68

Nomenclatura

Letras Latinas

C	curvatura do refletor	
\mathcal{F}	fator de estiramento	
h	meio afastamento	m
K	curvatura da frente de onda no ponto central	
N	número de traços	
P	ponto selecionado do volume de dados sísmicos	
q	parâmetro CRS combinado	s/m ou s/km
R	raio de curvatura da frente de onda no ponto central	m
t	tempo de percurso	s
T	tempo de registro	s
U	traço sísmico	
v	velocidade do meio	m/s ou km/s
x	coordenada horizontal	m
X	ponto selecionado do volume de dados sísmicos	
z	profundidade	m

Letras Gregas

α	velocidade das ondas compressoriais	m/s ou km/s
β	ângulo de emergência da frente de onda NIP no ponto central	
Δ	diferença	
δ	intervalo	
ϕ	ângulo de mergulho da camada	
Γ	parâmetro de focalização	
Σ	elemento de refletor ou frente de onda	
τ	tempo de percurso de uma reflexão primária	s

Superescritos

h relativo a um meio afastamento arbitrário
ini inicial

Subscritos

0 relativo ao afastamento nulo ou ao ponto central
a média
G relativo ao geofone
i *iésima* camada
m relativo ao ponto médio
min mínimo
max máximo
N relativo à frente de *onda-N*
NIP relativo à frente de *onda-NIP*
NMO *Moveout* Normal
p relativo ao foco
S relativo à fonte

Siglas

CMP Ponto Médio Comum
CO Afastamento Comum
CPU Unidade de Processamento Central
CRP Ponto de Reflexão Comum
CRS Superfície de Reflexão Comum
DMO *Moveout* com Mergulho
LGM Laboratório de Geofísica Matemática
MZO Migração para Afastamento Nulo
N Normal
NIP Ponto de Incidência Normal
NMO *Moveout* Normal
RMS Média Quadrática
S/N Sinal/Ruído
SU *Seismic Unix*
WIT *Wave Inversion Technology*
ZO Afastamento Nulo

Capítulo 1

Introdução

A existência econômica de um reservatório de petróleo começa com a fase exploratória, que leva ao descobrimento do campo. Em seguida, são realizados estudos para determinar a potencialidade do reservatório e suas características básicas. Com base nesses dados, estuda-se a viabilidade de produção através de um plano de desenvolvimento de produção primária e recuperação suplementar até o abandono.

A Terra é, numa primeira aproximação, um meio verticalmente estratificado. Estas estratificações foram o resultado da deposição lenta, constante de sedimentos, areias, cinza, e assim por diante. Devido à consolidação, erosão, mudança de nível do mar, e muitos outros fatores, o caráter geológico, e conseqüentemente elástico, destas camadas varia com profundidade e idade. Como resultado, quando a superfície do terreno for excitada com alguma fonte de energia sísmica e a resposta registrada em sismógrafos, veremos um complicado emaranhado de tipos de ondas elásticas: reflexões das discontinuidades nas propriedades das rochas, reflexões múltiplas dentro das camadas, ondas confinadas, ondas de interface que propagam ao longo da interface entre duas camadas diferentes, ondas de superfície que se atenuam exponencialmente com a profundidade, ondas que são refratadas através de mudanças contínuas nas propriedades das rochas, e outras. O caráter destas ondas sísmicas permite aos geofísicos extraírem valiosas informações sobre a natureza da geologia em subsuperfície.

Por causa de forças dinâmicas, tectônicas e outras agindo na Terra, esta visão primária da geologia de subsuperfície, como um bolo em camadas, deve ser modificada, freqüentemente, para levar em conta camadas dobradas e fraturadas. Em ambientes marinhos, sal menos denso pode ser sobreposto por sedimentos mais densos; como o sal sobe pela sua própria fluatibilidade, empurra as camadas sobrejacentes, deformando severamente camadas originalmente planas. Assim, até mesmo em uma escala relativamente pequena para a sísmica de exploração, pode haver variações laterais significantes nas propriedades das rochas.

Tomando todos estes efeitos em consideração, as ondas sísmicas que se propagam na subsuperfície serão refratadas, refletidas e difratadas. Para poder imagear a subsuperfície, em outras palavras, para poder resolver o problema do espalhamento inverso, nós precisamos conseguir desfazer todos estes efeitos de propagação da onda. No âmago, esta é a meta do imageamento: transformar um conjunto de sismogramas registrado na superfície em uma seção de profundidade, ou seja, uma imagem espacial de alguma propriedade das rochas (normalmente velocidade da onda ou impedância). Cada vez mais, o imageamento sísmico por sísmica de reflexão vem ganhando importância nos trabalhos de exploração e caracterização de reservatórios, já que uma melhor imagem estrutural da subsuperfície permite a correta interpretação do modelo geológico.

As formas mais primitivas de imageamento buscavam mover, literalmente migrar, eventos ao longo de seções sísmicas em tempo por meios manuais ou mecânicos. Depois, estes métodos de migração manuais foram substituídos por métodos computadorizados que levaram em conta, em variados níveis, as propriedades físicas de propagação da onda e espalhamento.

Dados de reflexão multicobertura são adquiridos basicamente movendo arranjos de fonte e receptor ao longo de linhas sísmicas. Cada fonte fornece uma família de tiro comum (CS) definida por sua coordenada de tiro x_S . Em uma família CS cada traço registrado está definido por sua de coordenada de receptor x_G . Como representado na Figura 1.1, todos os CS adquiridos constroem o dado multicobertura no espaço $(x_S - x_G - t)$, onde t corresponde ao tempo registrado.

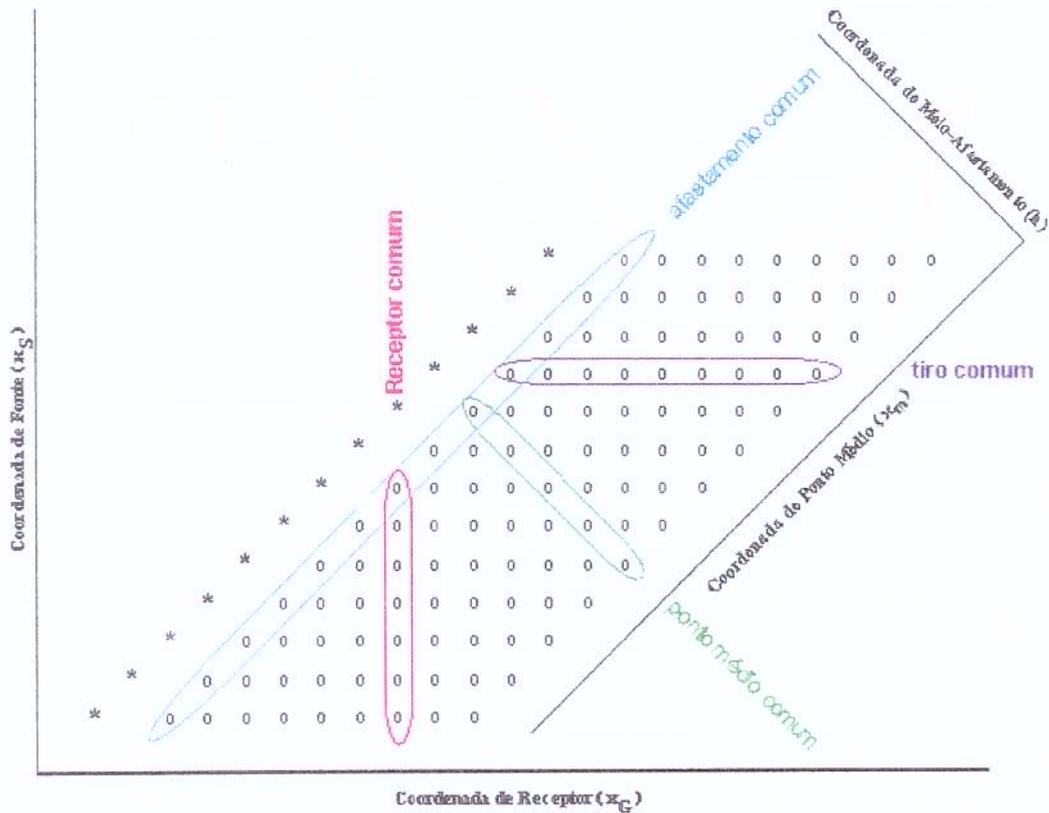


Figura 1.1: Relações entre as coordenadas x_S , x_G , x_m , h e os diferentes agrupamentos. Cada símbolo "o" indica um traço sísmico (modificado de Scales, 1994).

Porém, o processamento de dados sísmicos é convencionalmente realizado em coordenadas de ponto médio (x_m). Cada traço individual é atribuído ao ponto médio entre as posições de tiro e de receptor associados com aquele traço, como na Figura 1.2. Esses traços com a mesma coordenada de ponto médio se agrupam, compondo uma família CMP. A Figura 1.3 mostra que dentro de uma família CMP os traços são ordenados geralmente pelos seus meio-afastamentos (ou seja, distância média entre fonte e receptor). Cada família CMP é definida por sua coordenada de ponto médio x_m , já um traço dentro de uma determinada família CMP por sua coordenada de meio-afastamento h . Reunindo todas as famílias CMP, o dado multicobertura é definido no espaço $(x_m - h - t)$. Além das famílias CMP, famílias de afastamento comum (CO) são de maior importância. Uma família CO pode ser imaginada como uma coleção de traços que foram adquiridos trocando um único par fonte-receptor com afastamento constante ao longo da linha sísmica. Uma seção de afastamento nulo (ZO) seria o caso especial de uma seção de CO com pares fonte-receptor coincidentes ($h = 0$).

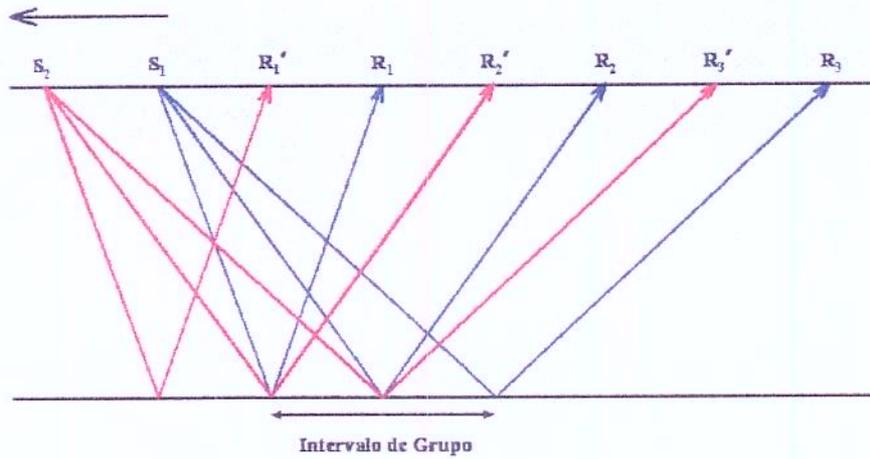


Figura 1.2: Representação de uma geometria 2D em ponto de tiro comum com 2 tiros e 3 receptores, com intervalo de tiro igual à metade do intervalo de receptores. O modelo consiste em um único refletor horizontal.

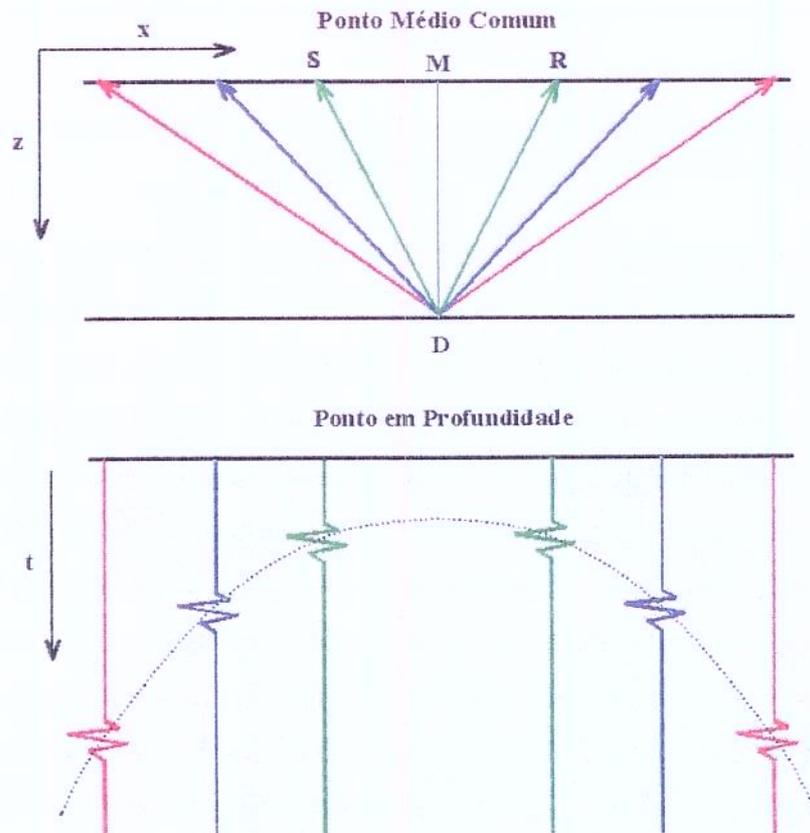


Figura 1.3: Uma família CMP associada a 6 pares fonte-receptor. A curva hiperbólica pontilhada representa o tempo de percurso para uma camada horizontal, de velocidade constante.

A imagem no domínio empilhado é o resultado de uma experiência hipotética (já que os receptores seriam explodidos) onde fontes e receptores são coincidentes, ou seja, a simulação de uma experiência de afastamento nulo (ZO). Pode ser obtida a partir de dados multicobertura através de métodos, como o empilhamento CMP de Mayne (1962) e o processamento com correção de *moveout* normal/*moveout* com mergulho (NMO/DMO) por Judson et al. (1978) e Hale (1991). A seção empilhada resultante (seção ZO simulada) pode ser migrada subsequente no domínio da profundidade para obter uma imagem da subsuperfície. Já que a migração acontece depois que o empilhamento, é geralmente chamada migração em profundidade pós-empilhamento (Pós-SDM). Secundariamente, devido ao seu custo elevado, existem métodos de imageamento que objetivam fornecer uma imagem da subsuperfície diretamente sem executar um empilhamento de intermediário. Estes métodos são chamados geralmente de migração em profundidade pré-empilhamento (Pré-SDM). Porém, os métodos mencionados acima ainda fazem uso de um macro-modelo de velocidades que tem que ser previamente formulado (torna-se um tipo de “círculo vicioso”, já que, de fato, este é um produto do imageamento sísmico).

Uma rotina menos dispendiosa e mais estável em relação a erros no modelo de velocidades, consiste na transformação da seção sísmica obtida com a geometria de aquisição de afastamento comum em seções simuladas de afastamento nulo. Este processo é denominado migração para afastamento nulo (MZO) e pode ser efetuado com as amplitudes preservadas, ou seja, corrigidas do fator de espalhamento geométrico. A combinação NMO seguido de DMO equivale ao MZO para um meio de velocidade constante (Tygel et al., 1998)

Os métodos de empilhamento sísmico estão baseados em fórmulas de aproximação do tempo de percurso de um raio de reflexão na vizinhança de um raio de reflexão fixo, denominado raio central. Na quase totalidade dos casos, este raio central corresponde ao caso de afastamento nulo (raio normal), com o par fonte-receptor posicionado no CMP. A diferença entre o tempo de percurso de um raio na vizinhança do raio central (raio paraxial) e aquele do raio normal é denominado de *moveout*. Várias expressões de aproximação do tempo de percurso existem na literatura. No caso do processamento CMP, temos o chamado *moveout* normal (NMO) para fontes e receptores na configuração CMP. Ainda na configuração CMP, temos a expressão do

tempo de percurso “das hipérbolas deslocadas” do método *PolyStack* (de Bazelaire et. al., 1994). Neste trabalho serão considerados apenas empilhamentos em modelos 2D, isto é, supondo dados multicobertura ao longo de uma única linha sísmica registrada. Para fontes e receptores arbitrariamente posicionados em torno do ponto central, existem fórmulas clássicas de tempo de percurso (veja, por exemplo, Ursin, 1982). Gelchinsky (1989) introduziu uma expressão alternativa de tempo de percurso, no âmbito do método *Multifocus* de empilhamento. Esta fórmula depende de três parâmetros: o ângulo de emergência do raio normal (β_0) e as curvaturas das “auto-ondas” (*eigenwaves*) K_N e K_{NIP} introduzidas em Hubral (1983). Ainda no caso de fontes e receptores dispostos arbitrariamente em relação ao ponto central, Schleicher et al. (1993) e Tygel et al. (1997) reescreveram a fórmula clássica do tempo de percurso de Červený, denominada fórmula hiperbólica do tempo de percurso, em função dos três parâmetros β_0 , K_N e K_{NIP} . O método de superfície de reflexão comum (CRS), objeto de nosso trabalho, utiliza a fórmula hiperbólica de tempos de percurso para o empilhamento. Uma importante característica das fórmulas de tempo de percurso do método CRS (válida também para os métodos *Multifocus* e *PolyStack*) é que a mesma pressupõe apenas o conhecimento da velocidade do meio na vizinhança de cada ponto central.

A superfície de empilhamento CRS pode ser especificada por meio de um operador de empilhamento que depende de três parâmetros: o ângulo de emergência do raio ZO (β_0) e duas curvaturas de frente de onda, da onda de ponto de incidência normal (K_{NIP}) e da onda normal (K_N), introduzidas por Hubral (1983). No método estudado, este trio de parâmetros é determinado de um modo automático por meio de procedimento de busca e análise de coerência.

A vantagem principal do empilhamento CRS é que não requer conhecimento sobre um modelo de macro-velocidade, além da velocidade próxima à superfície v_0 na vizinhança de cada ponto central (por exemplo, cada CMP). Ao contrário, o empilhamento CRS fornece até mesmo importantes atributos de campo de onda que são úteis para deduzir um modelo de macro-velocidade. O operador de empilhamento ajusta com mais coerência os eventos registrados nos dados pré-empilhados que métodos convencionais, já que utiliza pares de fontes e receptores posicionados arbitrariamente em relação ao ponto central e não apenas simetricamente a ele, como no processamento convencional. Além disso, os parâmetros obtidos pelo método CRS

representam importantes atributos que podem ser úteis na construção de modelos de velocidades mais confiáveis, por exemplo para uma futura migração.

Teorias de imageamento independentes de modelo semelhantes foram desenvolvidas por de Bazelaire que chama de *PolyStack* (de Bazelaire, 1988), Thore et al., 1994) e Gelchinsky que chama de *Multifocus* (Gelchinsky, 1989; Berkovitch et al., 1998). Todos eles têm em comum que os operadores de empilhamento envolvidos dependem de um certo número de atributos de campo de onda. Os operadores de empilhamento otimizados - aqueles que aproximam melhor os eventos de reflexão multicobertura - são determinados por análise de coerência (Taner e Koehler, 1969). Assim, não só uma seção empilhada de alta qualidade, mas também atributos importantes para determinar um modelo de velocidades podem ser obtidos por estes métodos.

Os objetivos principais deste trabalho são (a) descrever o método CRS, sua teoria e comparação com outros métodos similares e (b) aplicar o método em alguns modelos sintéticos e com dados reais, avaliando seu desempenho em relação ao processamento convencional.

1.1 Estrutura da tese

Iniciando com uma introdução ao método sísmico, este capítulo apresenta as técnicas de simulação ZO no processamento sísmico, como o processo padrão habitualmente aplicado de empilhamento NMO/DMO. Uma abordagem conceitualmente diferente para uma simulação ZO mais eficiente é sugerida.

O Capítulo 2 revisa técnicas de simulação ZO como o empilhamento CMP, a seqüência de empilhamento NMO/DMO em mais detalhe. Além disso, são discutidos dois métodos de simulação ZO que são independentes de modelo de velocidades. Estes métodos são o *PolyStack* e o métodos de imageamento *Multifocus*. Ambos são relacionados ao empilhamento CRS.

No Capítulo 3, é introduzido o empilhamento por Superfície de Reflexão Comum de um ponto de vista prático, apresentando estratégias de busca para encontrar os atributos de campo de onda ótimos num tempo de computação razoável. Será mostrado como os atributos de campo de onda β_0 , K_N e K_{NIP} podem ser determinados.

No Capítulo 4, a técnica de empilhamento CRS é aplicada a dados sintéticos em um dado marítimo, e os resultados são comparados ao do método de simulação ZO convencional, o empilhamento NMO. Os parâmetros de empilhamento CRS determinados automaticamente pelo método proposto são comparados com os parâmetros exatos teóricos calculados diretamente do modelo. Isto é importante para verificar a qualidade dos atributos de campo de onda encontrados pelo empilhamento CRS.

No Capítulo 5, são apresentadas algumas observações finais e discutidas perspectivas adicionais do empilhamento CRS.

Capítulo 2

Métodos para Imageamento Sísmico

Este capítulo fornece uma avaliação da técnica de simulação ZO convencional, o empilhamento pelo método NMO/DMO. A disponibilidade de um modelo de velocidades adequado é essencial a este método. Correções de *moveout* normal (NMO) precisam ser aplicadas, o que requer análises de velocidades. O processo de DMO também necessita de um modelo de velocidades apropriado para ser aplicado em todo seu potencial (Deregowski, 1986).

Serão analisados alguns métodos de simulação ZO que não precisam de um conhecimento prévio do modelo de velocidades. Estes métodos são o *PolyStack* e três aproximações de tempo de percurso 2-D para raios na vizinhança de um raio de afastamento nulo fixo: a aproximação parabólica, a hiperbólica e o método *multifocus*. Será discutido o seu potencial para simular seções empilhadas de afastamento nulo.

2.1 Empilhamento NMO/DMO

O empilhamento por ponto médio comum (CMP) introduzido por Mayne (1962) revolucionou a exploração sísmica. Pela primeira vez a redundância de dados sísmicos era realmente usada, melhorando a relação sinal/ruído (S/N) pela soma construtiva de eventos de reflexão e soma não-coerente do ruído aleatório.

Em aquisição de dados sísmicos 2D, fontes e receptores são movidos mais ou menos ao longo de uma linha reta. A distância entre ambos é chamada afastamento. A posição do CMP é definida como o ponto médio entre uma fonte e um receptor. Pares fonte-receptor com a mesma posição de CMP são juntados formando uma família CMP, como pôde ser visto na Figura 1.1. As coordenadas de CMP e de meio-afastamento são determinadas por

$$x_m = \frac{\Delta x_G + \Delta x_S}{2} \quad e \quad h = \frac{\Delta x_G - \Delta x_S}{2}, \quad (2.1)$$

onde Δx_S e Δx_G são as distâncias relativas de uma fonte S e um receptor G em relação ao ponto central X_0 .

2.1.1 Empilhamento CMP

Para um meio horizontalmente estratificado com velocidade constante como na Figura 1.2, uma geometria CMP compreende todos os raios que iluminam o mesmo ponto no refletor. Portanto, uma família CMP contém informação redundante na subsuperfície (veja também a Figura 1.3). Esta é a base para o empilhamento CMP. Já que eventos em traços de diferentes afastamentos trazem informação de um ponto comum do refletor as informações redundantes podem ser somadas construtivamente.

Neste caso simples o tempo de percurso ao longo do raio de reflexão SDR na Figura 1.3 é indicado por $t(h)$. Usando o teorema de Pitágoras o tempo de percurso como uma função do afastamento produz

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v^2}, \quad (2.2)$$

onde v é a velocidade do meio e t_0 é o tempo de percurso de afastamento nulo, ou seja, o tempo de percurso medido para fonte e receptor coincidentes ($h = 0$). A Equação (2.2) tem a forma matemática de uma hipérbole. A diferença de tempo Δt_{NMO} entre o tempo de percurso $t(h)$ para um afastamento específico e o tempo de percurso para afastamento-nulo t_0 é chamada *moveout* normal (NMO). Em outras palavras, o *moveout* normal descreve o efeito do afastamento no

tempo de percurso. Este efeito pode ser removido pela chamada correção de *moveout* normal que implica simplesmente em trazer eventos de tempo de percurso $t(h)$ para o tempo de percurso de afastamento-nulo t_0 usando

$$\Delta t_{NMO}(h) = t(h) - t_0 = t_0 \left\{ \left[1 + \left(\frac{2h}{vt_0} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \right\}. \quad (2.3)$$

Para um modelo ligeiramente mais complicado, com camadas horizontais de velocidades intervalares constantes, como na Figura 2.1 o tempo de percurso é determinado por Taner e Koehler (1969)

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{RMS}^2} + C_2 h^4 + C_3 h^6 + \dots + C_i h^{2i}, \quad (2.4)$$

onde C_i são funções da espessura e velocidade (intervalar) da camada. Como o meio-afastamento é pequeno em relação às profundidades envolvidas, recorreremos a uma aproximação de 2ª ordem

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{RMS}^2}. \quad (2.5)$$

A velocidade média quadrática v_{RMS} é determinada por

$$v_{RMS}^2 = \frac{1}{t(0)} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i(0), \quad (2.6)$$

com $\Delta t_i(0)$ sendo o tempo de percurso vertical de ida-e-volta (tempo duplo) através da $i^{ésima}$ camada, v_i é a velocidade na $i^{ésima}$ camada e $t(0) = \sum_{k=1}^i \Delta t_k$.

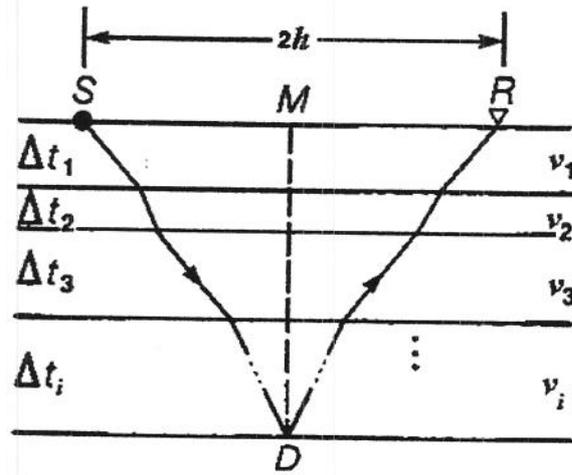


Figura 2.1: Modelo com múltiplas camadas horizontais (Yilmaz, 1987).

Para um modelo 2D consistindo de um refletor mergulhante com ângulo de mergulho ϕ , como esboçado na Figura 2.2, o tempo de percurso é determinado por (Levin, 1971):

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{\text{aparente}}^2}, \quad (2.7)$$

onde $v_{\text{aparente}} = v / \cos\phi$. Neste caso, a velocidade aparente também é chamada v_{NMO} ou de empilhamento (a que melhor “horizontaliza” os eventos em t_0). O ângulo de mergulho ϕ faz com que a curva de tempo de percurso seja mais plana que para uma camada horizontal. Então, a velocidade de NMO v_{NMO} é mais alta que a velocidade verdadeira do meio v . Uma inversão de velocidade baseada no *moveout* (que é utilizada na prática) conduziria a uma velocidade do meio aparentemente mais alta ($v_{\text{aparente}} = v_{NMO}$) que a velocidade real do meio v .

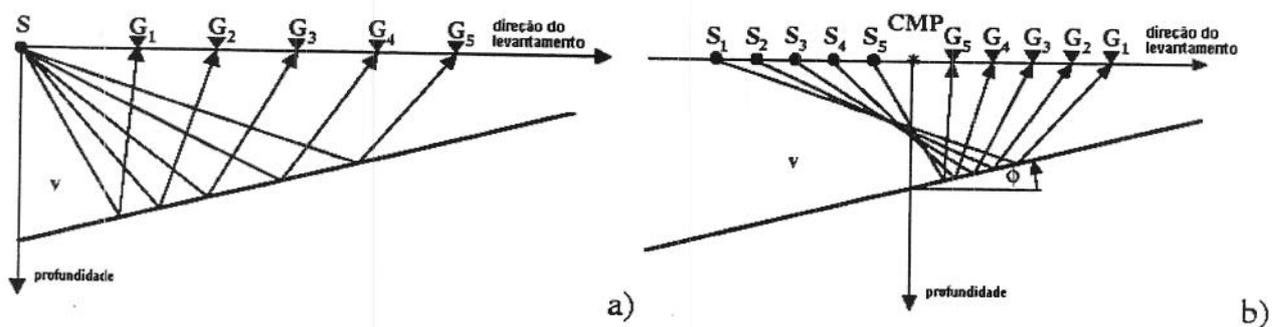


Figura 2.2: Uma geometria de ponto de tiro comum em a) e uma geometria de CMP em b) são mostradas para um único refletor mergulhante com velocidades constantes.

A correção de NMO para dados ordenados por CMP requer a determinação de um campo de velocidades v_{NMO} . O próprio efeito de NMO é normalmente usado para determinar velocidades de empilhamento (ou NMO), através da análise de velocidades (o conhecido “velan”). Atualmente os programas de análise de velocidades combinam até três técnicas simultâneas de testes: os espectros de velocidades, os painéis empilhados com velocidades constantes (CSV) e as próprias hipérbolas corrigidas nas famílias CMP. Na Figura 2.3 é mostrado um exemplo de “velan”.

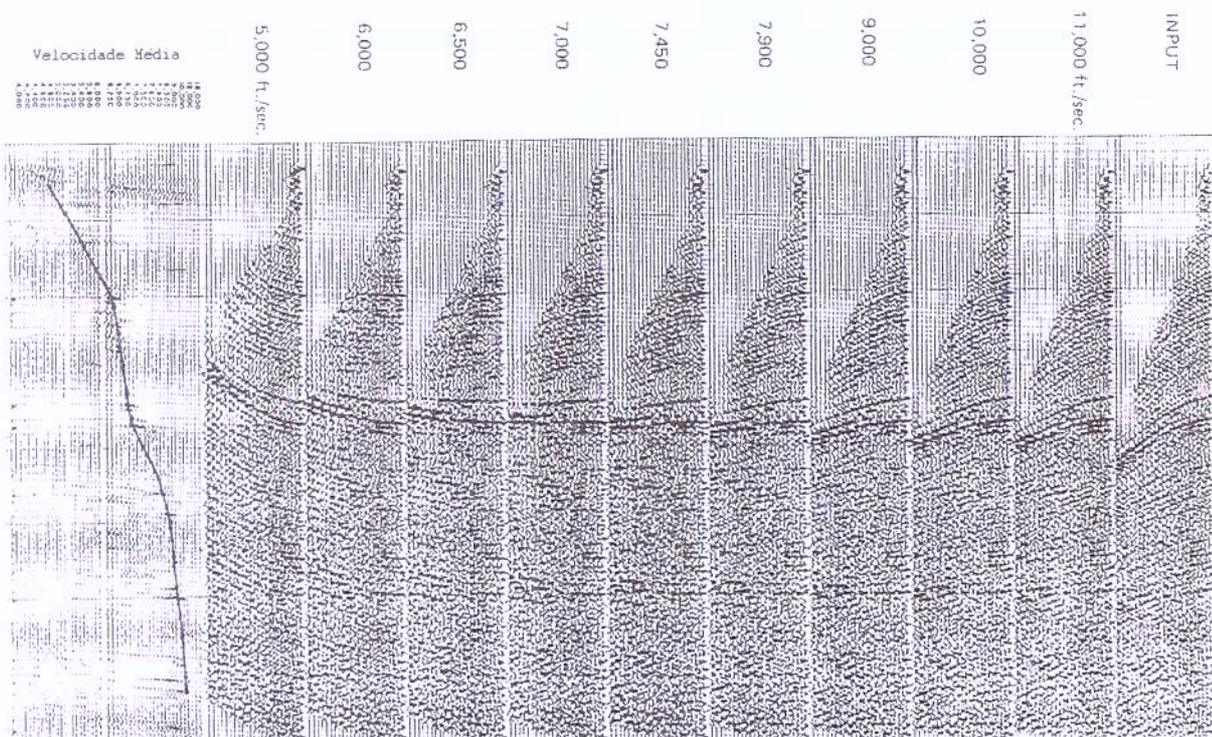


Figura 2.3: Análise de Velocidades, mostrando um espectro de velocidades, à esquerda e painéis compostos por uma família CMP corrigida de NMO, com várias velocidades constantes (Lindseth, 1982).

O procedimento, portanto é escolher a velocidade que melhor “horizontaliza” (no método de famílias CMP), e gera maior coerência (num espectro de velocidades). Essa estratégia é repetida para cada evento de interesse ao longo da seção sísmica, definindo um modelo de velocidades de empilhamento v_{NMO} . No caso da presença de múltiplas (evento que sofreu mais de uma reflexão ascendente), o próprio NMO funciona como um filtro, já que estes eventos possuem velocidades relativamente baixas se comparadas com as velocidades das reflexões primárias que

concorrem em tempo com a múltipla. As reflexões primárias serão, portanto, escolhidas como evento de interesse em detrimento das múltiplas.

Depois de definido um modelo de velocidades, a correção de NMO pode ser aplicada a todos os traços dentro de cada CMP, resultando em um alinhamento dos dados no respectivo tempo de percurso de afastamento-nulo t_0 , em outras palavras, os eventos são “horizontalizados”. O empilhamento CMP subsequente simplesmente soma as amostras de todos os traços, para cada t_0 . O resultado da soma é colocado no traço ZO. Na presença de ruído aleatório, este processo aumenta a relação sinal/ruído (S/N) já que apenas a energia da reflexão é somada construtivamente.

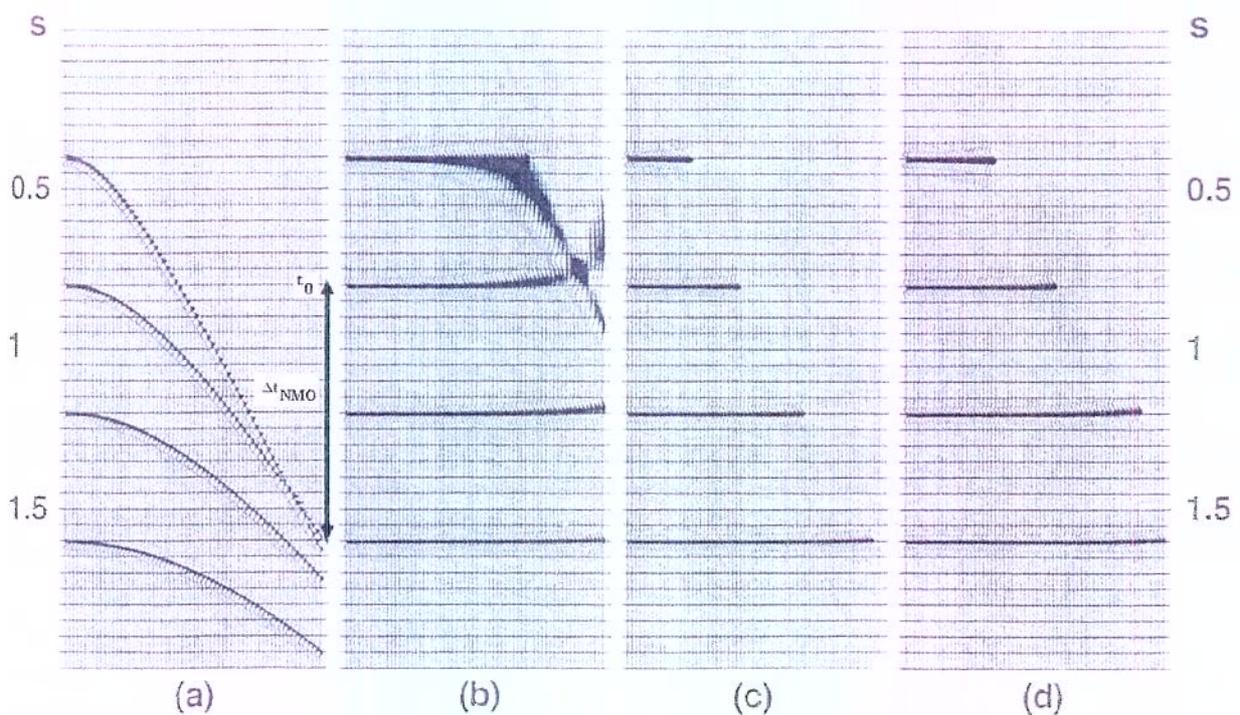


Figura 2.4: a) uma família CMP para 5 camadas de velocidades constantes b) corrigida de NMO, com Δt_{NMO} e t_0 indicando, respectivamente, o *moveout* normal e o tempo de percurso em afastamento nulo para a segunda interface. O silenciamento (mute) dos dados estirados, para 2 valores diferentes para o fator de estiramento. (Yilmaz, 1987)

Já que um único valor de velocidade de empilhamento pode ser associado a um par $(t_0; v_{NMO})$ surge o problema dos mergulhos conflitantes. Se dois eventos cruzam entre si na seção ZO só um valor de velocidade pode ser escolhido no ponto de interseção.

Na Figura 2.5 pode-se visualizar que, ao construir uma seção empilhada, o valor de amplitude de um pulso de reflexão de afastamento qualquer registrado no tempo $t = \tau$ é associado ao tempo de percurso ZO $t = \tau_0$. Correspondentemente, o valor registrado em $\tau + \delta\tau$ é associado $\tau_0 + \delta\tau_0$. Já que os intervalos pequenos $\delta\tau$ e $\delta\tau_0$ não são idênticos, o pulso sísmico é esticado por este processo. Quantitativamente, este estiramento pode ser definido por um fator \mathcal{F} dado pela relação entre o novo comprimento $\delta\tau_0$ e o comprimento velho $\delta\tau$ do pulso. Para pequenos intervalos $\delta\tau$ e $\delta\tau_0$, esta relação pode ser substituída pela derivada, assim,

$$\mathcal{F} = \frac{d\tau_0}{d\tau}. \quad (2.8)$$

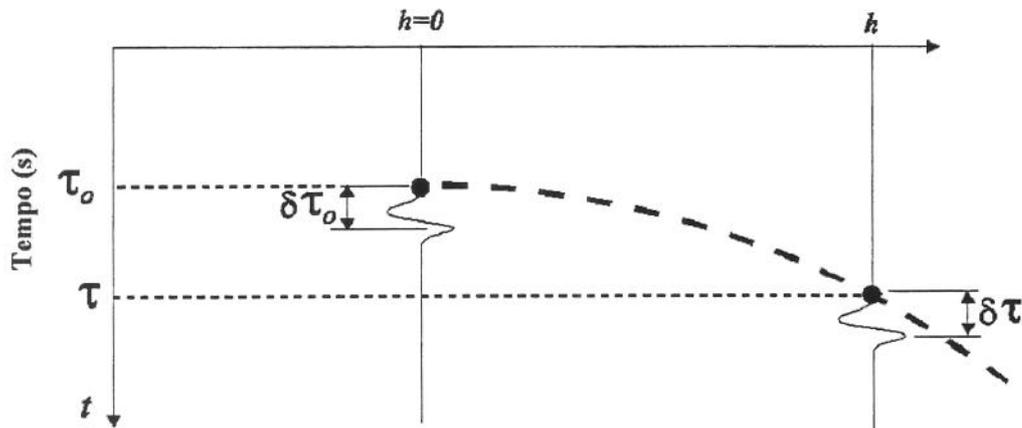


Figura 2.5: Para construir uma reflexão ZO na seção empilhada desejada, a reflexão de afastamento qualquer registrada no tempo $t = \tau$ deve ser movida até o tempo de percurso $t = \tau_0$, sendo que, por este processo, um pequeno intervalo de tempo $\delta\tau$ no afastamento original é reproduzido em um novo intervalo de tempo $\delta\tau_0$ na seção empilhada construída, o pulso sísmico correspondente sofre, então, um estiramento de $\delta\tau_0 / \delta\tau$ (modificado de Cruz et al., 2000).

Para computar o estiramento de NMO, Yilmaz (1987) determinou a expressão:

$$\mathcal{F}_{NMO} = \sqrt{1 + \frac{4h^2}{v_{RMS}^2 \tau_0^2}}, \quad (2.9)$$

Na realidade, depois de aplicar a correção de NMO aos dados de reflexão, o conteúdo de frequência do pulso de reflexão é diminuído pelo fator \mathcal{F}_{NMO} , ou seja, seu comprimento é aumentado por este fator. Para minimizar este efeito é aplicado um mute ou silenciamento nos pulsos estirados, a partir de um valor definido para o fator de estiramento, como visto na Figura 2.4.

2.1.2 Correção de DMO

Para um modelo com refletor mergulhante ou para meios lateralmente não-homogêneos, mais que um ponto em subsuperfície é iluminado para um mesmo CMP, como mostrado na Figura 2.2b. Assim, a energia da reflexão originada de pontos diferentes em subsuperfície também é somada no empilhamento. A remoção destes efeitos indesejados é um alvo do método DMO, bem como a migração de cada traço para o afastamento nulo de forma que cada seção de afastamento comum fique cinematicamente idêntica a uma seção de afastamento nulo.

Ao longo das últimas duas décadas o processo de DMO se tornou um procedimento padrão em processamento de dados sísmicos rotineiro, principalmente após Hale (1991). A Figura 2.6a mostra em mais detalhe a situação do refletor inclinado. São descritos três raios. Um raio SRG se estende da fonte no ponto S ao receptor no ponto G , após refletido no ponto R . Ele pode ser definido através das coordenadas de ponto médio x_m e de meio-afastamento h . Um segundo raio MR_0M é o raio de afastamento nulo que se origina na posição do ponto médio do primeiro raio. O terceiro raio em M_cRM_c também é um raio de afastamento nulo. Tem o mesmo ponto de reflexão R que o primeiro raio. No método de empilhamento CMP os dois raios SRG e MR_0M que tem a mesma posição de ponto médio seriam somados juntos, embora a energia refletida resulte de pontos de reflexão diferentes.

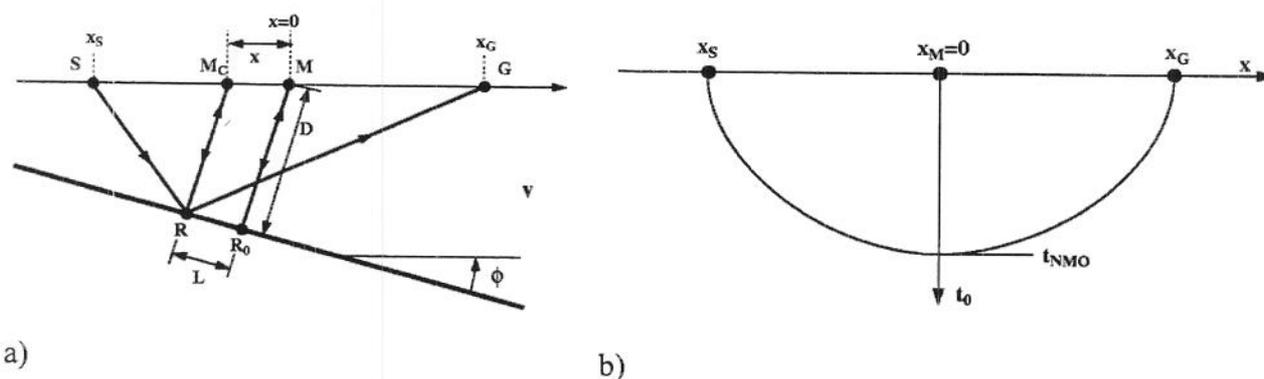


Figura 2.6: a) Deslocamento do ponto de reflexão para um refletor inclinado. b) Resposta impulsiva do DMO, ou seja, uma amostra não-nula em afastamento comum é traçada (cinematicamente) ao longo de uma elipse. Cada ponto na elipse de DMO corresponde a um mergulho particular (modificado de Müller, 1999).

Como mostrado por Levin (1971), o deslocamento do ponto de reflexão L é dado por

$$L = \frac{h^2}{D} \cos \phi \sin \phi, \quad (2.10)$$

onde D é a distância de M até R_0 e ϕ é o ângulo de mergulho do refletor. Para compensar a dispersão do ponto de reflexão o DMO precisa mover o traço de afastamento não-nulo registrado, ao longo de uma distância x para a esquerda (sempre mergulho acima), sendo que

$$x = -\frac{h^2}{D} \sin \phi. \quad (2.11)$$

Assim, são empilhados traços com o mesmo ponto de reflexão comum (CRP), tendo o tempo de reflexão de afastamento nulo t_0 após o DMO relacionado a D , por

$$D = \frac{vt_0}{2} - x \sin \phi, \quad (2.12)$$

onde v é a velocidade do meio, assumida constante. Substituindo D na Equação (2.11) produz

$$x^2 - \frac{vt_0}{2 \sin \phi} x - h^2 = 0. \quad (2.13)$$

Eu mostrarei a seguir que a elipse de DMO, ou seja, a resposta impulsiva do DMO, satisfaz esta equação para todos os mergulhos ϕ e velocidade v .

Para o processo de DMO a resposta impulsiva (que descreve o resultado de um determinado processo sobre um *spike*) é elíptica, ou seja, uma amostra não-nula nos dados resulta, pelo processo de DMO, em amostras não-nulas ao longo de uma elipse. A equação desta elipse foi determinada por Hale (1991), assim,

$$\frac{t_0^2}{t_{NMO}^2} + \frac{x^2}{h^2} = 1. \quad (2.14)$$

sendo t_{NMO} o tempo de percurso de uma amostra não-nula após a aplicação de NMO. Comparando esta equação com a Equação (2.7) temos

$$t_{NMO} = \left(t^2 + \frac{4h^2}{v_{NMO}^2} \right)^{1/2}, \quad (2.15)$$

onde t é o tempo de percurso registrado para o meio-afastamento h . A Figura 2.6b mostra uma ilustração da elipse de DMO. Cada ponto na elipse de DMO corresponde a um mergulho de refletor particular, seguindo a relação

$$\frac{dt_0}{dx} = \frac{2 \operatorname{sen} \phi}{v}. \quad (2.16)$$

Resolvendo a Equação (2.14) para t_0 , derivando em relação a x e substituindo na Equação (2.16) produz exatamente a Equação (2.13), o que prova que a elipse de DMO produz a quantidade correta de movimento lateral L para cada mergulho.

Já que partes diferentes da elipse de DMO correspondem a diferentes mergulhos, o problema do mergulho conflitante também é tratado corretamente. Assumindo velocidade constante, a elipse de DMO na Equação (2.14) é independente da velocidade, mas, como o DMO é sempre aplicado em combinação com o NMO, a dependência da velocidade é camuflada na correção de NMO. A Figura 2.7 mostra um fluxo de processamento básico para o empilhamento NMO/DMO.

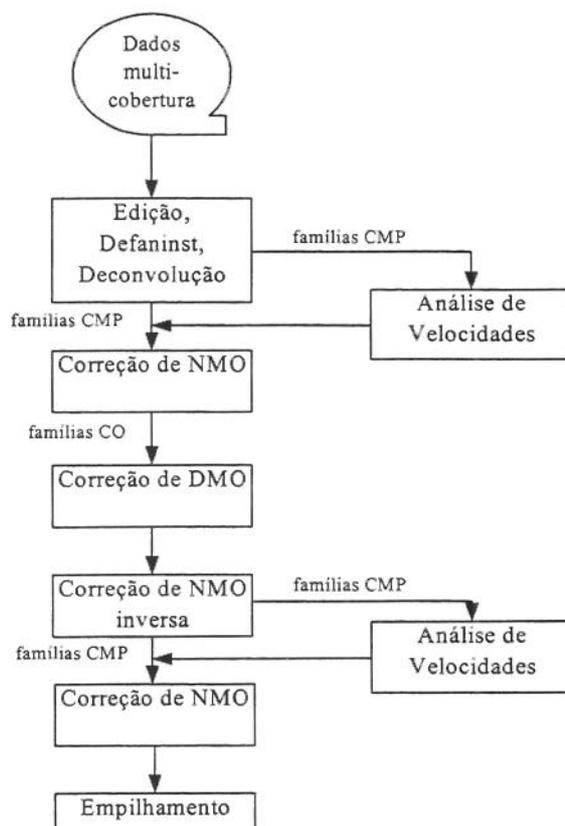


Figura 2.7: Fluxo de Processamento básico para empilhamento NMO/DMO de dados marítimos.

A migração para afastamento nulo (MZO) é equivalente ao processo NMO/DMO realizado em uma única passagem (Tygel et al., 1998), para uma aproximação com velocidades constantes. O MZO é encarado como uma transformada de configuração, e pode ser descrito como o resultado encadeado de duas operações básicas: uma migração em profundidade com a configuração de saída desejada (afastamento nulo) e uma demigração com a configuração de afastamento comum, sendo executadas através de uma única integral de empilhamento ao longo da curva de empilhamento do MZO.

O fator de estiramento do pulso no MZO foi calculado, por Tygel et al. (1998), como, sendo co-seno do ângulo de incidência da reflexão original no afastamento comum. Assim, o sinal de reflexão simulado em afastamento nulo, é estirado em relação ao sinal sísmico original em afastamento comum, conseqüentemente o conteúdo de freqüência será diminuído por este valor.

2.2 Métodos Independentes de Modelo de velocidades

2.2.1 *PolyStack*

O método *PolyStack* (de Bazelaire, 1988, Thore et al., 1994) é uma técnica de simulação ZO que não precisa de qualquer outra informação de velocidade exceto a velocidade próxima à superfície; por conseguinte, pertence à classe das técnicas de empilhamento independentes de modelo de velocidades. Uma seção empilhada e um modelo de velocidades podem ser ambos obtidos sem a necessidade de identificar eventos ou escolher manualmente velocidades. A fórmula de tempo de percurso usada neste contexto também é de forma hiperbólica. Porém, o centro da hipérbole não coincide com o centro das coordenadas, como para a equação de NMO padrão (2.7). Ela é deslocada em relação ao eixo do tempo.

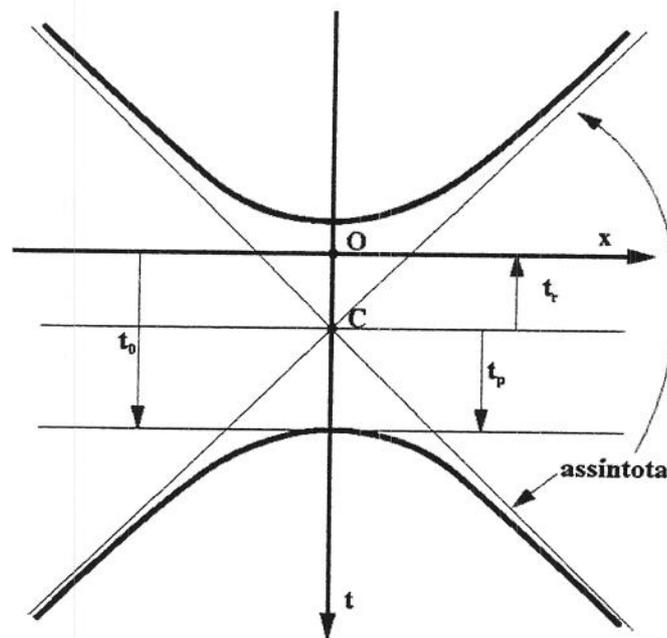


Figura 2.8: Hipérbole atrasada ou deslocada. Seu centro de simetria C não coincide com a origem O do sistema de coordenadas (modificado de Müller, 1999).

Usando princípios de ótica geométrica aliados ao Princípio de Fermat, de Bazelaire (1988) mostrou que a hipérbole atrasada pode ser expressa como

$$(t + t_r)^2 = (t_0 + t_r)^2 + \frac{4h^2}{v_0^2}, \quad (2.17)$$

onde t_r é o tempo do centro da hipérbole ao centro das coordenadas. Introduzindo o que ele chamou de tempo de foco t_p ,

$$t_p = (t_0 + t_r), \quad (2.18)$$

ela pode ser obtida por

$$(t + t_p + t_0)^2 = t_p^2 + \frac{4h^2}{v_0^2}. \quad (2.19)$$

A velocidade média v_a pode ser extraída para cada amostra de tempo t_0 partindo do tempo de foco t_p , por meio da equação:

$$v_a = v_0 \sqrt{t_p / t_0}. \quad (2.20)$$

Enquanto, para correção de NMO, velocidades de empilhamento para um determinado t_0 são testadas, a hipérbole atrasada oferece a possibilidade de varredura para valores constantes de t_p , ou hipérboles paralelamente deslocadas, ao longo das famílias. Este processo de busca pode ser implementado numericamente como um processo muito eficiente. Thore et al. (1994) mostrou que o *moveout* calculado com a hipérbole atrasada em geral ajusta melhor os dados levantados do que aquele baseado na fórmula de NMO padrão.

As hipérboles atrasadas são usadas da mesma maneira que as hipérboles de *moveout* convencionais. Em vez da velocidade de empilhamento v_{NMO} no empilhamento CMP padrão, o método *PolyStack* procura o parâmetro tempo de foco t_p . As amplitudes são empilhadas ao longo de hipérboles que ajustam melhor os dados levantados nas famílias CMP.

2.2.2 Expansões Tri-paramétricas

Tempos de percurso de raios (paraxiais) na vizinhança de um raio fixo (central) podem ser descritas por um certo número de parâmetros que se referem apenas ao raio central, mostrados na Figura 2.9a. As aproximações são corretas até a segunda ordem das distâncias entre os raios

paraxial e central nos pontos inicial e final correspondentes, independentemente de qualquer configuração sísmica. As aproximações de tempo de percurso obtidas diretamente de teoria do raio paraxial são as expansões parabólica e hiperbólica (Schleicher et al., 1993) e o método *multifocus* (Gelchinsky et al., 1989; Berkovitch et al., 1994).

Se o raio de afastamento nulo for escolhido como o raio central e assumida uma propagação bi-dimensional, os tempos de percurso podem ser expressos através de fórmulas tri-paramétricas simples, se a velocidade do meio na superfície for conhecida. Os três parâmetros são o ângulo de emergência β_0 do raio de afastamento nulo em relação à normal à superfície, a curvatura da frente de onda K_N da onda normal (*onda-N*), e curvatura de frente de onda K_{NIP} da onda de ponto de incidência normal (*onda-NIP*), medidos no ponto central.

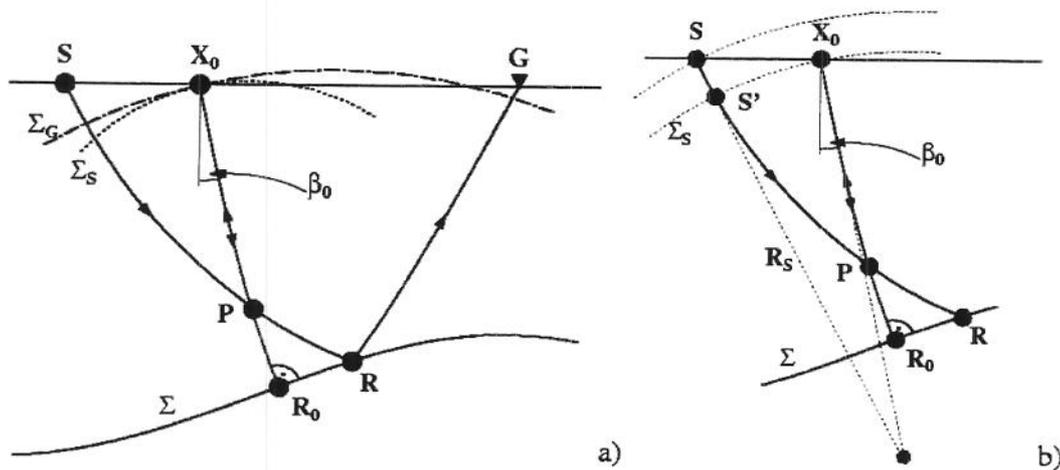


Figura 2.9: Representação da onda focal. Observa-se o raio normal de X_0 até *NIP*. Também é definido um, entre todos os possíveis raios paraxiais SRG , que intercepta o raio central em um ponto de foco comum P . Este conjunto de raios define uma onda fictícia chamada onda focal que começa em X_0 com frente de onda Σ_S , focaliza em P , é refletida no refletor Σ e emerge novamente em X_0 , agora com a frente de onda Σ_G (Müller, 1999).

Como descrito em Hubral (1983), a onda de ponto de incidência normal (*onda-NIP*) e a onda normal (*onda-N*) são *eigenwaves* fictícias que provaram ser muito úteis para a descrição da propagação do raio de afastamento nulo, bem como para seus raios paraxiais correspondentes. A *onda-NIP* é definida como uma onda que começa como uma fonte pontual no ponto de reflexão (*NIP*) do raio de reflexão de afastamento-nulo e propaga para cima com a metade da velocidade do meio, como na Figura 2.10. Chega ao ponto central com o mesmo tempo que o raio de

afastamento-nulo. A *onda-N* pode ser visualizada conceitualmente como aquela que começa como uma frente de onda coincidente com o refletor e viaja para a superfície com a metade da velocidade do meio. Chega ao ponto central com o mesmo tempo que o raio de afastamento-nulo, também.

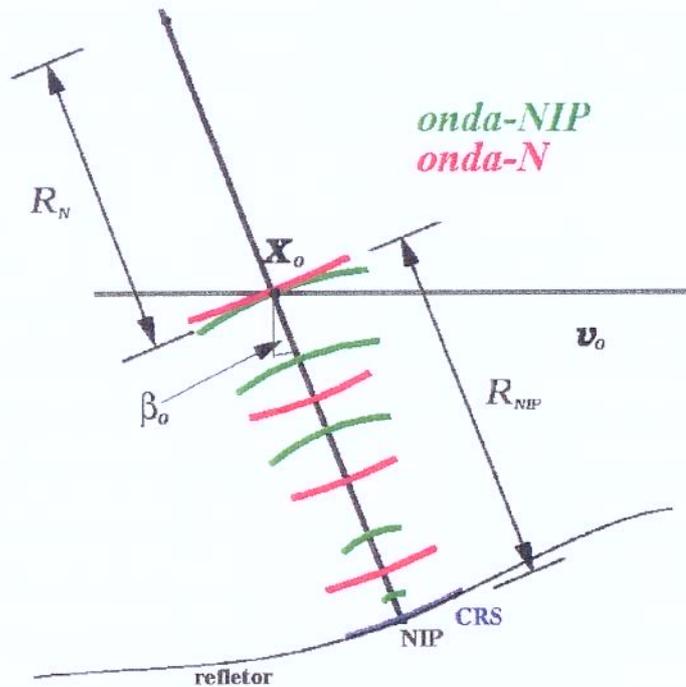


Figura 2.10: Interpretação dos três parâmetros envolvidos nas expansões de tempo de percurso baseadas na teoria de raios paraxiais (modificado de Müller, 1999).

Em termos das curvaturas da onda no ponto de incidência normal (NIP) e da onda normal (N), para meios lateralmente não-homogêneos, e usando as coordenadas de ponto médio e meio-afastamento, já definidas na Seção 2.1, obtém-se a expressão para o tempo de percurso parabólico

$$t(x_m, h) = t_0 + \frac{2x_m \text{sen } \beta_0}{v_0} + \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0} (K_N x_m^2 + K_{NIP} h^2) \quad (2.21)$$

e para o tempo de percurso hiperbólico

$$t^2(x_m, h) = \left(t_0 + \frac{2x_m \sin \beta_0}{v_0} \right)^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} (K_N x_m^2 + K_{NIP} h^2), \quad (2.22)$$

com o tempo duplo (ida-e-volta) de percurso ao longo do raio central indicado por t_0 .

O empilhamento por Superfície de Reflexão Comum (CRS) é uma técnica de simulação ZO que emprega justamente a equação de tempo de percurso hiperbólica. Assim, para os casos 2D, onde dados são adquiridos ao longo de uma única linha sísmica mais ou menos reta, a superfície de empilhamento CRS pode ser especificada por meio de três parâmetros e a velocidade próxima à superfície.

Para a computação do tempo de percurso *multifocus*, consideremos os raios de reflexão primária mostrados na Figura 2.9a. Um raio ZO, $X_0R_0X_0$, e um raio de afastamento arbitrário *SPRG* são refletidos num refletor objetivo Σ . Ambos os raios se cruzam (ou se focalizam) no ponto P que não é necessariamente localizado no raio $X_0R_0X_0$, mas também em sua extensão direta em ambos os lados (poderia ser interpretado como uma fonte pontual). Estes raios definem uma onda fictícia chamada onda focal que começa em X_0 com a frente de onda Σ_S , focaliza em P , é refletida no refletor Σ (no ponto NIP) e emerge novamente em X_0 , agora com a frente de onda Σ_G . Ambas as frentes de onda são assumidas como sendo bem-aproximadas por círculos e as suas curvaturas são indicadas por $K_S = 1/R_S$ e $K_G = 1/R_G$, respectivamente, já que a velocidade do meio v_0 no ponto central X_0 e em sua vizinhança paraxial é considerada constante e conhecida. Para cada um dos raios de foco *SPRG*, os afastamentos de fonte e receptor Δx_S e Δx_G não são mais independentes, mas estão relacionados pela condição que o raio tem que atravessar o ponto P fixo. O problema agora é achar uma aproximação de tempo de percurso para os raios paraxiais ao raio central e satisfaçam esta condição de foco.

Considerando inicialmente que as distâncias relativas de uma fonte S e um receptor G do raio paraxial em relação ao ponto central X_0 são determinadas por

$$\Delta x_S = x_m - h \quad e \quad \Delta x_G = x_m + h, \quad (2.23)$$

o tempo de percurso ao longo do raio de afastamento finito SRG pode ser expresso como

$$t = t_0 + \Delta t_S + \Delta t_G, \quad (2.24)$$

com o tempo de percurso ao longo do raio central (ZO) indicado por t_0 , *moveout* da fonte Δt_S e *moveout* do receptor Δt_G . A Figura 2.9b mostra uma visão detalhada do ponto de fonte S. Onde pode ser visto que Δt_S é o tempo de percurso ao longo do segmento de raio SS' (S' é o ponto onde o raio focal $SPRG$ atinge a frente de onda inicial Σ_S). A definição de Δt_G é análoga. Aproximando os segmentos de raio SS' e GG' por linhas retas, utilizando considerações geométricas, o *moveout* da fonte e do receptor podem ser expressos como:

$$\Delta t_S = \frac{\overline{SS'}}{v_0} = \frac{1}{v_0 K_S} \left[\sqrt{1 + 2K_S \sin \beta_0 \Delta x_S + (K_S \Delta x_S)^2} - 1 \right] \quad (2.25)$$

$$\Delta t_G = \frac{\overline{GG'}}{v_0} = \frac{1}{v_0 K_G} \left[\sqrt{1 + 2K_G \sin \beta_0 \Delta x_G + (K_G \Delta x_G)^2} - 1 \right].$$

Por meio da teoria do raio de ordem-nula as curvaturas dessas duas frentes de onda focadas hipotéticas podem ser escritas como (Tygel et al., 1999)

$$K_S = \frac{K_{NIP} - \Gamma K_N}{1 - \Gamma} \quad \text{e} \quad K_G = \frac{K_{NIP} + \Gamma K_N}{1 + \Gamma}, \quad (2.26)$$

onde Γ é o parâmetro de focalização definido por

$$\Gamma = \frac{\Delta x_G + \Delta x_S + K_{NIP} \sin \beta_0 \Delta x_G \Delta x_S}{\Delta x_G - \Delta x_S}. \quad (2.27)$$

Uma forma mais simples do parâmetro de focalização modificado na Equação (2.27) pode ser obtida facilmente negligenciando o termo de segunda-ordem $\Delta x_G \Delta x_S$ no numerador. Isto resulta em

$$\Gamma = \frac{\Delta x_G + \Delta x_S}{\Delta x_G - \Delta x_S}. \quad (2.28)$$

A fórmula de tempo de percurso *multifocus* depende, portanto, de três parâmetros desconhecidos (β_0 ; K_{NIP} ; K_N). A velocidade próxima à superfície v_0 é assumida como conhecida.

Para ajudar na comparação destes métodos de simulação, pode-se observar a resposta cinemática de um ponto refletor em subsuperfície, para os diversos métodos. As figuras a seguir mostram em suas metades inferiores, abaixo da linha sísmica (ou seja, o eixo x) um refletor tipo-domo em subsuperfície em um meio de velocidade constante conhecida. Na metade superior as figuras mostram as curvas de tempo de reflexão CO cinemáticas do refletor tipo-domo nas suas respectivas seções de CO, como na Figura 2.11.

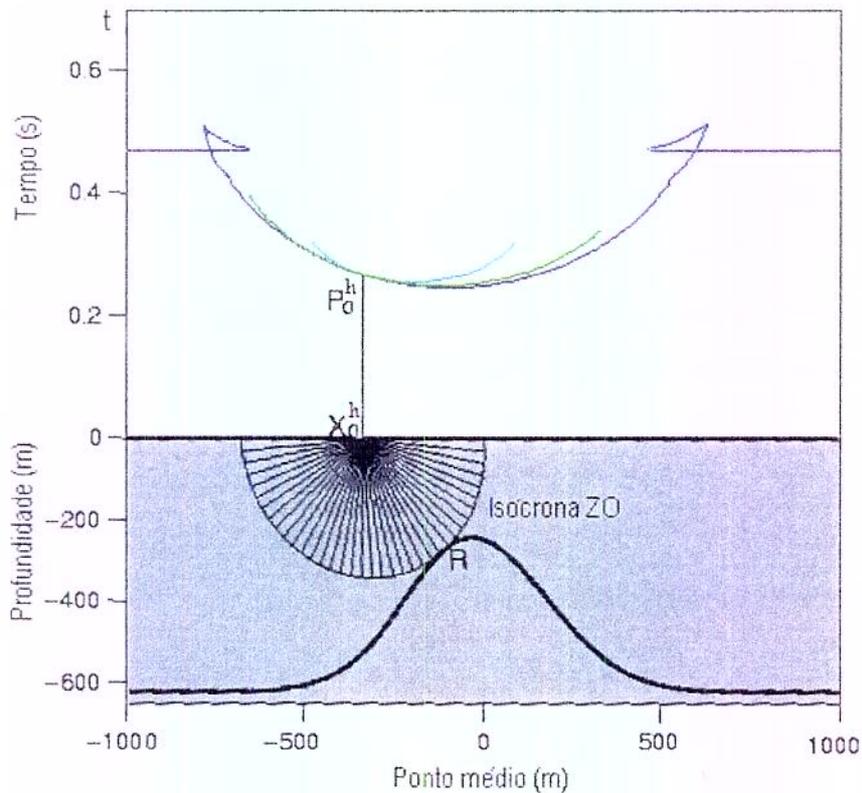


Figura 2.11: Metade inferior: Modelo tipo-domo mostrando o refletor sendo tocado no ponto R pela isócrona ZO associada ao ponto P_0 . Metade superior: Curva de tempo de reflexão CO (azul) tangenciada pela curva de empilhamento NMO/DMO, ou MZO (azul-clara) e pela curva de empilhamento CRS (verde), para um meio-afastamento arbitrário h .

A curva de empilhamento NMO/DMO azul-clara é construída para o ponto P_0 da seguinte maneira: Primeiramente, constrói-se a isócrona ZO do ponto P_0^h . É determinada pelo semicírculo (para meios com velocidade constante) inferior, centrado em X_0 com o raio $vt_0/2$, onde t_0 é a coordenada de tempo de P_0^h . Subseqüentemente, demigra-se esta isócrona ZO de volta ao domínio (x_m, h, t) para cada respectivo afastamento $2h$. Esta demigração fornece a curva de empilhamento NMO/DMO para P_0^h , que também é chamada freqüentemente de curva de

P_0 no plano $(x_m - t)$, a seção ZO simulada resultante, que é nosso objetivo final (representada como a primeira curva cinza), é chamada de empilhamento NMO/DMO.

Na Figura 2.13, um segmento de refletor circular (vermelho) é visualizado. Ele possui localmente a mesma curvatura C_R que o refletor procurado no ponto R . Pode ser visto, assim, como a aproximação de segunda ordem do refletor na vizinhança do ponto de reflexão R . As trajetórias CRP verdes para todos os pontos no refletor no ponto R definem a superfície de tempo de percurso de CRS verde no espaço $(x_m - h - t)$ atribuída a P_0 . Esta superfície é novamente tangente à superfície-tempo de reflexão CO azul ao longo da trajetória CRP verde-grossa do ponto R que tem sua origem no ponto P_0 .

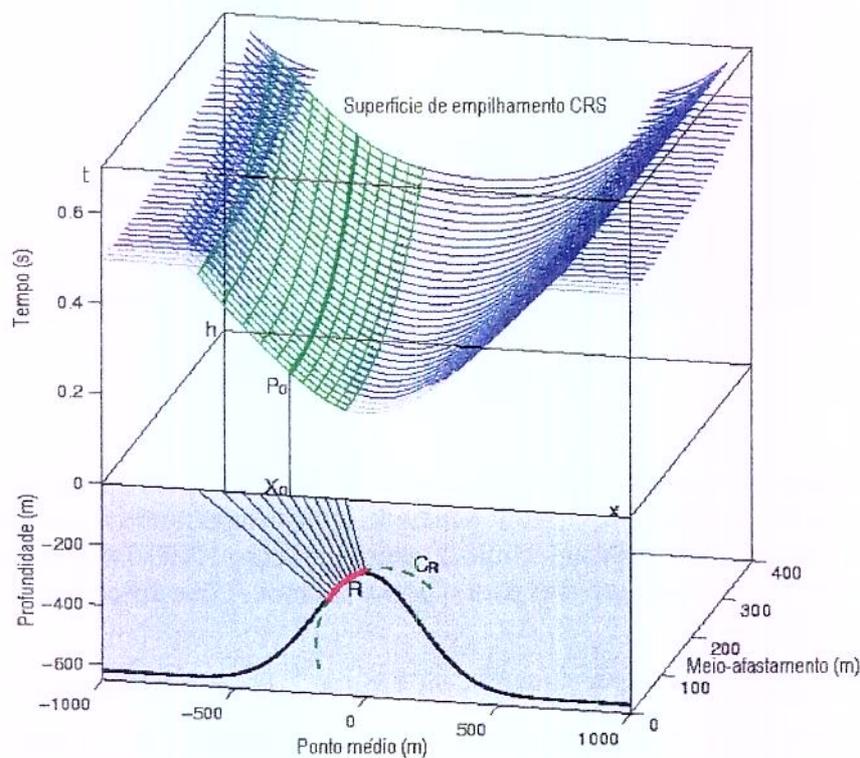


Figura 2.13: Metade inferior: Mesmo modelo da Figura 2.11, com raios de incidência normal (ZO) ao segmento de refletor C_R (vermelho) em R . A orientação do segmento de refletor é definida pela direção do raio de X_0 a R . Metade superior: Superfície de tempo de reflexão CO (azul) e superfície de empilhamento CRS (verde) para o segmento de refletor em R (modificado de Jäger, 1999).

A superfície de tempo de percurso de CRS é a resposta da reflexão multicobertura do refletor atribuída a R . Descreve os tempos de percurso de todos os pares fonte-receptor arbitrários

com um ponto de reflexão neste refletor. Em 3D o refletor se torna uma superfície e é chamado então de superfície de reflexão comum (CRS). Esta superfície é quase coincidente com a superfície de tempo de reflexão CO azul, ou seja, ela ajusta melhor a resposta do domo aos dados multicobertura. Assim, os dados podem ser somados ao longo da superfície verde mais coerentemente que no MZO.

2.3 Comentários

Expansões de tempo de percurso de segunda e mais alta-ordem foram por muito tempo de grande uso para o processo sísmico. Para dados em CMP, o tempo de percurso NMO mono-paramétrico, hiperbólico ainda é usado habitualmente para análise de velocidade, empilhamento e inversão. Mais recentemente, e ainda para dados CMP, expansões de tempo de percurso NMO bi-paramétricas, como o *PolyStack*, estão sendo usadas para resultados mais precisos.

Alternativamente, usando dados multicobertura completos ao longo de uma linha sísmica, expansões de tempo de percurso de segunda-ordem, tri-paramétricas, podem ser usadas. Em alguns trabalhos anteriores, como em Tygel et al. (1997) e Müller (1999), foram comparadas as expansões de tempos de percurso derivadas da teoria do raio paraxial. Para vários exemplos testados, as aproximações hiperbólica e *multifocus* deram, resultados consistentemente melhores que o tempo de percurso parabólico.

Com base nas observações deste capítulo, percebemos que estas representações tri-paramétricas de tempo de percurso produzem aproximações bastante razoáveis, não só para a curva de tempo de percurso CMP, mas também para a superfície de tempo de percurso multicobertura completa, demonstrando o seu potencial para uso em um procedimento de empilhamento melhorado. Para cada ponto central, serão empilhadas informações de dados ao longo de uma superfície de tempo de percurso completa em vez da hipérbole de CMP apenas.

Considerando que a superfície de empilhamento CRS é determinada independentemente para cada valor de τ_0 por análise de coerência. Segundo Cruz et al. (2000), os raios de curvatura R_N e R_{NIP} e o ângulo de emergência β_0 permanecerão os mesmos para cada reflexão de afastamento arbitrário. Estes parâmetros são, assim, independentes de τ_0 contanto que τ_0 pertença

à mesma reflexão na seção empilhada a ser construída. Isto significa que, contanto que se considere o mesmo evento de reflexão, as superfícies de empilhamento CRS permanecerão paralelas. Como consequência, a correção de CRS não estirará o pulso.

Isto também significa que o conteúdo de frequências antes de e depois de aplicar o empilhamento CRS é preservado e nenhum efeito de estiramento é observado. Na prática, claro que, por causa de dados ruidosos, a análise da coerência não conduzirá sempre a parâmetros idênticos R_N , R_{NIP} e β_0 para todos os valores de τ_0 de uma reflexão na seção empilhada construída. Na maioria das situações, porém, os parâmetros obtidos estarão suficientemente próximos para manter todos os efeitos de estiramento desprezíveis. Porém, regiões com baixa coerência sofrerão estiramento adicional.

Capítulo 3

Empilhamento por Superfície de Reflexão Comum:

Neste capítulo será apresentado um novo método de simulação de afastamento-nulo. O método é chamado empilhamento por Superfície de Reflexão Comum (Müller, 1998; Müller, 1999; Müller et al., 1998; Jäger, 1999). Pertence à classe dos métodos de imageamento independentes de macro-modelo já que, ao contrário das técnicas de empilhamento convencionais, nenhuma informação de velocidade além da velocidade próxima à superfície é requerida. Três parâmetros de empilhamento definem a superfície de empilhamento CRS. Estes podem ser determinados automaticamente por meio de um procedimento de busca envolvendo análise de coerência.

As linhas básicas do método CRS são a escolha da função de tempo de percurso hiperbólica (Tygel et al., 1997), e a estratégia de quebrar o problema da busca triparmétrica original em problemas mais simples envolvendo um ou dois desconhecidos. Como mostrado em Müller (1999), estimativas rápidas para os três parâmetros podem ser obtidas por buscas monoparmétricas simples executadas em seções CMP e seções empilhadas a partir dos dados multicobertura. O uso direto destes parâmetros nos algoritmos de empilhamento CRS conduz a resultados de imageamento muito aceitáveis.

O conceito de aproximar a verdadeira subsuperfície por um arco (em 2D) ou uma superfície (em 3D) que localmente tem a mesma curvatura que a verdadeira subsuperfície e o uso de sua resposta de reflexão como superfície de empilhamento está incorporado no empilhamento por

Superfície de Reflexão Comum (CRS). Em analogia ao método CRP com seu objetivo de iluminar um único ponto no refletor, o método de CRS visa iluminar um arco ou uma superfície, levando em conta, assim, a natureza local da subsuperfície. Estas considerações conduzem ao nome empilhamento por Superfície de Reflexão Comum (CRS), ou seja, são usados traços que contém eventos de reflexão gerados por um arco ou superfície de refletor comum em profundidade.

A seguir, será explicado o empilhamento CRS em detalhe.

3.1 A superfície de empilhamento CRS

Para operacionalizar o método CRS, será usada a fórmula de tempo de percurso hiperbólica, já que, como citado no Capítulo 2, ela fornece resultados, em geral, mais precisos que sua contrapartida parabólica. Porém, de um modo absolutamente análogo, a mesma estratégia também pode ser estabelecida baseada no tempo de percurso parabólico da Equação (2.21). Será considerada, portanto, a expressão de tempo de percurso hiperbólica como em Tygel et al. (1997)

$$t^2 = \left(t_0 + \frac{2x_m \text{sen } \beta_0}{v_0} \right)^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} (K_N x_m^2 + K_{NIP} h^2), \quad (3.1)$$

onde t_0 é o tempo de percurso de afastamento-nulo, v_0 é a velocidade em X_0 e β_0 é o ângulo de emergência do raio de afastamento-nulo em relação à normal à superfície no ponto central. As quantidades K_N e K_{NIP} são as curvaturas de frente de onda na superfície da *onda-N* e *onda-NIP*, respectivamente, medidas no ponto central.

A Equação (3.1) independe de um modelo de velocidades. O conhecimento da velocidade próxima à superfície v_0 é suficiente para descrever o tempo de percurso para um determinado par fonte-receptor. O trio de parâmetros β_0 , K_{NIP} e K_N define a superfície de empilhamento em relação a um tempo de percurso t_0 , para um raio ZO específico. Já que representam o ângulo de emergência e raios de curvatura ($R_{NIP}=1/K_{NIP}$ e $R_N=1/K_N$), todos medidos em X_0 , representam a orientação, a posição e a forma do elemento de refletor considerado.

3.2 Procedimento de empilhamento CRS

Os dados obtidos por um experimento sísmico de multicobertura, executado em uma determinada linha sísmica, consiste em um grande número de traços sísmicos $U(x_m, h, t)$ correspondendo a pares de fonte-receptor posicionados através de pares de coordenadas variáveis (x_m, h) e tempo de registro $0 < t < T$. O problema básico que nós temos que resolver é o seguinte: Consideremos um *grid* denso de pontos (x_0, t_0) , onde x_0 posiciona um ponto central X_0 na linha sísmica e t_0 é o tempo de percurso de afastamento-nulo. Para cada ponto central X_0 , assumiremos que a velocidade do meio $v_0 = v(x_0)$ seja conhecida. A partir dos dados multicobertura, precisamos determinar os parâmetros correspondentes β_0 , K_N e K_{NIP} , para qualquer ponto dado (x_0, t_0) e velocidade v_0 .

Uma abordagem para resolver este problema poderia ser a aplicação de uma análise de coerência multi-paramétrica aos dados, usando o critério de similaridade de Taner e Koehler (1969)

$$S = \frac{1}{N} \frac{\sum_t \left(\sum_{i=1}^N U(x_m, h, t) \right)^2}{\sum_t \sum_{i=1}^N (U(x_m, h, t))^2}, \quad (3.2)$$

onde $U(x_m, h, t)$ é a amplitude no *iésimo* traço no tempo t_0 considerado e N é o número de traços. O somatório interno é executado sobre todos os traços selecionados, e o externo é executado sobre uma determinada janela de tempo em torno de t_0 . Para cada par dado (x_0, t_0) , o objetivo é achar o máximo global da função de similaridade Equação (3.2) em relação aos parâmetros β_0 , K_N e K_{NIP} . Estes parâmetros são restritos aos limites $-\pi/2 < \beta_0 < \pi/2$ e $-\infty < K_N, K_{NIP} < \infty$.

Esta estratégia, no entanto, tem desvantagens. Um procedimento de busca tri-paramétrica consome muito tempo, é computacionalmente muito cara e não se pode estar seguro de que o trio de parâmetros de empilhamento ótimo esteja sendo descoberto. Porém, se uma informação inicial estiver disponível, a probabilidade de convergência é aumentada e o problema de otimização-global poderia ser reduzido a um de otimização local, ou seja, a informação inicial permite

começar a otimização na vizinhança do máximo global, assim neste caso o máximo local é idêntico ao global.

Porém, a estrutura da fórmula de aproximação do tempo de percurso fornece uma alternativa. Para configurações de levantamento especiais, a Equação (3.1) pode ser expressa como função de um ou dois parâmetros. Uma simplificação adicional permite montar a seguinte estratégia descrita pelo fluxograma da Figura 3.1: Por meio de três procedimentos de busca e análise de coerência mono-paramétricos, parâmetros de empilhamento CRS iniciais são determinados. Em um passo subsequente, estes parâmetros de empilhamento iniciais são usados como valores iniciais por um algoritmo de otimização que refina a estimativa dos parâmetros. A soma ao longo de superfícies de empilhamento definidas por estes parâmetros otimizados na respectiva amostra em tempo ZO produz a seção empilhada CRS. A soma ao longo das superfícies de empilhamento dadas pelos parâmetros iniciais é denominada seção empilhada CRS Inicial. Além destas seções ZO simuladas, os parâmetros de empilhamento CRS e um valor de coerência são obtidos como um subproduto no procedimento de busca e análise de coerência.

Esta estratégia gerou um algoritmo de empilhamento CRS, concebido por Mann (1999), seguindo o método proposto por Müller (1998); Müller et al. (1998); Jäger (1999), que foi utilizado neste trabalho. Em seguida, os dois passos de busca, isto é, a Busca em CMP e a Busca em ZO, bem como a Otimização e Empilhamento CRS são explicados.

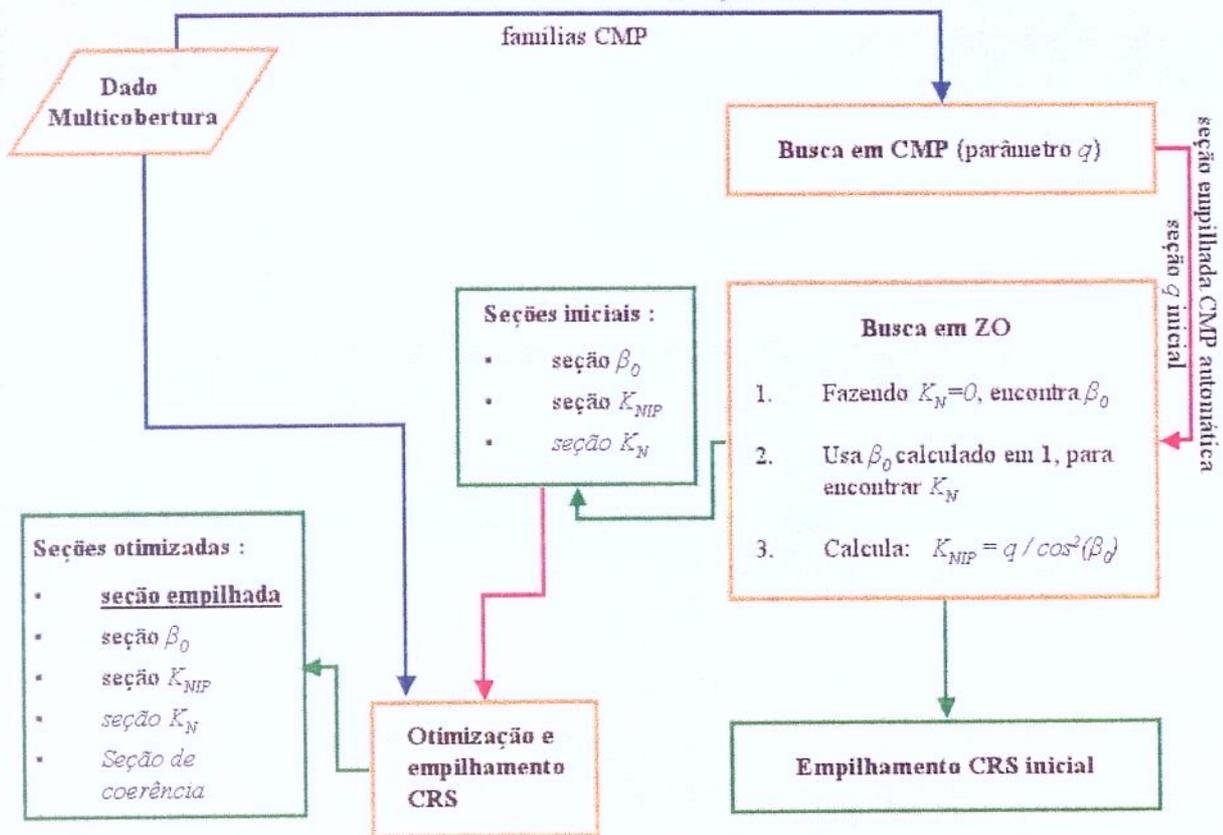


Figura 3.1: Fluxograma para o empilhamento CRS. Em azul são mostrados os fluxos dos dados de entrada. Em verde aparecem as seções obtidas com o método.

3.2.1 Busca na configuração de ponto médio-comum (CMP)

Fazendo o ponto médio coincidir com o ponto central, a expressão do tempo de percurso-CMP pode ser obtida a partir do tempo de percurso hiperbólico da Equação (3.1) colocando simplesmente $x_m=0$ naquela fórmula. Desta forma, ela só depende de um parâmetro, se reduzindo a

$$t_{CMP}^2 = t_0^2 + \frac{2t_0 h^2 q}{v_0}, \quad (3.3)$$

com o parâmetro combinado

$$q = \cos^2 \beta_0 K_{NIP}, \quad (3.4)$$

que pode ser relacionado à velocidade de empilhamento convencional v_{NMO} por comparação entre as Equações (2.7) e (3.3), assim:

$$v_{NMO}^2 = \frac{2v_0}{t_0 \cos^2 \beta_0 K_{NIP}} = \frac{2v_0}{t_0} \frac{1}{q}. \quad (3.5)$$

Portanto a Equação (3.3) nada mais é que a fórmula de *NMO* padrão, mas escrita aqui em termos da velocidade próxima à superfície v_0 e o ângulo de emergência do raio *ZO* β_0 e a curvatura da frente de *onda-NIP* K_{NIP} .

Usando a Equação (3.3), o parâmetro q pode ser determinado para cada amostra em tempo *ZO* na zona objetivo. Cada parâmetro q testado define uma hipérbole na família *CMP* que é correlacionada com os dados pré-empilhados. O parâmetro q que produz a coerência mais alta é armazenado como um valor inicial q^{ini} . É semelhante a realizar um espectro de velocidades, como visto na seção 2.1, escolhendo as velocidades automaticamente através de máxima coerência. A soma de dados pré-empilhados ao longo da hipérbole assim definida, na respectiva amostra em tempo *ZO*, produz uma seção empilhada *CMP* (*CMPstack*). Este processo foi chamado Empilhamento *CMP* Automático, já que é equivalente a um processo de empilhamento *CMP* convencional usando a Equação (3.3) em vez da Equação (2.7), com uma determinação automática do parâmetro q (que traduz a v_{NMO}) de empilhamento. Uma seção de coerência resultante exibe o valor da coerência determinado ao longo desta hipérbole em função da posição do *CMP* e do tempo de percurso *ZO*. A seção de coerência é útil para controle de qualidade. Seu valor é um indicador da qualidade do ajuste da hipérbole aos eventos nos dados pré-empilhados. Além disso, é obtida uma representação do parâmetro q^{ini} na zona objetivo. Por meio da Equação (3.5), os parâmetros q podem ser expressos em função da velocidade de empilhamento, produzindo um modelo de velocidades.

Já que o parâmetro q é resultante de uma análise de velocidades convencional automática, no lugar da busca por q , poderia ser usada, no caso de um reprocessamento de dados, o modelo de velocidades e a seção simulada *ZO* já existentes como entrada para a etapa seguinte.

3.2.2 Busca na configuração de afastamento-nulo

A expressão de tempo de percurso de afastamento-nulo é obtida colocando $h=0$ no tempo de percurso hiperbólico, Equação (3.1), chegando-se à expressão bi-paramétrica

$$t_{ZO}^2 = \left(t_0 + \frac{2x_m \text{sen } \beta_0}{v_0} \right)^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} K_N x_m^2. \quad (3.6)$$

Para traços na família ZO a descrição de tempo de percurso só depende dos dois parâmetros β_0 e K_N . Em uma aproximação de primeira-ordem em x_m esta equação pode ser então simplificada para produzir uma equação mono-paramétrica

$$t_{ZO} = t_0 + \frac{2x_m \text{sen } \beta_0}{v_0}. \quad (3.7)$$

Esta aproximação equivale a considerar apenas frentes de onda planas chegando à superfície ($K_N=0$) na Equação (3.6), o que é razoável se verificarmos as grandes profundidades envolvidas, se comparadas com os meios-afastamentos h .

Usando a Equação (3.7), um ângulo inicial de emergência β_o^{ini} é determinado para cada amostra em tempo ZO. Em analogia ao Empilhamento CMP Automático, para cada ângulo de emergência β_o testado a expressão de tempo de percurso de primeira-ordem, Equação (3.7), é calculada e correlacionada com dados ZO. O ângulo de emergência que produz a correlação mais alta é armazenado como o ângulo de emergência inicial β_o^{ini} . Na implementação utilizada, o *CMPstack* é usado como entrada para este processo. Uma soma dos dados ZO ao longo da função de tempo de percurso de primeira-ordem nas amostras em tempo ZO produz a chamada seção empilhada com ondas planas (*PWstack*).

Com q^{ini} e β_o^{ini} , calculados nos passos anteriores, os valores iniciais para a curvatura da frente de *onda-NIP* K_{NIP}^{ini} podem ser obtidos a partir da Equação (3.4)

Já determinado o parâmetro β_o^{ini} , o termo de segunda ordem na pode ser agora considerado na Equação (3.6), que dependerá apenas de um parâmetro desconhecido, a curvatura da frente de *onda-N*. O procedimento é idêntico aos anteriores, são testados valores de K_N discretos e a curva de tempo de percurso resultante é correlacionada com os dados ZO (*CMPstack*). Este processo de busca também produz uma seção de coerência para controle de qualidade, bem como um empilhamento ZO (*HYstack*) e os valores iniciais de curvatura da frente de *onda-N*.

Agora, para cada amostra em tempo ZO na zona objetivo, valores iniciais do trio de parâmetros de empilhamento (β_o^{ini} , K_{NIP}^{ini} , K_N^{ini}) são disponíveis. Cada trio define uma superfície de empilhamento CRS no domínio (x_m , h , t). Somando os dados pré-empilhados ao longo destas superfícies e colocando o resultado da soma na respectiva amostra em tempo ZO produz a seção empilhada CRS Inicial (*Inistack*). A análise de coerência da superfície de empilhamento CRS com o dados pré-empilhados fornece, novamente, uma seção de coerência. Esta seção pode ser usada para estimar a qualidade do ajuste das superfícies de empilhamento CRS aos eventos nos dados pré-empilhados. Estes valores de coerência serão usados a seguir para definir os limites de coerência na otimização dos parâmetros.

Para achar os melhores parâmetros de empilhamento possíveis, os valores iniciais servem como entrada para um algoritmo de otimização. Na implementação utilizada é aplicado um algoritmo de otimização local simples e robusto chamado “Busca Poliédrica Flexível” de Nelder e Mead (1965). Os parâmetros de empilhamento CRS iniciais são usados para limitar o processo de busca às imediações do máximo global. Uma investigação detalhada deste algoritmo de otimização com relação ao empilhamento CRS é realizada por Jäger (1999). Os trios de parâmetro de empilhamento ótimos resultantes são usados no processo de empilhamento, produzindo a seção empilhada CRS (*Optstack*). A apresentação dos parâmetros de empilhamento (β_o , K_{NIP} , K_N) como função da posição ZO e tempo de percurso ZO fornece a seção do ângulo de emergência, a seção de curvatura da frente de *onda-NIP* e a seção de curvatura da frente de *onda-N*. Como em todos os passos anteriores do procedimento de CRS, é obtida uma seção de coerência que exhibe o valor de correlação em função da posição ZO e do tempo de percurso ZO.

3.2.2 Busca na configuração de afastamento-nulo

A expressão de tempo de percurso de afastamento-nulo é obtida colocando $h=0$ no tempo de percurso hiperbólico, Equação (3.1), chegando-se à expressão bi-paramétrica

$$t_{ZO}^2 = \left(t_0 + \frac{2x_m \text{sen } \beta_0}{v_0} \right)^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} K_N x_m^2. \quad (3.6)$$

Para traços na família ZO a descrição de tempo de percurso só depende dos dois parâmetros β_0 e K_N . Em uma aproximação de primeira-ordem em x_m esta equação pode ser então simplificada para produzir uma equação mono-paramétrica

$$t_{ZO} = t_0 + \frac{2x_m \text{sen } \beta_0}{v_0}. \quad (3.7)$$

Esta aproximação equivale a considerar apenas frentes de onda planas chegando à superfície ($K_N=0$) na Equação (3.6), o que é razoável se verificarmos as grandes profundidades envolvidas, se comparadas com os meios-afastamentos h .

Usando a Equação (3.7), um ângulo inicial de emergência β_o^{ini} é determinado para cada amostra em tempo ZO. Em analogia ao Empilhamento CMP Automático, para cada ângulo de emergência β_o testado a expressão de tempo de percurso de primeira-ordem, Equação (3.7), é calculada e correlacionada com dados ZO. O ângulo de emergência que produz a correlação mais alta é armazenado como o ângulo de emergência inicial β_o^{ini} . Na implementação utilizada, o *CMPstack* é usado como entrada para este processo. Uma soma dos dados ZO ao longo da função de tempo de percurso de primeira-ordem nas amostras em tempo ZO produz a chamada seção empilhada com ondas planas (*PWstack*).

Com q^{ini} e β_o^{ini} , calculados nos passos anteriores, os valores iniciais para a curvatura da frente de *onda-NIP* K_{NIP}^{ini} podem ser obtidos a partir da Equação (3.4)

Já determinado o parâmetro β_o^{ini} , o termo de segunda ordem na pode ser agora considerado na Equação (3.6), que dependerá apenas de um parâmetro desconhecido, a curvatura da frente de *onda-N*. O procedimento é idêntico aos anteriores, são testados valores de K_N discretos e a curva de tempo de percurso resultante é correlacionada com os dados ZO (*CMPstack*). Este processo de busca também produz uma seção de coerência para controle de qualidade, bem como um empilhamento ZO (*HYstack*) e os valores iniciais de curvatura da frente de *onda-N*.

Agora, para cada amostra em tempo ZO na zona objetivo, valores iniciais do trio de parâmetros de empilhamento (β_o^{ini} , K_{NIP}^{ini} , K_N^{ini}) são disponíveis. Cada trio define uma superfície de empilhamento CRS no domínio (x_m , h , t). Somando os dados pré-empilhados ao longo destas superfícies e colocando o resultado da soma na respectiva amostra em tempo ZO produz a seção empilhada CRS Inicial (*Inistack*). A análise de coerência da superfície de empilhamento CRS com o dados pré-empilhados fornece, novamente, uma seção de coerência. Esta seção pode ser usada para estimar a qualidade do ajuste das superfícies de empilhamento CRS aos eventos nos dados pré-empilhados. Estes valores de coerência serão usados a seguir para definir os limites de coerência na otimização dos parâmetros.

Para achar os melhores parâmetros de empilhamento possíveis, os valores iniciais servem como entrada para um algoritmo de otimização. Na implementação utilizada é aplicado um algoritmo de otimização local simples e robusto chamado “Busca Poliédrica Flexível” de Nelder e Mead (1965). Os parâmetros de empilhamento CRS iniciais são usados para limitar o processo de busca às imediações do máximo global. Uma investigação detalhada deste algoritmo de otimização com relação ao empilhamento CRS é realizada por Jäger (1999). Os trios de parâmetro de empilhamento ótimos resultantes são usados no processo de empilhamento, produzindo a seção empilhada CRS (*Optstack*). A apresentação dos parâmetros de empilhamento (β_o , K_{NIP} , K_N) como função da posição ZO e tempo de percurso ZO fornece a seção do ângulo de emergência, a seção de curvatura da frente de *onda-NIP* e a seção de curvatura da frente de *onda-N*. Como em todos os passos anteriores do procedimento de CRS, é obtida uma seção de coerência que exhibe o valor de correlação em função da posição ZO e do tempo de percurso ZO.

Capítulo 4

Aplicações do método CRS

Este capítulo mostrará a aplicação do método de empilhamento CRS, por meio de exemplos numéricos (modelo sintético) e em um exemplo de dados reais multicobertura.

Já que, no caso sintético, o modelo é conhecido, os parâmetros de empilhamento exatos podem ser diretamente calculados. Comparando os parâmetros teóricos com aqueles determinados pelo método de empilhamento CRS a precisão da aproximação de tempo de percurso foi testada. Uma comparação entre os parâmetros obtidos do modelo contra os obtidos dos dados será mostrada. Um dos modelos foi também submetido ao processo de migração para afastamento nulo (MZO) podendo, assim, ser comparado ao método CRS.

Em dados reais o empilhamento CRS foi aplicado e comparado ao resultado da seqüência de processamento convencional empilhamento NMO. Em todos os casos, para a realização de pequenos processamentos, tais como ganho, formatações de valores do *header* e os *displays*, utilizou-se o pacote sísmico SU (*Seismic Unix*), de domínio público, desenvolvido pela *Colorado School of Mines*.

4.1 Modelos Sintéticos

Serão apresentadas agora duas aplicações do método CRS a dados sintéticos multicobertura de reflexão sísmica. Os modelos sintéticos elásticos bidimensionais foram gerados a partir do

conceito da teoria do raio, utilizando o sistema SEIS88 desenvolvido por Červený et Pšenčík (1988). Foi também utilizado um algoritmo desenvolvido por Ricardo Biloti, do Laboratório de Geofísica Matemática (LGM) da UNICAMP, que extrai os valores dos parâmetros CRS a partir do modelo elástico.

Para a geração dos dados sísmicos foi usado um pulso de Gabor como sinal de fonte, com frequência de 25 Hz. Ruído aleatório foi acrescentado aos dados multicobertura para produzir uma relação de S/N semelhante à apresentada em dados reais.

4.1.1 Modelo Tipo-Talude

O modelo utilizado nesta simulação (Figura 4.1) consiste de uma situação geológica do tipo talude. Trata-se de uma situação bastante importante do ponto de vista exploratório, já que grande parte das pesquisas atuais de petróleo no Brasil está voltada para esta situação geológica. Ele representa a quebra da plataforma continental rasa, passando para regiões profundas através de uma transição, onde o fundo do mar apresenta mergulhos de 15° em média. Esta geometria, junto com o forte contraste de impedância do fundo do mar, gera dificuldades para o imageamento sísmico.

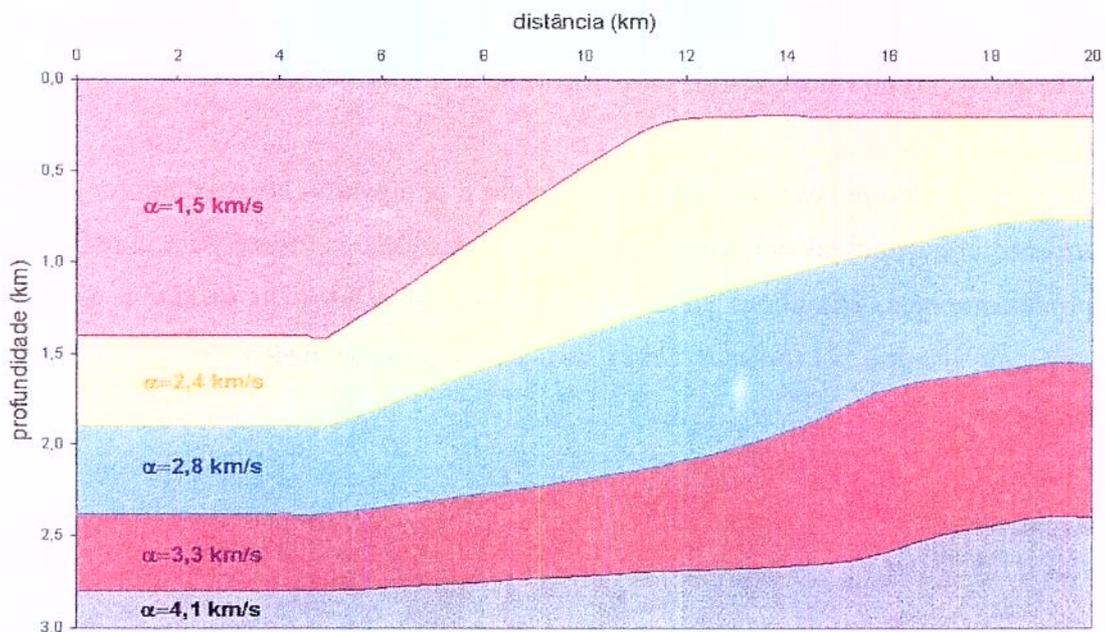


Figura 4.1: Modelo tipo-talude, ilustrando a transição de plataforma rasa para águas profundas. É composto por 4 camadas homogêneas de densidade unitária separadas por interfaces curvas, onde as velocidades da onda P são representadas por α , com a velocidade $v_0=1,5$ km/s (lâmina d'água).

O dado sísmico multicobertura foi obtido com os parâmetros de aquisição enumerados na Tabela 4.3, gerando, portanto, uma coleção de 746 famílias CMP com 24 traços cada.

Tabela 4.1: Parâmetros de aquisição para o modelo tipo-talude.

CMP's	1 - 746
afastamentos	200 – 2550 m
Intervalo de receptor	50 m
Nº de receptores	48
Intervalo de tiro	50 m
Intervalo de CMP's	25 m
Intervalo de amostragem	4 ms
Tempo de registro	4 s

A Figura 4.2 mostra três famílias CMP, onde se pode perceber, como também na Figura 4.3, o nível de ruído adicionado aos dados simulados.

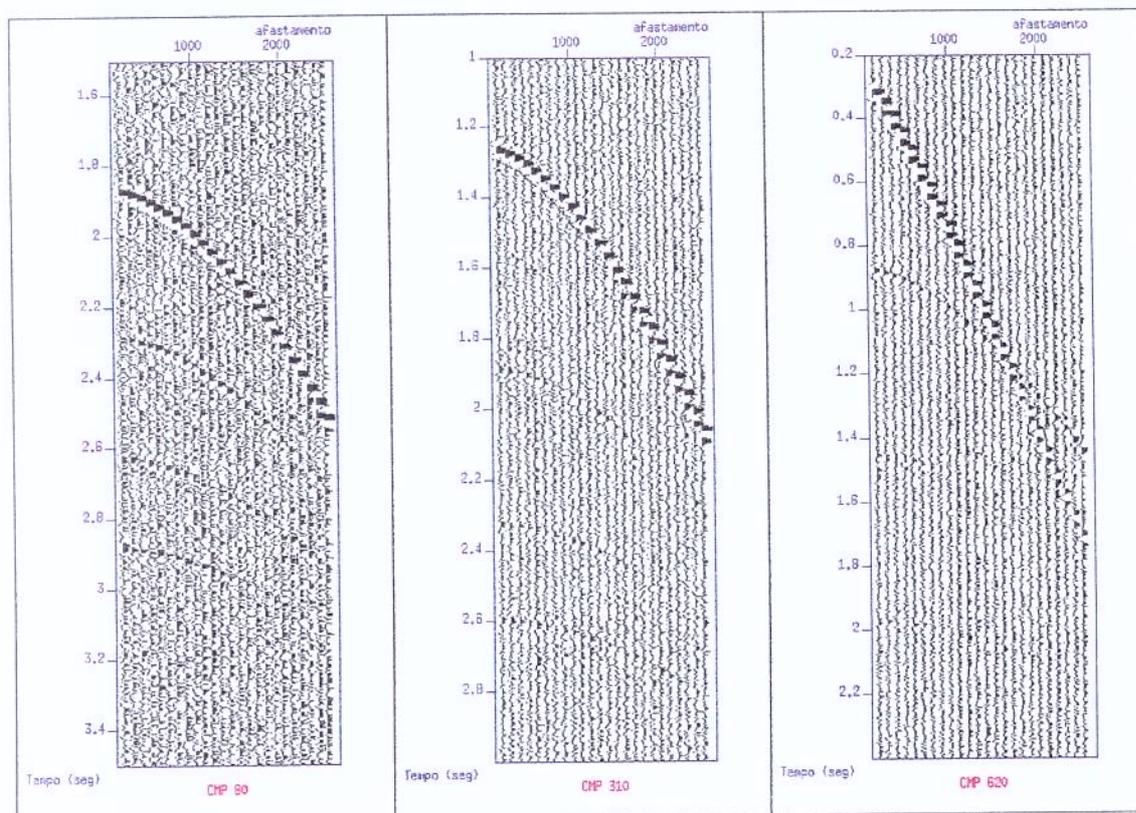


Figura 4.2: Três famílias CMP típicas, evidenciando a razão sinal/ruído.

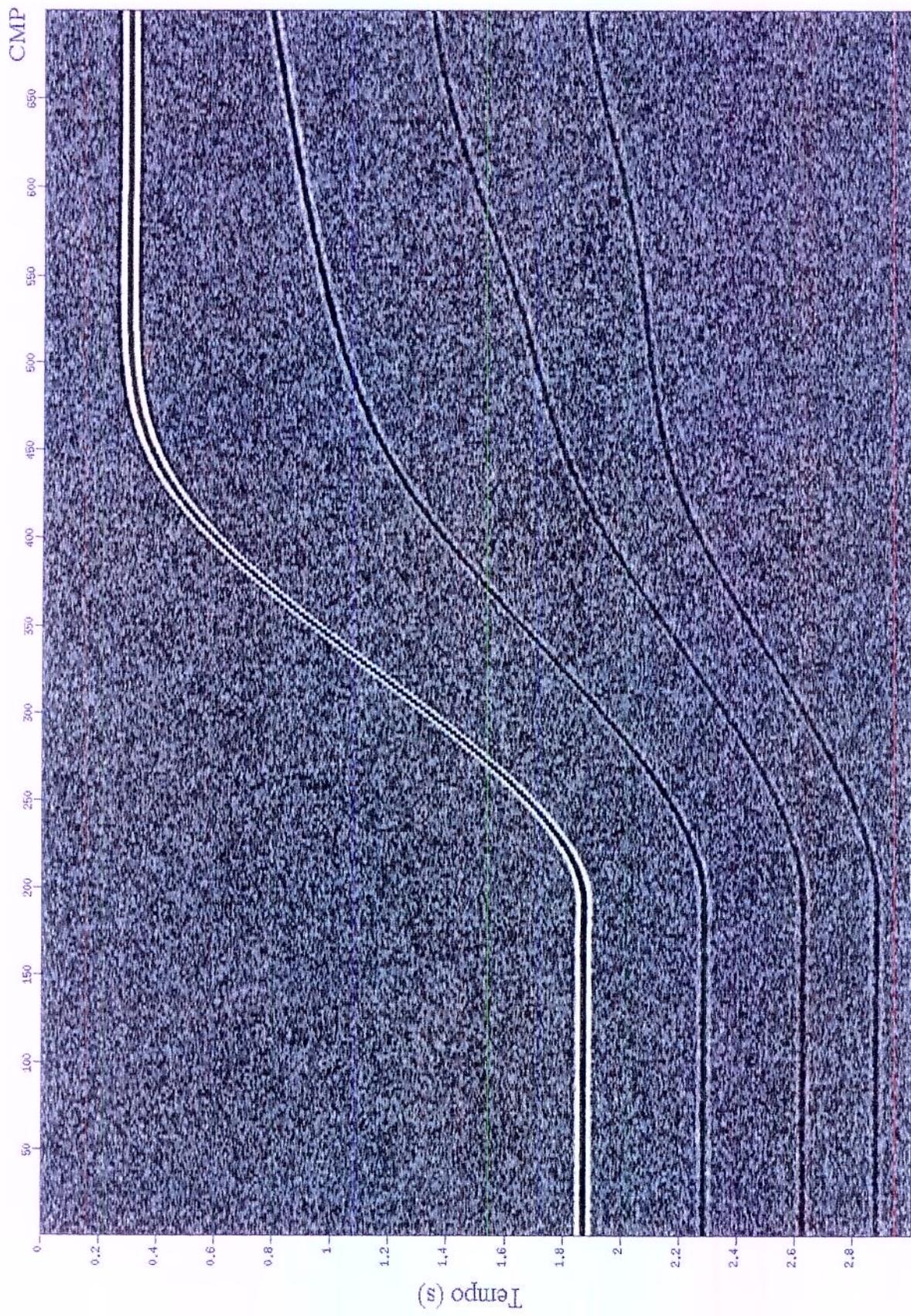


Figura 4.3: Seção de afastamento comum de 200 m.

O empilhamento CRS como explicado na Seção 3.2 e no fluxograma na Figura 3.1 é então aplicado a este dado sintético. A análise de coerência usando o critério de similaridade de Taner e Koehler (1969), descrito na Equação (3.2), é executada. Na primeira parte ocorre a estimativa do parâmetro combinado q , por meio de uma busca mono-paramétrica nas famílias CMP extraídas dos dados multi-cobertura. A situação é semelhante a uma análise de velocidade v_{NMO} automática convencional, sendo que a fórmula de tempo de percurso da Equação (3.3), que só depende do parâmetro q . O empilhamento CMP automático produz então o resultado mostrado na Figura 4.4, que foi gerado sem qualquer informação de velocidade além da velocidade próxima à superfície que, no caso de dados marítimos, é conhecida (1500 m/s). A seção Empilhada CMP Automática é um resultado intermediário no procedimento de empilhamento CRS e é usada como entrada para os processos subseqüentes de busca do ângulo de emergência e do raio da *onda-N*.

Os parâmetros q iniciais podem ser visualizados na Figura 4.5, bem como as velocidades de empilhamento v_{NMO} , na Figura 4.6. Pode-se verificar a coerência com as velocidades médias do modelo.

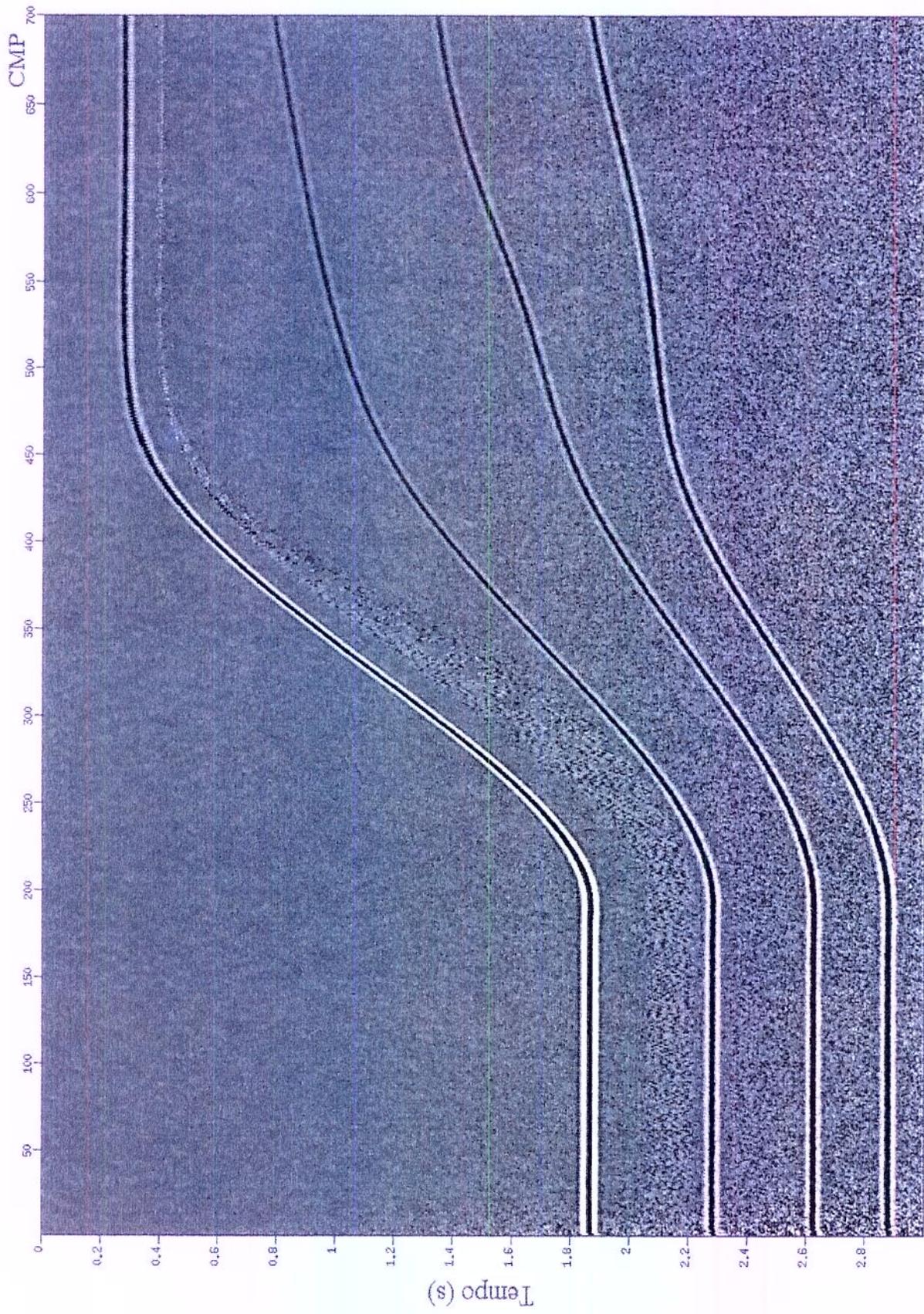


Figura 4.4: Seção empilhada CMP automática.

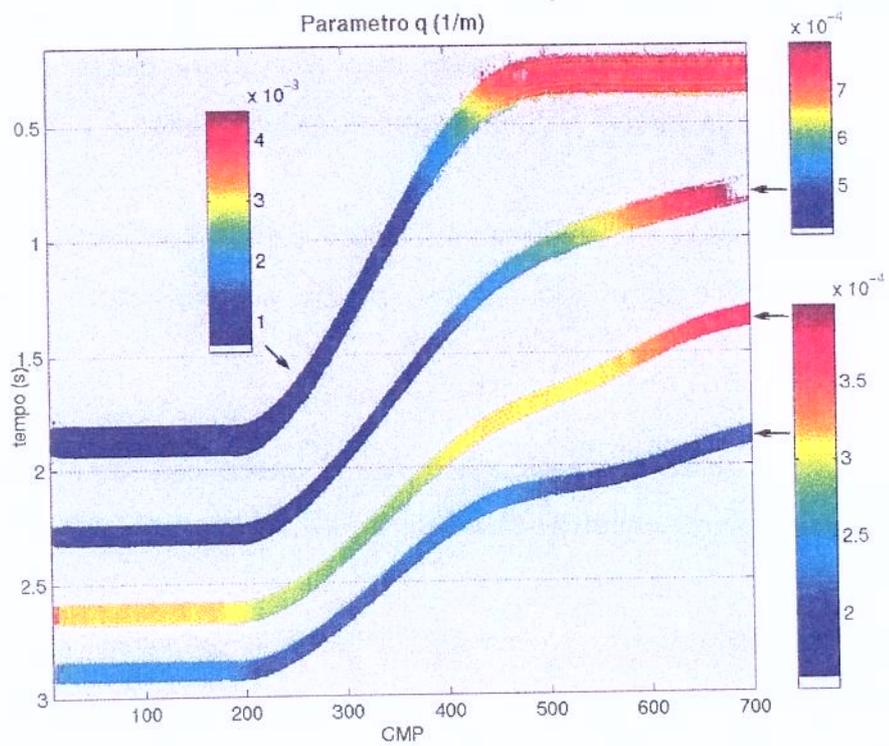


Figura 4.5: Seção de parâmetros q obtidos no empilhamento CMP automático.

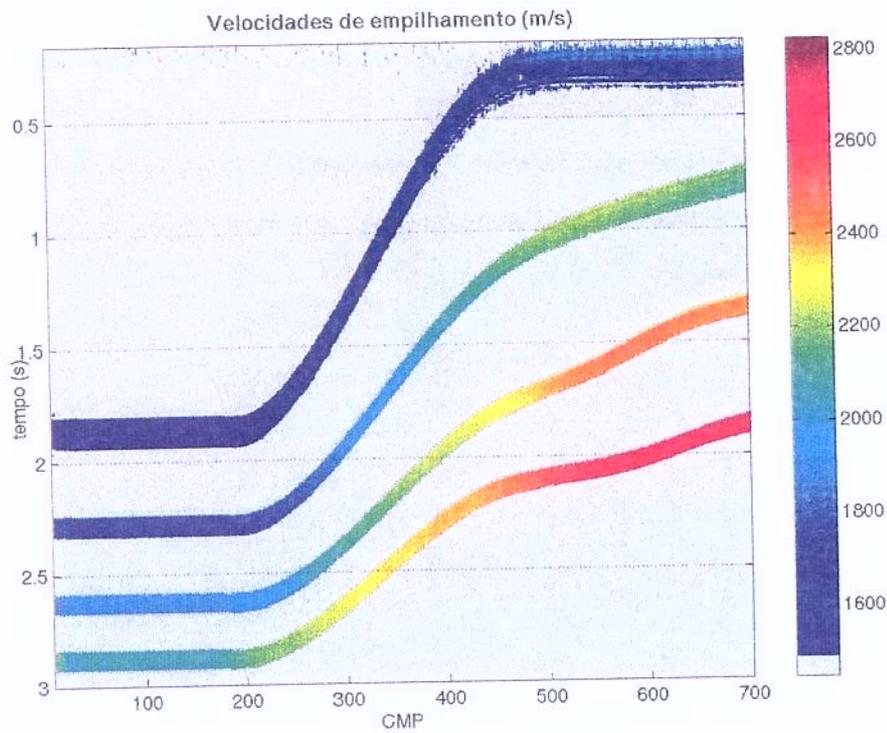


Figura 4.6: Velocidades de empilhamento iniciais v_{NMO} , empilhamento CMP automático.

Esta seção obtida com a fórmula de tempo de percurso da Equação (3.3) será usada agora como uma aproximação de seção de afastamento-nulo (ZO), para extrair os ângulos de emergência β_0 e as curvaturas da *onda-N* K_N , com o seguinte procedimento:

- a) Usando a Equação (3.6) de tempo de percurso para afastamento-nulo (4), fixando primeiro $K_N = 0$ e executando, para cada par $(x_0; t_0)$, uma busca monoparamétrica para β_0 .
- b) O valor de β_0 obtido será então substituído na mesma equação para realizar uma nova busca monoparamétrica para o valor de K_N .
- c) O uso da relação $K_{NIP} = q / \cos 2\beta_0$, completa as estimativas iniciais dos três parâmetros β_0 , K_N e K_{NIP} , permitindo, assim, a obtenção de uma seção empilhada CRS a partir da fórmula de tempo de percurso hiperbólica.

Esta seção empilhada CRS (Figura 4.7) apresenta uma maior razão S/N em comparação com o resultado do empilhamento CMP automático. Esta é uma indicação para o bom ajuste das superfícies de empilhamento CRS definidas pelos parâmetros de empilhamento iniciais à resposta da reflexão modelada. Assim, o aumento no nível S/N é devido a uma soma ao longo da superfície usando muito mais traços para simular cada amostra de tempo ZO. A boa qualidade da seção empilhada CRS é observada no bom imageamento dos eventos de reflexão relativos aos flancos íngremes da zona de talude.

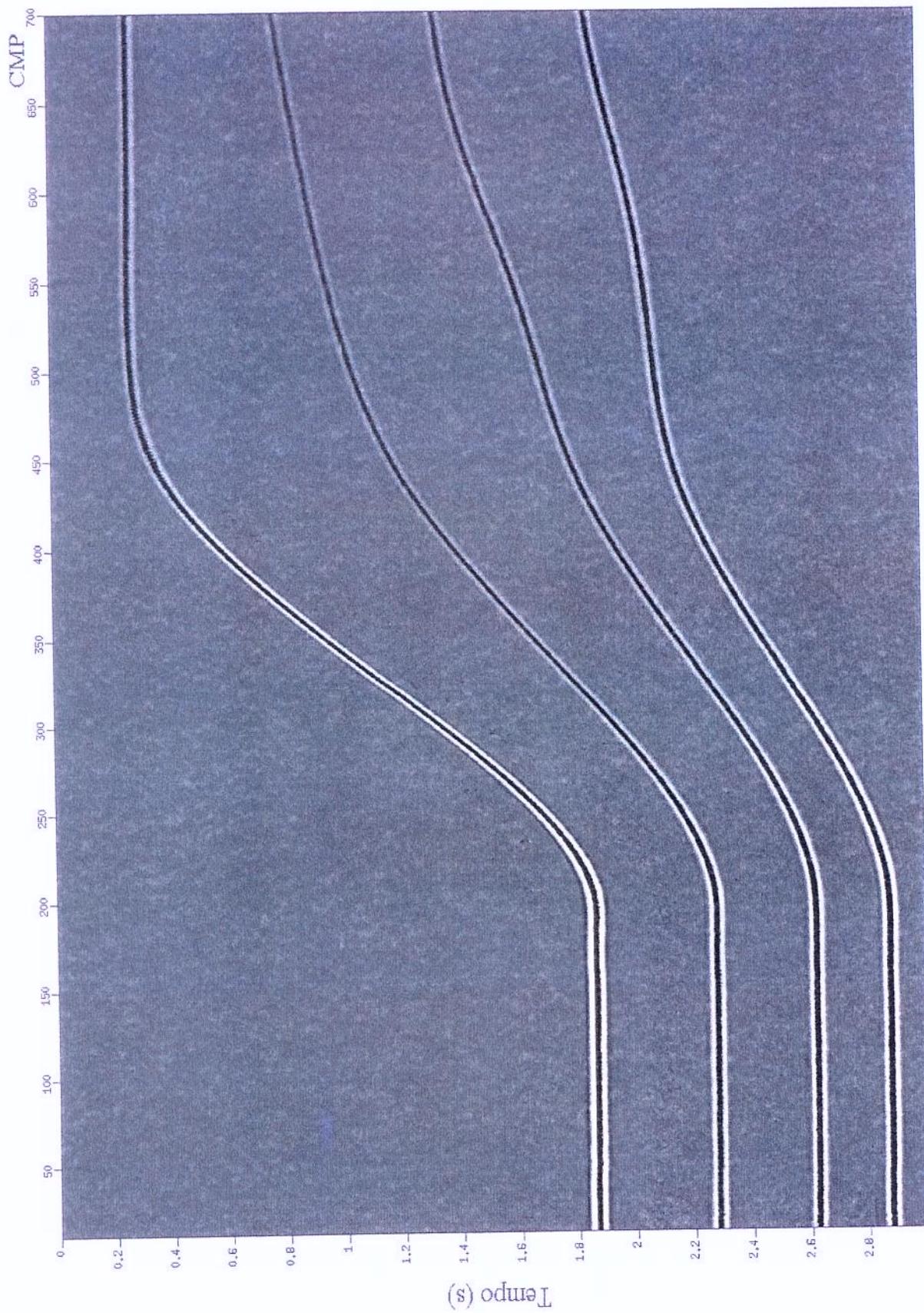


Figura 4.7: Seção empilhada CRS inicial.

A última parte do processo consiste na aplicação de um algoritmo de otimização. Para evitar a aplicação do algoritmo de otimização a amostras no ruído, a seção de coerência inicial da Figura 4.8 é usada para restringir a otimização. As seções de coerência representam também uma medida de confiança para as seções empilhadas correspondentes. Quanto mais alto o valor de semelhança, melhor a coerência detectada no correspondente evento de reflexão e, assim, mais segura a reflexão de afastamento nulo simulada. O empilhamento CRS é aplicado a amostras onde a similaridade inicial excede um limite pré-estabelecido, gerando, a partir da aplicação dos parâmetros β_0 , K_N e K_{NIP} otimizados, uma seção empilhada CRS otimizada (Figura 4.9) Uma comparação desta seção com a seção empilhada CRS inicial mostrada na Figura 4.7 revela uma imagem ligeiramente melhor após a otimização. Porém, ambas as seções são bem parecidas.

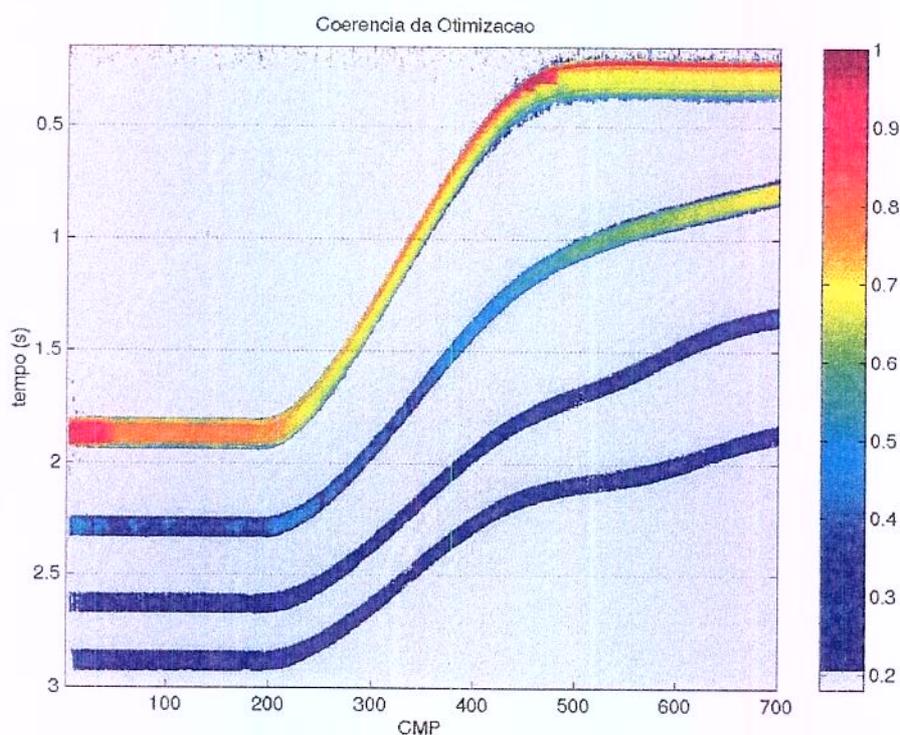


Figura 4.8: Seção de coerência.

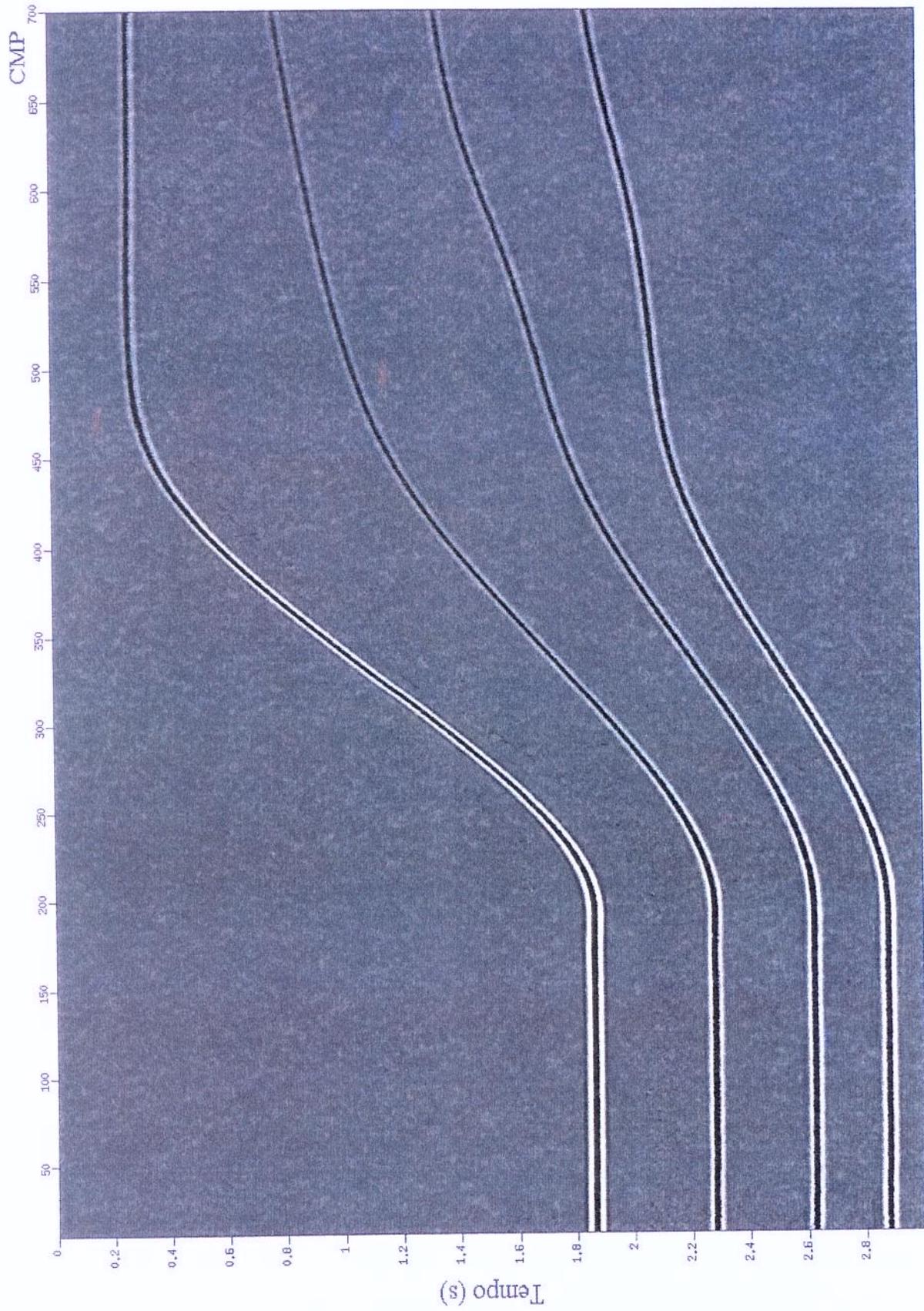


Figura 4.9: Seção empilhada CRS otimizada.

Além das seções ZO simuladas, o método de empilhamento CRS produz as seções de atributos. Estes atributos são os parâmetros de empilhamento CRS. Os valores dos parâmetros são exibidos apenas quando a coerência excede 0.18 (as regiões em cinza são valores eliminados por este critério). Isto elimina regiões ruidosas, facilitando a visualização e a interpretação destes parâmetros. A Figura 4.10 exibe o ângulo de emergência determinado no procedimento de otimização. Este parâmetro alcança uma faixa entre -15° e $+2^\circ$, correspondendo perfeitamente à geometria do modelo.

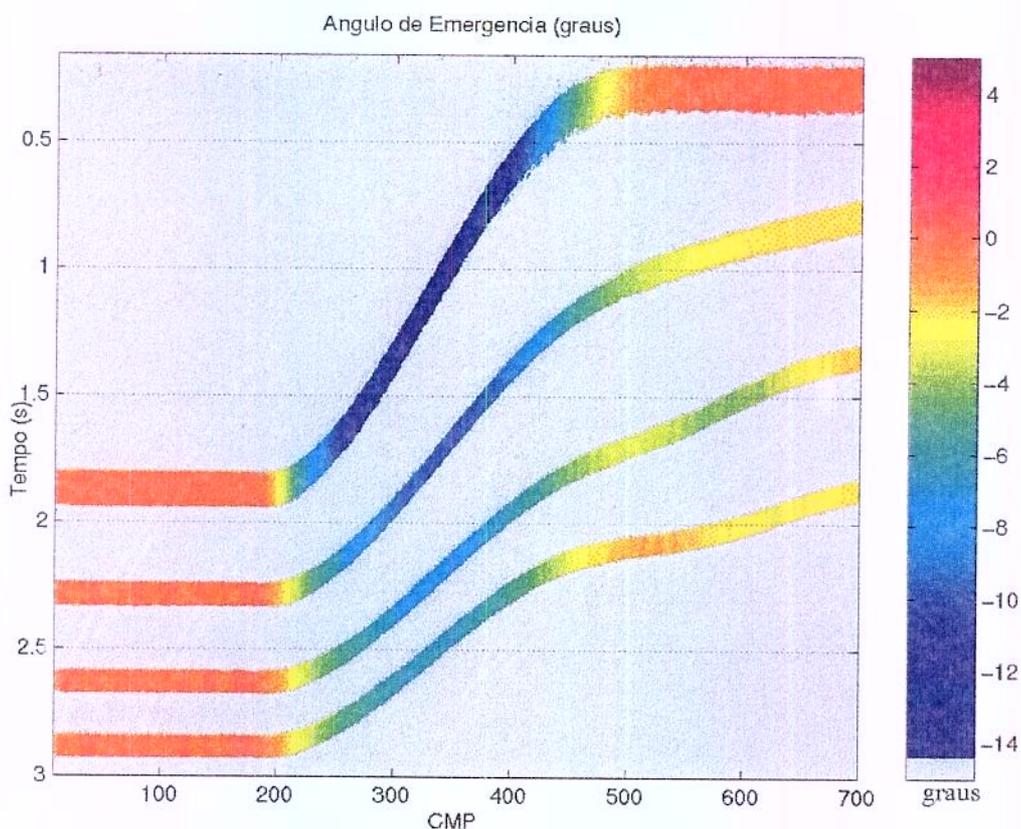


Figura 4.10: Seção de ângulo de emergência β_0 .

Os raios de curvatura das frentes de *onda-N* e *NIP* são traçados na Figura 4.11 e Figura 4.12, respectivamente. O raio de curvatura da frente de *onda-N* é o parâmetro mais sensível, podendo variar rapidamente entre $+\infty$ e $-\infty$ nos refletores horizontais. Por este motivo foi mais adequado exibir o seu inverso (curvatura da frente de *onda-N*). Ele tende a refletir a curvatura dos refletores. Como esperado, o raio de curvatura da frente de *onda-NIP* tende a aumentar com o tempo de percurso ZO crescente (representando um aumento na profundidade das interfaces).

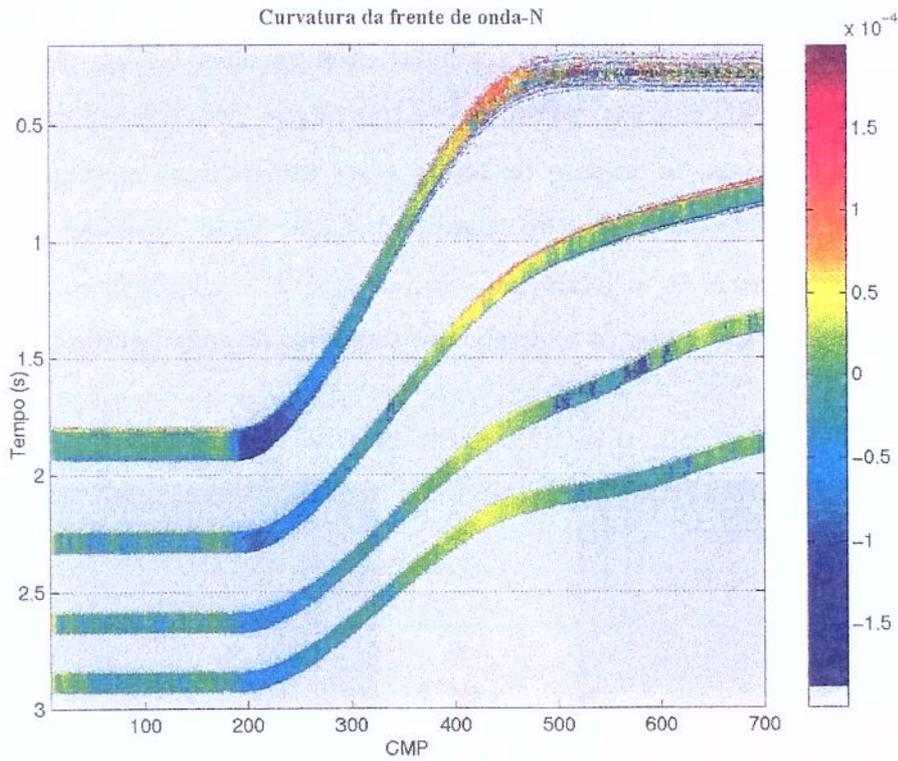


Figura 4.11: Seção de curvatura da frente de *onda-N* K_N .

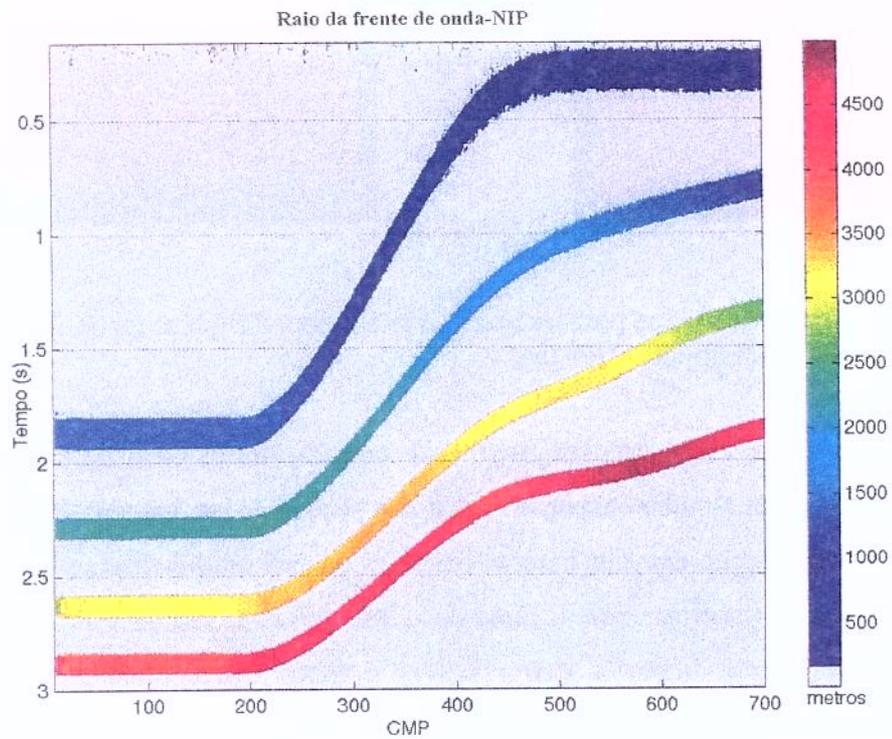


Figura 4.12: Seção de raio de curvatura da frente de *onda-NIP* R_{NIP} .

Finalmente, a Figura 4.13 exibe o número de traços que foram usados pelo empilhamento CMP automático e o empilhamento CRS para simular cada amostra ZO em tempo. Para este modelo, o empilhamento CRS usa um máximo de 1160 traços para simular uma amostra de tempo ZO nos tempos maiores. O número de traços a ser utilizado no empilhamento CRS é definido pelos parâmetros de abertura, no algoritmo CRS. Dele depende a precisão da aproximação dos raios paraxiais na vizinhança do raio central. Já o empilhamento CMP faz uso de um máximo de 24 traços, que é igual à multiplicidade máxima de cada família CMP.

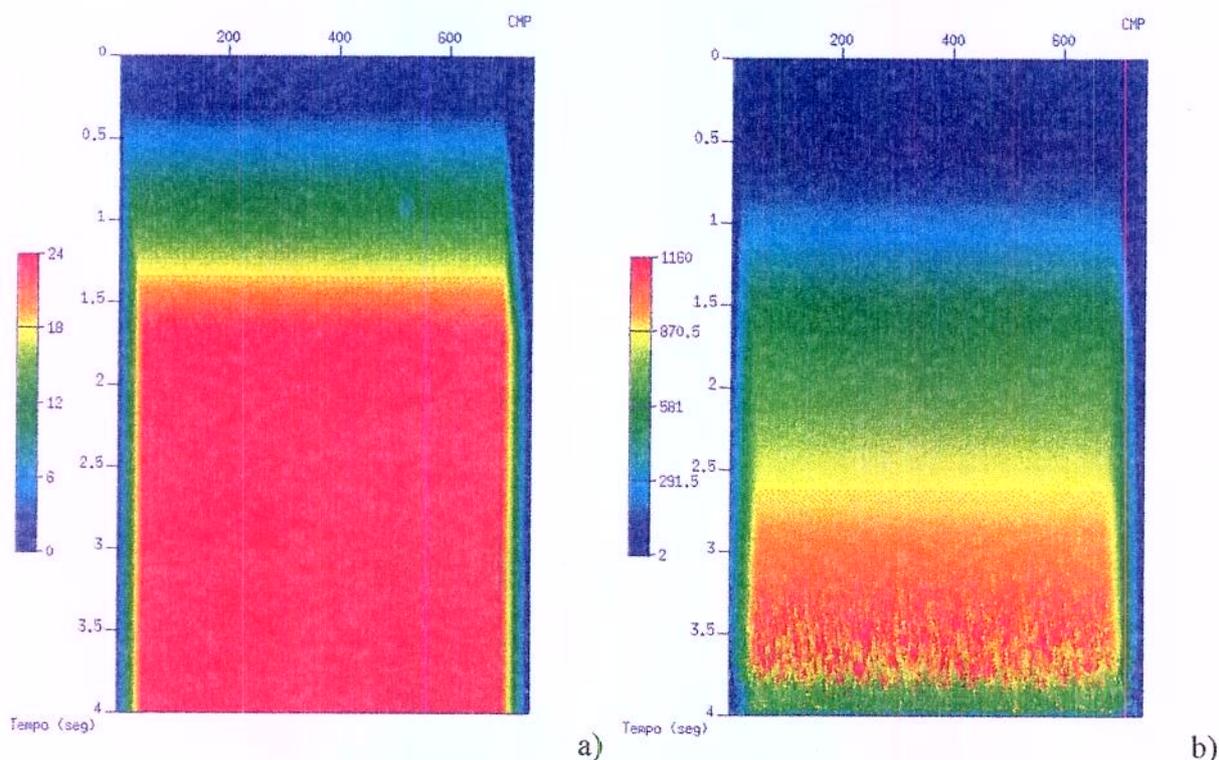


Figura 4.13: Número de traços usados para imagear cada amostra ZO para o empilhamento CMP automático (a) e para o empilhamento CRS (b).

É difícil estimar a qualidade dos parâmetros de empilhamento CRS determinados pelos procedimentos de busca, pela simples inspeção visual das seções de parâmetros. As Figuras 4.17 a 4.19 mostram uma comparação entre os parâmetros teóricos, calculados diretamente do modelo e os otimizados. Pode-se verificar que o método CRS fornece estimativas de parâmetros geralmente precisas na maioria da seção, destacando-se o ângulo de incidência. Porém, nota-se que uma maior dispersão em alguns pontos, para as curvaturas das frentes de *onda-N* e *NIP*, após o CMP 400, na porção mais rasa. Esta região é caracterizada por um menor número de traços

utilizado no processo de empilhamento CRS, evidenciado na Figura 4.13. Já os resultados discrepantes apresentados no parâmetro K_N (Figura 4.15) são, provavelmente, resultado do programa usado para escolher (*picking*) os parâmetros para plotagem.

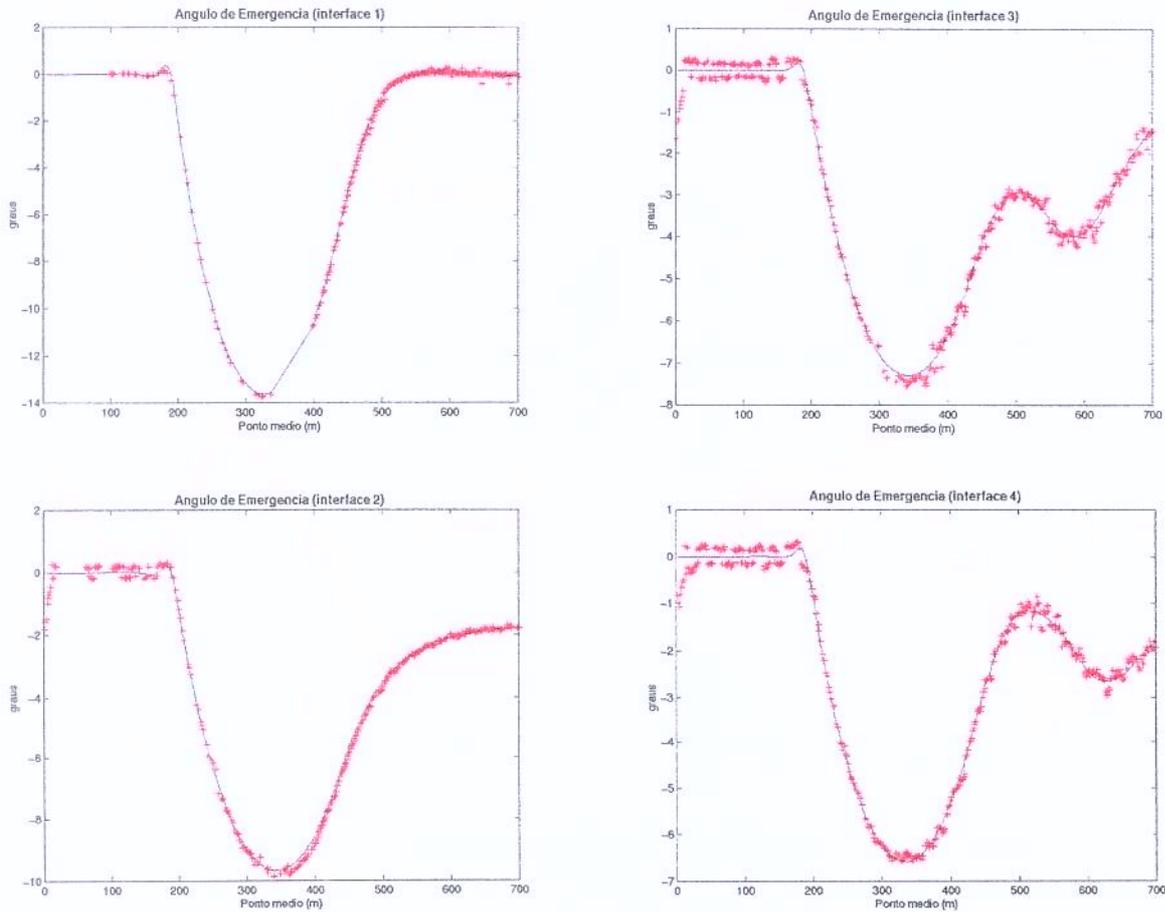


Figura 4.14: Ângulo de emergência β_0 : Curva teórica em azul e os valores otimizados obtidos pelo empilhamento CRS (“+” vermelhos).

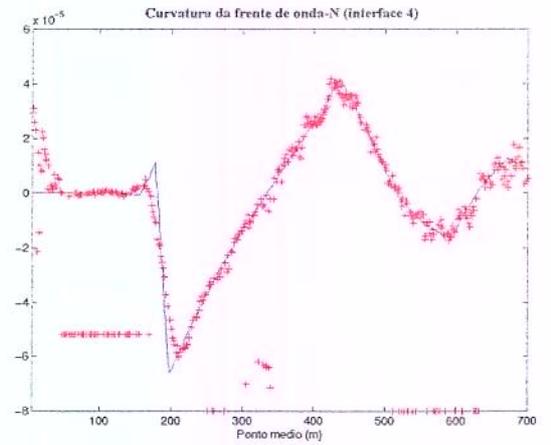
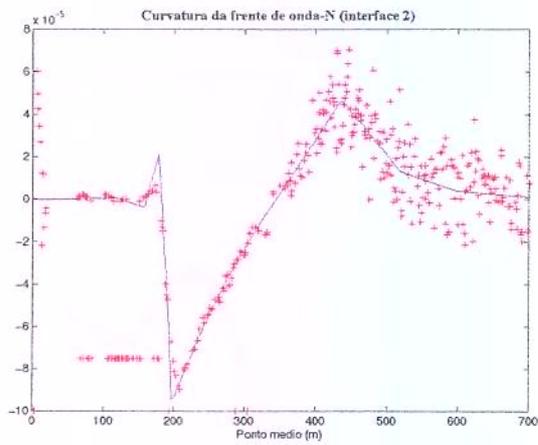
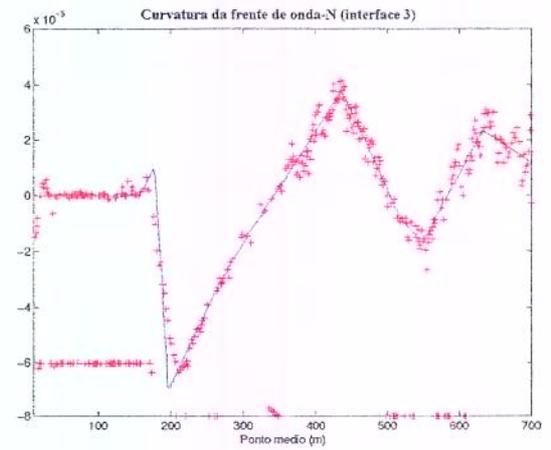
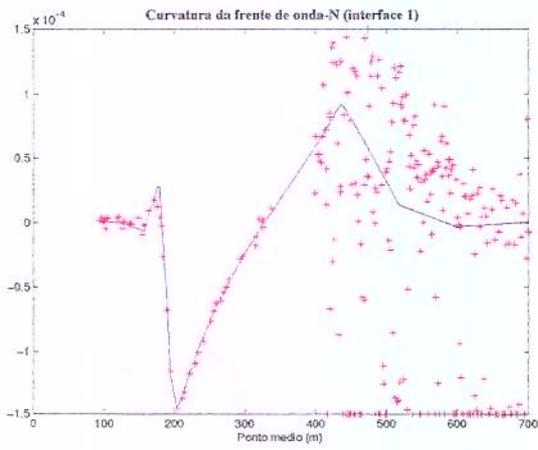


Figura 4.15: Curvatura da frente de *onda-N* K_N : Curva teórica em azul e os valores otimizados obtidos pelo empilhamento CRS (“+” vermelhos).

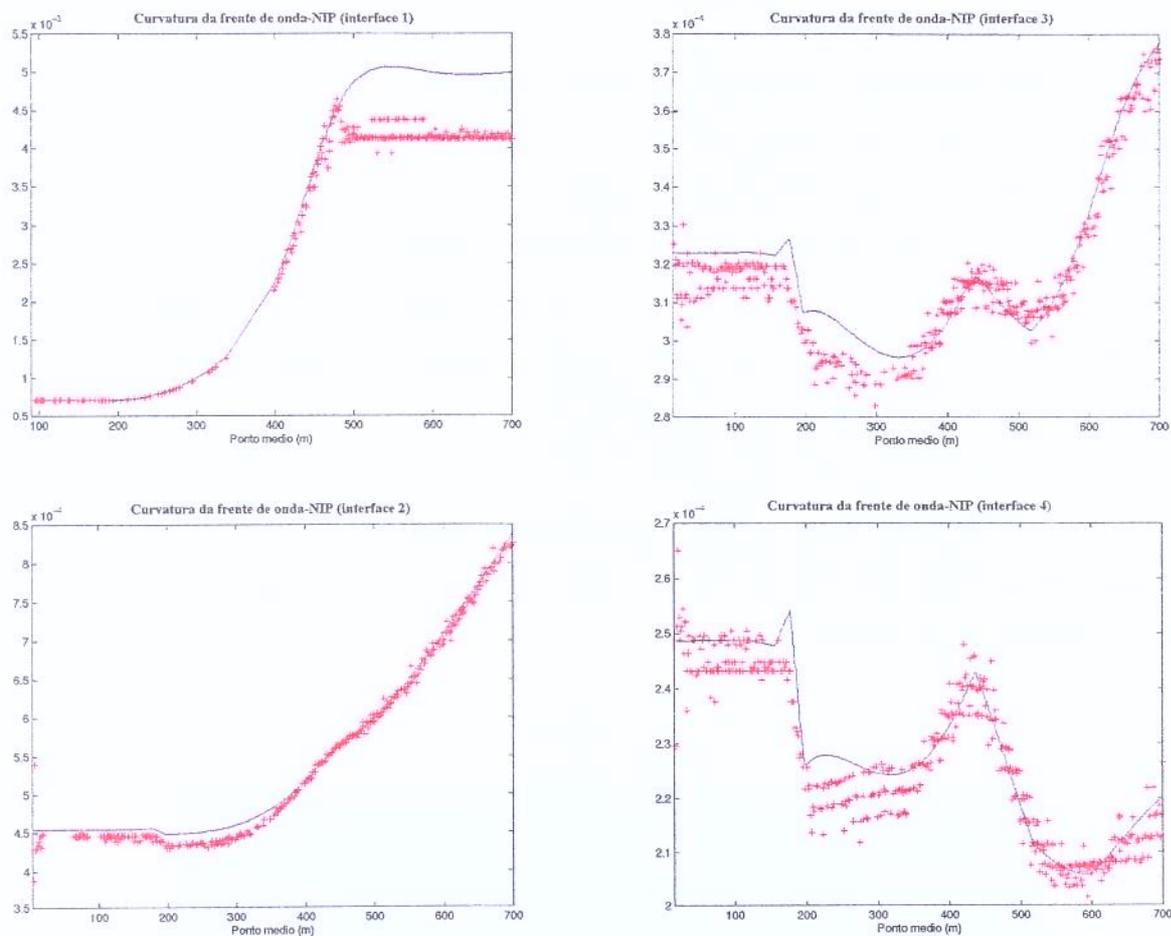


Figura 4.16: Curvatura da frente de *onda-NIP* K_{NIP} : Curva teórica em azul e os valores otimizados obtidos pelo empilhamento CRS (“+” vermelhos).

Além da qualidade da imagem, o tempo de processamento é um fator importante para determinar o sucesso de um processo de imageamento. Tempo de processamento é definido como o tempo total necessário para completar um processo. Isto inclui tempo de CPU e o tempo gasto para ações interativas. O tempo de CPU depende do *hardware* usado e da efetividade do algoritmo implementado. Isto é fácil de medir e comparar. O tempo que o usuário precisa para processos interativos é bastante difícil estimar. Depende de fatores como a disponibilidade de uma informação a priori e das habilidades e experiência do usuário. O *hardware* utilizado neste trabalho foi uma estação *SUN – ULTRA 60*, com 2 processadores de 450 MHz e 1 Gb de memória RAM. O tempo de CPU para finalizar todo o processo de empilhamento CRS foi de quase 4 horas.

4.1.2 Modelo Tipo-Domo com Capa de Gás

Serão apresentados agora os resultados obtidos da aplicação do método de empilhamento CRS para o caso de um *bright spot*, onde se apresenta, como mostrado na Figura 4.17, uma situação de um domo com capa de gás, sobreposta por uma interface inclinada. O modelo é composto por duas camadas homogêneas de densidade unitária separadas por uma interface inclinada. A última camada apresenta variação lateral de velocidades sob o domo, devida à presença da capa de gás. Esta variação lateral foi criada com a utilização de *splines* bicúbicas para que não surgisse novas interfaces nessas zonas.

Este modelo foi escolhido devido ao desafio que a inversão de velocidades (meio superior com velocidades maiores que o meio inferior) representa ao imageamento sísmico, devido à inversão nas amplitudes do evento correspondente.

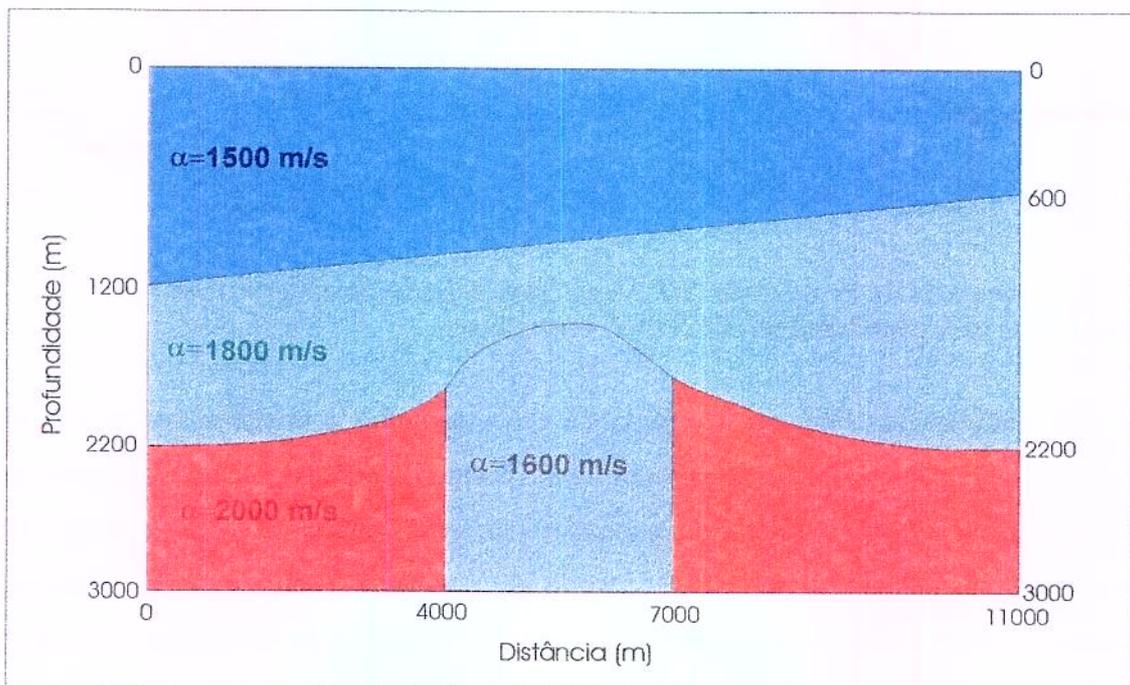


Figura 4.17: Modelo tipo-domo com capa de gás, ilustrando a diminuição na velocidade da camada na presença de gás. As velocidades da onda P são representadas por α , com a velocidade $v_0=1500\text{ m/s}$ (lâmina d'água).

A obtenção dos dados multicobertura foi realizada com a utilização dos parâmetros apresentados na Tabela 4.1, gerando famílias CMP com 24 traços cada.

Tabela 4.2: Parâmetros de aquisição para o modelo tipo-domo com capa de gás.

CMP's	1 - 998
afastamentos	20 - 2000 m
Intervalo de receptor	20 m
Nº de receptores	48
Intervalo de tiro	20 m
Intervalo de CMP's	10 m
Intervalo de amostragem	4 ms
Tempo de registro	4 s

Uma família de tiro comum é mostrada na Figura 4.18, onde se pode constatar a inversão de polaridade do sinal sísmico no segundo refletor, marcando a inversão da velocidade da onda P (α).

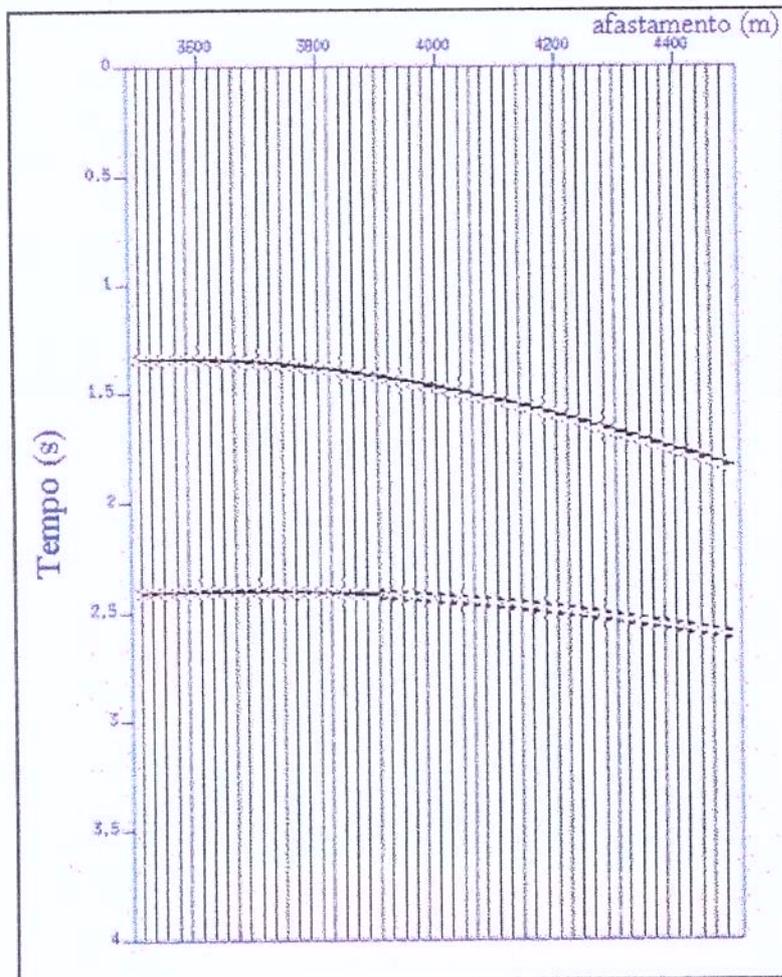


Figura 4.18: Família de tiro comum, apresentando inversão de polaridade.

A Figura 4.19 apresenta o resultado do processamento convencional de empilhamento NMO para os dados multicobertura sem adição de ruído. As velocidades de empilhamento foram obtidas através de análise de velocidades, e são apresentadas na Figura 4.20. Pode-se visualizar a estrutura dômica com inversão de polaridade devido à capa de gás.

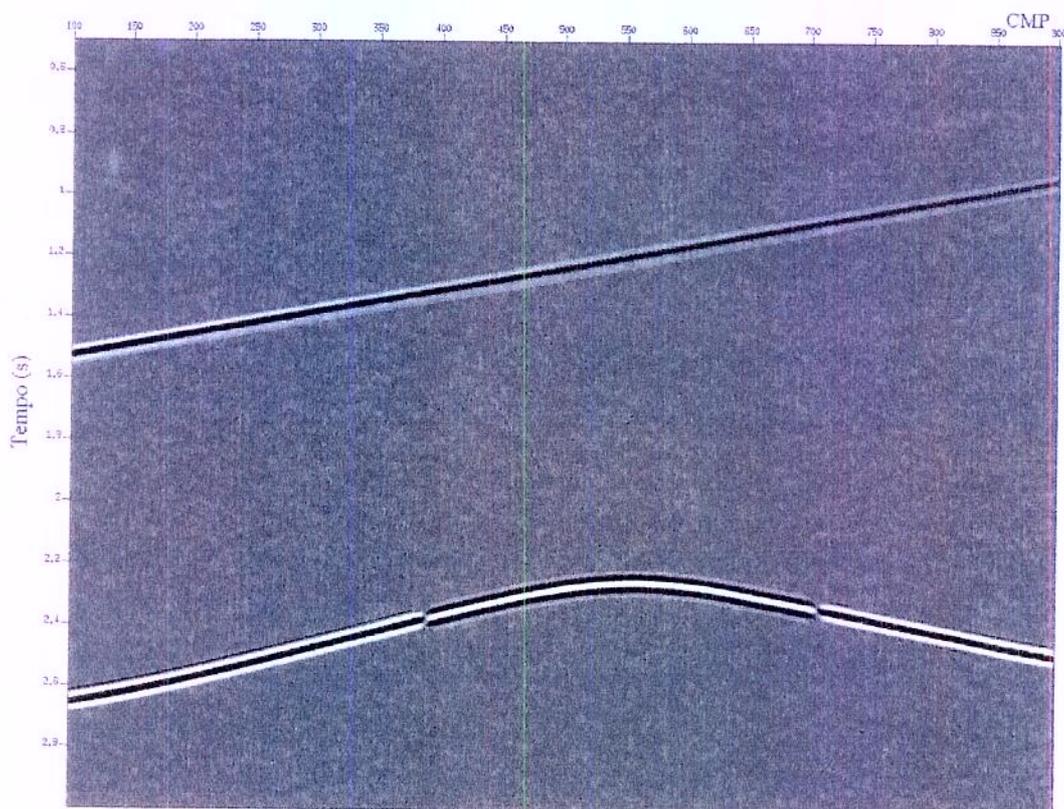


Figura 4.19: Seção empilhada CMP convencional, sem adição de ruído.

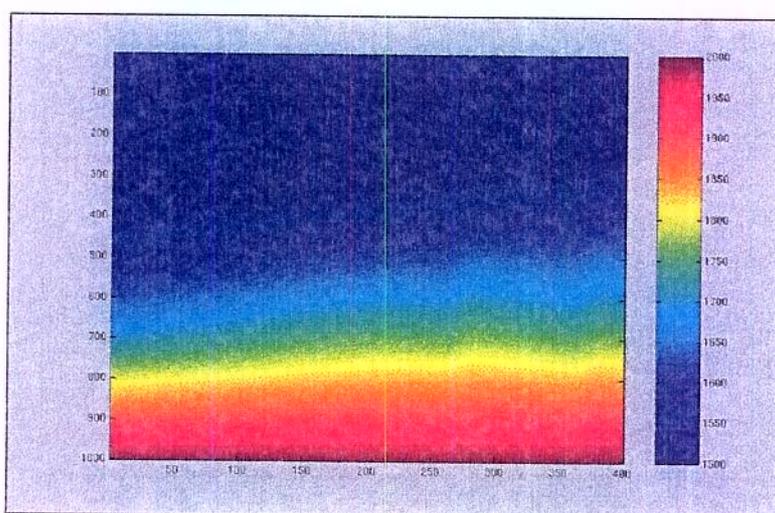


Figura 4.20: Modelo de velocidades utilizado para o empilhamento.

Utilizando uma série de programas criados pela equipe do LGM da UNICAMP, foi executada a migração para afastamento nulo (MZO). Como no modelo anterior, para afastamentos menores, houve um bom imageamento do modelo, mostrado na Figura 4.21. Já nos afastamentos longos (Figura 4.22) nota-se o efeito do estiramento do pulso, principalmente na região mais rasa, como já comentado na Seção 2.1.2.

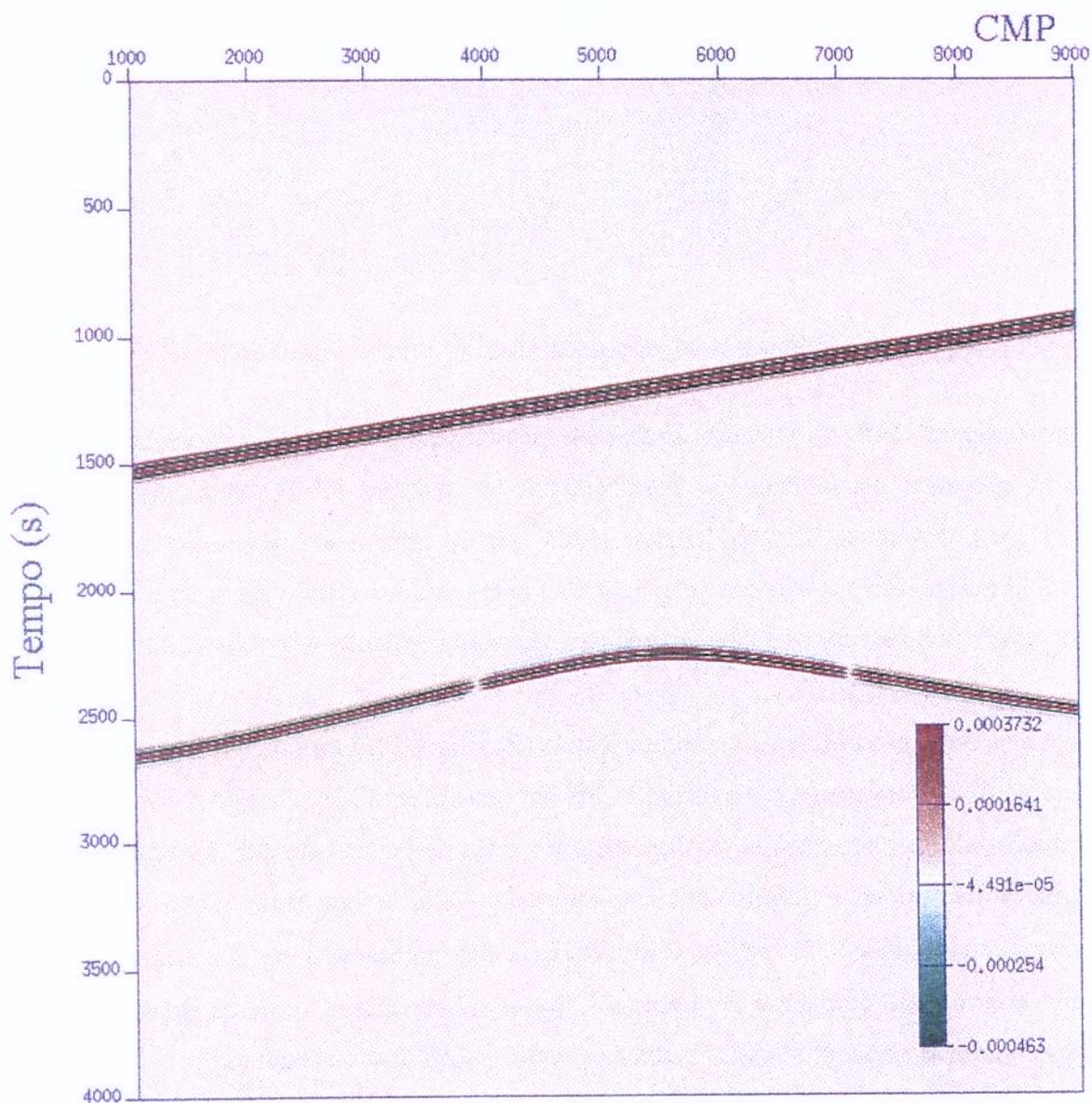


Figura 4.21: Migração para afastamento nulo com afastamentos de 80 m.

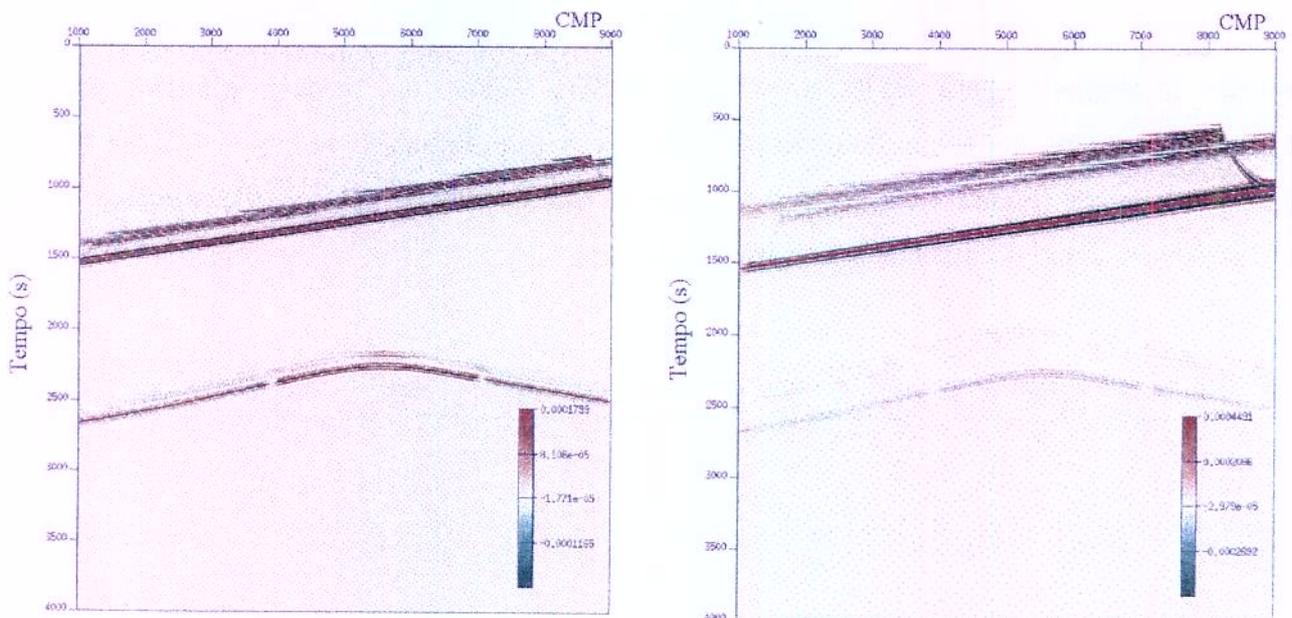


Figura 4.22: Seções ZO obtidas por MZO a partir de afastamentos de 1040 m e 2000 m.

O empilhamento CRS foi aplicado de maneira semelhante à do modelo da seção anterior, ressaltando-se apenas a necessidade de renumeração das famílias CMP, para adequação ao algoritmo de empilhamento CRS utilizado. Desta forma obteve-se, inicialmente a seção empilhada CMP automática mostrada na Figura 4.23, onde pode ser visto o ruído adicionado aos dados. São também obtidas seções do parâmetro q e, conseqüentemente, das velocidades v_{NMO} .

Na segunda etapa são obtidas a seção empilhada CRS inicial (Figura 4.24), onde já se pode perceber uma possível desvantagem do método CRS em relação ao CMP. Devido aos critérios de coerência envolvendo os dados de multicobertura, a inversão da polaridade que, na seção CMP é abrupta, torna-se um pouco indefinida no empilhamento CRS, o que pode piorar também a resolução de pequenas falhas. As seções intermediárias dos parâmetros β_0 , K_N e K_{NIP} iniciais servem como controle de qualidade do processo. Destas observações, torna-se necessário um estudo mais aprofundado do método para melhor entender e melhorar os resultados.

Finalmente, o algoritmo de otimização é executado para produzir os parâmetros CRS finais, bem como a seção empilhada CRS otimizada (Figura 4.25). Esta apresenta muito pouca diferença em relação à seção inicial, inclusive na região onde ocorre a inversão de polaridade, já bem imageada anteriormente.

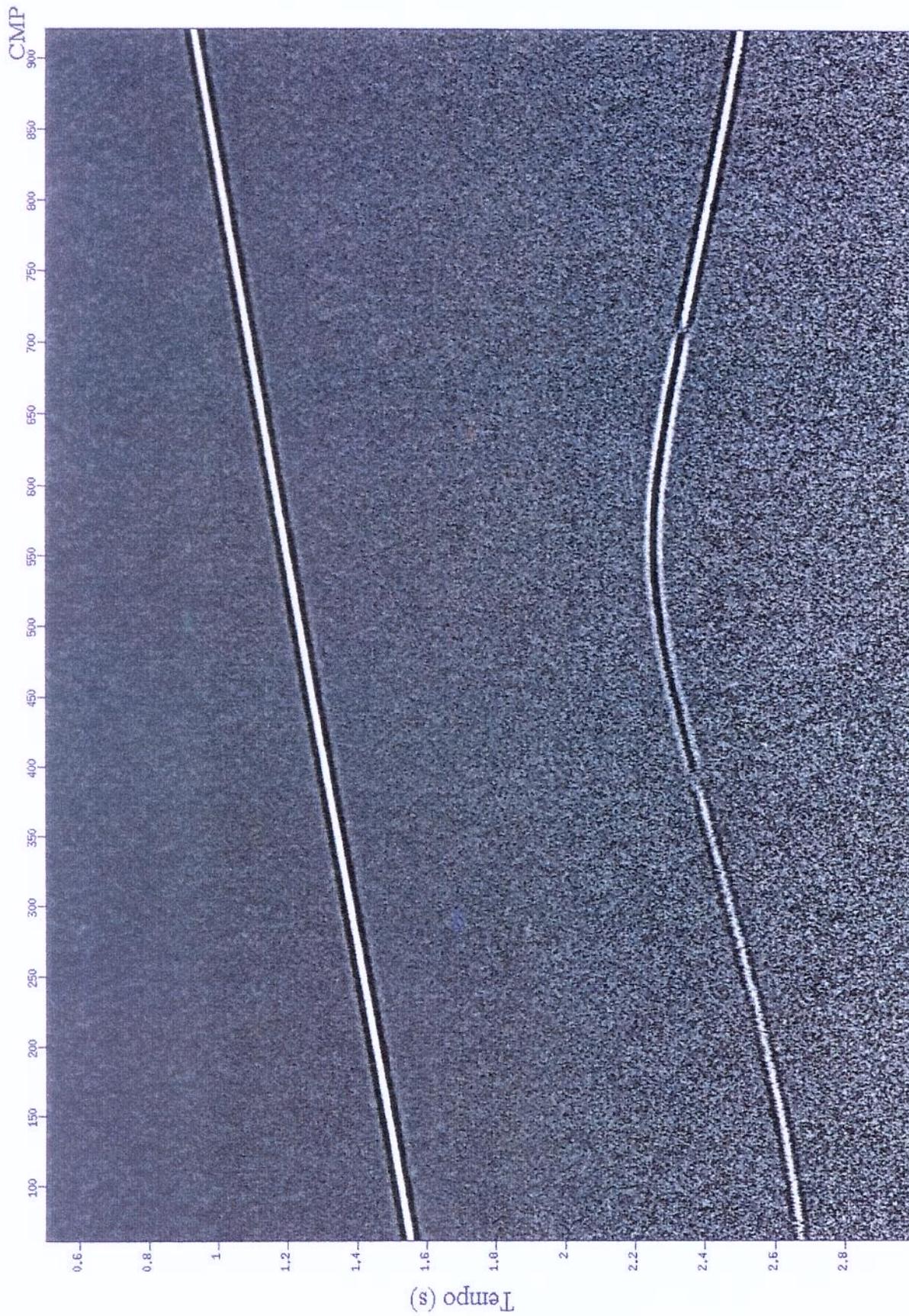


Figura 4.23: Seção empilhada CMP automática.

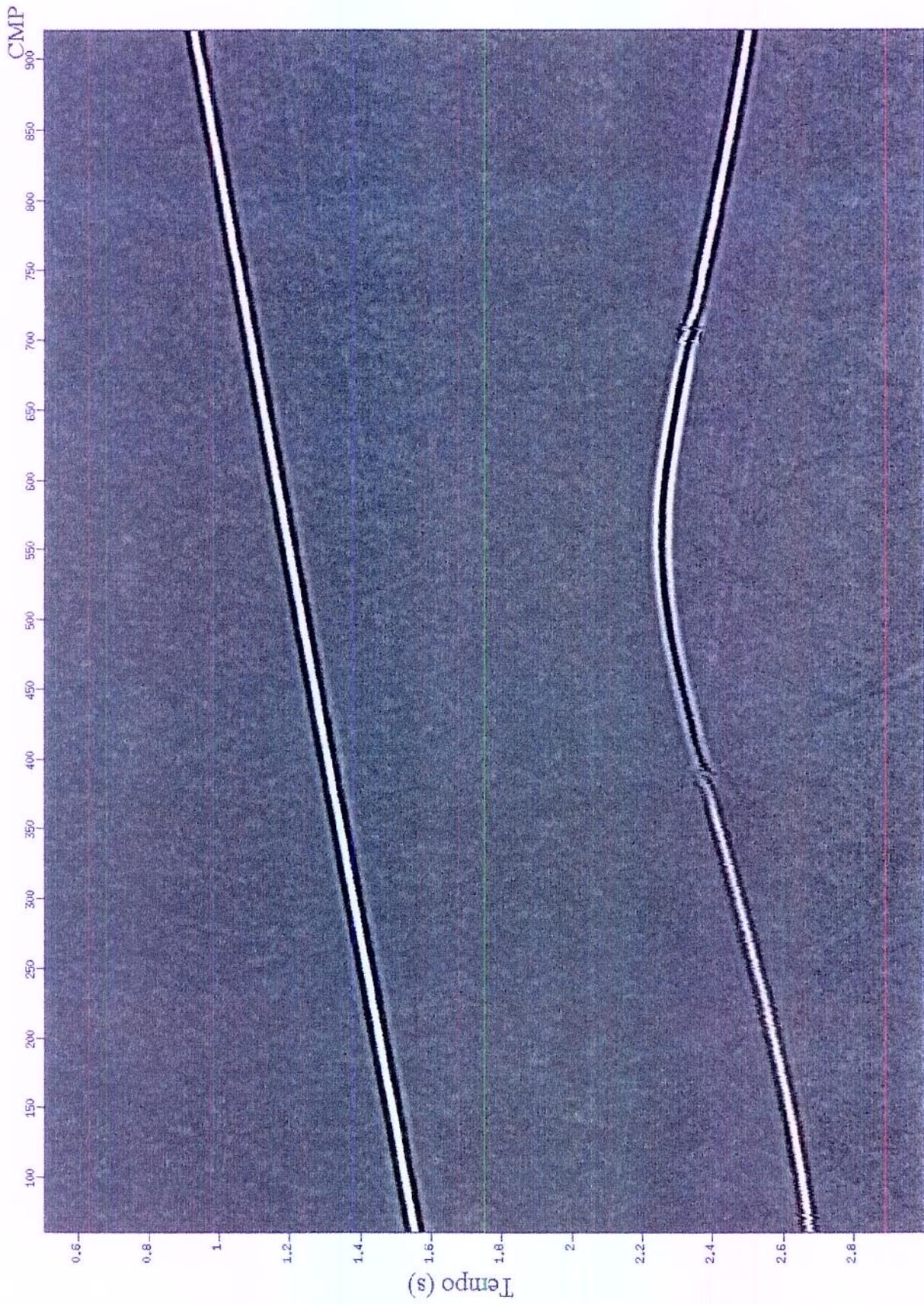


Figura 4.24: Seção empilhada CRS inicial.

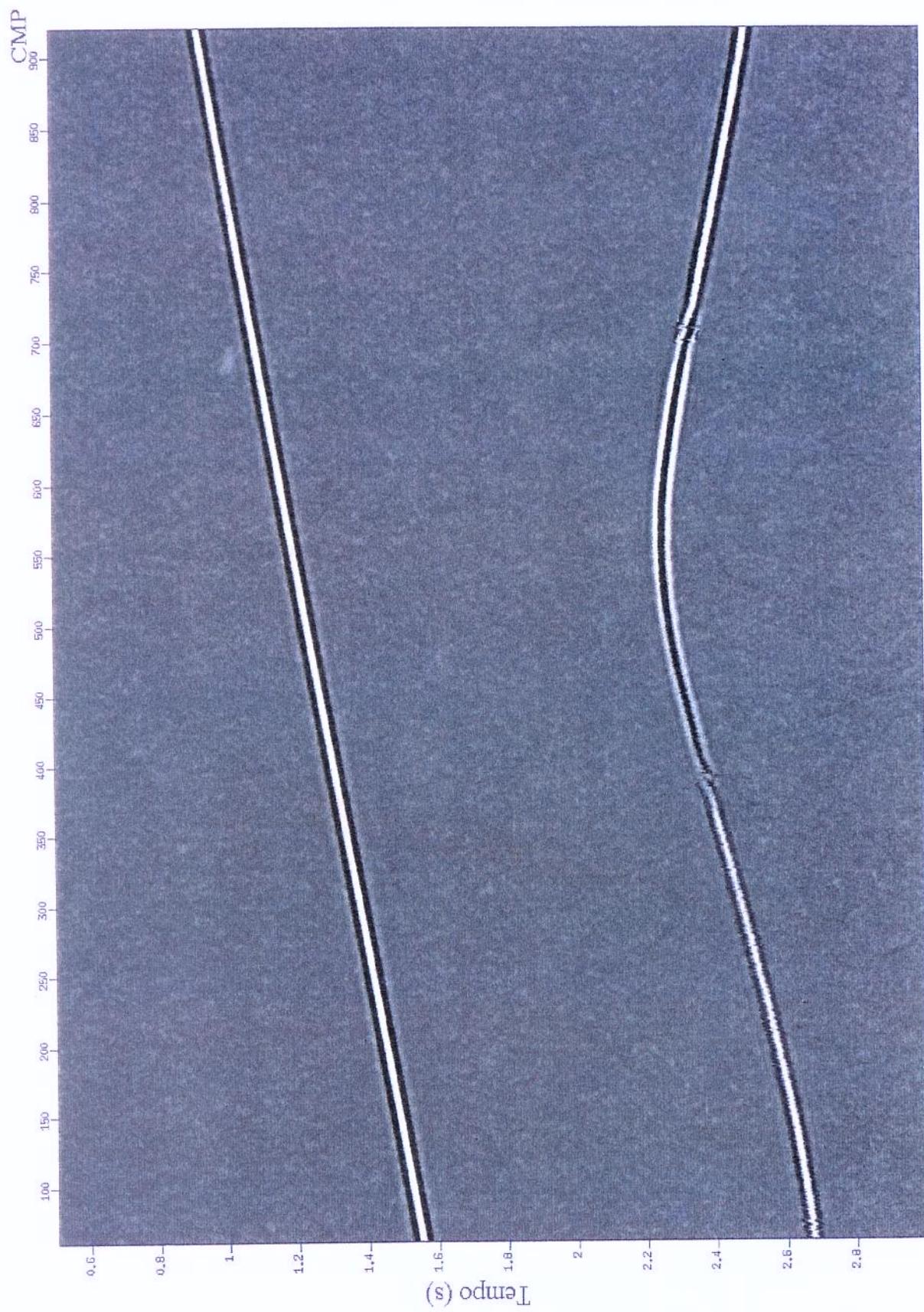


Figura 4.25: Seção empilhada CRS otimizada.

Além das seções ZO simuladas, o método de empilhamento CRS produz várias seções de atributos. São os parâmetros de empilhamento CRS e a medida da coerência que é maximizada no procedimento de empilhamento CRS. A Figura 4.26 exibe a seção de similaridade obtida usando o processo de empilhamento CRS. O valor de similaridade é *plotado* como uma função da coordenada CMP e do tempo de percurso ZO. Os dois eventos de reflexão podem ser identificados claramente na seção de similaridade, com valores maiores que nas regiões de ruídos. Na vizinhança da primeira interface os valores de similaridade estão na ordem de 0.5 a 0.8, devido ao grande contraste de impedância. O que representa a real situação do refletor do fundo do mar. A Figura 4.27 exibe o ângulo de emergência determinado no procedimento de otimização. Este parâmetro é exibido em uma faixa entre -6° e $+4^\circ$. Novamente as regiões de cor cinza, são valores eliminados correspondentes a valores de similaridade menores que 0.02. As curvaturas das frentes de *onda-N* e *NIP* são traçadas na Figura 4.28 e Figura 4.29, respectivamente. A curvatura da frente de *onda-N* representa muito bem a curvatura do refletor, veja por exemplo os valores próximos de zero para o refletor plano da primeira interface. Como no caso anterior, a curvatura da frente de *onda-NIP* tende a diminuir com tempo de percurso ZO crescente. A Figura 4.30 mostra o segundo refletor em detalhe.

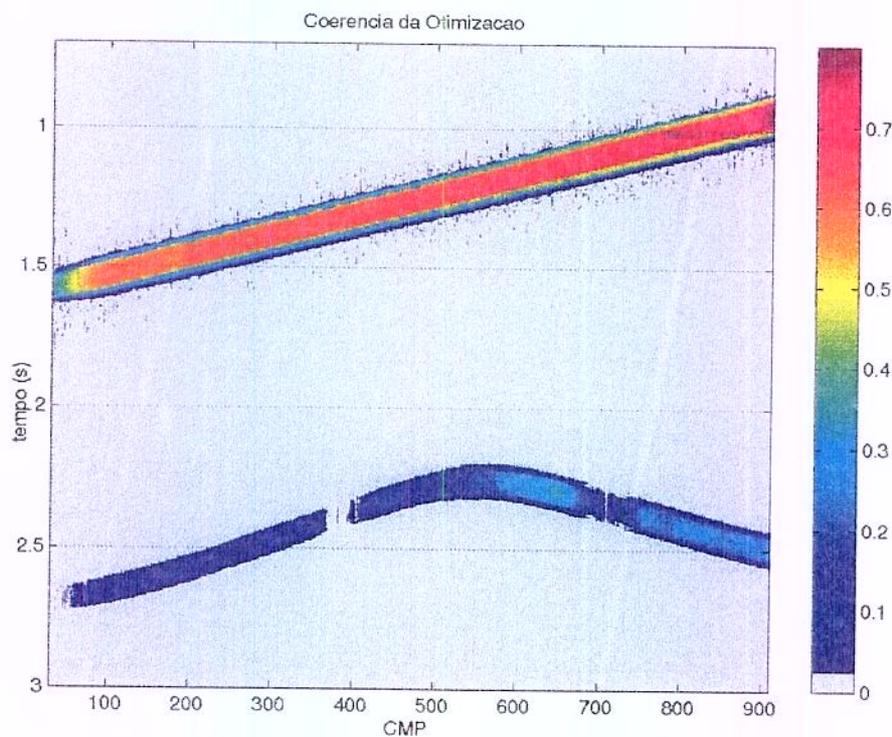


Figura 4.26: Seção de coerência calculada durante a otimização.

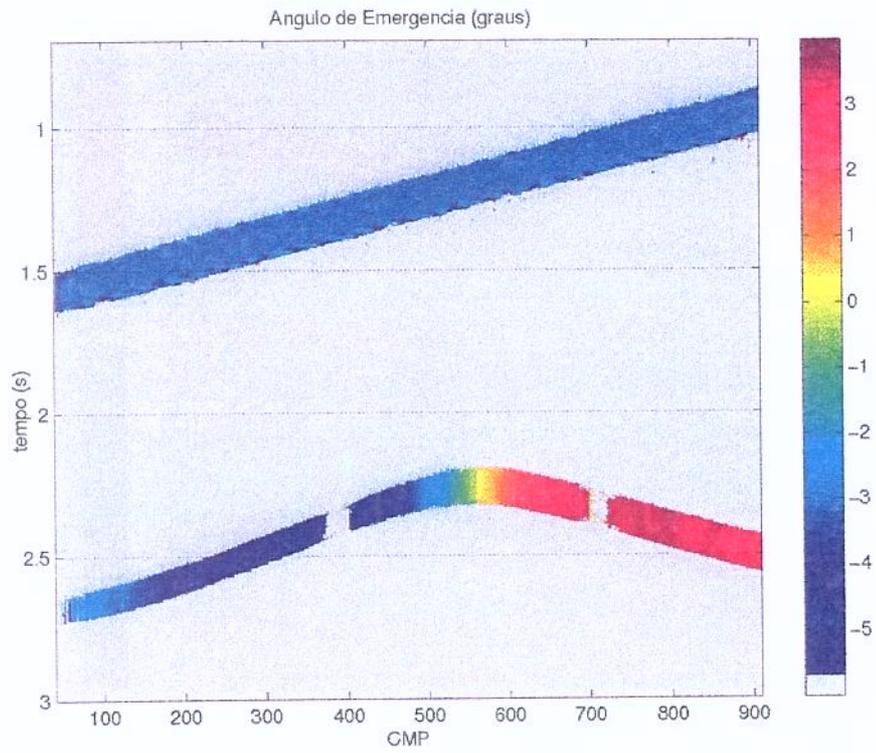


Figura 4.27: Seção de ângulo de emergência β_0 .

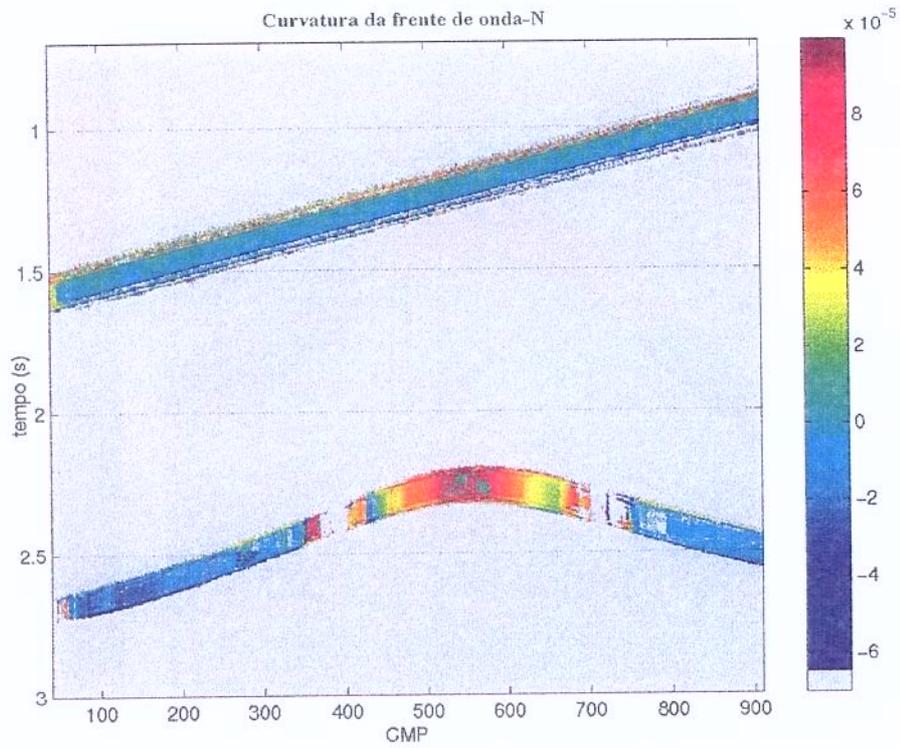


Figura 4.28: Seção de curvatura da frente de *onda-N* K_N .

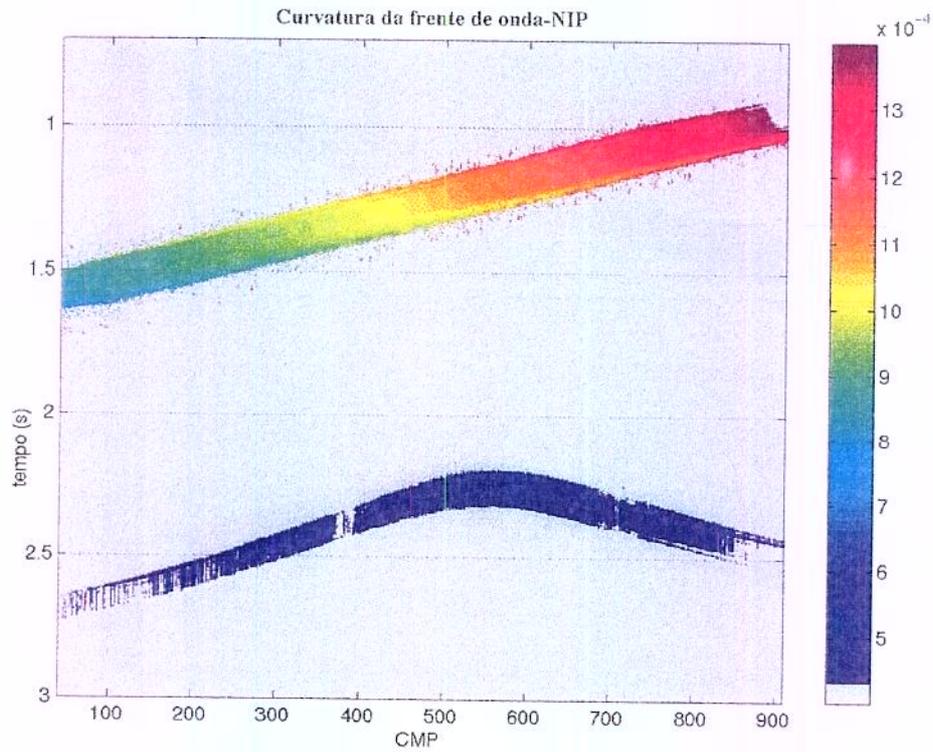


Figura 4.29: Seção de curvatura da frente de *onda-NIP* K_{NIP} .

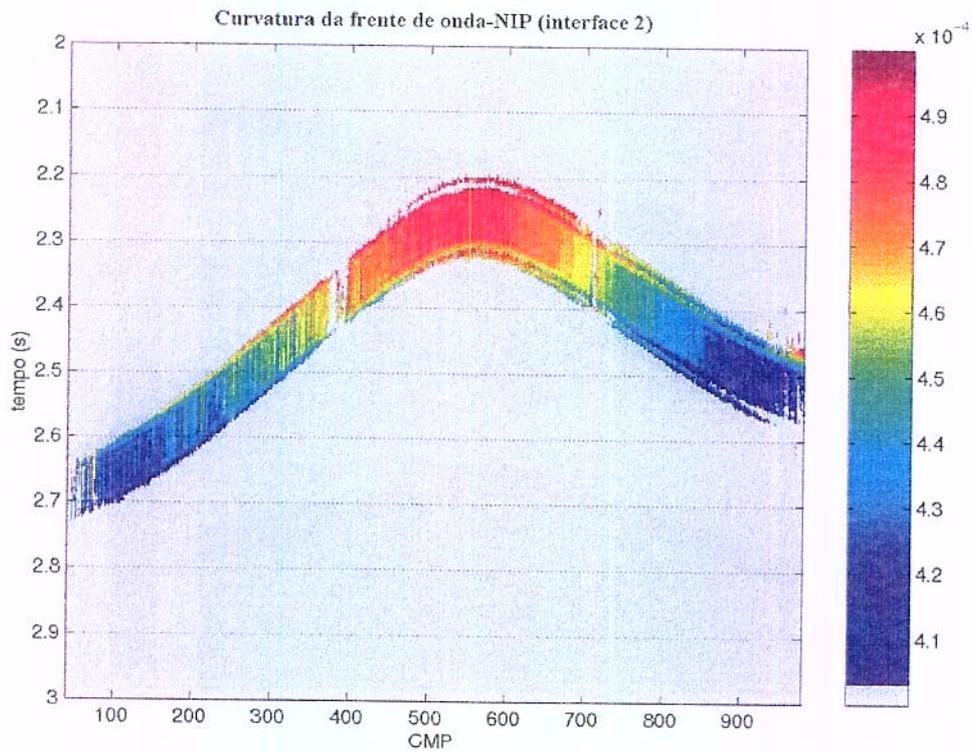


Figura 4.30: Seção de curvatura da frente de *onda-NIP* K_{NIP} em detalhe da segunda camada.

O tempo de CPU utilizado para empilhar este modelo com o método CRS com o mesmo hardware foi de aproximadamente 16 horas, devido ao maior número de amostras.

4.2 Dado Real

Nós vimos na seção anterior que o empilhamento CRS produz resultados muito bons aplicados a dados sintéticos. A precisão do procedimento de empilhamento CRS foi justificada por uma comparação de parâmetros de empilhamento CRS exatos com os seus correspondentes calculados pelo método. Como um primeiro teste, dados sintéticos são muito úteis. Eles permitem remover efeitos não desejados como múltiplas, ondas convertidas, ruído de aquisição e geometria de aquisição irregular e, assim, eles permitem focalizar no comportamento intrínseco do método sob investigação. Porém, o último teste para qualquer método de processamento sísmico novo é a aplicação a dados reais. O método tem que demonstrar sua robustez na presença de ruído não-coerente e coerente. Esta seção mostra a aplicação do empilhamento CRS a um dado marítimo.

A PETROBRAS forneceu gentilmente um dado multicobertura marítimo 2D extraído de uma aquisição 3D, onde se pode visualizar uma bacia sedimentar com mergulhos discordantes. A linha sísmica 2D possui aproximadamente 18,7 km de comprimento coberta por 750 posições de CMP. O dados tem uma multiplicidade nominal de 128. Os parâmetros de aquisição destes dados sísmicos estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Parâmetros de aquisição para o dado marítimo real.

CMP's	1307 - 2057
afastamentos	193 – 4168 m
Intervalo de receptor	25 m
Nº de receptores	160
Intervalo de tiro	37,5 m
Intervalo de CMP's	25 m
Intervalo de amostragem	4 ms
Tempo de registro	5 s

Os dados foram pré-processados, com aplicação aos dados de correção de espalhamento geométrico, deconvolução com consistência em superfície e supressão de múltiplas. Os dados são de qualidade muito alta como mostrado na Figura 4.31 para quatro famílias CMP escolhidas como exemplo.

Foram disponibilizados também os dados originais sem supressão de múltiplas, para que se pudesse avaliar o comportamento do empilhamento CRS nesta situação.

O empilhamento CMP convencional na Figura 4.32 revela uma estrutura com mergulhos suaves dos estratos em subsuperfície.

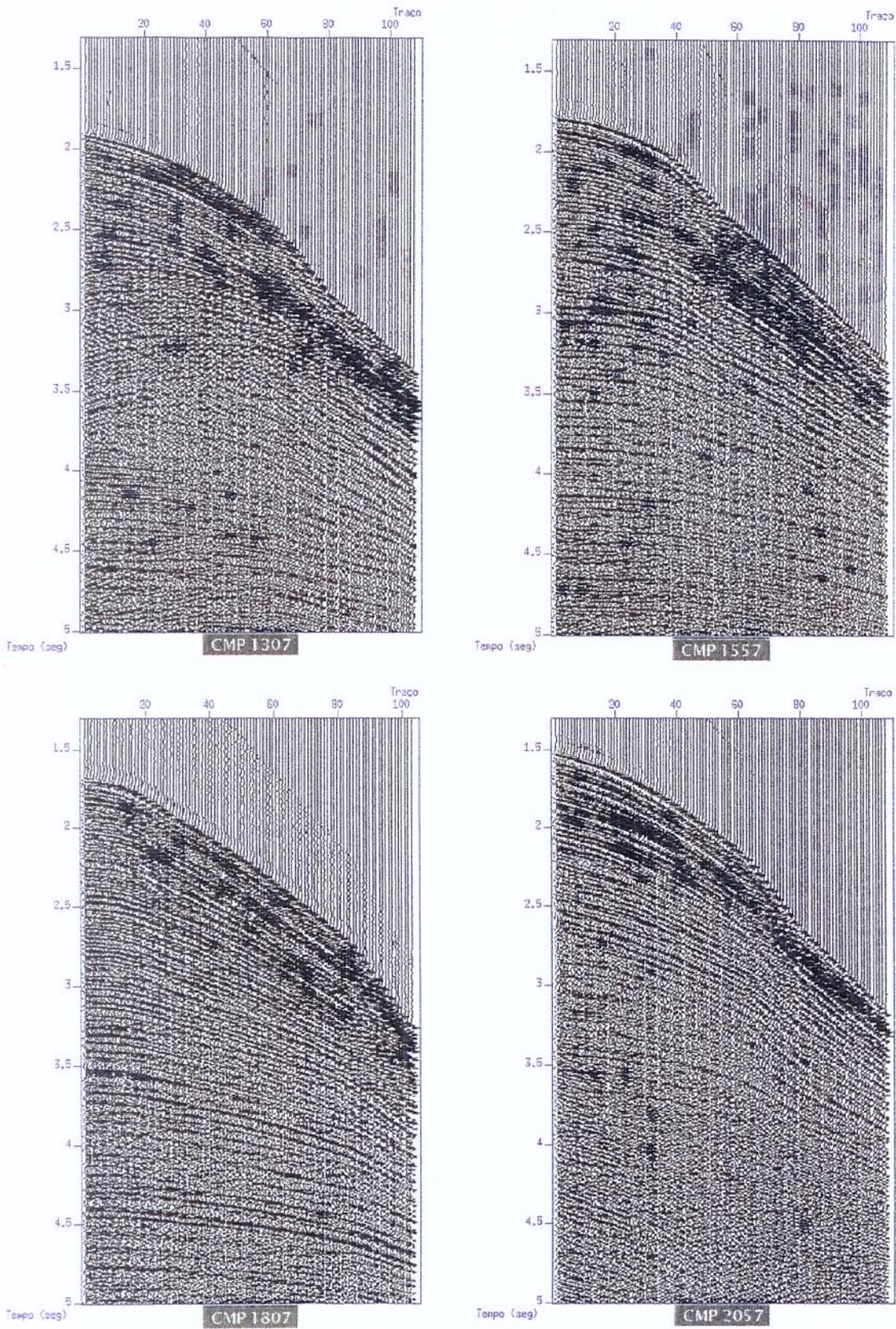


Figura 4.31: Exemplos de famílias CMP extraídas do dado marítimo.



Figura 4.32: Seção empilhada NMO convencional para os dados marítimos sem múltiplas.

A Figura 4.33 mostra o resultado do empilhamento CMP automático e a Figura 4.35, a seção empilhada CRS após a aplicação do algoritmo de otimização. Estas imagens têm que ser comparadas com o resultado do empilhamento convencional na Figura 4.32. Podem ser vistas as principais características dos eventos em todas as três seções ZO simuladas. A geometria em subsuperfície consiste em camadas arqueadas com alguns mergulhos discordantes.

A qualidade da imagem da seção empilhada CMP automática é altamente comparável à da seção empilhada CMP convencional. Por outro lado, a seção empilhada CRS exibe uma qualidade de imagem um pouco diferente. A continuidade dos eventos é aumentada em algumas regiões, sendo que, em outras, houve uma melhor definição de pequenas falhas. A relação S/N é mais alta que para o empilhamento CMP convencional. O canal existente no fundo do mar (na porção esquerda da seção) é melhor imageado no método CRS.

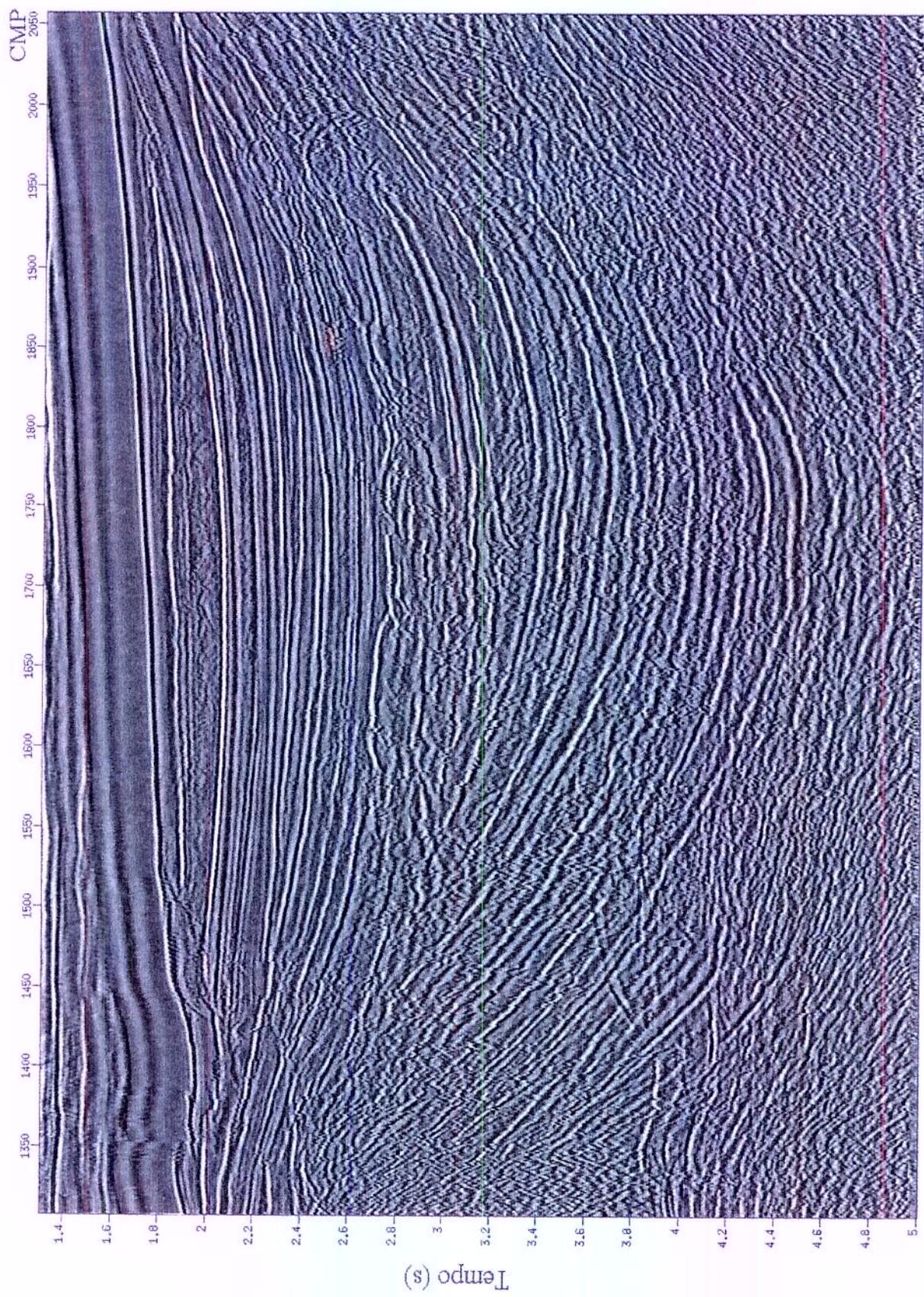


Figura 4.33: Seção empilhada CMP automática para os dados marítimos sem múltiplas.

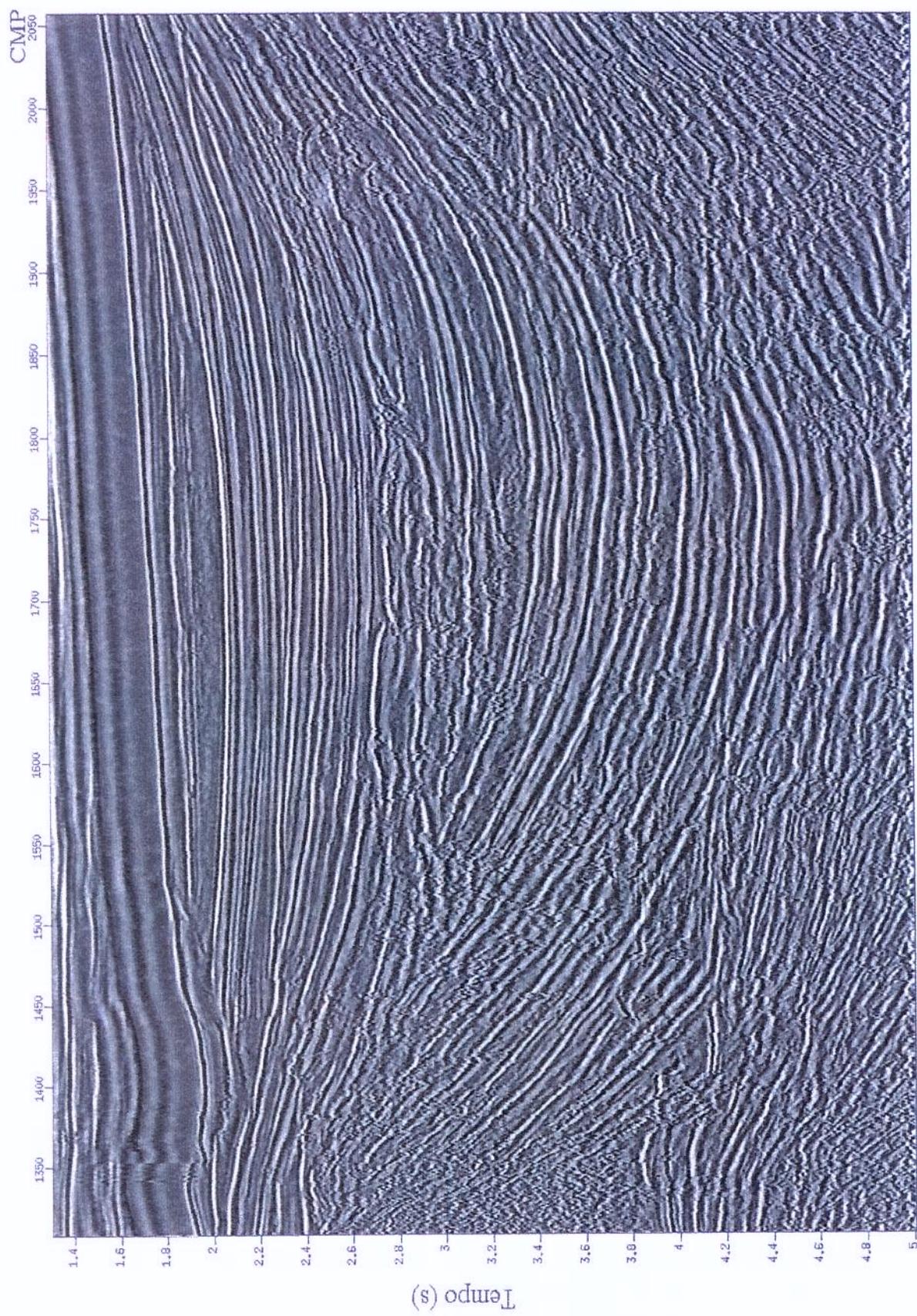


Figura 4.34: Seção empilhada CRS inicial para os dados marítimos sem múltiplas.

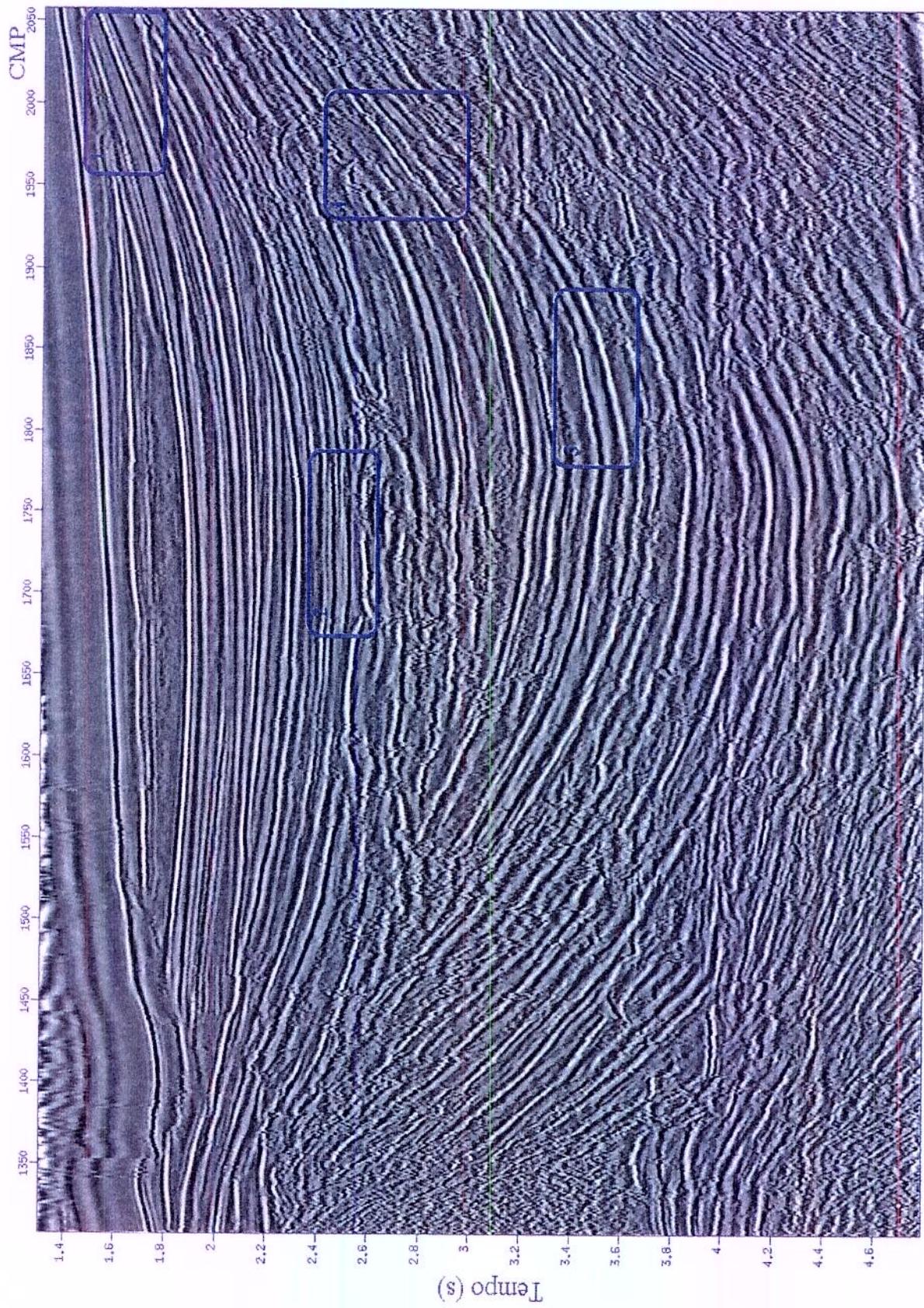


Figura 4.35: Seção empilhada CRS otimizada para os dados marítimos sem múltiplas.

Um aspecto bastante importante a ser ressaltado é a atenuação das difrações observada já na seção empilhada CMP automática, resultante, provavelmente, do conflito entre as difrações e outros eventos, já que a busca por parâmetros precisa escolher apenas um dos eventos. Isso dificultará um processo subsequente de migração pós-empilhamento. Este aspecto precisa ser melhor investigado, sendo que uma solução poderia ser a escolha de um segundo trio de parâmetros no processo de busca de parâmetros ZO, na tentativa de privilegiar as difrações, ou incrementando, de alguma forma, a coerência destes eventos.

Para ressaltar as diferenças, foram marcadas algumas regiões especiais através de retângulos numerados em ambas as seções (CRS otimizada, na Figura 4.35 e NMO convencional, na Figura 4.32). Os retângulos 1, 2 e 3 apresentam áreas onde o aumento de continuidade na seção empilhada CRS é claramente visível. A região retangular 4 foi escolhida para ilustrar o aumento da resolução de algumas falhas pequenas, o que pode ser bastante útil para avaliações em locações de poços horizontais, por exemplo, onde o imageamento de pequenas estruturas é de extrema importância.

Ao final da redação desta dissertação nos foi disponibilizada uma nova versão do programa de empilhamento CRS do WIT, que promete resolver os problemas de mergulhos conflitantes e outros. Esta nova versão foi aplicada sem, no entanto, testes mais aprofundados dos parâmetros de entrada. Pode-se perceber na Figura 4.36, porém, uma melhor qualidade da imagem, com exceção da parte mais rasa da seção. Houve uma melhor definição dos mergulhos conflitantes, mas as difrações ainda não foram bem imageadas.

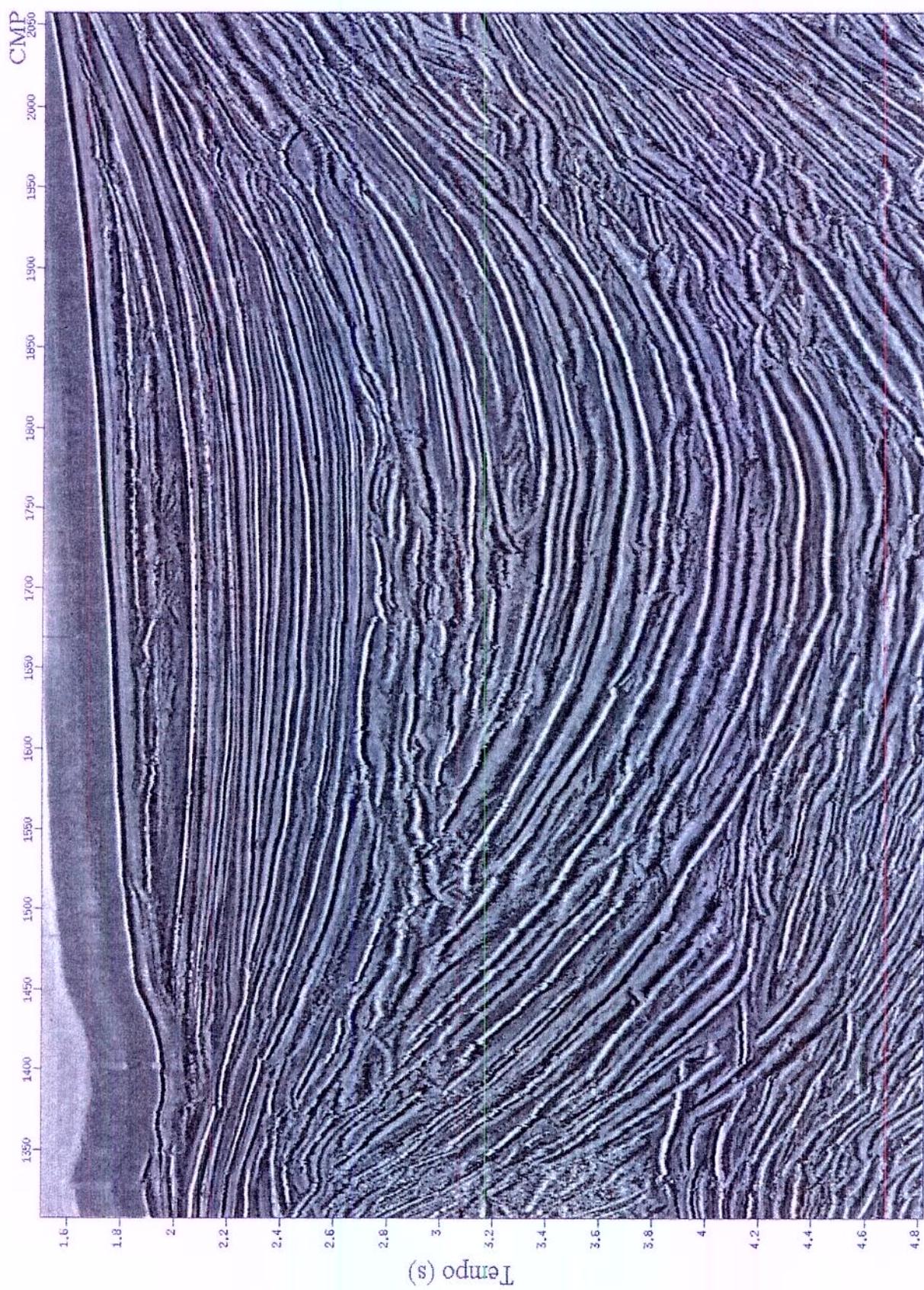


Figura 4.36: Seção empilhada CRS otimizada para os dados marítimos sem múltiplas (nova versão do WIT).

Vários eventos de reflexão principais podem ser identificados claramente na seção de similaridade do empilhamento CRS na Figura 4.37. Com tempo de percurso ZO crescente os valores de similaridade são decrescentes. Isto é devido à relação sinal/ruído decrescente que acompanha o aumento da perda por espalhamento geométrico. Porém, os valores de similaridade ao longo de eventos mais fortes são claramente distinguíveis do ruído envolvente.

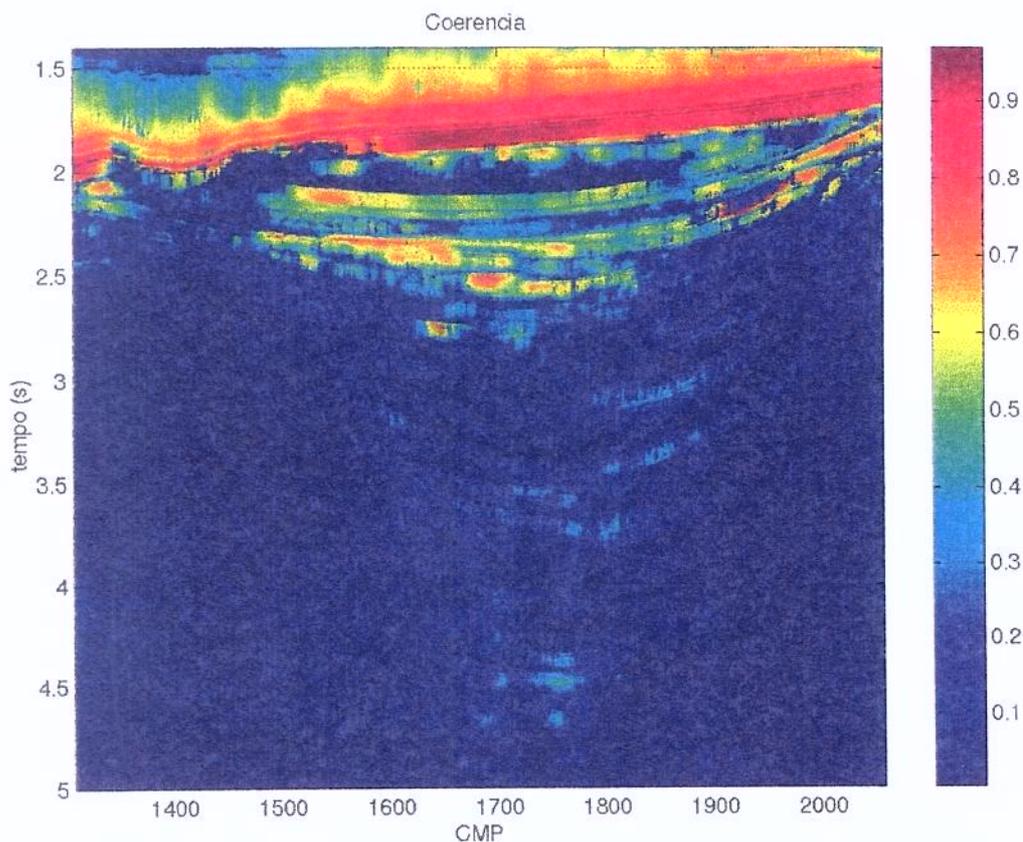


Figura 4.37: Seção de coerência para os dados marítimos sem múltiplas.

A Figura 4.38 ilustra bem os ângulos de emergência entre -10° e 15° visualizados nas seções empilhadas. A cor cinza indica regiões onde o limite do valor de similaridade cai abaixo de 0.05.

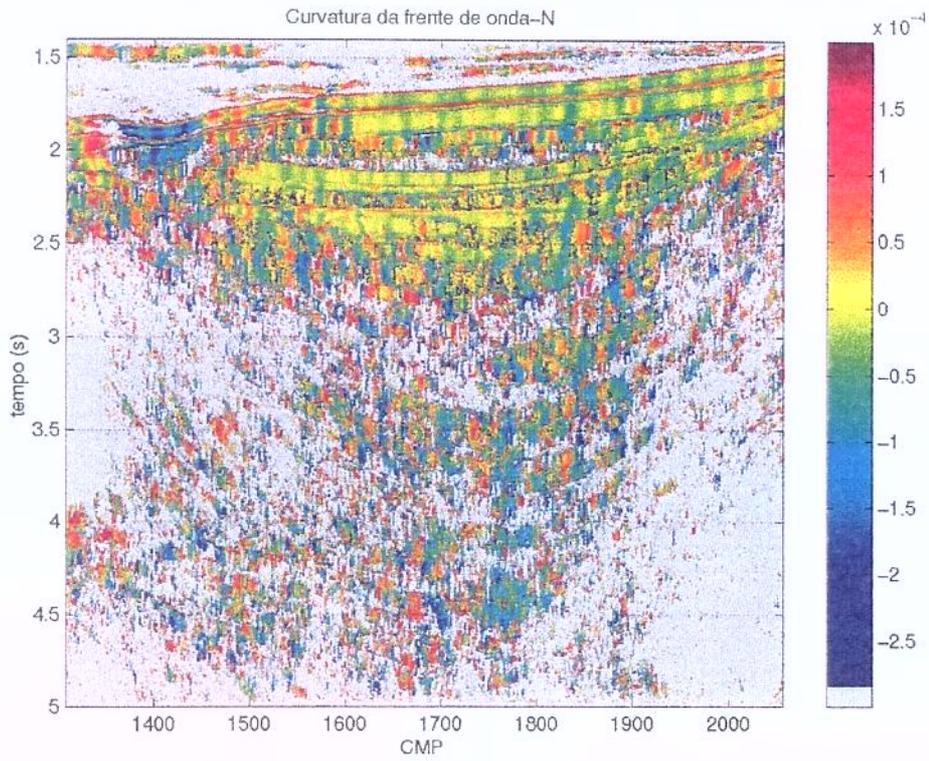


Figura 4.39: Seção de curvatura da frente de *onda-N* após otimização.

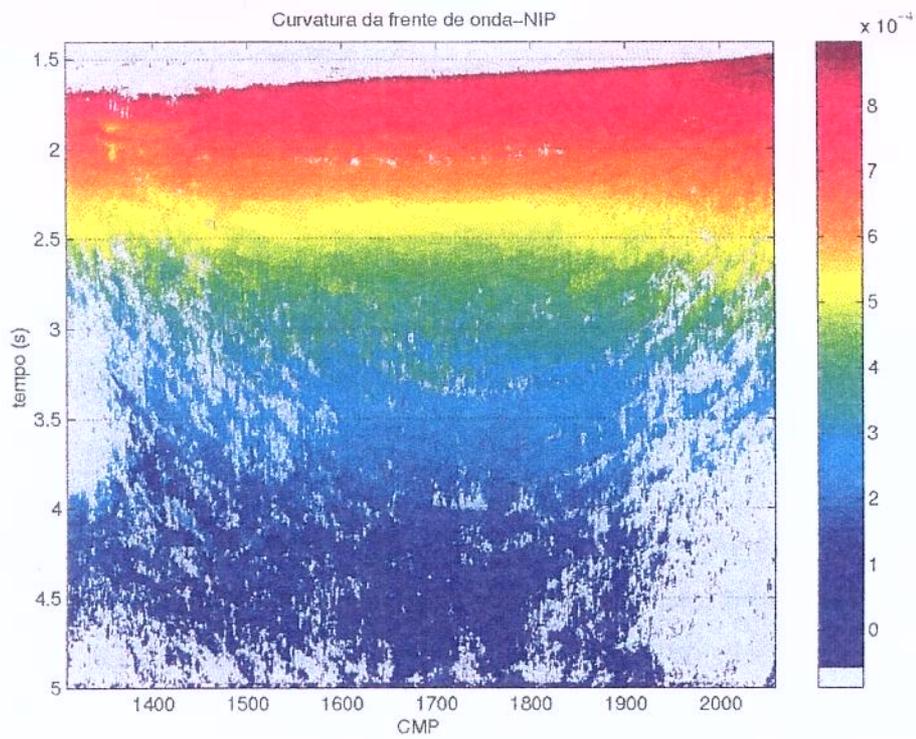


Figura 4.40: Seção de curvatura da frente de *onda-NIP* após otimização.

Finalmente, a Figura 4.41 ilustra o número de traços que foram usados pelo empilhamento CMP Automático e o Empilhamento CRS para simular uma amostra do tempo ZO. Até quase 17 vezes mais traços foram usados no método de CRS. Assim, o aumento da relação sinal/ruído das seções de Empilhamento CRS versus seção empilhada CMP automático pode ser explicado e pode creditado, em parte, a este fato.

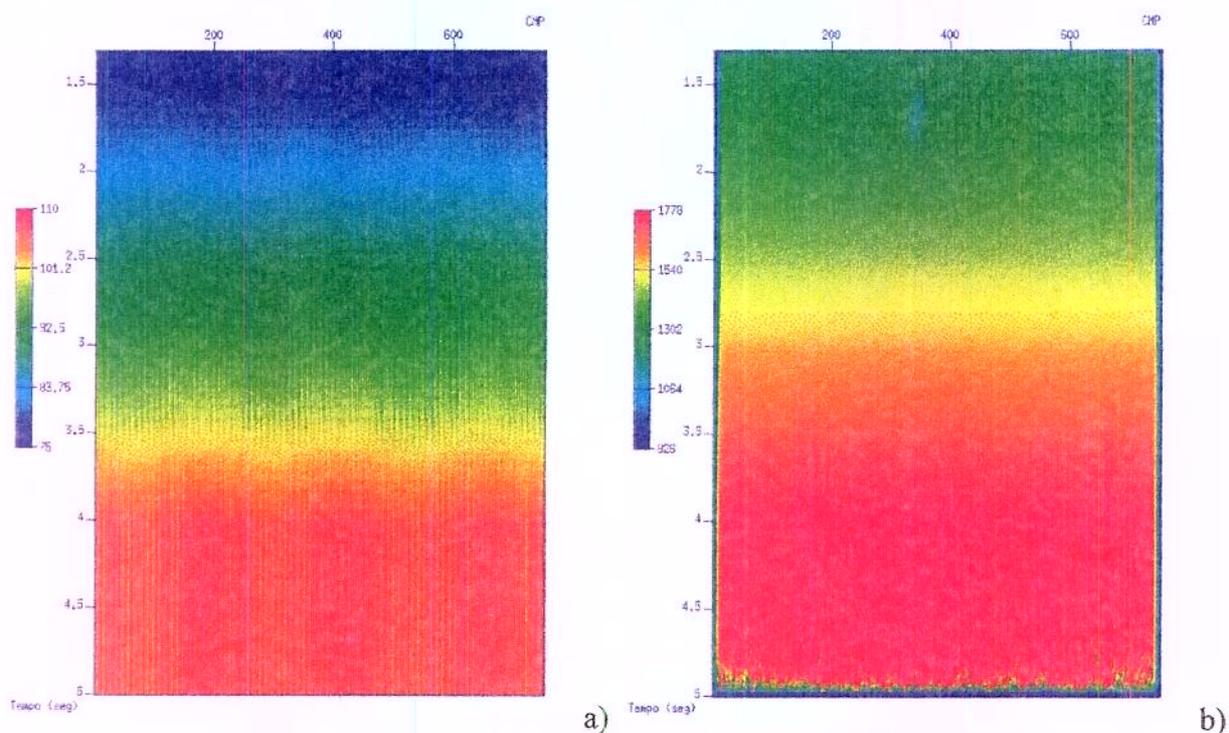


Figura 4.41: Número de traços usados para imagear cada amostra ZO para o empilhamento CMP automático (a) e para o empilhamento CRS (b).

O resultado da aplicação do método CRS nos dados com múltiplas é apresentado na Figura 4.42, onde se nota, que o empilhamento privilegiou também as múltiplas, que foram bem imageadas. Talvez, utilizando parâmetros de processamento mais adequados para o sinal de interesse, seja possível reverter isso em testes posteriores.

O método de empilhamento convencional NMO suprime grande parte das múltiplas. Isto se deve ao modelo de velocidades iterativamente construído, que é usado para corrigir o NMO. O usuário que constrói o modelo de velocidades pode rejeitar pares (t_0, v_{NMO}) que obviamente pertencem a múltiplas, ou seja, eventos de baixa velocidade no espectro de velocidade com mesmo tempo t_0 de eventos de velocidade mais alta. Em uma correção de NMO subsequente estes eventos não são horizontalizados e assim são suprimidos no processo de empilhamento.



Figura 4.42: Seção empilhada CRS otimizada para os dados maríimos com múltiplas.

O procedimento automático de busca e empilhamento CRS tenta imagear também as múltiplas. O procedimento CRS busca por parâmetros que maximizem a função-objetivo do empilhamento CRS. Como as múltiplas podem ser descritas pela fórmula de *moveout* hiperbólico da Equação (3.1), o empilhamento CRS encontra também trios de parâmetros de empilhamento para estas múltiplas, já que elas possuem altos valores de coerência (Figura 4.43). A implementação do método utilizada neste trabalho não permitiu intervenção do usuário para, por exemplo, limitar os parâmetros q iniciais gerados na etapa de empilhamento CMP automático. Com isso o intervalo da busca de parâmetros poderia ser limitado para produzir o mesmo efeito de supressão de múltiplas do método de empilhamento convencional. Seriam identificadas múltiplas a partir de um contraste entre velocidades identificadas em um mesmo tempo de percurso ZO e eliminadas. Poderia, também, ser usada uma estimativa inicial de velocidades v_{NMO} para construir uma função limitada para o parâmetro q .

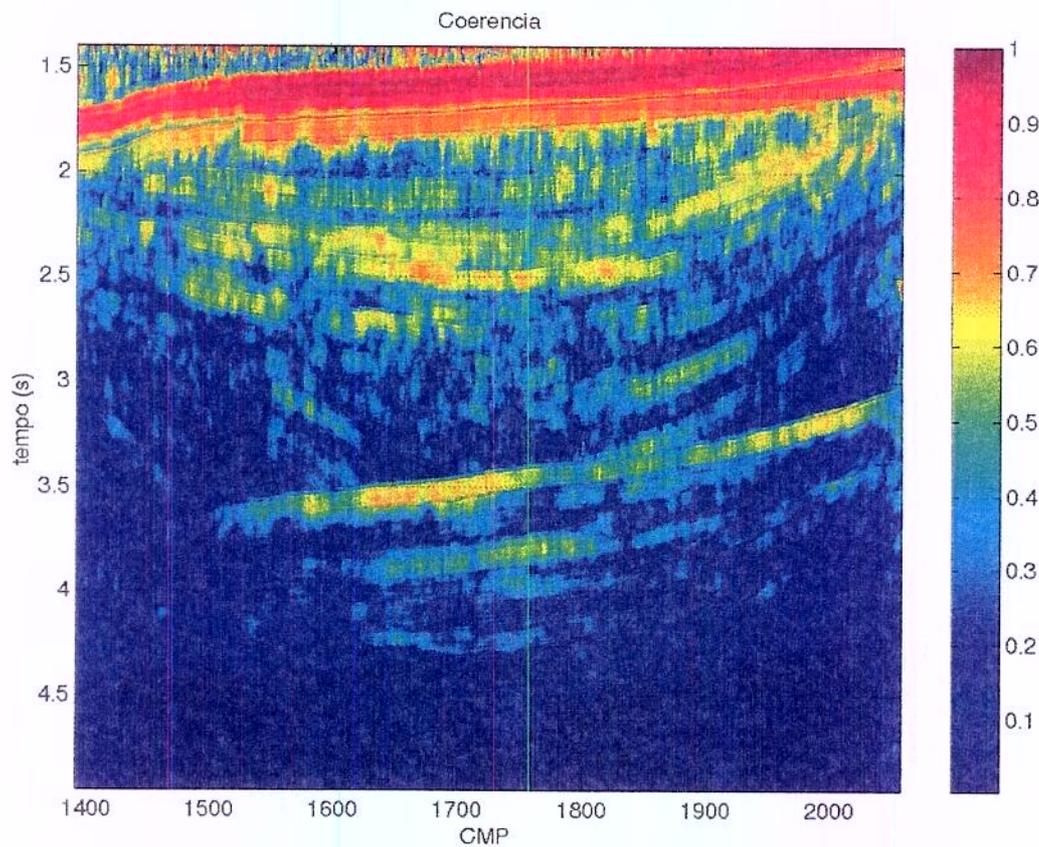


Figura 4.43: Seção de coerência para os dados marítimos com múltiplas.

O tempo de CPU necessário ao empilhamento CRS para o dado marítimo foi de quase 17 horas. Cerca de $\frac{1}{3}$ deste tempo foi utilizado para o empilhamento CRS inicial e o restante para o processo de otimização dos parâmetros. Se o objetivo for apenas a obtenção da seção ZO, a seção empilhada CRS inicial (Figura 4.34) atende muito bem, gerando uma boa imagem sísmica. Havendo a necessidade de inversão do modelo, utilizando os parâmetros CRS, o processo de otimização é obrigatório. Já está disponível um algoritmo mais eficiente de otimização por Gradiente Projetado Espectral, para a estimativa final dos parâmetros, em fase de implementação por Birgin et. al. (1999).

A partir dos resultados apresentados nas aplicações acima se pode concluir que o empilhamento CRS permite simular uma seção ZO até mesmo para um meio heterogêneo e para uma baixa relação S/N. Além disso, como um subproduto do empilhamento CRS, obtemos os parâmetros da *onda-NIP* (raios de curvatura e ângulo de emergência) que são úteis em procedimentos de inversão para determinar o modelo de macro-velocidades. Está em fase de finalização um algoritmo de inversão do modelo desenvolvido por Ricardo Biloti, do LGM – UNICAMP. Em contraste, o único resultado do empilhamento CMP é uma seção de afastamento nulo simulada e funções de velocidades de empilhamento em tempo.

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas

O empilhamento CRS é um método de imageamento sísmico independente de modelo de velocidades. Só o conhecimento da velocidade próxima à superfície é requerido. Como resultado de um empilhamento CRS obtém-se, além de cada amostra ZO simulada, atributos do campo de ondas importantes: o ângulo de emergência e os raios de curvatura da frente de *onda NIP* e da normal. Estes atributos podem ser usados subseqüentemente, em implementação já em fase de finalização, para obter uma aproximação do macro modelo de velocidades 2-D não-homogêneo que permite determinar uma imagem no domínio da profundidade.

A aplicação do empilhamento CRS em diversos casos testados recentemente (Müller, 1999; Jäger, 1999; Müller et al., 1998), incluindo este trabalho, mostrou resultados notáveis com relação à seção empilhada e aos atributos de frente de onda determinados. Foram detectadas diferenças significantes em comparação ao resultado do empilhamento NMO/DMO, por exemplo, o aumento na continuidade dos eventos e um substancial aumento na relação S/N.

Neste sentido, as estratégias de empilhamento CRS aqui aplicadas oferecem uma abordagem promissora para melhorar a seção empilhada e permitir uma subseqüente inversão mais precisa. Essa inversão do modelo deve ser testada em breve, assim que houver disponibilidade do algoritmo em fase de finalização.

Em resumo, o método CRS tem as seguintes vantagens sobre o empilhamento CMP padrão:

- não requer um modelo de macro-velocidades prévio.
- utiliza muito mais traços que as famílias CMP do empilhamento convencional. Assim, o método CRS fornece uma seção empilhada mais limpa, com uma melhor relação S/N.
- fornece os parâmetros de frente de onda necessários a uma subsequente inversão do modelo.
- os pulsos sísmicos das reflexões ZO construídas pelo método de CRS não são estirados, se comparados a reflexões ZO verdadeiras (ou seja, a frequência do pulso não é alterada na construção de uma reflexão ZO na seção empilhada final, a partir de uma determinada reflexão em afastamento arbitrário).

As seguintes observações implementacionais tentam responder algumas perguntas que naturalmente surgem ao aplicar o método CRS. Em princípio, devemos sempre suspeitar da implementação atual das estimativas dos parâmetros. Porém, os exemplos de dados sintéticos e reais significantes descritos aqui e na literatura atestam que este é um processo robusto. A seleção de parâmetros foi executada com sucesso em todas as aplicações. É esperado que a expressão de tempo de percurso triparmétrica CRS, na maioria das situações, solucione ou minimize os problemas dos chamados mergulhos conflitantes.

Para isso são necessários mais testes relacionados aos parâmetros de entrada com a versão mais recente do programa de empilhamento CRS de Jürgen Mann, recentemente cedida pelo Wave Institute Technology (WIT). Na realidade, os ângulos de emergência e os raios de curvatura de frente de onda são atributos físicos e geométricos fundamentais, certamente melhor preparados para separar eventos de reflexão distintos que, por exemplo, velocidades de empilhamento obtidas por um empilhamento CMP convencional.

A implementação mais recente do programa de empilhamento CRS permite a realização de uma busca adicional pelo parâmetro R_{NIP} em caso de mergulhos conflitantes, o que pode resolver, por exemplo, o problema das difrações. Ele traz, também, um método de atenuação de múltiplas baseado em percentuais de moveout em relação aos eventos vizinhos. Traz, inclusive uma migração em tempo usando os parâmetros CRS otimizados. Não possível, no entanto testar esta nova implementação do decorrer deste trabalho.

Uma continuação dos testes e estudos pode nos levar a descobrir uma maneira de “rastrear” *spikes* através do operador CRS, melhorando o conhecimento do método. Isso é importante para entender o que acontece, por exemplo, com as amplitudes sísmicas ao longo do processo, já que o imageamento em verdadeira amplitude é cada vez mais requisitado, tanto na exploração como no desenvolvimento de reservatórios de petróleo.

Do ponto de vista de esforço computacional, o empilhamento CRS Inicial é bastante rápido, gerando boa qualidade da imagem. Se a simulação de uma seção ZO for o alvo principal, pode ser usado o empilhamento CRS Inicial, aplicando uma otimização orientada apenas a determinados objetivos, como em regiões de maior complexidade estrutural. Por outro lado, se os parâmetros de empilhamento CRS forem usados como parâmetros de entrada para um processo de inversão para determinar o modelo de velocidades ou outros propósitos, será necessário investir mais tempo de CPU na busca dos melhores parâmetros possíveis.

Uma opção para a implementação do método CRS comercialmente poderia ser, no caso de um reprocessamento, a utilização do modelo de velocidades e da seção ZO já obtidos com o método CMP convencional como entrada para um processo de busca apenas do ângulo de emergência, empilhando a seguir com o uso da Equação (3.7).

No caso de empilhamento CRS para meios 3D, o trio de parâmetros de empilhamento CRS se torna um octeto de parâmetros segundo, Müller (1999). Dois ângulos de emergência definem um raio ZO emergente na superfície e são necessárias três curvaturas para descrever uma frente de onda chegando numa aproximação de segunda-ordem, ou seja, seis valores de curvatura para a *onda-NIP* e para a *onda-N*. Isto produz um total de oito parâmetros que têm que ser determinados.

Isto pode parece ser muito difícil, porém, para configurações de levantamento especiais a dependência de parâmetros pode ser reduzida a dois ou três. Porém, a criação de algoritmos de otimização eficientes está crescendo. Levando em conta que a qualidade da imagem é o fator mais importante de um processo de imageamento, nunca se deve abandonar um processo por causa de suas exigências computacionais. Mesmo porque o atual desenvolvimento do poder de computação permite aplicar estes processos até mesmo facilmente num futuro próximo.

Referências Bibliográficas

Berkovitch, A., Keydar, S., Landa, E., Trachtman, P. Multifocusing in practice. In: 68th Annual International Meeting. *Expanded Abstracts*, Society of Exploration Geophysicists, 1998. p.1748-1751.

Birgin, E. G., Biloti, R., Tygel, M., Santos, L. T. Restricted optimization: a clue to fast and accurate implementation of the common reflection surface stack method. *Journal of Applied Geophysics*, v.42, p.143-155, 1999.

Červený, V., Pšenčík, I. SEIS88. Charles University, Praga, Czechoslovakia.

Cruz, J. C. R., Hubral, P., Tygel, M., Schleicher, J., Höcht, G. The common reflecting element (CRE) method revisited. *Geophysics*, v.65, n.3, p.979-993, may 2000.

de Bazelaire, E. Normal moveout revisited: Inhomogeneous media and curved interface. *Geophysics*, v.53, p.143-157, 1988.

de Bazelaire, E., Viallix, J. R. Normal moveout in focus. *Geophysical Prospecting*, v.42, n.5, p.477-499, 1994.

Deregowski, S. M. What is DMO? *First Break*, v.4, n.7, p.7-24, 1986.

Duarte, O. O. *Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia*. Rio de Janeiro: PETROBRAS/SBGf, 1997, 304p.

- Gelchinsky, B. Homeomorphic imaging in processing and interpretation of seismic data – fundamentals and schemes. In: 59th Annual International Meeting. *Expanded Abstracts*, Society of Exploration Geophysicists, 1989. p.983.
- Hale, D. Dip moveout processing. In Domenico, S. N., Editor, *Course notes series*, v.4, Society of Exploration Geophysicists, 1991.
- Hubral, P. Computing true-amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, v.48, p.1051-1062, august 1983.
- Hubral, P., Krey, T. *Interval velocities from seismic reflection time measurements*. Society of Exploration Geophysicists, 1980, 203p.
- Jäger, R. The common reflection surface stack – Theory and application. *Master's thesis*. Karlsruhe University, 1999, 125p.
- Judson, D. R., Schultz, P. S., Sherwood, J. W. C. Equalizing the stacking velocities of dipping events via DEVILISH. In: 48th Annual International Meeting. *Expanded Abstracts*, Society of Exploration Geophysicists, 1978.
- Levin, F. K. Apparent velocity from dipping interface reflections. *Geophysics*, v.36, p.510-516, 1971.
- Lindseth, R. O. *Digital processing of geophysical data: A review*. Society of Exploration Geophysicists, 1987, 526p.
- Mayne, W. L. Common reflection point horizontal data stacking techniques. *Geophysics*, v.27, n.6, p.927-938, 1962.
- Mann, J. Common reflection surface stack. *User's manual – version 3.4*. Geophysical Institute, University of Karlsruhe, 1999.

- Müller, T. Common reflection surface stacking. In: *Wave Inversion Technology Report N^o. 1*, Geophysical Institute, Karlsruhe University, 1998. p.69-75.
- Müller, T. The common reflection surface stack method – Seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model. *Ph. D. thesis*. Karlsruhe University, 1999, 132p.
- Müller, T., Jäger, R., Höcht, G. Common reflection surface stacking method - Imaging with an unknown velocity model. In: 68th Annual International Meeting. *Expanded Abstracts*, Society of Exploration Geophysicists, 1998. p.1764-1767.
- Nelder, J. A., Mead, R. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, v.7, p.308-313, 1965.
- Scales, J. A. *Theory of seismic imaging*. Golden: Center for Wave Phenomena – Colorado School of Mines, 1994.
- Schleicher, J., Tygel, M., Hubral, P. Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3-D media. *Geophysical Prospecting*, v.41, p.495-514, 1993.
- Sheriff, R. E. *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1991, 376p.
- Taner, M.T., Koehler, F. Velocity spectra - Digital computer derivation and application of velocity function. *Geophysics*, v.34, p.859-881, 1969.
- Thore, P. D., de Bazelaire, E., Ray, M. P. Three-parameter equation: An efficient tool to enhance the stack. *Geophysics*, v.59, n.2, p.297-308, 1994.
- Tygel, M., Müller, T., Hubral, P., Schleicher, J. Eigenwave based multiparameter traveltimes expansions. In: 67th Annual International Meeting. *Expanded Abstracts*, Society of Exploration Geophysicists, 1997. p.1770-1773.

Tygel, M., Santos, L. T., Schleicher, J. Multifocus moveout revisited: Derivations and alternative expansions. *Journal of Applied Geophysics*, v.42, p.319-331, 1999.

Tygel, M., Schleicher, J., Hubral, P., Santos, L. T. 2.5-D true-amplitude Kirchhoff migration to zero-offset in laterally inhomogeneous media. *Geophysics*, v.63, n.2, p.557-573, 1998.

Ursin, B. Quadratic wavefront and travelttime approximations in inhomogeneous layered media with curved interfaces. *Geophysics*, v.47, n.7, p.1012-1021, 1982.

Yilmaz, O. *Seismic data processing*. Society of Exploration Geophysicists, 1987, 526p.