



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PROCESSAMENTO E IMAGEAMENTO DE DADOS  
SÍSMICOS MARINHOS**

HAMILTON MONTEIRO DE LIMA JÚNIOR

BELÉM  
2010

HAMILTON MONTEIRO DE LIMA JÚNIOR

**PROCESSAMENTO E IMAGEAMENTO DE DADOS  
SÍSMICOS MARINHOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, para obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Sísmicos

Orientador: Prof. Dr. Lourenildo Willame  
Barbosa Leite

BELÉM  
2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro Garcia de Montalvão

L732p Lima Júnior, Hamilton Monteiro de  
Processamento e imageamento de dados sísmicos marinhos /  
Hamilton Monteiro de Lima Júnior; Orientador: Lourenildo Williame  
Barbosa Leite 2010  
116 f. : il.  
Dissertação (Mestrado em Geofísica) Programa de Pós-Graduação  
em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.  
1. Empilhamento sísmico. 2. Imageamento. 3. Migração. I.  
Universidade Federal do Pará II. Leite, Lourenildo W. B., *orient.* III.  
Título.

CDD 20º ed.: 622.1592

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

PROCESSAMENTO E IMAGEAMENTO DE DADOS  
SÍSMICOS MARINHOS

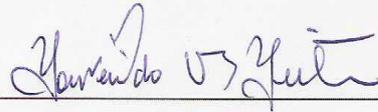
DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

HAMILTON MONTEIRO DE LIMA JÚNIOR

COMO REQUISITO À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

Data de Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Lourenildo Willame Barbosa Leite - Orientador



Prof. Dr. Jessé Carvalho Costa - Membro



Dr. Björn Zeno Heilmann - Membro

BELÉM  
2010

*Dedico este trabalho a meu pai Hamilton  
Monteiro de Lima (in memoriam) por todo  
incentivo e dedicação.  
A minha mãe Maria José, a minha esposa  
Suellen Cristina e a minha filha Maria  
Helena por todo o amor e carinho.*

## AGRADECIMENTOS

Ao orientador, Prof. Dr. Lourenildo W. B. Leite, por todo o conhecimento e experiência repassada ao longo destes anos de convivência, e por todo o apoio para que este trabalho pudesse ser realizado.

Ao Dr. Björn Zeno Heilmann por sua colaboração neste trabalho com uma ajuda preciosa com a tecnologia CRS.

Aos professores Dr. Jessé Carvalho Costa e Dra. Ellen Nazaré Gomes por todos os conselhos e sugestões para melhoria do trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro durante os estudos, e à FINEP e PETROBRAS pelo apoio à pesquisa.

Ao Prof. Dr. André Andrade por todas as conversas esclarecedoras e divertidas.

A Felipe Terra e ao Prof. Dr. Amin Bassrei pela atenuação das múltiplas relacionadas a superfície livre.

A todos os meus colegas, aos professores do Curso, aos meus amigos e familiares que contribuíram de maneira direta ou indireta para o término deste trabalho.

*“A diferença entre a teoria e a prática é  
menor na teoria do que na prática”.*  
*(Folclore)*

## RESUMO

O presente trabalho constou do processamento e imageamento de dados sísmicos marinhos reais obtidos na plataforma continental oriental atlântica brasileira da Bacia do Jequitinhonha. A etapa de pré-processamento foi realizada em parceria com o Grupo de Pesquisa em Sísmica da Universidade Federal de Bahia que aplicou o método de atenuação de múltiplas denominado SRME ao dado. Este dado foi submetido em seguida à aplicação de várias outras técnicas utilizando o pacote livre da CWP/SU. A etapa de processamento WIT/CRS constou da aplicação de três fluxogramas que utilizam a tecnologia CRS para simulação de seções ZO. Estes fluxogramas diferiram segundo a inclusão sistemática dos processos denominados Correção Residual Estática e Densificação do Dado Pré-empilhamento. Os resultados dos três fluxogramas foram comparados entre si com o objetivo de mostrar a evolução da qualidade visual das seções resultantes através da continuidade dos eventos traço-a-traço e da relação sinal/ruído. Além de seção CRS empilhada, é também obtido uma seção de migração CRS que tem a intenção de ser usada para interpretação geológica, com o objetivo de promover melhores condições quanto a indicação de uma possível perfuração com sucesso.

## ABSTRACT

The work consisted of the processing and imaging of real seismic data obtained over the marine continental shelf of eastern Brazilian Atlantic of the Jequitinhonha Basin. The preprocessing stage was performed in partnership with the Seismic Research Group of Federal University of Bahia, that applied the SRME method for multiple attenuation of the data. In the sequel, this data was submitted to several processing techniques using the free package CWP/SU. The CRS processing stage consisted of the application of three workflows that used the CRS technology for simulating ZO sections. These workflows differed according to the systematic inclusion of the processes named Residual Static Correction and Pre-stack Data Enhancement. The results of these three workflows were compared with each other to show the evolution of the visual quality of the resulting sections through the event continuity, as well as the signal-to-noise ratio. In addition to the stacked sections, it was also obtained the CRS migration sections that are intended to be used for plausible geological interpretation aiming at a possible indication for a successful drilling.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 Geometria do levantamento fonte-comum onde $V$ representa a velocidade da camada. ....	22
Figura 2.2 Geometria do levantamento ponto-médio-comum onde $V$ representa a velocidade na camada. ....	22
Figura 2.3 Geometria do levantamento afastamento-comum onde $V$ representa a velocidade na camada. ....	23
Figura 2.4 Geometria do levantamento receptor-comum onde $V$ representa a velocidade na camada. ....	23
Figura 2.5 Efeitos físicos relacionados à propagação de ondas sísmicas num meio geológico (adaptado de Sheriff (1975)). ....	24
Figura 2.6 Modelo composto por interfaces plano-horizontais, com camadas homogêneas, isotrópicas, posicionadas entre dois semi-espacos. ....	26
Figura 2.7 Modelo composto por interfaces plano-inclinadas, com camadas homogêneas, isotrópicas, posicionadas entre dois semi-espacos. ....	27
Figura 2.8 Modelo composto por interfaces arbitrariamente curvas, com camadas homogêneas, isotrópicas, posicionadas entre dois semi-espacos. ....	28
Figura 2.9 Ilustração do operador de empilhamento CRS. Na parte inferior se tem um modelo de duas camadas sobre um semi-espaco, onde em vermelho é mostrado o raio de afastamento-nulo. Na parte superior se tem as curvas em azul que representam os tempos de trânsito hiperbólico dos eventos de reflexão, e em vermelho a superfície do operador CRS. ....	30
Figura 2.10 Nível de coerência como função do ângulo de emergência $\beta_0$ calculado ao longo do operador linear na seção CMP empilhada (adaptado de Mann (2002)). ....	33
Figura 2.11 Super-traços para uma família fonte-comum corrigida de sobretempo normal. Super-traço F e o super-traço G são correlacionados para determinar a correspondente estática na fonte (adaptado de Ronen e Claerbout (1985)). ....	38

Figura 2.12 Exemplo de correção sobretempo CRS para um ponto $P_0(x_0, t_0)$ de uma seção ZO simulada. O evento de reflexão atual de um exemplo sintético é mostrado como uma família de curvas afastamento-comum (em cinza). A superfície azul é o operador de empilhamento CRS dado por $\beta_0, R_{NIP}, R_N$ . Com o conhecimento dos atributos CRS, o sobretempo pode ser subtraído de acordo com equação (2.27), o que resulta num evento de reflexão suavizado mostrado como um plano horizontal verde no tempo $t_0$ . A linha vermelha define a abertura de empilhamento. ....	39
Figura 2.13 Correlação cruzada de um traço CRS sobretempo corrigido em relação a um traço piloto para um dado deslocamento no tempo $\Delta t$ (adaptado de Koglin (2005)). ....	40
Figura 2.14 Superfície de empilhamento CRS para um meio com velocidade constante (adaptado de Baykulov e Gajewski (2007)). O empilhamento CRS soma o dado ao longo da superfície verde e leva o resultado para o ponto $P_0$ . Esta superfície de empilhamento resulta da aproximação dos refletores em subsuperfície por um segmento de refletor que tem localmente a mesma curvatura do refletor em subsuperfície. Empilhamento CRS Parcial realiza a soma do dado ao longo da coordenada do ponto-médio deslocado (linha vermelha na superfície de empilhamento CRS) e leva o resultado para o afastamento na super-família (neste exemplo o meio-afastamento é igual a 200m). ....	41
Figura 3.1 Mapa de localização da bacia geológica com ênfase na área de estudo (em amarelo), onde o fundo do mar varia de 150m a 1500m de profundidade. ....	44
Figura 3.2 Seção geológica esquemática da porção de água rasa da bacia. É ilustrado a fossa tectônica resultante da distensão provocada pela fuga de sal para águas mais profundas a leste. ....	45
Figura 3.3 Mapa de localização da linha sísmica utilizada (em vermelho). ....	45
Figura 3.4 Seção afastamento-mínimo. $h = 150m$ . ....	47
Figura 3.5 Etapas do pré-processamento ....	48
Figura 3.6 Número de traços contidos nas famílias CMP. ....	49
Figura 3.7 Seção ponto-médio-comum mostrando o acerto da geometria (de CS para CMP), e o silenciamento no topo dos traços. ....	50
Figura 3.8 Espectro de amplitude antes da aplicação da filtragem. ....	51
Figura 3.9 Espectro de amplitude após aplicação da filtragem banda-passante trapezoidal: 10 – 20 – 40 – 60 Hz. ....	51

Figura 3.10 Espectro $f - k$ antes da aplicação do filtro. ....	52
Figura 3.11 Espectro $f - k$ depois da aplicação do filtro. ....	53
Figura 3.12 Ilustração do modelo marinho para a deconvolução de múltiplas pelo método SRME. ....	54
Figura 3.13 A matriz do dado adquirido com um arranjo fixo de sensores, com a fonte sequencialmente posicionada nas coordenadas de cada sensor. As seções tiro-comum correspondem às colunas da matriz do dado. As seções tiro são transformadas para o domínio da frequência através da transformada de Fourier, e re-ordenadas em seções tiro-comum monocromáticas para cada frequência como coluna da matriz monocromática. Adaptado de Verschuur et al. (1992). ....	55
Figura 3.14 Ilustração do processo de eliminação adaptativa de múltiplas, simultaneamente se estima a assinatura da fonte pela minimização da energia total contida no dado. (Note que as matrizes representam todos os tiros na frequência dominante e os painéis representam um tiro no domínio do tempo). Adaptado de Verschuur et al. (1992). ....	59
Figura 3.15 Autocorrelação do dado antes da aplicação da deconvolução preditiva. ...	60
Figura 3.16 Autocorrelação do dado após a aplicação da deconvolução preditiva. ....	61
Figura 3.17 Autocorrelação do dado após a aplicação da deconvolução preditiva com uma quantidade maior de pontos. ....	61
Figura 4.1 Fluxogramas das principais etapas dos processamentos aplicados. (Esquerda) Fluxograma I. (Direita) Fluxograma II. (Centro) Fluxograma III. ....	62
Figura 4.2 Etapas do fluxograma I. ....	64
Figura 4.3 Seção empilhada resultante do fluxograma I. O ganho agc com uma janela de 0.5s e uma suavização gaussiana foram aplicadas para revelar eventos com baixa amplitude. A abertura ZO foi restrita à primeira zona de Fresnel projetada. ....	66
Figura 4.4 Seção coerência ( $S$ ) resultante do fluxograma I. O intervalo mostra os valores de coerência que tem um máximo ao redor de 0.3. ....	67
Figura 4.5 Seção ângulo ( $\beta_0$ ) resultante do fluxograma I. ....	68
Figura 4.6 Seção curvatura da onda N ( $K_N$ ) resultante do fluxograma I. ....	69
Figura 4.7 Seção raio de curvatura da onda NIP ( $R_{NIP}$ ) resultante do fluxograma I. .	70

Figura 4.8 Seção migrada resultante do fluxograma I. O ganho agc com uma janela de 0.5s e uma suavização gaussiana foram aplicadas para revelar eventos com baixa amplitude. A abertura ZO foi restrita a primeira zona de Fresnel projetada. ....	71
Figura 4.9 Etapas do fluxograma II. ....	72
Figura 4.10 Seção empilhada resultante do fluxograma II. O ganho agc com uma janela de 0.5s e uma suavização gaussiana foram aplicadas para revelar eventos com baixa amplitude. A abertura ZO foi restrita à primeira zona de Fresnel projetada. ....	73
Figura 4.11 Seção coerência ( $S$ ) resultante do fluxograma II. O intervalo da escala de cores mostra os valores de coerência que tem um máximo em torno de 0.36. ....	74
Figura 4.12 Seção ângulo ( $\beta_0$ ) resultante do fluxograma II. ....	75
Figura 4.13 Seção curvatura da onda N ( $K_N$ ) resultante do fluxograma II. ....	76
Figura 4.14 Seção raio de curvatura da onda NIP ( $R_{NIP}$ ) resultante do fluxograma II. ....	77
Figura 4.15 Seção migrada resultante do fluxograma II. O ganho agc com uma janela de 0.5s e uma suavização gaussiana foram aplicadas para revelar eventos com baixa amplitude. A abertura ZO foi restrita à primeira zona de Fresnel projetada. ....	78
Figura 4.16 Ilustração das etapas do fluxograma III. ....	79
Figura 4.17 Seção empilhada resultante do fluxograma III. O ganho agc com uma janela de 0.5s e uma suavização gaussiana foram aplicadas para revelar eventos com baixa amplitude. A abertura ZO foi restrita à primeira zona de Fresnel projetada. ....	81
Figura 4.18 Seção coerência ( $S$ ) resultante do fluxograma III. O intervalo mostra os valores de coerência que tem um máximo em torno de 0.5. ....	82
Figura 4.19 Seção ângulo ( $\beta_0$ ) resultante do fluxograma III. ....	83
Figura 4.20 Seção curvatura da onda N ( $K_N$ ) resultante do fluxograma III. ....	84
Figura 4.21 Seção raio de curvatura da onda NIP ( $R_{NIP}$ ) resultante do fluxograma III. ....	85
Figura 4.22 Seção migrada resultante do fluxograma III. O ganho agc com uma janela de 0.5s e uma suavização gaussiana foram aplicadas para revelar eventos com baixa amplitude. A abertura ZO foi restrita à primeira zona de Fresnel projetada. ....	86
Figura A.1 Ilustração de um raio central $SRG$ (em verde) tendo em sua vizinhança um raio paraxial $\overline{SRG}$ (em vermelho). Os raios estão inseridos em um sistema sísmico, onde as fontes e os receptores estão localizados na mesma superfície (em laranja). Os vetores vagarosidade	

dos raios central e paraxial nos pontos iniciais e finais são expressos pelas coordenadas do raio  $(x_s, z_s)$  e  $(x_g, z_g)$ . Se mostra também os vetores deslocamento  $\Delta x_s$  e  $\Delta x_g$ , relacionados aos pontos  $S$  e  $G$  e que são, respectivamente, origens dos sistemas de coordenadas do raio. 96

Figura A.2 Ilustração de um sistema sísmico 2D. O raio central (em azul) atravessa o meio, e o raio paraxial (em vermelho) está na vizinhança do raio central. .... 96

Figura A.3 Ilustração da construção das projeções do vetor vagarosidade  $\bar{p}_S$ . .... 97

Figura A.4 Ilustração das frentes de onda para um meio homogêneo. Em vermelho se observa o experimento referente a onda NIP e em azul o experimento referente a onda N.  $K_{NIP}$  e  $K_N$  representam as curvaturas das ondas NIP e N, respectivamente. ....105

Figura C.1 Possíveis transformações do tetraedro no algoritmo de busca poliedro flexível para três parâmetros. As linhas tracejadas representam o resultado do processo anterior a iteração, que é o poliedro inicial (primeira iteração). Adaptado de Mann (2002). .... 112

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b>	<b>18</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>2 MÉTODO SÍSMICO DE REFLEXÃO</b>	<b>21</b>
2.1 GEOMETRIA E CUBO DE DADOS	21
2.2 FONTE, MEIO, RECEPTOR	24
2.3 MODELOS PARA A SUBSUPERFÍCIE E DIFRAÇÕES	25
<b>2.3.1 Modelo com Interfaces Plano-horizontais</b>	<b>25</b>
<b>2.3.2 Modelo com Interfaces Plano-inclinadas</b>	<b>26</b>
<b>2.3.3 Modelo com Interfaces Curvas</b>	<b>27</b>
2.4 MÉTODO DE EMPILHAMENTO CRS	29
<b>2.4.1 Busca Automática dos Atributos CRS</b>	<b>30</b>
2.4.1.1 Busca de $v_{EMP}$ em Famílias CMP	31
2.4.1.2 Busca de $\beta_0$ e $R_{NIP}$ na Seção Empilhada	31
2.4.1.3 Busca de $R_N$ na Seção Empilhada	32
2.4.1.4 Empilhamento Inicial	32
2.4.1.5 Busca Final por Otimização	32
<b>2.4.2 Detecção de Mergulhos Conflitantes</b>	<b>32</b>
<b>2.4.3 Nova Determinação do Parâmetro <math>R_{NIP}</math></b>	<b>33</b>
2.5 ABERTURAS E ZONA DE FRESNEL	34
2.6 MIGRAÇÃO EM TEMPO BASEADA NOS ATRIBUTOS CRS	35
2.7 CORREÇÃO RESIDUAL ESTÁTICA POR MEIO DOS ATRIBUTOS CRS	36
2.8 DENSIFICAÇÃO DO DADO PRÉ-EMPILHAMENTO	40

<b>3</b>	<b>GEOLOGIA E PRÉ-PROCESSAMENTO SÍSMICO</b>	<b>44</b>
3.1	ASPECTOS GEOLÓGICOS	44
3.2	ETAPAS DO PRÉ-PROCESSAMENTO	48
3.2.1	Geometria	48
3.2.2	Silenciamento	49
3.2.3	Filtragem	50
3.2.4	Atenuação de Múltiplas da Superfície Livre com o SRME	53
3.2.5	Deconvolução Preditiva	60
<b>4</b>	<b>RESULTADOS DO PROCESSAMENTO</b>	<b>62</b>
4.1	FLUXOGRAMA I	64
4.2	FLUXOGRAMA II	72
4.3	FLUXOGRAMA III	79
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>88</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>90</b>
	<b>APÊNDICE A – TEORIA GEOMÉTRICA DO RAI0</b>	<b>95</b>
A.1	MATRIZES PROPAGADORA DO RAI0	98
A.2	PROPRIEDADES DA MATRIZ PROPAGADORA	101
A.2.1	Simpleticidade	101
A.2.2	Raio Reverso	102
A.2.3	Regra da Cadeia	102
A.3	TEMPO DE TRÂNSITO EM TERMOS DA MATRIZ PROPAGADORA	103
A.4	PRIMEIRA ZONA DE FRESNEL PROJETADA EM TERMOS DA MATRIZ PROPAGADORA	103
A.5	TEMPO DE TRÂNSITO EM TERMOS DOS ATRIBUTOS CRS	104
A.5.1	Experimentos hipotéticos	104
A.5.2	Matriz propagadora em termos dos atributos CRS	105

A.6	PRIMEIRA ZONA DE FRESNEL PROJETADA EM TERMOS DOS ATRIBUTOS CRS . . . . .	108
	<b>APÊNDICE B - MEDIDA DE COERÊNCIA SEMBLANCE . . . . .</b>	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE C - BUSCA POLIEDRO FLEXÍVEL . . . . .</b>	<b>110</b>
C.1	ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO . . . . .	110
C.2	ADAPTAÇÃO AO MÉTODO CRS . . . . .	113
	<b>APÊNDICE D - HARDWARE E SOFTWARE USADOS . . . . .</b>	<b>115</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABREVIATURA	DESCRIÇÃO
CDS	Common Diffraction Surface
CMP	Common Mid Point
CO	Common Offset
CR	Common Receiver
CRP	Common Reflection Point
CRS	Common Reflection Surface
CS	Common Source
DMO	Dip Moveout
N	Normal
NIP	Normal Incidence Point
NMO	Normal Moveout
RES	Residual Static Correction
ZO	Zero Offset

# 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido em temas do Projeto Rede Risco Exploratório (FINEP) que reúne várias universidades do norte e nordeste (UFPA, UFBA, UFRN, UFPE e a UFAL), no desenvolvimento de tecnologia voltada à exploração de hidrocarbonetos (petróleo e gás). O referido projeto tem como título “*Imageamento Sísmico Sob a Quebra da Plataforma Continental*” cujo objetivo é o “*Desenvolvimento de Métodos de Análise de Velocidades*”. Concomitantemente a estes projetos de pesquisa em andamento, o presente trabalho faz parte do projeto de formação de recursos humanos da ANP, sob o título “*Geofísica Aplicada a Exploração e Desenvolvimento de Reservatório de Petróleo e Gás*”. Além disso, este trabalho se enquadra também no projeto “*Imageamento Sísmico 2D e 3D Incorporando o Método CRS e Análise de Velocidade*” da rede temática de Geofísica Aplicada da Petrobras.

Tem como objetivo principal a aplicação de técnicas baseadas na teoria do empilhamento por superfície de reflexão comum CRS para gerar imagens sísmicas de qualidade para a interpretação em dados marinhos reais relacionados a meios geologicamente complexos.

O imageamento sísmico a partir de dados de reflexão busca produzir a melhor imagem possível da estrutura geológica em subsuperfície, e uma técnica consagrada é o empilhamento que permite simular seções sísmicas ao afastamento-nulo ZO a partir de dados de multi-cobertura. O método de imageamento aplicado neste trabalho é o empilhamento descrito por (Mueller (1999), Jaeger (1999); Mann (2002)), e ele possui as características dos métodos independentes do macro-modelo de velocidade (HUBRAL, 1999).

O método de empilhamento CRS utiliza uma função Semblance com uma lei hiperbólica do tempo de trânsito 2D para o operador do empilhamento. Este operador é função de uma terna de parâmetros associados à frente de onda e ao seu raio normal para cada ponto  $P_0(t_0, x_0)$  que representa a seção. Estes parâmetros descrevem: (1) o ângulo de emergência do raio normal ( $\beta_0$ ); (2) o raio de curvatura da onda no ponto de incidência normal ( $R_{NIP}$ ); e (3) o raio de curvatura da onda normal ( $R_N$ ). A aproximação do tempo de trânsito CRS é obtida da expansão de Taylor de segunda ordem hiperbólica para os raios paraxiais relacionados a

um raio normal ((SCHLEICHER et al., 1993); (TYGEL et al., 1997)), ou pela aproximação geométrica (HOECHT et al., 1999). A etapa fundamental do método de empilhamento 2D CRS consiste na determinação dos três parâmetros ótimos a partir dos dados sísmicos de multi-cobertura associados a cada ponto amostrado da seção ZO simulada através de várias estratégias de busca automática sobre a função Semblance (JAEGER, 1999).

Além desta introdução se tem os seguintes capítulos.

No capítulo 2 é realizada uma breve introdução ao método sísmico com descrição da geometria e volume de dados, das fontes e receptores, modelos geológicos, do método de empilhamento CRS e suas estratégias de busca e dos processos de Correção Residual Estática, Densificação do Dado Pré-empilhamento e migração através dos atributos CRS.

No capítulo 3 são apresentados alguns aspectos geológicos do dado marinho utilizado, como localização da bacia e da linha de aquisição, bem como as etapas do pré-processamento aplicado ao dado.

No capítulo 4 são apresentados os resultados da aplicação do método de empilhamento CRS, dos processos de Correção Residual Estática e Densificação do Dado Pré-empilhamento e da migração CRS seguindo três fluxogramas ilustrados na Figura 4.1.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões dos trabalhos realizados, bem como foram levantadas sugestões, críticas e perspectivas para futuros trabalhos.

## 2 MÉTODO SÍSMICO DE REFLEXÃO

O objetivo do método sísmico de reflexão é fornecer uma imagem da subsuperfície a partir de dados de multi-cobertura, através do aumento da relação sinal/ruído da assinatura de reflexão e da atenuação da energia de sinais indesejáveis como ruídos coerentes e aleatórios. A descrição do método sísmico passa pelo conjunto: (1) fonte (explosão e seu acoplamento); (2) meio (geologia sedimentar complexa); (3) receptores (parâmetros da geometria, arranjo de geofones, eletrônica, sensores); e (4) presença de ruídos diversos. Outro conceito básico é estabelecer nas descrições se a sísmica é 2D ou 3D. Os efeitos que devem ser incluídos na componente determinística são as reflexões primárias, e aqueles que serão admitidos como ruídos são diversos como, por exemplo, múltiplas, conversão P-SV, ondas de superfície e etc.

Para iniciar a descrição do método sísmico de reflexão, o cálculo do modelo direto requer a definição do arranjo geométrico da aquisição (ou da simulação de dados sintéticos), ou da família em relação à qual será feita a simulação. Comumente se refere aos arranjos fonte-comum CS (Figura 2.1), ponto-médio-comum CMP (Figura 2.2), afastamento-comum CO (Figura 2.3) e receptor-comum CR (Figura 2.4).

### 2.1 GEOMETRIA E CUBO DE DADOS

A aquisição de dados sísmicos de reflexão 2D resulta num cubo 3D  $(x_m, h, t)$  de dados no qual é selecionado um conjunto (*bin*) para análise de velocidade, empilhamento e posterior migração, onde é necessário as informações das coordenadas das fontes  $x_s$ , dos sensores  $x_g$  e a trajetória de empilhamento expressa por um modelo teórico.

A geometria de aquisição de dados sísmicos de reflexão 2D é a configuração fonte-comum CS (Figura 2.1) que servirá para compor o cubo 3D  $(x_m, h, t)$  de dados em multi-cobertura. Esta configuração estabelece a discretização temporal-espacial dos dados que, como exemplo típico, usualmente é da ordem de  $dt = 4ms$  e  $dg = 25m$ , em que  $dt$  é taxa de amostragem no tempo e  $dg$  é a distância entre os receptores.

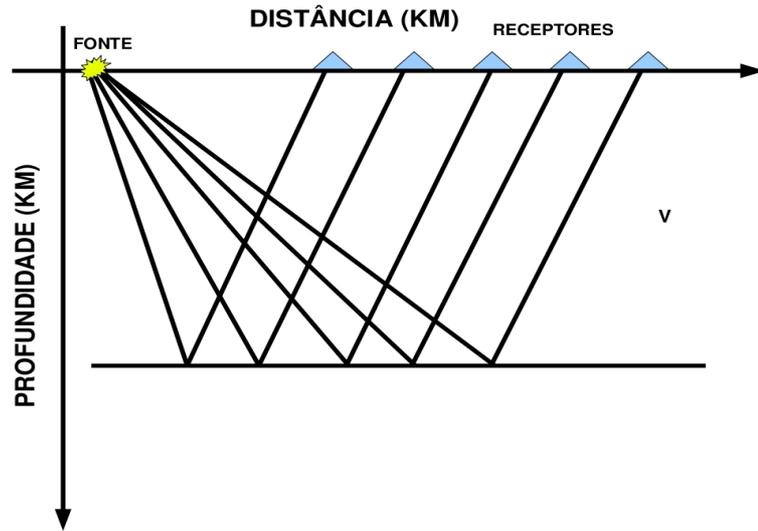


Figura 2.1: Geometria do levantamento fonte-comum onde  $V$  representa a velocidade da camada.

A partir do cubo 3D  $(x_m, h, t)$  de dados, diferentes arranjos podem ser organizados como, por exemplo, o arranjo ponto-médio-comum CMP.

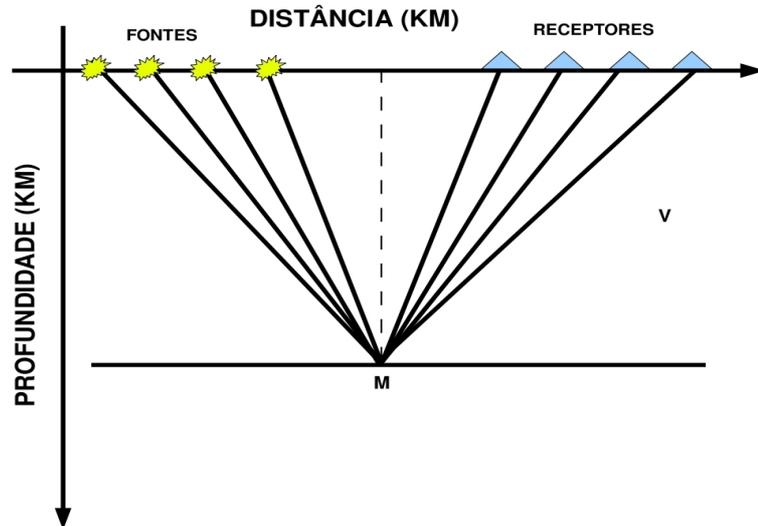


Figura 2.2: Geometria do levantamento ponto-médio-comum onde  $V$  representa a velocidade na camada.

A relação matemática para organizar os traços é dada pelo seguinte par de equações:

$$x_m = \frac{(x_s + x_g)}{2} \quad (2.1)$$

$$h = \frac{(x_g - x_s)}{2} \quad (2.2)$$

onde  $x_m$  representa o ponto-médio e  $h$  o meio-afastamento fonte-receptor. Os arranjos tem a finalidade de promover a redundância de informação dos pontos e segmentos de reflexão em subsuperfície. Outras formas de organização do cubo de dados são as configurações afastamento-comum CO (Figura 2.3) e receptor-comum CR (Figura 2.4).

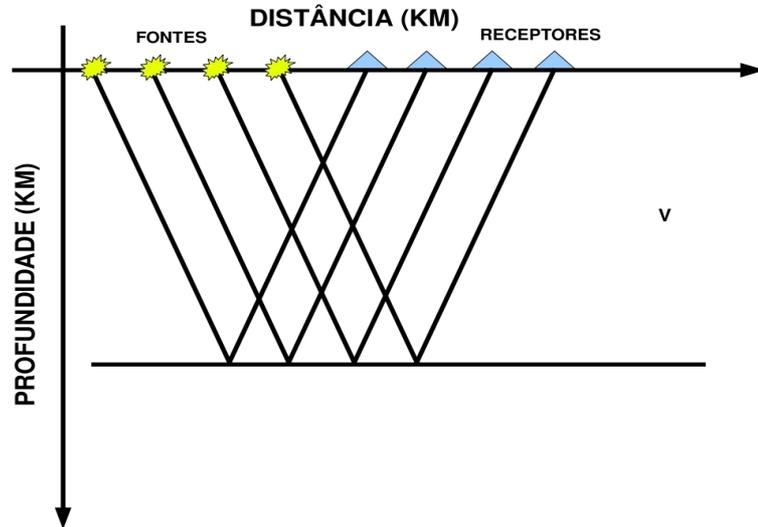


Figura 2.3: Geometria do levantamento afastamento-comum onde  $V$  representa a velocidade na camada.

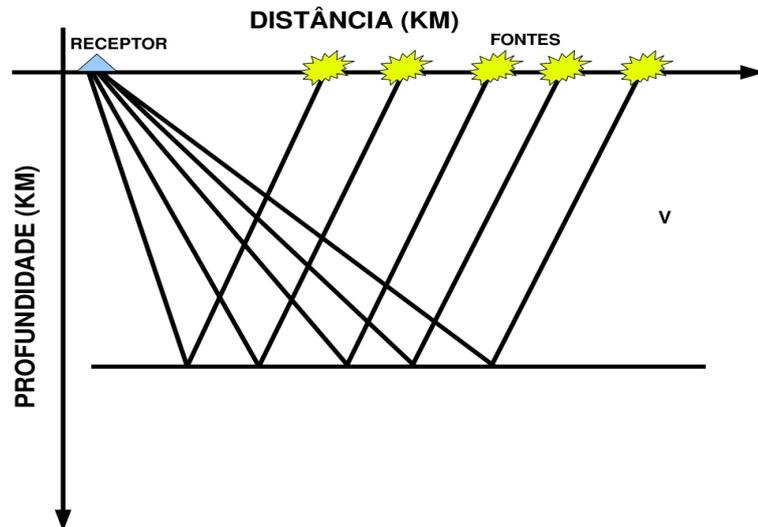


Figura 2.4: Geometria do levantamento receptor-comum onde  $V$  representa a velocidade na camada.

A primeira tarefa do programa de levantamento sísmico contínuo do tipo 2D consiste no traçado da linha no mapa geológico de superfície da região, obedecendo à direção geral do mergulho das camadas (perpendicular à direção geral das estruturas). Em segundo lugar, estabelecer a sequência dos pontos de tiro e das estações receptoras situadas ao longo da

linha projetada (conjunto de sensores em linha). O conjunto de registros (traços) é obtido através das estações de geofones quando o registro é terrestre, ou de hidrofones quando o registro é marinho.

## 2.2 FONTE, MEIO, RECEPTOR

A fonte sísmica gera nos meios geológicos uma grande complexidade de ondas que podem ser classificadas de forma simples e prática como: ondas do ar, ondas de volume, e ondas de superfície terrestre ou da água (Figura 2.5). O presente estudo envisa o tratamento exclusivo das ondas de volume, e em particular das ondas compressoriais (ondas P), não desconhecendo a existência das ondas S (SH e SV), das conversões P-SV em função do ângulo de incidência, e as condições de ondas pré-críticas e pós-críticas.

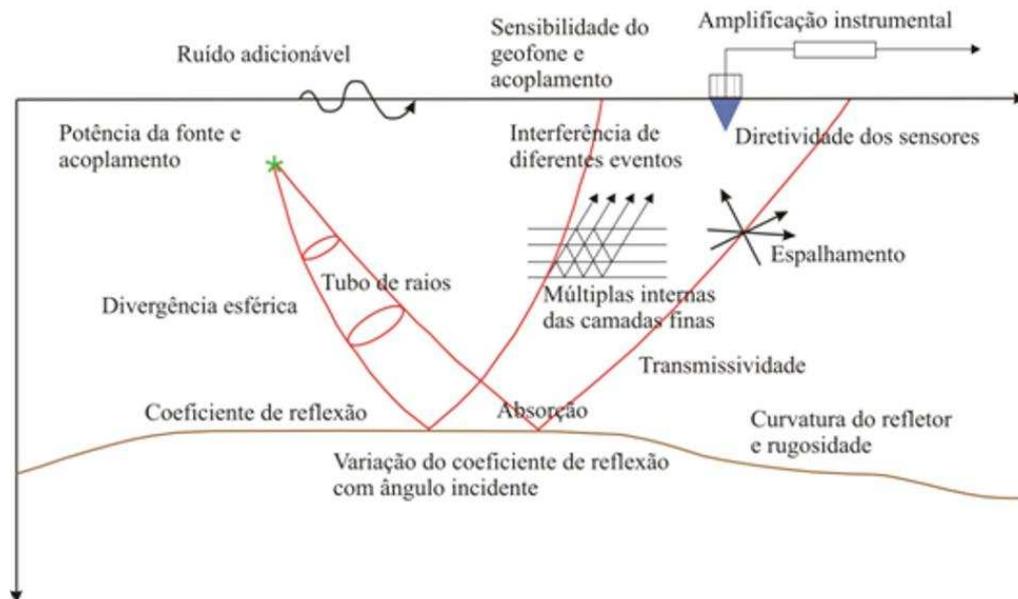


Figura 2.5: Efeitos físicos relacionados à propagação de ondas sísmicas num meio geológico (adaptado de Sheriff (1975)).

Na propagação das ondas de volume, o interesse é no efeito da transmissividade e na refletividade através das interfaces em subsuperfície. As ondas refletidas e refratadas que emergem nos receptores são registradas com relação ao tempo decorrido entre a fonte de emissão de energia sísmica e o receptor; isto é, o tempo total de trânsito, ou tempo-duplo. Cada canal registra um traço sísmico ou sismograma, pode ser descrito de forma prática e canônica por um equação composta de duas partes: uma determinística e uma não-determinística na

forma:

$$s(t, x) = m(t, x) + r(t, x) = w(t, x) * R(t, x) + r(t, x). \quad (2.3)$$

A componente determinística  $m(t, x)$  representa a mensagem, que é a parte visada para o imageamento. A componente não-determinística  $r(t, x)$  representa o ruído e deve ser excluída; sendo assim, nesta componente são colocados ruídos de diversos tipos, tais como: produzidos pela fonte, geológicos, locais, correlacionável, e instrumental. A parte determinística se caracteriza por ser escrita como o resultado de uma convolução entre a função meio,  $R(t, x)$ , (definida como a refletividade) e a função pulso-fonte efetivo,  $w(t, x)$  (ROBINSON; SILVIA, 1979).

## 2.3 MODELOS PARA A SUBSUPERFÍCIE E DIFRAÇÕES

Os problemas geológicos devem ser descritos em 3D. No entanto, como uma primeira aproximação se considera uma descrição 2D para a geologia, sendo que para isto se admite que o perfil geofísico é perpendicular à direção de mergulho das camadas admitida como constante. Para que se possa imagear estruturas em subsuperfície é necessário desenvolver modelos físico-geológicos para representar as estruturas de forma determinística. Sendo assim, são apresentados alguns modelos da superfície que são usados para alcançar o objetivo maior, que é a interpretação das estruturas em subsuperfície a serem entendidos em 3D.

### 2.3.1 Modelo com Interfaces Plano-horizontais

Este é o modelo considerado como o mais simples para representar a subsuperfície (Figura 2.6), sendo constituído por interfaces plano-horizontais, camadas homogêneas e isotrópicas, posicionadas entre dois semi-espacos infinitos, sendo o superior o vácuo. Este modelo encontra grande aplicação na correção NMO e empilhamento convencional, onde está incluído a análise de velocidade via Semblance (NEIDELL; TANER, 1971).

O tempo de trânsito da resposta ao impulso de uma onda emitida pela fonte na posição  $x_s$  e captada pelo receptor na posição  $x_g$  é dado pela seguinte expressão:

$$t^2(x) = t_0^2 + \frac{x^2}{v_{RMS}^2} + O(x^4); \quad (2.4)$$

onde  $x$  é a distância fonte-receptor, e  $v_{RMS}$  é a velocidade média-quadrática dada pela equação

$$v_{RMS}^2 = \frac{v_1 R_0}{t_0} = \frac{1}{t_0} \sum_{j=1}^n v_j^2 \Delta t_j, \quad (2.5)$$

onde  $v_1$  é a velocidade na primeira camada,  $t_0$  é o tempo duplo na configuração afastamento-nulo e  $\Delta t_j$  é o tempo duplo vertical na camada  $j$  (HUBRAL; KREY, 1980).

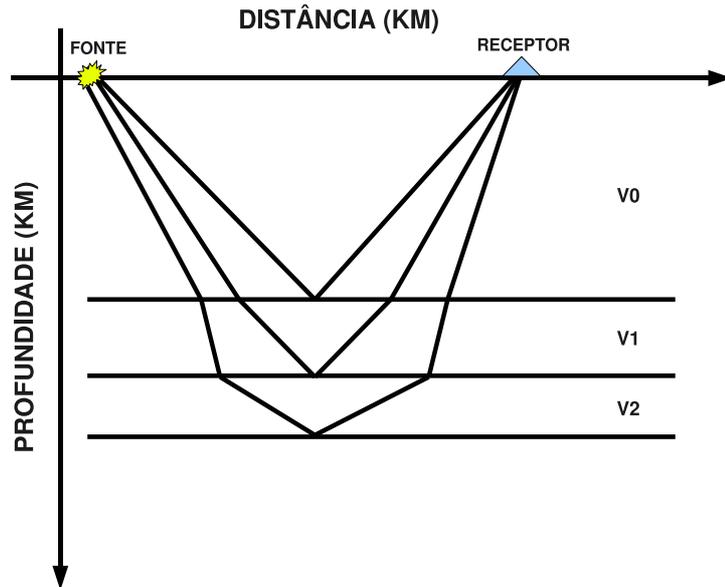


Figura 2.6: Modelo composto por interfaces plano-horizontais, com camadas homogêneas, isotrópicas, posicionadas entre dois semi-espacos.

### 2.3.2 Modelo com Interfaces Plano-inclinadas

Este modelo representa uma evolução ao modelo anterior para representar a subsuperfície, por consistir de interfaces plano-inclinadas, homogêneas, isotrópicas, sobre um semi-espaco inferior e um superior sendo o vácuo (ver Figura 2.7). Mas, mesmo com esta complicação adicional, este modelo ainda está aquém de uma possível realidade geológica complexa.

O tempo de trânsito para o caso ilustrado na Figura 2.7 é dado pela seguinte expressão:

$$t^2(x) = \left( t_0 + \frac{\text{sen } \beta_0}{v_1} \right)^2 + \frac{t_0 \cos^2 \theta_0}{K_n} x^2; \quad (2.6)$$

onde  $x$  é o afastamento fonte-receptor,  $v_1$  é a velocidade na primeira camada,  $t_0$  é o tempo duplo de trânsito na configuração afastamento-nulo,  $\theta_0$  é o ângulo de mergulho da interface

e  $K_n$  é dado por

$$K_n = v_1 R_0, \quad (2.7)$$

com

$$R_0 = \frac{1}{v_1} \sum_{j=1}^n \prod_{k=0}^{j-1} \frac{\cos^2 \alpha_k}{\cos^2 \theta_k} v_j^2 \Delta t_j, \quad (2.8)$$

onde  $\Delta t_j$  é o tempo duplo normal na camada  $j$  (HUBRAL; KREY, 1980).

A partir da Figura 2.7 se observa a necessidade de estabelecer a relação entre a distribuição de receptores e a geometria do modelo da subsuperfície (megulhos de interfaces) e ângulos de incidência vertical para que a estrutura seja comum ao arranjo.

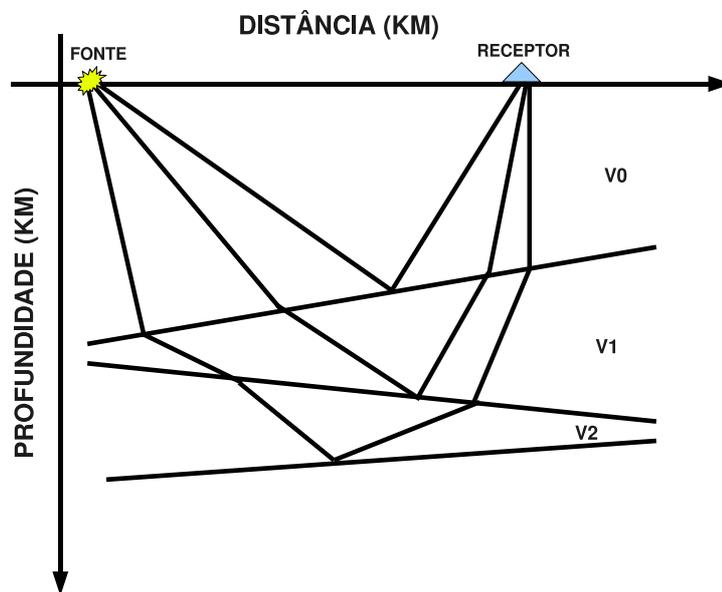


Figura 2.7: Modelo composto por interfaces plano-inclinadas, com camadas homogêneas, isotrópicas, posicionadas entre dois semi-espacos.

### 2.3.3 Modelo com Interfaces Curvas

Com relação aos dois casos anteriores, este modelo em 2D pode ser considerado como mais próximo da realidade das estruturas geológicas em subsuperfície, sendo constituído de camadas homogêneas, isotrópicas e com interfaces arbitrariamente curvas como ilustrado na Figura 2.8.

A aproximação do tempo de trânsito para este modelo é obtido através da teoria paraxial

do raio (ver apêndice A), e apresentado em duas formas, o parabólico dado pela equação:

$$t(x_m, h) = t_0 + 2\frac{\text{sen } \beta_0}{v_0}(x_m - x_0) + \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0} \left( \frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{\text{NIP}}} \right); \quad (2.9)$$

e o hiperbólico dado pela equação:

$$t^2(x_m, h) = \left( t_0 + 2\frac{\text{sen } \beta_0}{v_0}(x_m - x_0) \right)^2 + 2t_0 \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0} \left( \frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{\text{NIP}}} \right). \quad (2.10)$$

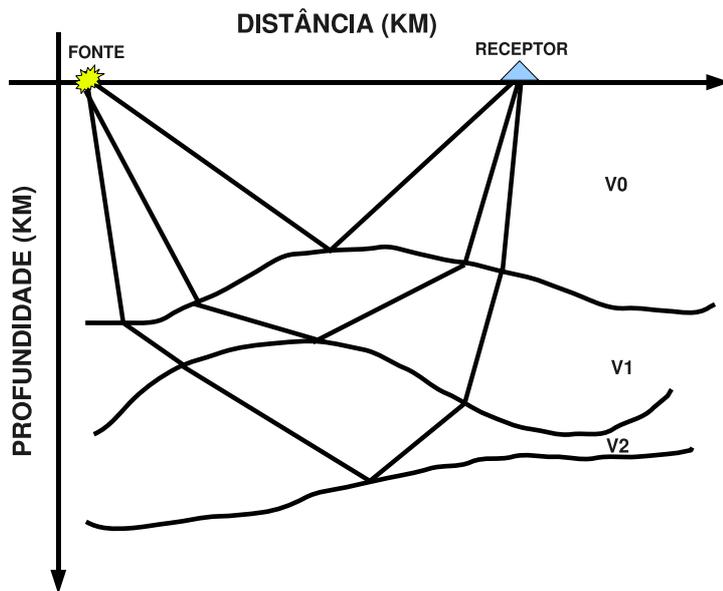


Figura 2.8: Modelo composto por interfaces arbitrariamente curvas, com camadas homogêneas, isotrópicas, posicionadas entre dois semi-espacos.

Nas equações (2.9) e (2.10),  $t_0$  é o tempo de trânsito na configuração afastamento-nulo,  $v_0$  é a velocidade na superfície onde se localiza o ponto  $P_0(x_0, t_0)$ ,  $x_m$  é a coordenada do ponto-médio do afastamento fonte-receptor,  $h$  é o meio-afastamento fonte-receptor,  $x_0$  é o ponto de medida na superfície. As quantidades  $\beta_0$ ,  $R_N$  e  $R_{\text{NIP}}$  são relativas à frente de onda observada no ponto  $P_0(x_0, t_0)$  (ver Figura 2.9) e obtidas a partir de dois experimentos físico-matemáticos hipotéticos ((DURBAUM, 1954), (SHAH, 1973)). O primeiro experimento admite uma onda originada a partir de uma fonte pontual localizada no ponto NIP (ver Figura A.4) com uma frente de onda inicialmente esférica (onda NIP). O segundo experimento admite uma onda originada ao redor do ponto NIP (ver Figura A.4), mas com uma frente de onda com curvatura inicial idêntica à curvatura do refletor, aproximada por uma esfera (ou círculo), denominada de onda N.

## 2.4 MÉTODO DE EMPILHAMENTO CRS

O método de empilhamento CRS para simular seções afastamento-nulo para o caso de uma superfície de observação plana, é descrito por Mueller (1999), Jaeger (1999) e Mann (2002), como uma alternativa ao empilhamento convencional. A implementação do CRS foi feita com várias peculiaridades: (1) o processo é automatizado; (2) a informação a priori é a velocidade próxima a linha sísmica de aquisição; (3) o operador de empilhamento CRS (ver Figura 2.9) depende de três parâmetros que definem a superfície de empilhamento e são determinados com base nos dados de multi-cobertura por processos de busca automática e análise de coerência.

A determinação dos parâmetros do operador de empilhamento é realizada através de estratégias de busca que utilizam casos particulares da equação do tempo de trânsito (equação 2.10) controlada pelos raios de curvatura das ondas NIP e N. Isto faz com que a busca tri-paramétrica original seja desdobrada em problemas mais simples que envolvem um ou dois parâmetros desconhecidos. As equações do empilhamento CRS consideram a aproximação do refletor em subsuperfície por um segmento de círculo em 2D, ou por uma esfera em 3D.

O operador de empilhamento CRS (equação (2.10)) é função das coordenadas espaciais independentes  $x_m$  e  $h$ . Além da seção simulada ao afastamento-nulo, são estimados também os atributos  $\beta_0$ ,  $R_{\text{NIP}}$  e  $R_{\text{N}}$  da frente de onda relativos à superfície de medida no ponto  $P_0(x_0, t_0)$ . As quantidades  $\beta_0$ ,  $R_{\text{NIP}}$  e  $R_{\text{N}}$  são os parâmetros da função polinomial que representa a superfície do operador, e são objetos da estimativa usando métodos de otimização. Para outras aplicações dos atributos CRS podemos citar Duvencek (2002), Heilmann (2007), von Steht (2004), Koglin (2005) e Baykulov e Gajewski (2007).

Uma forma de iniciar a descrição teórica do empilhamento CRS é a teoria paraxial do raio, como descrito por Bortfeld (1989) e Schleicher et al. (1993). As fórmulas do tempo de trânsito de um raio paraxial na vizinhança de um raio central para meios com heterogeneidade lateral (ver apêndice A) são descritas em termos da matriz propagadora do raio que contém a curvatura da onda no ponto de incidência normal (NIP) e da onda normal (N). Estas são as informações referentes às equações (2.9) e (2.10) que descrevem o operador CRS (Figura 2.9).

No processo de empilhamento, para cada ponto  $P_0(x_0, t_0)$  é necessário determinar a terna “ótima” de parâmetros  $\beta_0$ ,  $R_{\text{NIP}}$  e  $R_{\text{N}}$  para que a equação (2.10) melhor ajuste aos eventos de reflexão no dado em multi-cobertura. Para quantificar o ajuste do operador ao evento observado e pré-empilhado se faz uso da medida de coerência *Semblance* (NEIDELL; TANER,

1971). O problema prático a ser resolvido pode ser estabelecido como: encontrar o máximo absoluto do valor da função coerência que depende de três independentes  $\beta_0$ ,  $R_{NIP}$  e  $R_N$ . Além disso, como o problema é não-linear, a forma de encontrar o extremo global/local é a partir de um ponto de partida, que neste caso é uma terna específica de parâmetros ( $\beta_0^{ini}$ ,  $R_{NIP}^{ini}$  e  $R_N^{ini}$ ), a ser apresentado a seguir.

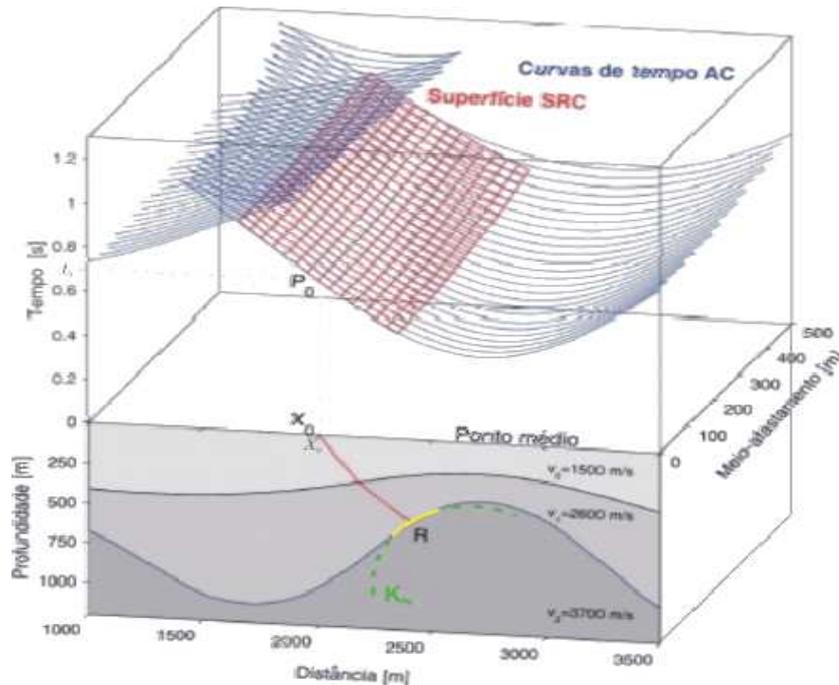


Figura 2.9: Ilustração do operador de empilhamento CRS. Na parte inferior se tem um modelo de duas camadas sobre um semi-espaço, onde em vermelho é mostrado o raio de afastamento-nulo. Na parte superior se tem as curvas em azul que representam os tempos de trânsito hiperbólico dos eventos de reflexão, e em vermelho a superfície do operador CRS.

### 2.4.1 Busca Automática dos Atributos CRS

A solução para o problema de otimização tri-paramétrica não-linear é dividí-lo em quatro buscas (MUELLER, 1999), com o objetivo de estimar os atributos  $\beta_0$ ,  $R_{NIP}$  e  $R_N$ , que são resumidas a seguir:

1. Busca de  $v_{EMP}$  em Famílias CMP;
2. Busca de  $\beta_0$  e  $R_{NIP}$  na Seção Empilhada;
3. Busca de  $R_N$  na Seção Empilhada;

4. Empilhamento Inicial;
5. Busca Final por Otimização.

#### 2.4.1.1 Busca de $v_{\text{EMP}}$ em Famílias CMP

Esta etapa simula uma seção de afastamento-nulo com base numa simplificação da equação (2.10) para  $x_m = x_0$ , reduzindo a equação (2.10) para a seguinte forma:

$$t_{\text{CMP,hip}}^2(x_m = x_0, h) = t_0^2 + \frac{2t_0}{v_0}qh^2; \quad (2.11)$$

onde o parâmetro  $q$  é dado por

$$q = \frac{\cos \beta_0}{R_{\text{NIP}}}. \quad (2.12)$$

Esta redução faz com que a equação (2.10) passe a depender apenas do parâmetro  $q$ , que combina dois parâmetros CRS. Comparando a equação (2.11) com a equação do empilhamento convencional dada por:

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4}{v_{\text{EMP}}^2}h^2; \quad (2.13)$$

e a velocidade de empilhamento  $v_{\text{EMP}}$  pode ser expressa na forma

$$v_{\text{EMP}}^2 = \frac{2v_0}{t_0q} = \frac{2v_0R_{\text{NIP}}}{t_0 \cos^2 \beta_0}. \quad (2.14)$$

A partir da particularização acima, a primeira etapa de busca dos atributos CRS utiliza seções CMP, sendo semelhante a análise de velocidade do empilhamento convencional, mas sem interação com o usuário. Para cada seção CMP identificada por  $x_0$ , e para cada  $t_0$  se determina numa malha o valor de  $q$  que produz o maior valor de coerência com base na equação (2.11).

#### 2.4.1.2 Busca de $\beta_0$ e $R_{\text{NIP}}$ na Seção Empilhada

Com o resultado da etapa anterior se produz uma seção simulada ao afastamento-nulo, que adicionalmente possui uma boa relação sinal/ruído, o que justifica a busca linear pelo parâmetro  $\beta_0$ . Para pequenos deslocamentos ao longo da coordenada ponto-médio ( $x_m$ ), e devido ao parâmetro  $R_{\text{N}}$  possuir em geral grandes valores, ou seja, ( $|R_{\text{N}}| \gg 1$ ), se pode desprezar a contribuição da parcela de segunda ordem na equação (2.10) obtendo a seguinte

equação:

$$t_{\text{ZO,linear}}(x_m, h = 0) = t_0 + \frac{2\text{sen } \beta_0}{v_0}(x_m - x_0). \quad (2.15)$$

Desta forma, uma busca uni-paramétrica por  $\beta_0$  é realizada numa pequena vizinhança (abertura) de  $x_0$ . Como  $\beta_0$  e o parâmetro combinado  $q$  estão determinados, através da equação (2.12) é calculado o parâmetro raio de curvatura da onda NIP ( $R_{\text{NIP}}$ ).

### 2.4.1.3 Busca de $R_{\text{N}}$ na Seção Empilhada

A partir dos resultados da etapa anterior resta determinar o parâmetro  $R_{\text{N}}$ , considerando a configuração afastamento-nulo onde  $h = 0$ , a equação (2.10) se reduz a:

$$t_{\text{ZO,hip}}^2(x_m, h = 0) = \left( t_0 + \frac{2\text{sen } \beta_0}{v_0}(x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{\text{N}}}(x_m - x_0)^2. \quad (2.16)$$

como o parâmetro  $\beta_0$  foi determinado na etapa anterior, é realizado novamente uma busca uni-paramétrica pelo parâmetro  $R_{\text{N}}$  na equação (2.16).

### 2.4.1.4 Empilhamento Inicial

Com os valores iniciais dos parâmetros  $\beta_0^{\text{ini}}$ ,  $R_{\text{N}}^{\text{ini}}$  e  $R_{\text{NIP}}^{\text{ini}}$ , é realizado o Empilhamento Inicial segundo a equação (2.10). Se usa esta denominação para enfatizar que os parâmetros determinados através deste procedimento são apenas uma primeira estimativa.

### 2.4.1.5 Busca Final por Otimização

Nesta etapa é usado o operador (2.10), a função objeto de minimização dada pela medida de coerência Semblance, o algoritmo de otimização do tipo poliedro flexível, e os parâmetros CRS iniciais ( $\beta_0^{\text{ini}}$ ,  $R_{\text{N}}^{\text{ini}}$  e  $R_{\text{NIP}}^{\text{ini}}$ ) obtidos das etapas anteriores, para se estimar a melhor terna de parâmetros CRS possível no sentido do Semblance (que é uma forma de quadrados-mínimos normalizados). Os detalhes do processo de otimização são apresentados no Apêndice C.

## 2.4.2 Detecção de Mergulhos Conflitantes

A condição de mergulho conflitante aparece quando a amplitude de uma mesma amostra é formada pela contribuição de dois ou mais eventos de reflexão com frentes de onda se propagando em direções distintas. O resultado da etapa de busca de  $v_{\text{EMP}}$  em famílias CMP

é usada como entrada para as buscas e empilhamento na seção ZO, mesmo na situação de mergulhos conflitantes. Como cada evento de reflexão tem um ângulo de emergência  $\beta_0^i$  diferente (onde o índice  $i$  define o número de eventos contribuindo), e se faz necessário uma estratégia para identificar tais situações. Uma estratégia é determinar máximos adicionais de coerência na etapa busca de  $\beta_0$  e  $R_{NIP}$  na seção empilhada; ou seja, se deve determinar, de forma explícita, um número a priori de eventos que vão contribuir para cada amostra e cada posição na seção ZO a ser simulada. Para cada um desses eventos haverá um ângulo de emergência que será identificado através da análise de coerência executada na mesma seção ZO. Para determinação dos máximos relevantes referentes a mergulhos conflitantes, Mann (2001a) e Mann (2001b) propôs critérios de coerência que são:

- O máximo global de coerência tem que exceder um dado valor mínimo inicial. Valores abaixo deste nível não são avaliados;
- Os máximos locais de coerência devem exceder um dado valor inicial relativo ao máximo global;
- Os máximos devem estar claramente separados.

A partir destes critérios, a etapa de busca de  $\beta_0$  e  $R_{NIP}$  na seção empilhada é executada para determinar cada valor de  $\beta_0^i$ . Esta busca pelos ângulos de emergência gera um espectro de ângulo, ilustrado na Figura 2.10, que é analisado de acordo com os critérios listados acima.

Com os valores de ângulos  $\beta_0^i$  detectados, é realizada novamente a busca de  $R_N$  na seção empilhada para detecção dos parâmetros  $R_N^i$ , este processo é realizado para cada valor de ângulo detectado.

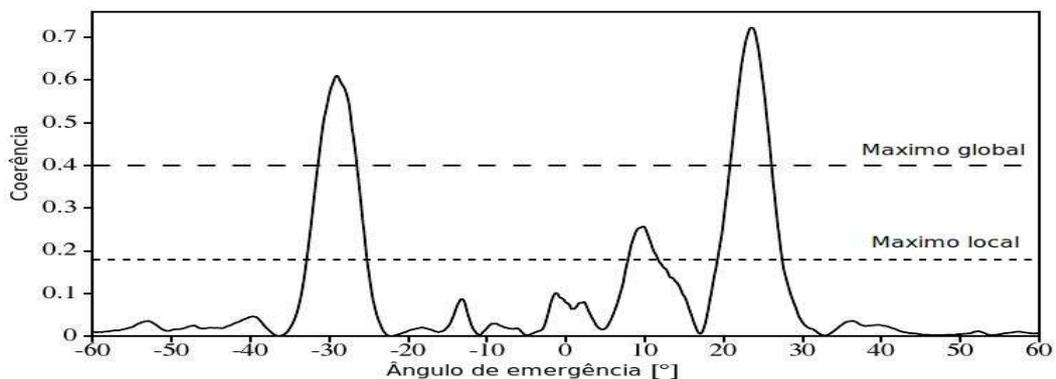


Figura 2.10: Nível de coerência como função do ângulo de emergência  $\beta_0$  calculado ao longo do operador linear na seção CMP empilhada (adaptado de Mann (2002)).

### 2.4.3 Nova Determinação do Parâmetro $R_{\text{NIP}}$

Até este ponto da descrição, a estratégia proposta nos dá uma série de ângulos de emergência  $\beta_0^i$  e raios de curvatura  $R_N^i$  associados a um determinado número de eventos que contribuem para cada posição ZO. Entretanto, os raios de curvatura  $R_{\text{NIP}}^i$  restantes não podem ser calculados a partir do parâmetro combinado  $q$  e dos ângulos de emergência  $\beta_0^i$ , uma vez que se tem um conjunto de ângulos de emergência disponíveis, e apenas um valor do parâmetro combinado  $q$  é fornecido pela etapa de busca de  $v_{\text{EMP}}$  em famílias CMP. Para resolver este impasse, Mann (2001a) e Mann (2001b) propôs uma busca adicional para os raios de curvatura  $R_{\text{NIP}}^i$  em um subconjunto diferente do dado pré-empilhamento, o subconjunto utilizado é a configuração fonte-comum na posição  $x_0$ , e que fica especificada pela relação ( $x_m - x_0 = h$ ). Substituindo esta relação na equação (2.10) se obtém o tempo de trânsito dado por:

$$t_{\text{FC/RC,hip}}^2(x_m, h) = \left( t_0 + \frac{2\text{sen } \beta_0}{v_0}(x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0 h^2}{v_0} \left( \frac{1}{R_C} \right); \quad (2.17)$$

onde,

$$\left( \frac{1}{R_C} \right) = \left( \frac{1}{R_N} + \frac{1}{R_{\text{NIP}}} \right). \quad (2.18)$$

A equação (2.17) depende dos parâmetros  $R_C$  e  $\beta_0$ , onde  $R_C$  é denominado de *raio de curvatura combinada* de  $R_{\text{NIP}}$  e  $R_N$ . Como os ângulos de emergência  $\beta_0^i$  são conhecidos na busca de  $\beta_0$  e  $R_{\text{NIP}}$  na seção empilhada, a busca adicional depende apenas do parâmetro  $R_C^i$ .

Para cada valor de ângulo de emergência  $\beta_0^i$ , o parâmetro  $R_C^i$  correspondente é determinado através de uma busca uni-paramétrica realizada sobre a equação (2.17). O parâmetro  $R_{\text{NIP}}^i$  requerido é obtido através da equação (2.18), sendo que  $R_N^i$  é estimado na etapa de busca de  $R_N$  na seção empilhada correspondente ao parâmetro  $\beta_0^i$ .

## 2.5 ABERTURAS E ZONA DE FRESNEL

O operador de empilhamento CRS é uma aproximação de segunda ordem em  $h$  e  $|x_m - x_0|$  do tempo de trânsito de uma reflexão em função do ponto-médio  $x_m$  e meio-afastamento  $h$ . Mas essa aproximação fornece bons resultados para pequenos afastamentos. Como não se tem um modelo de velocidade, é difícil quantificar o erro cometido na aproximação em função do tamanho dos deslocamentos  $x_m - x_0$  e  $h$ .

A informação registrada nos receptores é função das estruturas em subsuperfície. Hilter-

man (1982) e Lindsey (1989) descrevem que a principal contribuição a um evento registrado está contido na região do refletor denominada de *Primeira Zona de Fresnel*, que deve ser distinguida com relação ao afastamento, e cujo tamanho depende das propriedades geométricas do refletor na vizinhança do ponto de reflexão, da velocidade do meio acima do refletor e do conteúdo de frequência do sinal. Sendo assim, o conceito da zona de Fresnel está diretamente relacionado à resolução horizontal em subsuperfície. A definição da primeira zona de Fresnel em torno de um raio central é dada pelo tempo de trânsito dos raios difratados, que partem da fonte até o refletor e retornam ao receptor. A primeira zona de Fresnel ao redor de um ponto de reflexão  $x_R$  é formada por todos os pontos  $x_P$  para os quais o tempo de trânsito da difração  $t_d$ , e o tempo de trânsito da reflexão  $t_R$ , ao longo do raio central satisfazem a seguinte condição:

$$|t_d(x_P) - t_R(x_R)| \leq \frac{T}{2}, \quad (2.19)$$

onde  $T$  é o período do pulso monofrequência da fonte (KRAVTSOV; ORLOV, 1990).

A primeira zona de Fresnel, definida em profundidade, tem uma correspondente extensão na superfície de medição, e é denominada de *Primeira Zona de Fresnel Projetada*. Sendo assim, a principal contribuição vinda de um refletor em profundidade deve ser contida dentro da primeira zona de Fresnel projetada (HUBRAL et al., 1993). Mann (2002) propôs a primeira zona de Fresnel projetada como a abertura mais adequada para o empilhamento.

Uma aproximação da primeira zona de Fresnel projetada para o caso de uma seção ZO, em termos dos atributos CRS (ver apêndice A) é dada em Mann (2002) através da seguinte equação:

$$\frac{W_F}{2} = |x_m - x_0| = \frac{1}{\cos \beta_0} \sqrt{\frac{v_0 T}{2 \left| \frac{1}{R_{\text{NIP}}} - \frac{1}{R_N} \right|}} \quad (2.20)$$

A zona de Fresnel depende de todos os três parâmetros CRS, o que significa que o procedimento de empilhamento só é possível após a realização das buscas uni-paramétricas.

Os atributos CRS não informam sobre o valor adequado para o afastamento no processo de busca de  $v_{\text{EMP}}$  em famílias CMP, e na prática a definição da abertura CMP adequada é deixada a cargo do usuário.

## 2.6 MIGRAÇÃO EM TEMPO BASEADA NOS ATRIBUTOS CRS

Conceitualmente, se um refletor se reduz a um ponto difrator, o raio de curvatura da onda normal ( $R_N$ ) é reduzido ao raio de curvatura da onda NIP ( $R_{\text{NIP}}$ ); ou seja,  $R_N \rightarrow R_{\text{NIP}}$ .

Em consequência, o operador de migração Kirchhoff em tempo se constitui como um caso particular do operador de empilhamento CRS. Assim, o tempo de trânsito de reflexão se transforma num tempo de trânsito da difração dado por:

$$t_D^2(x_m, h) = \left( t_0 + 2 \frac{\text{sen } \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{\text{NIP}}} ((x_m - x_0)^2 + h^2). \quad (2.21)$$

Embora o operador CRS (equação 2.10) aproxime melhor os eventos de reflexão, a resposta aproximada à difração pode ser usada como uma alternativa do operador de empilhamento para simular uma seção afastamento-nulo como um operador tipo Kirchhoff. Uma aplicação apresentada por Mann et al. (2000), onde o ápice da resposta apropriada da difração também oferece a localização aproximada da imagem de uma migração. Devido à simetria dos eixos, este conceito é aplicado no plano afastamento-nulo,  $h = 0$ , onde  $\frac{\partial t_D(x_m, h=0)}{\partial x_m=0}$  resulta na localização do ápice:

$$x_{\text{ápice}} = x_0 - \frac{R_{\text{NIP}} t_0 v_0 \text{sen } \beta_0}{2R_{\text{NIP}} \text{sen}^2 \beta_0 + t_0 v_0 \cos^2 \beta_0}; \quad (2.22)$$

$$t_{\text{ápice}}^2 = \frac{t_0^3 v_0 \cos^2 \beta_0}{2R_{\text{NIP}} \text{sen}^2 \beta_0 + t_0 v_0 \cos^2 \beta_0}. \quad (2.23)$$

A resposta afastamento-nulo aproximada à difração, parametrizada em termos da localização do ápice ( $x_{\text{ápice}}$ ,  $t_{\text{ápice}}$ ), em vez da localização no afastamento-nulo ( $x_0$ ,  $t_0$ ), e com  $h = 0$ , é escrita como:

$$t_D^2(x) = t_{\text{ápice}}^2 + \frac{4(x - x_{\text{ápice}})^2}{v_c^2}; \quad (2.24)$$

$$v_c^2 = \frac{2v_0^2 R_{\text{NIP}}}{2R_{\text{NIP}} \text{sen}^2 \beta_0 + t_0 v_0 \cos^2 \beta_0}. \quad (2.25)$$

O somatório é feito ao longo da resposta aproximada da difração, com seu resultado colocado no ápice para aproximar uma migração no tempo tipo Kirchhoff com a velocidade constante  $v_c$ , onde todos os atributos contribuem. Nesta estratégia, o somatório é realizado ao longo do operador CRS (equação 2.10), em vez do operador de difração (equação 2.21), e se atribui o resultado ao ápice ( $x_{\text{ápice}}$ ,  $t_{\text{ápice}}$ ).

Note que a velocidade  $v_c$  da migração está em função dos atributos CRS na posição afastamento-nulo ( $x_0$ ,  $t_0$ ). Na migração convencional em tempo, a velocidade de migração é definida no ápice (equações 2.22 e 2.23) do operador de migração.

## 2.7 CORREÇÃO RESIDUAL ESTÁTICA POR MEIO DOS ATRIBUTOS CRS

A Correção Residual Estática por meio dos atributos CRS, segue critérios e técnicas convencionais de correção residual estática ((RONEN; CLAERBOUT, 1985); (TANER et al., 1974); (WIGGINS et al., 1976); (COX, 1974)) relacionadas a efeitos de topografia e camada de intemperismo. Para levar um dado a uma superfície de referência estática, as técnicas de correção produzem um deslocamento no tempo para cada localização de fonte-receptor. O primeiro passo dessas técnicas convencionais é aplicar uma correção NMO seguida de correção dos desalinhamentos devido a estática no receptor, ou da fonte. Assim, os deslocamentos no tempo  $t_{i,j}$  calculados para cada traço são relacionados através da equação:

$$t_{i,j} = t_{r_i} + t_{s_j} + M_k X_{i,j}^2 + \dots \quad \text{com} \quad k = \frac{i+j}{2}. \quad (2.26)$$

Na equação (2.26),  $t_{r_i}$  é a estática do receptor na  $i$ -ésima localização;  $t_{s_j}$  é a estática da fonte na  $j$ -ésima localização;  $M_k$  é o sobretempo residual na  $k$ -ésima família CMP; e  $X_{i,j} = r_i - s_j$  é a distância entre fonte e receptor (ver Taner et al. (1974); Wiggins et al. (1976); Cox (1974)). Existem vários métodos para determinar  $t_{i,j}$  ou  $t_{r_i}$  e  $t_{s_j}$ , respectivamente, onde um deles é baseado na correlação cruzada de todos os traços de cada família CMP com seu correspondente traço CMP empilhado. Deste modo, o tempo  $t_{i,j}$  é dado pela localização de um máximo global no resultado da correlação cruzada. Repetindo esta correlação cruzada para todo traço é obtido uma sobre-determinação por um sistema não-vinculado de equações lineares que usualmente é resolvido pelo método dos quadrados-mínimos.

Ronen e Claerbout (1985) introduziram uma técnica baseada na correlação cruzada pela maximização da medida de potência do sinal empilhado, onde a correlação cruzada é feita entre os “super-traços” (ver os traços F e G na Figura 2.11). Um super-traço é criado pela concatenação de todos os traços de cada receptor, que são então correlacionados com outro super-traço. A estática da fonte deste tiro é o tempo associado com o máximo global resultante da correlação cruzada, e o processo é repetido para toda estação de tiro e de receptor. Os tempos deslocados resultantes maximizam a função soma dos quadrados da amplitude de empilhamento final.

A correção residual estática por meio dos atributos CRS é baseada no princípio da correlação cruzada de forma similar ao método de Ronen e Claerbout (1985). O primeiro passo é utilizar a tecnologia WIT/CRS para se obter a seção ZO simulada e as correspondentes seções de atributos CRS. Cada traço da seção ZO simulada serve como um traço piloto para a

correlação cruzada necessária e a correção de sobretempo normal é realizada com os atributos CRS previamente obtidos.

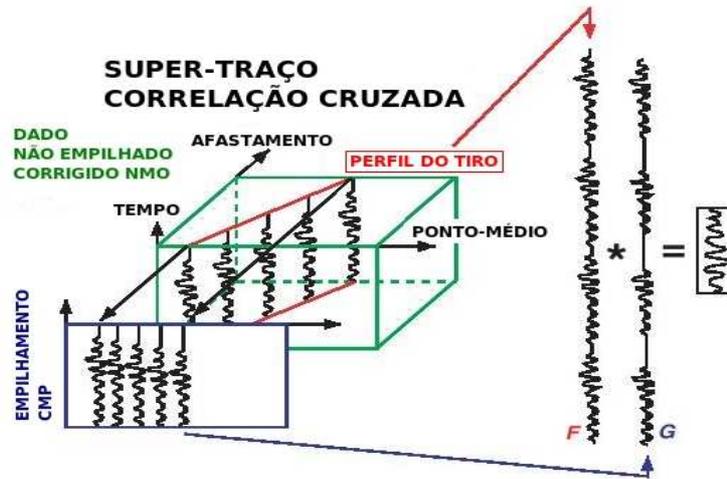


Figura 2.11: Super-traços para uma família fonte-comum corrigida de sobretempo normal. Super-traço F e o super-traço G são correlacionados para determinar a correspondente estática na fonte (adaptado de Ronen e Claerbout (1985)).

Para a correção de sobretempo normal, a dependência das coordenadas de ponto médio  $x_m$  e meio-afastamento  $h$  da equação (2.27) deve ser eliminada, e para isto são usados os atributos CRS da seção ZO simulada. Com o conhecimento destes atributos, a superfície de reflexão comum é transformada num plano horizontal no tempo  $t_0$  pela subtração do sobretempo dado por:

$$t_{\text{sobretempo}}(x_m, h) = t_{\text{hip}}(x_m, h) - t_0; \quad (2.27)$$

onde  $t_0$  é a amostra de tempo considerada da seção ZO simulada, a correção é realizada para todo  $t_0$  de cada traço ZO simulado da seção empilhada (ver Figura 2.12). O resultado para um traço ZO é chamado de “super-família” CRS que contém todos os traços pré-empilhados CRS com sobretempo corrigido, e que estão no interior de sua correspondente abertura espacial (mostrado como a meia-elipse em vermelho na Figura 2.12).

Após a correção de sobretempo ser aplicada, os traços são assumidos desalinhados pela estática residual para cada localização de fonte e cada localização de receptor. Assim, a correlação cruzada com o correspondente traço piloto fornece o deslocamento estático total para este traço. Então, a correlação cruzada é realizada entre todo traço sobretempo corrigido de cada super-família CRS e o correspondente traço na seção ZO simulada, isto é, o traço piloto. Após este processo, todo resultado de correlação que levar a mesma localização de fonte ou a mesma localização de receptor é somado.

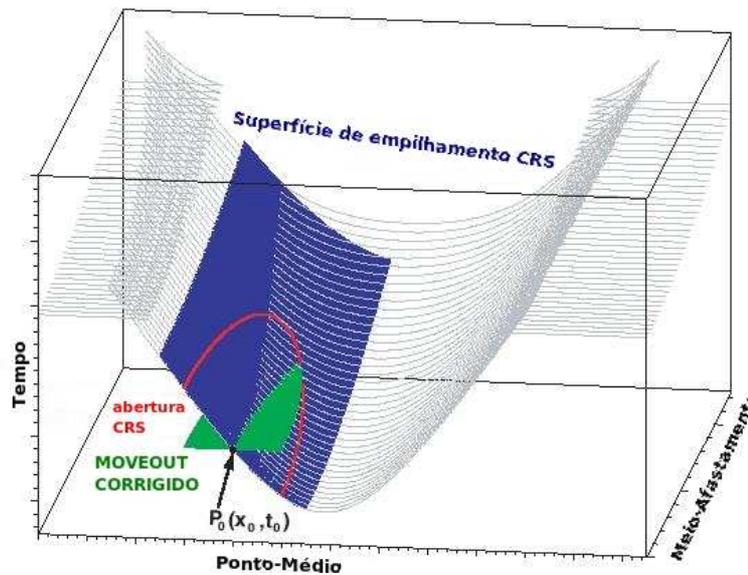


Figura 2.12: Exemplo de correção sobretempo CRS para um ponto  $P_0(x_0, t_0)$  de uma seção ZO simulada. O evento de reflexão atual de um exemplo sintético é mostrado como uma família de curvas afastamento-comum (em cinza). A superfície azul é o operador de empilhamento CRS dado por  $\beta_0, R_{NIP}, R_N$ . Com o conhecimento dos atributos CRS, o sobretempo pode ser subtraído de acordo com equação (2.27), o que resulta num evento de reflexão suavizado mostrado como um plano horizontal verde no tempo  $t_0$ . A linha vermelha define a abertura de empilhamento.

O valor de estática residual é considerado estar associado ao máximo global dos resultados da correlação somada. Portanto, a correlação cruzada está, em geral, afetada pelo efeito de suavização. A Figura 2.13 mostra a correlação cruzada de um traço piloto com um traço CRS sobretempo corrigido para um dado tempo deslocado  $\Delta t$ . Somente a parte de uma janela selecionada a partir de  $t_{min}$  e  $t_{max}$  será correlacionada. No caso da correlação cruzada discreta, o resto dos traços serão zerados. Assim, neste exemplo, somente as amostras de 9 a 18 do traço CRS sobretempo corrigido e as amostras 6 a 15 do traço piloto contribuirão para o resultado da correlação. Entretanto, os traços contidos no dado que estão fora da janela selecionada podem ajudar a reduzir o efeito de suavização na correlação cruzada, por isso, os traços não são zerados antes da correlação cruzada justamente para reduzir o efeito de suavização. Neste exemplo, isso significa que as amostras 6 a 21 no traço CRS sobretempo corrigido e as amostras 3 a 18 no traço piloto são consideradas dentro do cálculo para a correlação.

Finalmente, o valor de estática residual tem que ser estimado a partir das correlações cruzadas empilhadas. Como mencionado anteriormente, a estática residual é usualmente associada com um máximo global dos resultados da correlação. Entretanto, a partir dos testes realizados, é observado que este procedimento nem sempre é a melhor escolha, pois

muitos máximos globais estão localizados num tempo com deslocamento nulo mas numa área assimétrica em torno do máximo global. Assim, é introduzido outro algoritmo de marcação automática em vez da simples extração do máximo global. Agora, é possível definir um limite mínimo, que é uma porcentagem do máximo global ou o máximo local próximo a um deslocamento nulo. Então, o centro do lobo positivo definido para este limite é usado como o tempo deslocado estimado.

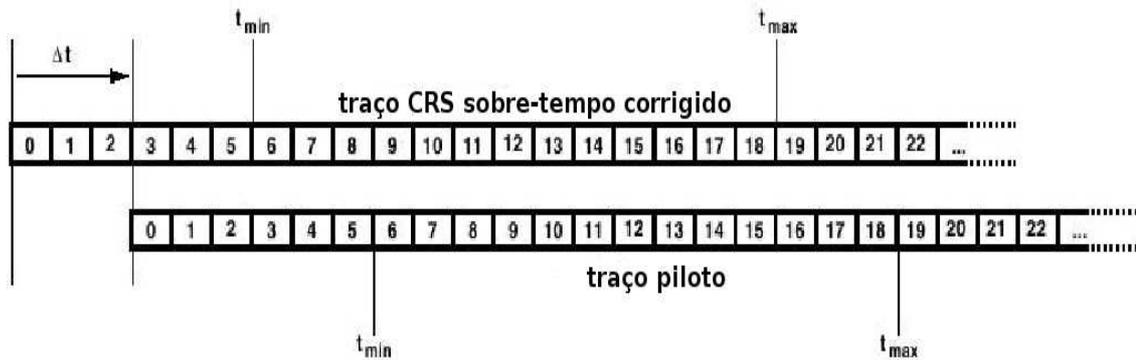


Figura 2.13: Correlação cruzada de um traço CRS sobretempo corrigido em relação a um traço piloto para um dado deslocamento no tempo  $\Delta t$  (adaptado de Koglin (2005)).

## 2.8 DENSIFICAÇÃO DO DADO PRÉ-EMPILHAMENTO

Dependendo do valor de deslocamento do CMP  $x_m - x_0$  escolhido, a superfície de empilhamento CRS (em verde na Figura 2.14) contém um número maior de traços do que o número usado durante o empilhamento convencional CMP (YILMAZ, 1987) (em roxo na Figura 2.14). A escolha do valor do deslocamento do CMP é importante para o resultado da resolução lateral, e o tamanho da primeira zona de Fresnel projetada é um bom guia para a escolha deste parâmetro, o qual pode ser interpretado como a extensão lateral do operador de empilhamento. Portanto o empilhamento CMP é considerado como um caso particular do empilhamento CRS quando se escolhe o valor do deslocamento do CMP nulo, ou seja,  $x_m - x_0 = 0$ . Neste caso, o operador de empilhamento CRS (equação 2.10) se transforma na fórmula do empilhamento convencional CMP dada por:

$$t^2(x_m - x_0 = 0, h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{NMO}^2}, \quad (2.28)$$

onde  $v_{NMO} = \sqrt{\frac{2v_0 R_{NIP}}{t_0 \cos^2 \beta_0}}$  é a velocidade de empilhamento.

O método de densificação do dado pré-empilhamento calcula uma superfície de empilhamento em torno de um ponto específico definido pelo seu afastamento e coordenadas de tempo de trânsito num CMP escolhido, e realiza a soma do dado ao longo desta superfície. O resultado da soma é atribuído a uma nova amostra com mesmo CMP, afastamento e coordenadas de tempo. Repetindo este processo para todo ponto desejado é gerado uma nova família denominada *super-família empilhada CRS parcial*. Na Figura 2.14 a superfície empilhada CRS parcial é mostrada como uma malha na cor vermelha em torno de um ponto específico (ponto vermelho), numa família CMP escolhida. Esta superfície coincide localmente com a superfície de empilhamento CRS, mostrada como uma malha na cor verde, mas a superfície de empilhamento CRS parcial é menor do que a superfície de empilhamento CRS.

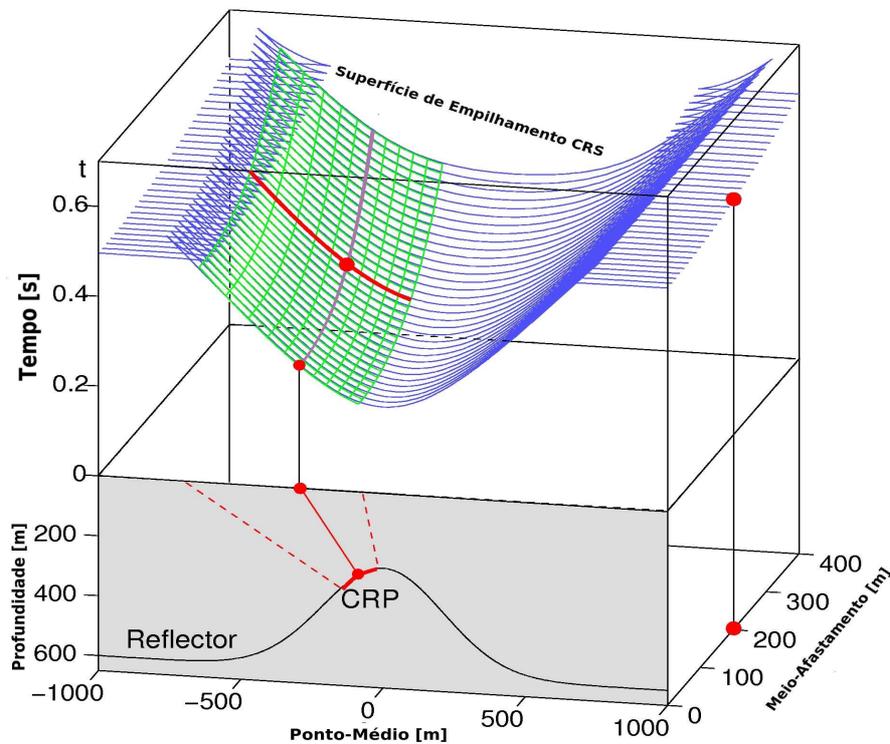


Figura 2.14: Superfície de empilhamento CRS para um meio com velocidade constante (adaptado de Baykulov e Gajewski (2007)). O empilhamento CRS soma o dado ao longo da superfície verde e leva o resultado para o ponto  $P_0$ . Esta superfície de empilhamento resulta da aproximação dos refletores em subsuperfície por um segmento de refletor que tem localmente a mesma curvatura do refletor em subsuperfície. Empilhamento CRS Parcial realiza a soma do dado ao longo da coordenada do ponto-médio deslocado (linha vermelha na superfície de empilhamento CRS) e leva o resultado para o afastamento na super-família (neste exemplo o meio-afastamento é igual a  $200m$ ).

A superfície de empilhamento CRS parcial é definida pelo tempo no afastamento-nulo ( $t_0$ ) do ponto considerado e os correspondentes parâmetros CRS. O tamanho da superfície pode variar a partir do tamanho da superfície de empilhamento CRS. Contudo, é uma boa

escolha usar o tamanho da superfície igual ao tamanho da superfície de empilhamento CRS, o máximo afastamento ou o deslocamento do CMP do ponto escolhido pode ser menor do que o definido para a superfície de empilhamento CRS. As medidas da superfície de empilhamento CRS parcial no afastamento e CMP são denominadas de *aberturas de empilhamento CRS parcial*. Estas aberturas serão ajustadas de acordo com a finalidade do processamento, e podem englobar apenas alguns traços da superfície de empilhamento CRS em torno do ponto escolhido. Empilhar mais traços pode ser necessário para complementar as lacunas presente nas famílias CMP. Neste caso a informação numa vizinhança dos CMPs ou numa vizinhança dos afastamentos é usada para gerar um novo traço na super-família CRS.

Visto que o empilhamento CRS parcial realiza a soma do dado para gerar uma amostra na super-família CRS, isto aumenta a qualidade das seções pelo aumento da sua razão sinal/ruído. Além disso, tomar informação a partir da vizinhança dos traços para preenchimento de lacunas. Finalmente, a superfície de empilhamento CRS é calculada para todo afastamento desejado, o qual significa que a regularização do dado dentro de cada família pode ser realizada. A incorporação do deslocamento do CMP  $x_m - x_0$  no cálculo da superfície de empilhamento CRS parcial resulta na construção das super-famílias CRS onde o mergulho dos refletores é considerado. Devido a isto o método de empilhamento CRS parcial é superior a técnica convencional CMP (YILMAZ, 2001), onde o mergulho das estruturas não é considerado. Como dito anteriormente, a superfície de empilhamento CRS é a que melhor descreve a resposta de reflexão, isso comparado ao método de empilhamento NMO/DMO. Portanto, o empilhamento CRS parcial produzirá melhores resultados do que o procedimento de interpolação NMO/DMO descrito por Brune et al. (1994).

Como a superfície de empilhamento CRS parcial não é apenas calculada para o traço no afastamento-nulo, mas para todo afastamento fonte-receptor especificado, e o resultado do empilhamento parcial é atribuído ao traço com um afastamento específico, as famílias resultantes não estão sobretempo corrigidas. Portanto o empilhamento CRS parcial pode ser usado para outros procedimentos convencionais posteriores como análise de velocidade, empilhamento ou migração.

A superfície de empilhamento CRS parcial é calculada numa escolhida localização CMP para toda amostra especificada  $A(t_A, h_A)$ , onde  $t_A$  é tempo de trânsito duplo, e  $h_A$  é o meio-afastamento fonte-receptor. O tempo no afastamento-nulo e os correspondentes parâmetros CRS ( $\beta_0, R_N, R_{NIP}$ ) que descrevem este evento devem ser encontrados. A busca pelos parâmetros CRS foi explicada na seção 2.4.1.

A busca pelo tempo de trânsito no afastamento-nulo é realizada para cada localização de

CMP do dado de forma independente. Como a curva de tempo de trânsito CMP é um caso particular da superfície de empilhamento CRS quando o deslocamento do CMP é nulo (veja a equação (2.28)), esta busca é simplificada para a busca da hipérbole CMP que melhor ajusta o evento em  $A$ . Todos os tempos de trânsito no afastamento-nulo dentro do intervalo  $[0, t_A]$ , bem como os correspondentes parâmetros CRS, são testados para determinar a hipérbole que tem o menor desvio temporal para  $t_A$  no meio-afastamento  $h_A$ . Da equação (2.28) o tempo de trânsito que melhor ajusta a curva CMP é descrita por:

$$t^2(x_m - x_0 = 0, h) = t_0'^2 + \frac{2t_0' \cos^2 \beta_0}{v_0} \frac{h^2}{R_{\text{NIP}}}, \quad (2.29)$$

onde  $t_0'$  é o tempo no afastamento-nulo testado, e  $\beta_0$  e  $R_{\text{NIP}}$  são os parâmetros CRS correspondentes a  $t_0'$ .

Entretanto, a hipérbole assim definida não ajusta o evento  $A(t_A, h_A)$  de forma exata, pois apenas um conjunto discreto de valores de tempos de trânsito no afastamento-nulo foram testados. O  $t_0'$  determinado não pode ser usado para descrever a superfície de empilhamento CRS parcial, porque os eventos não são empilhados coerentemente neste caso. Portanto, a hipérbole deve ser corrigida para se ajustar de forma exata ao ponto  $A$ . Admitindo que os parâmetros CRS  $\beta_0$  e  $R_{\text{NIP}}$  variam de forma suave em torno do evento  $A$ , se pode fixá-los na equação (2.29). Ajustando o tempo de trânsito  $t_A$  e o meio-afastamento  $h_A$  do evento  $A$  dentro da equação (2.29) se tem:

$$t_A^2 = t_0^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} \frac{h_A^2}{R_{\text{NIP}}} \quad (2.30)$$

onde  $t_0$  é o tempo de trânsito no afastamento-nulo de uma curva de tempo de trânsito CMP que se ajusta ao evento  $A$  de forma exata. Resolvendo a equação quadrática (2.30) em  $t_0$ , e utilizando apenas as soluções positivas, se tem:

$$t_0 = -\frac{h_A^2 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{\text{NIP}}} + \sqrt{\left(\frac{h_A^2 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{\text{NIP}}}\right)^2 + t_A^2}. \quad (2.31)$$

onde  $\beta_0$  e  $R_{\text{NIP}}$  estão definidos para o tempo de trânsito  $t_0'$ . Se admite que  $R_{\text{NIP}}$ , que é a medida do refletor em profundidade, seja positivo. O valor de  $t_0$  é substituído na equação (2.10) obtendo a fórmula do tempo de trânsito para a superfície de empilhamento CRS parcial (equação (2.32)) que ajusta de forma exata o evento  $A$  considerado, e esta superfície é que é

usada para somar o dado coerente:

$$\begin{aligned}
 t^2(x_m, h) = & \left( -\frac{h_A^2 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{\text{NIP}}} + \sqrt{\left( \frac{h_A^2 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{\text{NIP}}} \right)^2 + t_A^2} + \frac{2 \text{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 \\
 & + \frac{2 \cos^2 \beta_0}{v_0} \left( -\frac{h_A^2 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{\text{NIP}}} + \sqrt{\left( \frac{h_A^2 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{\text{NIP}}} \right)^2 + t_A^2} \right) \\
 & \left( \frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h_A^2}{R_{\text{NIP}}} \right) \tag{2.32}
 \end{aligned}$$

### 3 GEOLOGIA E PRÉ-PROCESSAMENTO SÍSMICO

Neste capítulo são apresentados aspectos geológicos da área, detalhes das etapas do pré-processamento ilustradas a partir do fluxograma 3.5, e resultados da aplicação destas etapas ao dado marinho.

#### 3.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS

A bacia geológica possui uma área de 25.685 km<sup>2</sup>, e está localizada na margem leste da costa brasileira, no litoral do estado da Bahia (Figura 3.1).



Figura 3.1: Mapa de localização da bacia geológica com ênfase na área de estudo (em amarelo), onde o fundo do mar varia de 150m a 1500m de profundidade.

A bacia possui cerca de 5.535 km<sup>2</sup> de área submersa (aproximadamente 20% da área total). Semelhantemente a outras bacias do litoral atlântico sul, ela inclui uma sequência sin-ripte, seguida de uma sequência transicional evaporítica e de uma sequência marinha em suas fases carbonáticas, de uma sequência marinha transgressiva, e, no topo, uma sequência

marinha regressiva.

Uma seção geológica esquemática da plataforma continental é apresentada na Figura 3.2, onde se destaca a ocorrência de uma fossa, de uma feição estrutural-estratigráfica associada à tectônica extensional causada pelo fluxo de sal (MAGNAVITA et al., 1998).

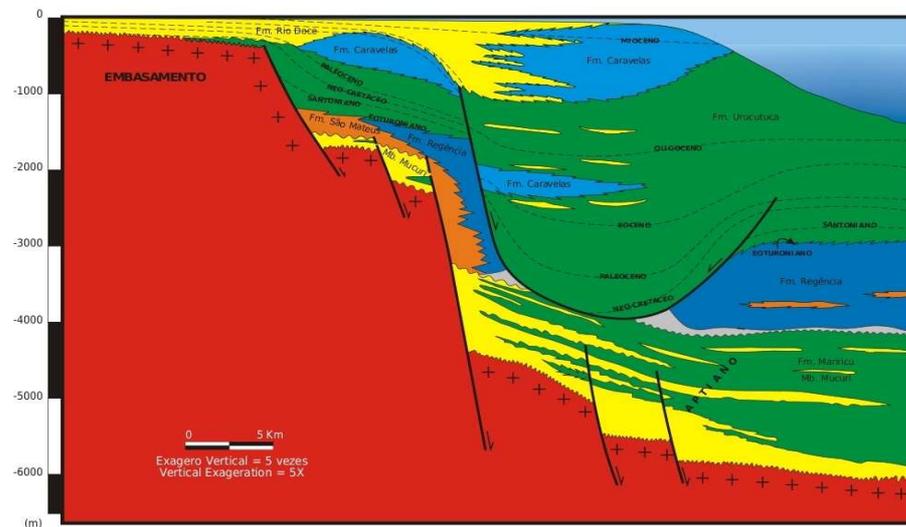


Figura 3.2: Seção geológica esquemática da porção de água rasa da bacia. É ilustrado a fossa tectônica resultante da distensão provocada pela fuga de sal para águas mais profundas a leste.

A linha sísmica foi adquirida pela PETROBRAS no ano de 1985. O comprimento total da linha sísmica é de aproximadamente 38 km, e foi gravada com streamer digital de 120 canais (Figura 3.3)

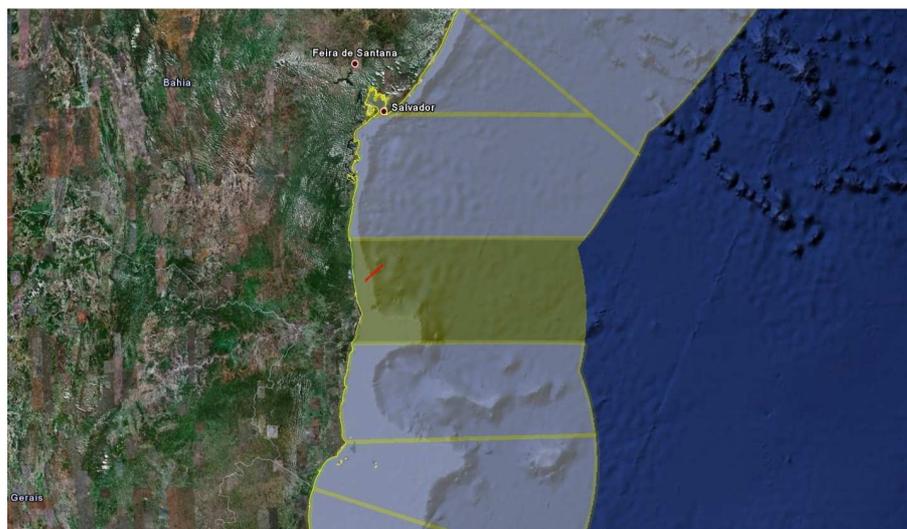


Figura 3.3: Mapa de localização da linha sísmica utilizada (em vermelho).

Os parâmetros da aquisição são descritos na tabela 3.1.

<b>Geometria de Tiros e Receptores</b>		<b>Geometria CMP</b>	
Número de Tiros	1578	Número de CMP	3274
Intervalo de Tiros	25 m	Intervalo entre CMP	12.5 m
Número de Receptores	120	Máxima cobertura	60
Intervalo entre Receptores	25 m	Lanço de geofones	-150 a -3125 m

<b>Parâmetros de Gravação</b>	
Tempo de gravação	7 s
Intervalo de amostragem	4 ms

Tabela 3.1: Parâmetros da aquisição do dado marinho.

A partir dos parâmetros da aquisição da tabela 3.1, se pode obter a seção afastamento-mínimo (Figura 3.4) que serve para orientar as etapas posteriores, sendo considerada como referência para o processamento e o imageamento.

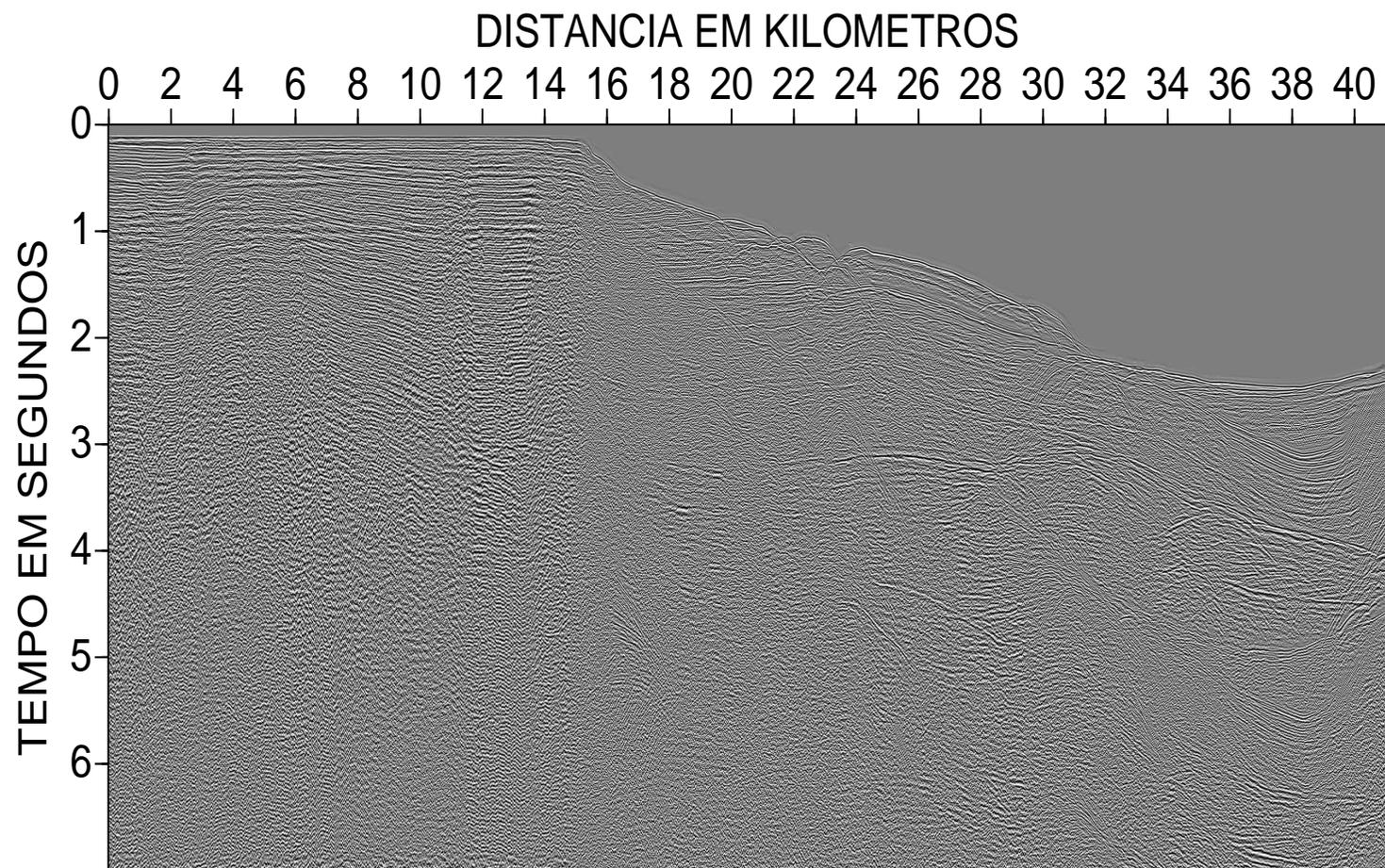


Figura 3.4: Seção afastamento-mínimo.  $h = 150\text{m}$ .

## 3.2 ETAPAS DO PRÉ-PROCESSAMENTO

O fluxograma mostrando as etapas do pré-processamento aplicado é apresentado na figura abaixo:

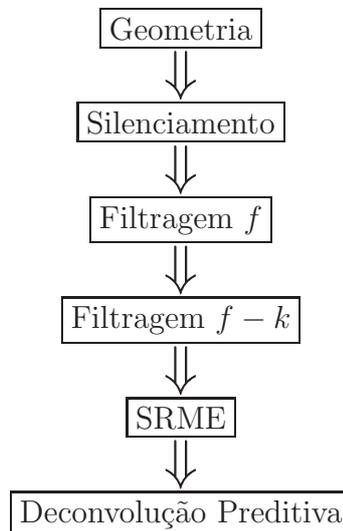


Figura 3.5: Etapas do pré-processamento

O pré-processamento consta da aplicação de técnicas básicas e fundamentais que levam a análise de velocidade, ao empilhamento e a migração, e resulta no aumento da razão sinal/ruído.

### 3.2.1 Geometria

A primeira etapa do pré-processamento é o acerto da geometria, onde se edita o conteúdo do cabeçalho dos traços sísmicos. Os traços, originalmente organizados em seções fonte-comum (Figura 2.1) são reordenados em famílias CMP (Figura 2.2) para privilegiar a redundância de informação multi-cobertura. A relação fonte-receptor é dada pela equação (2.1).

A técnica da formatação CMP, patenteada por Mayne (1962), tem como princípio a gravação redundante de informação para melhorar a relação sinal/ruído. Para se conseguir a redundância, são usadas no campo múltiplas fontes  $ns$  espaçadas de  $\Delta s$ . O campo acústico emitido pela fonte é registrado por múltiplos receptores  $ng$  espaçados de  $\Delta g$ . A equação (3.1) fornece o número de traços numa família CMP,  $NI$ .

A relação sinal/ruído é melhorada (teoricamente) por um fator de  $\sqrt{NI}$ , baseado no fato

de que o sinal de reflexão nos traços de uma família CMP é idêntico, e o ruído é aleatório (SENGBUSH, 1983). No entanto, para uma geometria de aquisição regular, a melhoria da relação sinal/ruído obtida pelo empilhamento é menor do que  $\sqrt{NI}$ .

$$NI = \frac{ng\Delta g}{2\Delta s}. \quad (3.1)$$

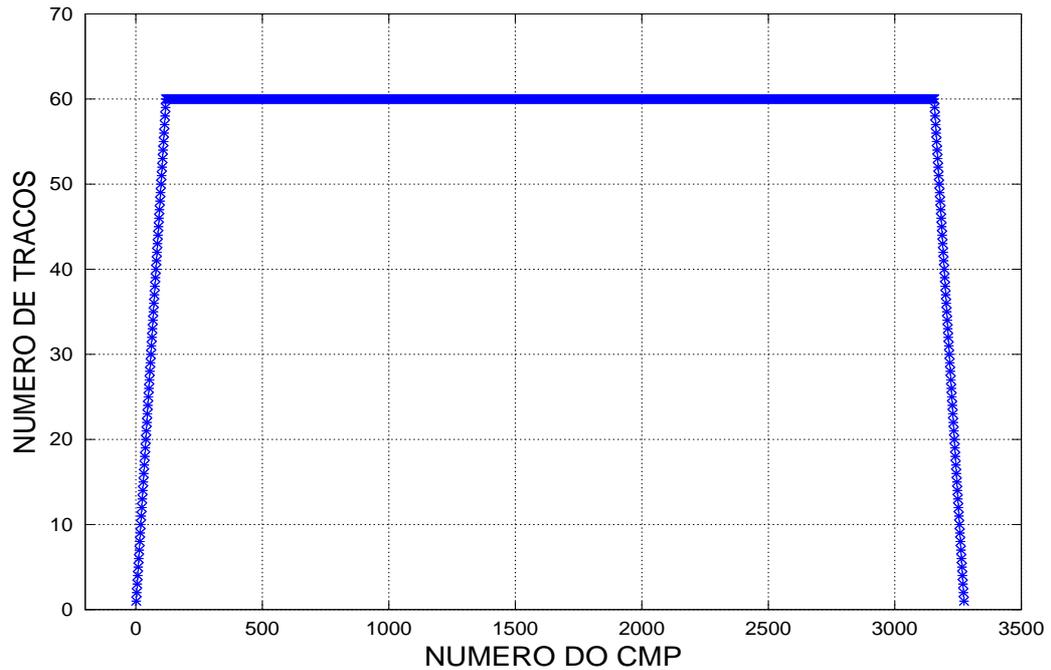


Figura 3.6: Número de traços contidos nas famílias CMP.

A Figura 3.6 mostra a cobertura nas famílias CMPs, o que corresponde à quantidade de traços que cada família CMP possui.

### 3.2.2 Silenciamento

Os traços sísmicos contém ruídos que prejudicam o empilhamento, ruídos estes que devem ser descartados (ou silenciados) antes do processo de empilhamento. A etapa de silenciamento de traços sísmicos, fontes e receptores, foi realizada para evitar que traços demasiadamente ruidosos, fontes e receptores defeituosos sejam considerados e adicionados ao dado sísmico. No presente trabalho, além do silenciamento de fontes e receptores, foi realizado o silenciamento do topo dos traços para eliminar onda direta e refrações rasas.

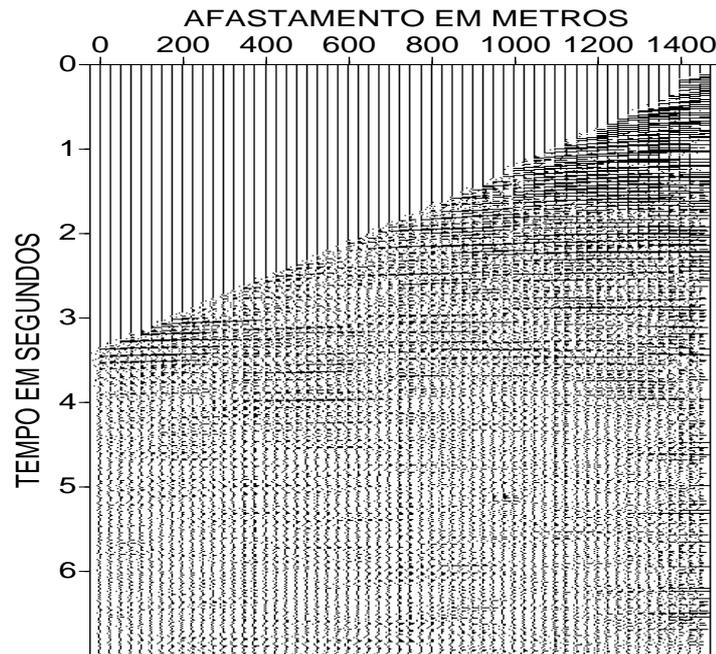


Figura 3.7: Seção ponto-médio-comum mostrando o acerto da geometria (de CS para CMP), e o silenciamento no topo dos traços.

### 3.2.3 Filtragem

Esta etapa tem a finalidade de atenuar, ou até remover, ruídos contidos no dado e ressaltar eventos de reflexão. Os filtros são desenhados no domínio da frequência, e constam basicamente de banda-passante trapezoidal dos tipos  $f$  (1D) e  $f-k$  (2D). O primeiro filtro aplicado foi o  $f$  para cortar a baixa e a alta frequência caracterizados pelas ondas de superfície d'água, e ruídos ambientais de alta frequência. Matematicamente, a operação de filtragem  $f$  é definida por:

$$A(f) = \begin{cases} 1, & f_1 < f < f_2 \\ 0, & \text{para o todo o resto} \end{cases} \quad (3.2)$$

onde  $f_1$  e  $f_2$  são as frequências de corte.

Em geral a energia sísmica útil para o processamento está contida na banda de frequência de 10 Hz a 70 Hz, o que significa que na equação (3.2) as frequências de corte são  $f_1 = 10$  Hz e  $f_2 = 70$  Hz. No presente trabalho, as frequências de corte foram determinadas após análise do espectro de amplitude mostrado na Figura 3.8, onde se observa a concentração de energia

nas frequências entre 10 Hz e 60 Hz utilizadas para definir o corte.

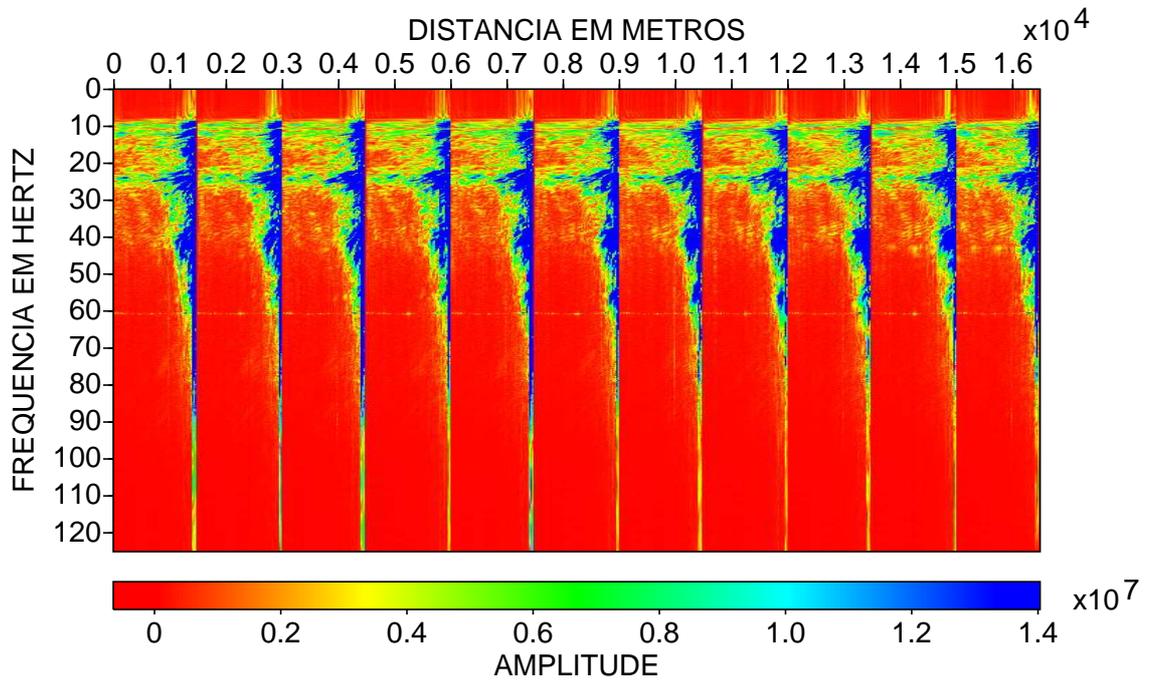


Figura 3.8: Espectro de amplitude antes da aplicação da filtragem.

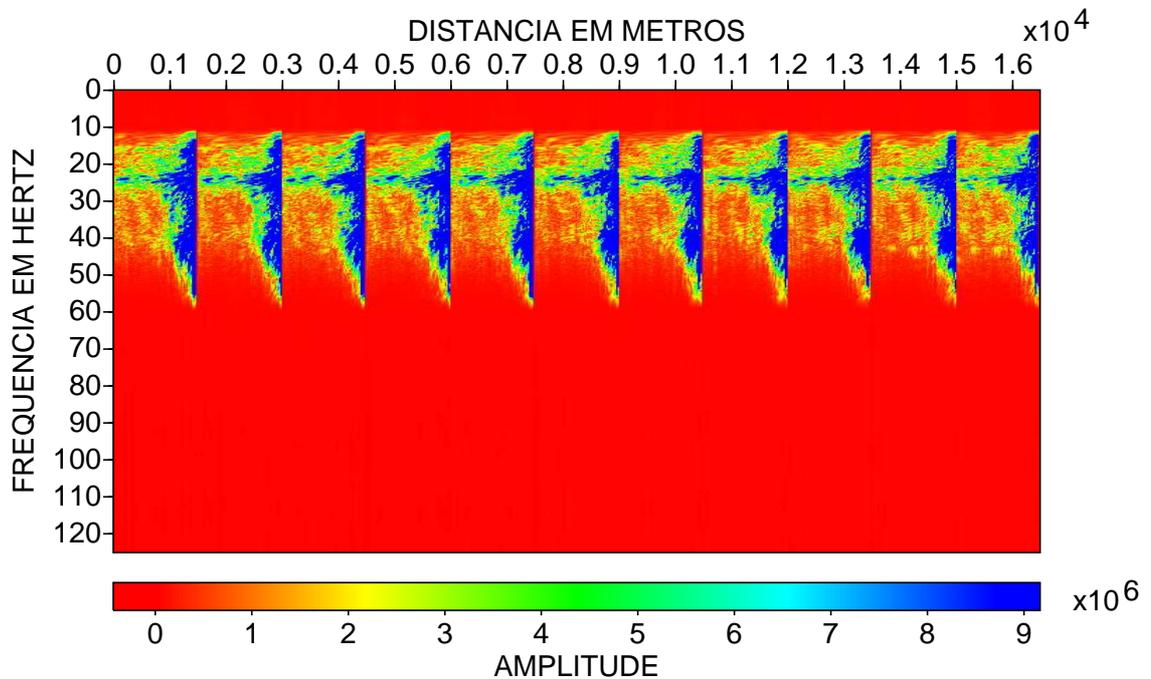


Figura 3.9: Espectro de amplitude após aplicação da filtragem banda-passante trapezoidal: 10 – 20 – 40 – 60 Hz.

O segundo filtro aplicado ao dado foi o filtro  $f - k$ , também conhecido como filtro de velocidade aparente, no domínio da frequência-número de onda. A representação de cada evento de velocidade constante no domínio  $f - k$  é uma linha reta passando pela origem. A finalidade deste filtro é atenuar ruídos caracterizados por uma determinada faixa de velocidade horizontal aparente. A aplicação deste filtro se deu a partir da análise do espectro  $f - k$  do dado como é mostrado na Figura 3.10.

Os eventos no domínio  $f - k$  são mostrados perpendiculares no domínio  $t - x$ . A equação é:  $sv = 1/v_{ind}$ , onde  $sv$  é a inclinação da reta para o processo de filtragem e  $v_{ind}$  é a velocidade a ser filtrada, as inclinações adotadas foram:  $sv_1 = -0.00066$ ,  $sv_2 = -0.00015$ ,  $sv_3 = 0.00015$  e  $sv_4 = 0.00066$ , e o resultado desta filtragem para um CMP é mostrado na Figura 3.11. As inclinações foram determinadas de tal forma a eliminar eventos com velocidades abaixo de 1500 m/s, uma vez que se considera estas velocidades como representativas de ondas se propagando na camada d'água.

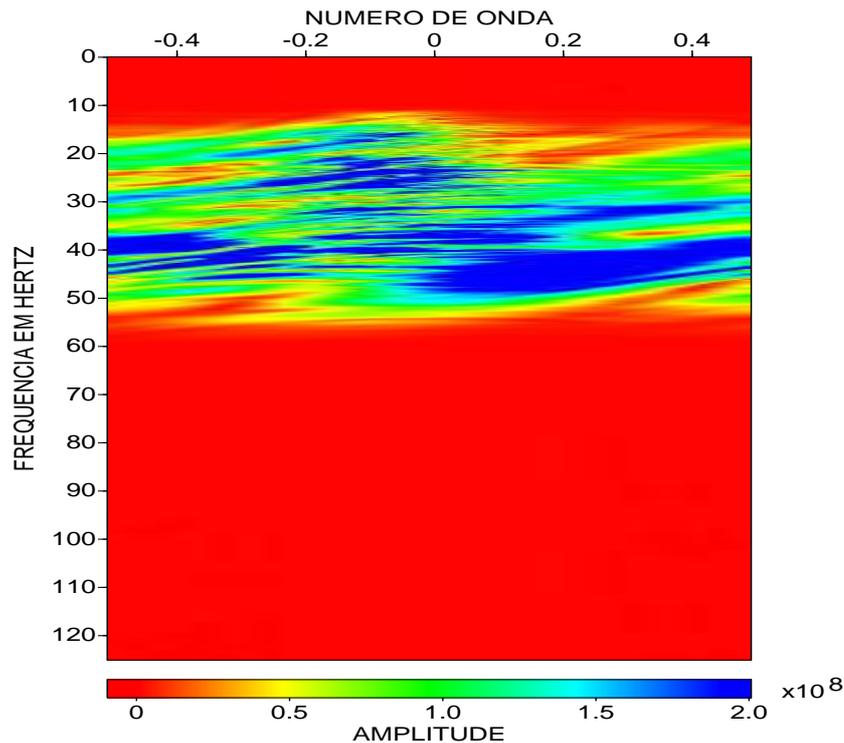


Figura 3.10: Espectro  $f - k$  antes da aplicação do filtro.

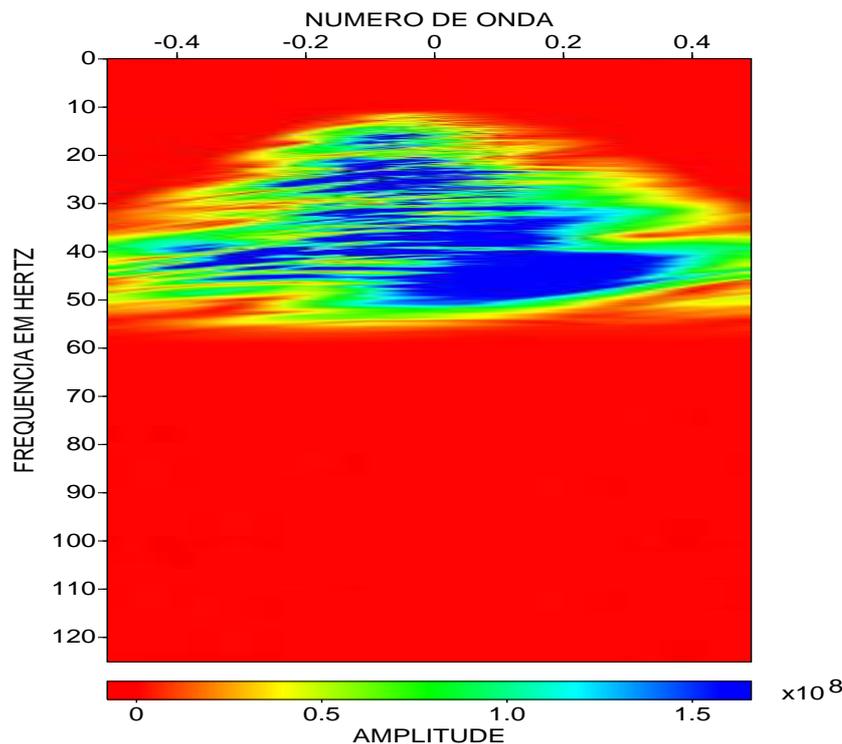


Figura 3.11: Espectro  $f - k$  depois da aplicação do filtro.

### 3.2.4 Atenuação de Múltiplas da Superfície Livre com o SRME

O método aplicado para atenuação de múltiplas relacionadas à da superfície livre, denominado SRME (*Surface Related Multiple Elimination*), foi descrito por Verschuur (1991), Verschuur et al. (1992) e Berkout e Verschurr (1997). O método SRME objetiva a atenuação da energia múltipla relacionada à superfície livre através de um processo inteiramente baseado no dado, o que significa que não é necessário adicionar outras informações. O desenvolvimento histórico do método é baseado no princípio de que nas auto-convoluções de um traço, eventos primários são transformados em múltiplas de ordens superiores.

Na prática, o próprio dado registrado é usado como uma primeira estimativa do campo primário, e o processo se torna então uma série de auto-convoluções a partir de famílias fonte-comum transformadas para famílias monocromáticas. O algoritmo gera um modelo pré-empilhamento de múltiplas que pode então ser subtraído dos dados usando uma forma de subtração adaptativa, ou um algoritmo de reconhecimento de padrões. O SRME pode focalizar múltiplas com sobretempo diferencial bem pequeno, tais como múltiplas internas (*peg-leg*), ou energia múltipla localizada nos traços com pequeno afastamento. No entanto, o método requer uma geometria de regularização e consideração sobre contaminação por

amostragem. A aplicação prática da maior parte do método é naturalmente em 2D, e não se pode incluir neste efeitos em 3D. O grau de atenuação é também dependente do método de subtração usado. Inovações envolvem algoritmos para processamento 3D, e versões não iterativas denominadas SRME Parcial (HUGONNET, 2002).

Numa descrição resumida do método, dados de componente simples, do tipo acústico, e multi-componente, do tipo elástico, podem ser considerados. Levando em consideração o campo refletivo completo na superfície livre para o caso elástico, todos os eventos múltiplos refletidos e convertidos relacionadas à superfície livre podem ser eliminados. Em todos os casos, é importante que, dado um certo tempo de registro, os dados representem ondas refletidas ascendentes, relacionadas a ondas descendentes. Também, que antes da aplicação do SRME deve ser aplicado um pré-processamento visando: (1) uma decomposição do campo medido nas componentes descendentes e ascendentes; (2) uma avaliação do pulso-fonte efetivo da fonte para deconvolução; (3) estimativa da diretividade da fonte e sensores para deconvolução dos seus efeitos. Estes procedimentos visam recuperar a resposta do meio às primárias. Considerando o caso marinho de componente simples, 2D, onde apenas ondas P são registradas. A descrição formal do método segue a metodologia de um processo de inversão estável e, conseqüentemente, é conveniente iniciar com a descrição do modelo direto para representar os dados observados. A Figura 3.12 ilustra parte da física do problema para o meio marinho.

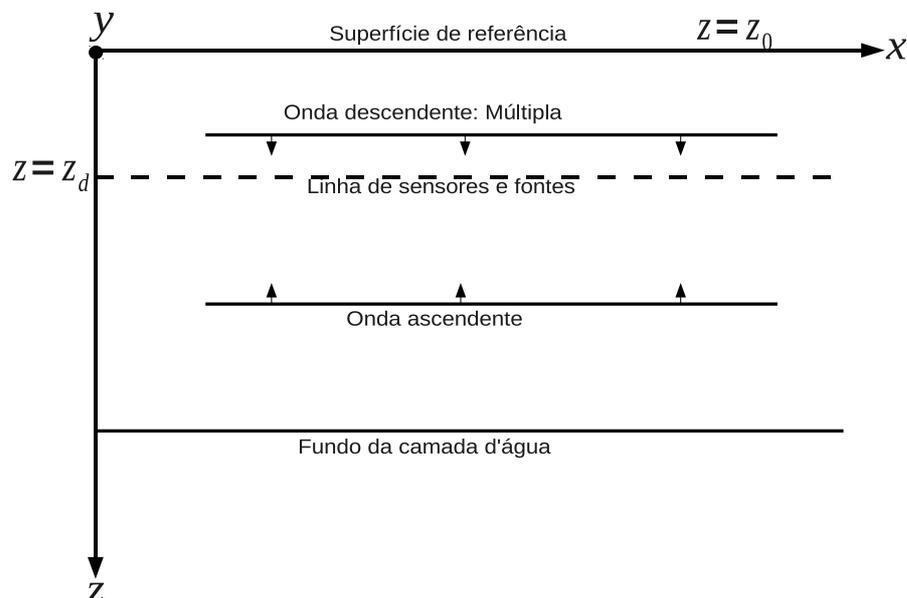


Figura 3.12: Ilustração do modelo marinho para a deconvolução de múltiplas pelo método SRME.

Sendo assim, a descrição inicia com um cubo de dados de dimensões fixas, organizado em família fonte-comum e representado por uma matriz  $D_{i,j,k}$  ( $i$ =eixo- $x$ ,  $j$ =eixo- $h$ ,  $k$ =eixo- $t$ ) formado por  $N$  tiros [ $i = (1, N)$ ] e  $N$  sensores [ $j = (j, N)$ ], com  $M$  pontos temporais [ $k = (k, M)$ ], no domínio  $x - t$ .

Em segundo lugar, este cubo tem seus traços transformados para o domínio da frequência ( $x - \omega$ ) usando a transformada de Fourier para uma função real com  $M$  pontos, e frequência de Nyquist definida ( $\omega_N = 1/2\Delta t$ ).

Em terceiro lugar, as famílias CS- $(x - t)$  são re-agrupadas em famílias monocromáticas CS- $(x - \omega)$  (ver Figura 3.13), de modo que as linhas da matriz complexa 3D agora passam a ser as colunas da matriz 2D formando painéis monocromáticos com  $N$  pontos complexos, e cujas frequências estão no intervalo de Nyquist. A organização das matrizes é tal que uma convolução espacial pode ser representada por uma multiplicação destas matrizes, segundo o teorema da convolução no tempo-espaço. Sendo assim, a matriz 2D descreve a linha sísmica total para uma mono-frequência, onde as colunas representam fonte-comum e as linhas receptor-comum.

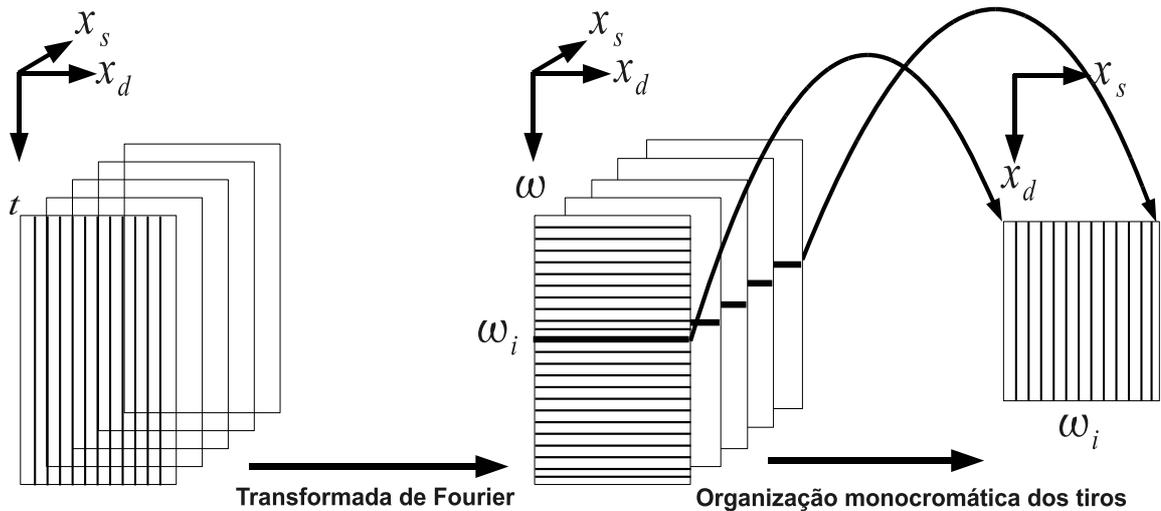


Figura 3.13: A matriz do dado adquirido com um arranjo fixo de sensores, com a fonte sequencialmente posicionada nas coordenadas de cada sensor. As seções tiro-comum correspondem às colunas da matriz do dado. As seções tiro são transformadas para o domínio da frequência através da transformada de Fourier, e re-ordenadas em seções tiro-comum monocromáticas para cada frequência como coluna da matriz monocromática. Adaptado de Verschuur et al. (1992).

Para a descrição teórica resumida é conveniente definir matrizes destacadas em negrito seguindo a nomenclatura de Verschuur et al. (1992):

- $z$ : coordenada vertical, positiva para baixo.
- $z = z_0$ : plano da superfície de referência. Como exemplo, a superfície da água com  $z_0 = 0$ .
- $\Delta z = z_d - z_0$ : diferença entre a superfície de referência e a superfície dos sensores,  $z = z_d$ .
- $\mathbf{I}$ : matriz identidade.
- $\mathbf{P}^-(z_0)$ : campo de onda total ascendente na superfície de nível  $z = z_0$  com múltiplas da superfície livre. Ela representa o dado propriamente dito.
- $\mathbf{P}_0^-(z_0)$ : campo de onda total ascendente na superfície de nível  $z = z_0$  sem múltiplas da superfície livre.
- $\mathbf{X}^-(z_0, z_0)$ : resposta da subsuperfície ao impulso com as múltiplas relacionadas à superfície inclusas.
- $\mathbf{X}_0^-(z_0, z_0)$ : resposta da subsuperfície sem as múltiplas relacionadas à superfície. (superfície livre não-refletiva).
- $\mathbf{R}^-(z_0)$ : refletividade da superfície livre para um campo descendente a partir da superfície de nível  $z = z_0$ .
- $\mathbf{S}^+(z_0)$ : fonte do campo de ondas descendente a partir da superfície de nível  $z = z_0$  para gerar a próxima múltipla.

Para estas matrizes temos as seguintes descrições: o negrito significa matriz 2D; um traço inferior que foi aplicado a transformada de Fourier no tempo; um traço superior que foi aplicado a transformada de Fourier no espaço; um sinal negativo superior à direita representa campo ascendente; um sinal positivo superior à direita representa campo descendente.

O campo de pressão monocromático ascendente na superfície livre é representado pela matriz  $(N \times N)$ ,  $\mathbf{P}_0^-(z_0)$ , segundo:

$$\mathbf{P}_0^-(z_0) = \mathbf{X}_0^-(z_0, z_0)\mathbf{S}^+(z_0), \quad (3.3)$$

mas  $\mathbf{P}_0^-(z_0)$  não representa o dado diretamente observado. O nível em profundidade,  $z = z_0$ , informa onde fontes e receptores estão localizados. Para o caso da resposta da subsuperfície

com as múltiplas inclusas relacionadas à superfície livre,  $\underline{\mathbf{X}}(z_0, z_0)$ , o campo total é expresso por:

$$\underline{\mathbf{P}}^-(z_0) = \underline{\mathbf{X}}(z_0, z_0)\underline{\mathbf{S}}^+(z_0), \quad (3.4)$$

A matriz  $(N \times N)$ ,  $\underline{\mathbf{S}}^+(z_0)$ , contém o campo-fonte descendente na superfície ( $z = z_0$ ), e cada coluna desta matriz contém o campo descendente para cada tiro-fonte do experimento, com  $S_j(\omega)$ , onde  $j$  indica o número do tiro, e para fontes dipolares puras a matriz  $\underline{\mathbf{S}}^+(z_0)$  é diagonal. A matriz  $(N \times N)$ ,  $\underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0)$ , representa a resposta da subsuperfície considerando uma superfície livre não-refletiva; isto é, sem múltiplas correspondentes. Esta matriz contém todas as reflexões primárias e múltiplas internas da subsuperfície.

Com a presença da superfície livre, as ondas ascendentes refletem e se transformam em ondas descendentes (fontes descendentes,  $\underline{\mathbf{S}}^+(z_0)$ ), e o campo total registrado,  $\underline{\mathbf{P}}^-(z_0)$ , é composto das partes descendente e ascendente, onde múltiplas estão incluídas, e cuja expressão implícita é dada por:

$$\underline{\mathbf{P}}^-(z_0) = \underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0)\underline{\mathbf{S}}^+(z_0) + \underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0)\underline{\mathbf{R}}^-(z_0)\underline{\mathbf{P}}^-(z_0). \quad (3.5)$$

A expressão explícita para o campo total ascendente na superfície, incluindo as múltiplas relacionadas a superfície livre  $\underline{\mathbf{P}}^-(z_0)$ , pode ser obtido das equações acima na forma:

$$\underline{\mathbf{P}}^-(z_0) = [\underline{\mathbf{I}} - \underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0)\underline{\mathbf{R}}^-(z_0)]^{-1}\underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0)\underline{\mathbf{S}}^+(z_0). \quad (3.6)$$

Para remover as múltiplas do dado  $\underline{\mathbf{P}}^-(z_0)$ , a equação (3.4) pode ser invertida para obter uma relação explícita para  $\underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0)$  na forma:

$$\underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0) = \underline{\mathbf{X}}(z_0, z_0)[\underline{\mathbf{I}} - \underline{\mathbf{R}}^-(z_0)\underline{\mathbf{X}}(z_0, z_0)]^{-1}. \quad (3.7)$$

A estabilidade desta equação está relacionada à inversão da matriz, e ela pode ser reescrita na forma:

$$\underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0) = \underline{\mathbf{X}}(z_0, z_0) \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \{-\underline{\mathbf{R}}^-(z_0)\underline{\mathbf{X}}(z_0, z_0)\}^n \right]. \quad (3.8)$$

Considerando o caso marinho onde a superfície livre tem pressão nula, a refletividade  $\underline{\mathbf{R}}^-(z_0)$  simplifica para:

$$\underline{\mathbf{R}}^-(z_0) = r_0\underline{\mathbf{I}}. \quad (3.9)$$

Substituindo esta aproximação na equação (3.8) e escrevendo de forma aberta se tem

que:

$$\underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0) = \underline{\mathbf{X}}(z_0, z_0) - r_0 \underline{\mathbf{X}}^2(z_0, z_0) + r_0^2 \underline{\mathbf{X}}^3(z_0, z_0) - r_0^3 \underline{\mathbf{X}}^4(z_0, z_0) + \dots \quad (3.10)$$

onde a convergência depende da potência do termo admitido. Na presença de múltiplas, como fortes reverberações na camada d'água, a convergência pode ser lenta. O número de termos a ser adotado na expansão depende da ordem da múltipla a ser admitida; como por exemplo dos dados aqui processados, a ordem é  $n = 2$ .

Continuando na direção de especificar o a solução do problema em foco, a fonte do campo de ondas pode ser representado por:

$$\underline{\mathbf{S}}^+(z_0) = S(\omega) \underline{\mathbf{I}}; \quad (3.11)$$

onde  $S(\omega)$  é a assinatura da fonte dependente da frequência, e neste caso a deconvolução da diretividade da fonte é considerada aplicada, ou desprezada. Usando a equação (3.10), com as substituições (3.3), (3.11) e (3.4), para se obter:

$$\underline{\mathbf{P}}_0(z_0, z_0) = \underline{\mathbf{P}}(z_0) - A(\omega) \underline{\mathbf{P}}^2(z_0) + A(\omega)^2 \underline{\mathbf{P}}^3(z_0) - A(\omega)^3 \underline{\mathbf{P}}^4(z_0) + \dots \quad (3.12)$$

onde

$$A(\omega) = r_0 S^{-1}(\omega). \quad (3.13)$$

representa o fator da superfície refletora, fonte das múltiplas. A equação (3.13) tem no primeiro termo o dado original,  $\underline{\mathbf{P}}(z_0)$ , não afetado por  $A(\omega)$ , e nos outros termos os produtos no domínio da frequência,  $\underline{\mathbf{P}}^2(z_0)$ ,  $\underline{\mathbf{P}}^3(z_0)$ , etc., que são as auto-convoluções do dado. A assinatura da fonte,  $S(\omega)$ , deve conter o fator de escala e retardos a serem aplicados nos dados. O fator  $A(\omega)$  deve deconvolver os termos  $\underline{\mathbf{P}}^2(z_0)$ ,  $\underline{\mathbf{P}}^3(z_0)$ , etc., de tal forma que as múltiplas preditas coincidam em amplitude e fase com as múltiplas presentes nos dados ( $\underline{\mathbf{P}}(z_0)$ ). Se observa que nenhuma outra informação a priori é utilizada no processamento do dado.

O fator de escala  $A(\omega)$  é considerado desconhecido, e deve ser estimado em conjunto com a eliminação das múltiplas numa forma adaptativa, o que quer dizer através da otimização no sentido de minimizar a energia da seção. A Figura (3.14) serve para ilustrar este conceitos, juntamente com a equações (3.12) e (3.13).

O procedimento de eliminação de múltiplas considera que a entrada para o algoritmo é representada pelo campo de pressão ascendente,  $\underline{\mathbf{P}}^-(z_0)$ , na superfície livre. Consequentemente, se faz necessário uma decomposição do campo registrado nas partes ascendentes

e descendentes como um pré-processamento. Os sensores são posicionados na coordenada  $z = z_d$  abaixo da superfície do mar. Para um tiro monocromático registrado, o vetor  $\mathbf{P}(z_d)$  representa uma coluna da matriz dos dados  $\underline{\mathbf{P}}(z_d)$  para a frequência em consideração.

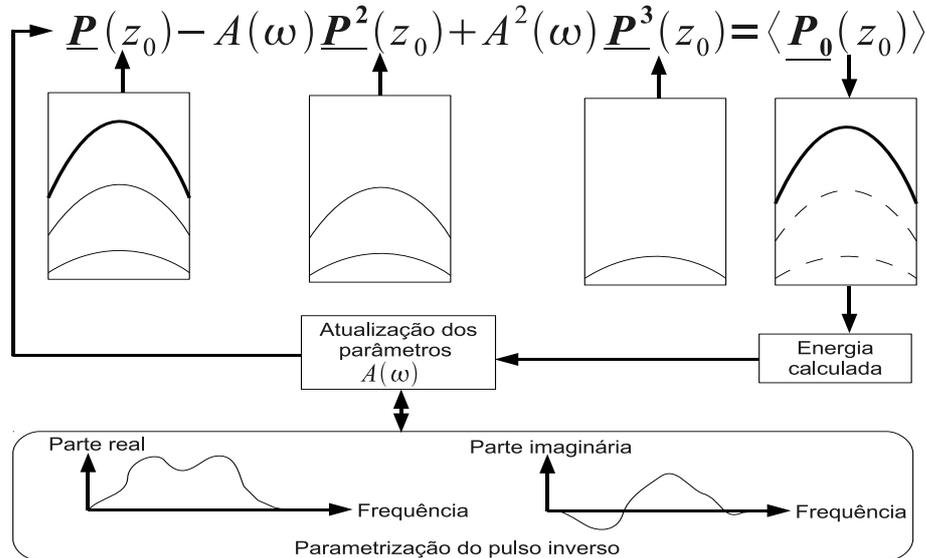


Figura 3.14: Ilustração do processo de eliminação adaptativa de múltiplas, simultaneamente se estima a assinatura da fonte pela minimização da energia total contida no dado. (Note que as matrizes representam todos os tiros na frequência dominante e os painéis representam um tiro no domínio do tempo). Adaptado de Verschuur et al. (1992).

Para o modelo marinho com uma camada d'água homogênea e superfície horizontal, a decomposição pode ser descrita no domínio  $k_x - \omega$  por  $\bar{\mathbf{P}}(k_x, z_d, \omega)$ , que corresponde à transformada de Fourier de  $\mathbf{P}(z_d)$  em  $x-t$ , que é composto dos campos ascendente,  $\bar{\mathbf{P}}^-(k_x, z_d, \omega)$ , e descendente,  $\bar{\mathbf{P}}^+(k_x, z_d, \omega)$  depois da reflexão na superfície livre (fantasma do sensor). Usando a operação de deslocamento duplo  $2\Delta z = z_d - z_0$  para a fase, se escreve que:

$$\bar{\mathbf{P}}^-(k_x, z_d, \omega) = \bar{\mathbf{P}}^-(k_x, z_d, \omega) + \bar{\mathbf{P}}^+(k_x, z_d, \omega) = \bar{\mathbf{P}}^-(k_x, z_d, \omega)[1 + r_0 e^{-2jk_z \Delta z}]; \quad (3.14)$$

onde  $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2}$ ;  $k = \omega/c = 2\pi f/c$ , ( $f$ , frequência;  $c$  velocidade da onda  $P$  na água); e  $\Delta z = z_d - z_0$ . A inversão da equação (3.14) produz o campo ascendente na superfície  $z = z_d$ , e dado por:

$$\bar{\mathbf{P}}^-(k_x, z_d, \omega) = \frac{1}{1 + r_0 e^{-2jk_z \Delta z}} \bar{\mathbf{P}}(k_x, z_d, \omega). \quad (3.15)$$

Para remover o fantasma do sensor, o campo  $\bar{\mathbf{P}}^-(k_x, z_d, \omega)$  é extrapolado para a superfície livre aplicando o deslocamento de fase simples  $e^{-jk_z \Delta z}$  para obter o operador de decomposição

acústica desejado:

$$\bar{\mathbf{P}}^-(k_x, z_d, \omega) = \frac{e^{-jk_z}}{1 + r_0 e^{-2jk_z \Delta z}} \bar{\mathbf{P}}(k_x, z_d, \omega). \quad (3.16)$$

O fantasma da fonte não é tratado nesta equação acima, uma vez que fontes dipolares já são admitidas no formalismo expresso pela equação (3.12).

### 3.2.5 Deconvolução Preditiva

A deconvolução é um processo com o qual se busca aumentar a resolução temporal do dado sísmico pela supressão de múltiplas. Uma das técnicas usadas aqui é baseada no filtro Wiener-Hopf (LINES, 1974), (WALDEN, 1988) e (LIENBACH, 1995). Este processo prático se inicia com o cálculo da autocorrelação do dado como mostra a Figura 3.15.

Se observa na Figura 3.15 a variação da amplitude da autocorrelação em torno do centro da figura, de onde se determina o comprimento de predição dado pela diferença entre o tempo que marca o valor máximo da autocorrelação (centro da figura) e o tempo que marca o segundo zero da função (ROBINSON; TREITEL, 2000). No caso do dado utilizado, o comprimento de predição foi de 0.04 s. O comprimento do operador foi determinado segundo a recomendação contida em Cohen e Stockwell (2005), onde o valor do comprimento do operador deve ser um pouco maior do que o valor do tempo que determina o máximo valor de amplitude da autocorrelação (centro da figura), e para o dado utilizado o comprimento foi de 0.25 s. Esta determinação é estritamente prática. O resultado está na Figura 3.16, onde se observa que foi mantida a forma do pulso, e atenuada a variação de amplitude da autocorrelação, indicando a predição realizada no dado.

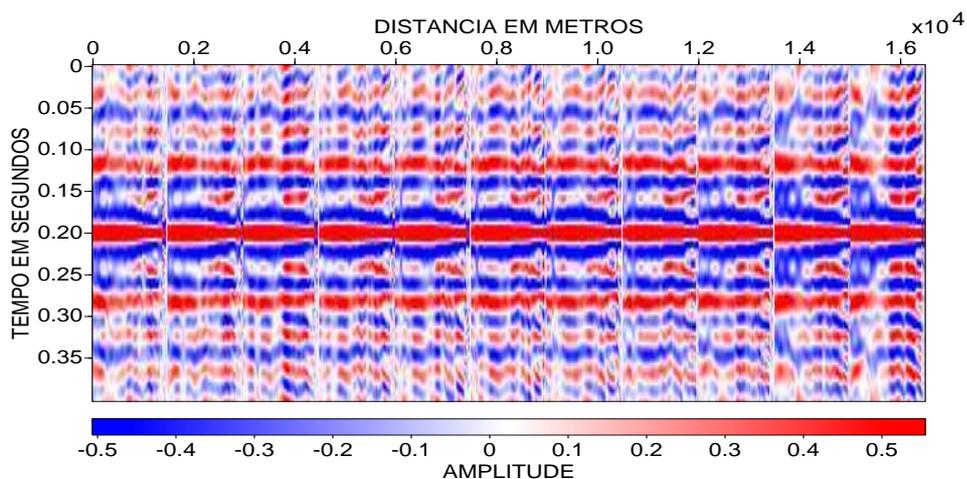


Figura 3.15: Autocorrelação do dado antes da aplicação da deconvolução preditiva.

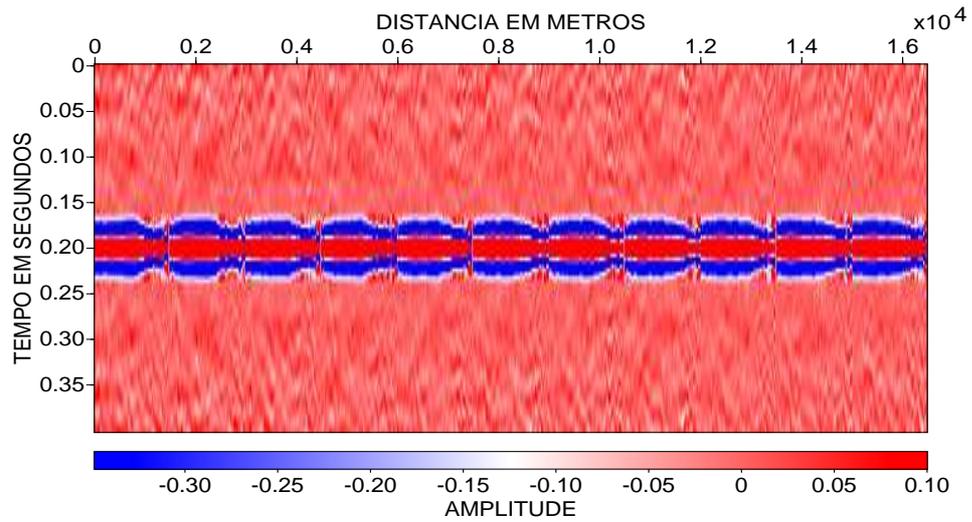


Figura 3.16: Autocorrelação do dado após a aplicação da deconvolução preditiva.

A Figura 3.17 mostra uma quantidade maior de pontos, possibilitando uma melhor visão da atuação do processo de deconvolução preditiva. No centro é possível ver o resultado da escolha do comprimento do operador na parte predominantemente branca em torno do centro da figura.

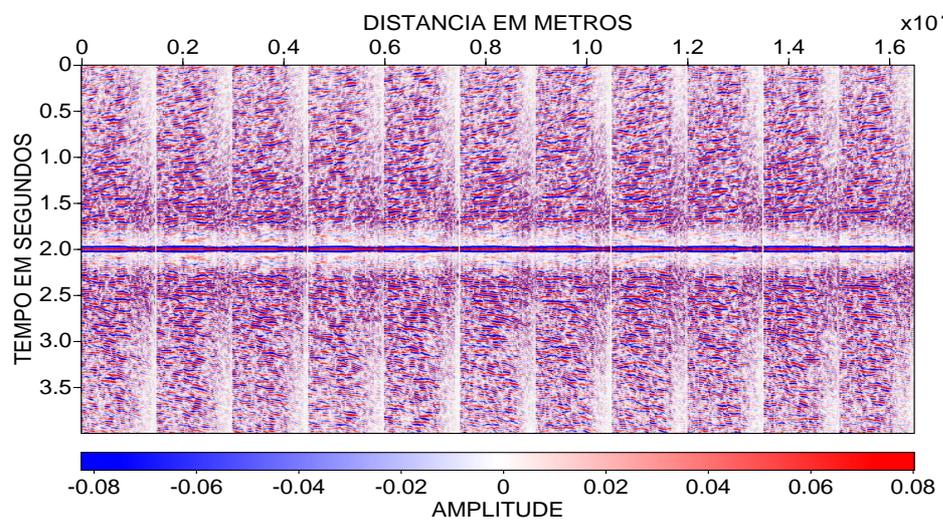


Figura 3.17: Autocorrelação do dado após a aplicação da deconvolução preditiva com uma quantidade maior de pontos.

## 4 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO

Neste capítulo são apresentados resultados do processamento da linha marinha de acordo com o fluxograma aplicado (Figura 4.1), que é composto de três caminhos. É também realizada uma comparação entre os fluxogramas aplicados. As etapas de empilhamento CRS e os processos Correção Residual Estática, Densificação do Dado Pré-empilhamento e Pré-processamento tiveram suas bases teóricas apresentadas nos capítulos 2 e 3, respectivamente.

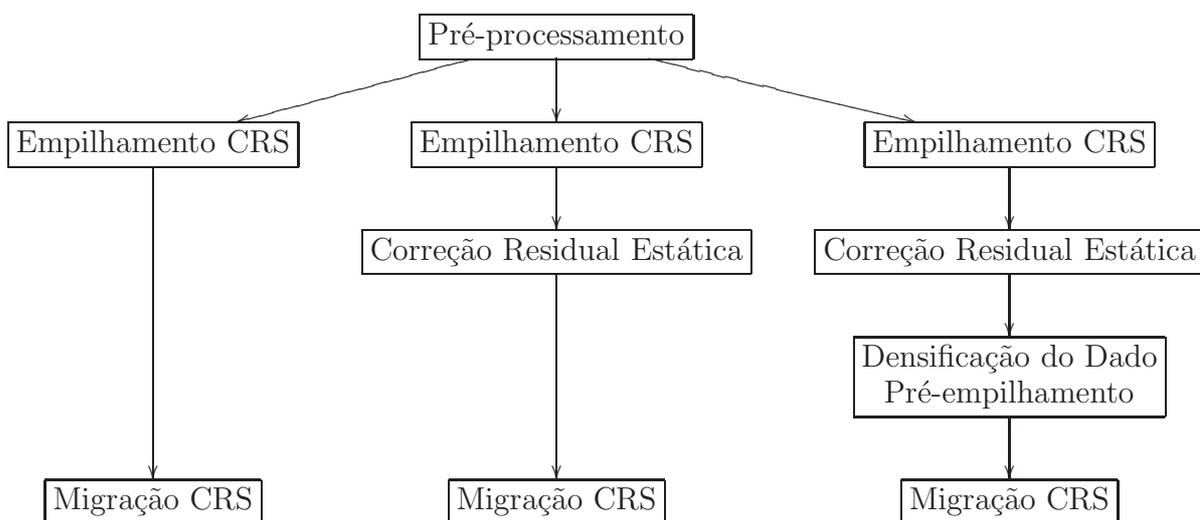


Figura 4.1: Fluxogramas das principais etapas dos processamentos aplicados. (Esquerda) Fluxograma I. (Direita) Fluxograma II. (Centro) Fluxograma III.

Como o empilhamento CRS é parte comum a todos os fluxogramas, a tabela 4.1 apresenta os parâmetros utilizados, bem como os parâmetros utilizados nos processos Correção Residual Estática e Densificação do Dado Pré-empilhamento.

Parâmetros gerais	Valores
Medida de coerência	Semblance
Dado usado para análise de coerência	Traços normalizados
Velocidade e vínculos	Valores

Velocidade constante na superfície	1500 m/s
Velocidades de empilhamento testadas	1400 à 6000 m/s
<b>Zona Alvo</b>	<b>Valores</b>
Tempos de trânsito para simulação ZO	0 à 7 s
Intervalo de amostragem temporal	4 ms
Número de traços ZO simulados	2167
Espaçamento entre traços ZO simulados	12.5 m
<b>Aberturas e suavização</b>	<b>Valores</b>
Mínima abertura ZO	100 m em 0.1 s
Máxima abertura ZO	500 m em 4.0 s
Mínima abertura CMP	300 m em 0.1 s
Máxima abertura CMP	3125 m em 4.0 s
Tamanho relativo à suavização	30%
<b>Busca automática de <math>v_{EMP}</math> em famílias CMP</b>	<b>Valores</b>
Incremento no sobre-tempo inicial para grandes afastamentos	16 ms
Número de iterações para o refinamento	3
<b>Busca de <math>\beta_0</math> e <math>R_{NIP}</math> na seção empilhada</b>	<b>Valores</b>
Ângulos de emergência testados	$-60^\circ$ à $60^\circ$
Incremento do ângulo de emergência	$1^\circ$
Número de iterações para o refinamento	3
<b>Busca de <math>R_N</math> na seção empilhada</b>	<b>Valores</b>
Incremento no sobre-tempo inicial para grandes afastamentos	8 ms
Número de iterações para o refinamento	3
<b>Deteção de mergulhos conflitantes</b>	<b>Valores</b>
Número máximo de mergulhos conflitantes	3
Mínimo de coerência para um máximo global	0.4
Mínimo de coerência para um máximo local	0.3
<b>Busca final</b>	<b>Valores</b>
Limite de coerência para tempos de trânsito pequenos	0.06
Limite de coerência para tempos de trânsito grandes	0.03
Número máximo de iterações na otimização	100
Desvio máximo relativo para parada	$10^{-4}$

Varição inicial dos ângulos de emergência	6°
Varição inicial de $R_{NIP}$	5%
Varição inicial de $R_N$ transformado	6°
Raio de transformação de $R_N$	100m
<b>Correção estática residual</b>	<b>Valores</b>
Tempo mínimo para a correlação cruzada	0.3 s
Tempo máximo para a correlação cruzada	4.0 s
Máximo deslocamento no tempo para a correlação cruzada	24 ms
<b>Densificação do dado pré-empilhamento</b>	<b>Valores</b>
Intervalo entre receptores nas super-famílias geradas	25 m

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados para simulação ZO pelo empilhamento CRS e para os processos de Correção Residual Estática e Densificação do Dado Pré-empilhamento.

Todas as seções empilhadas e migradas apresentadas neste capítulo estão com ganho *agc* (*automatic gain control*) e *gagc* (*gaussian taper*), com uma janela de 0.5 s, aplicados para melhorar a visualização dos resultados.

## 4.1 FLUXOGRAMA I

O primeiro fluxograma aplicado tem suas etapas apresentadas na Figura 4.2, e gerou os resultados mostrados nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

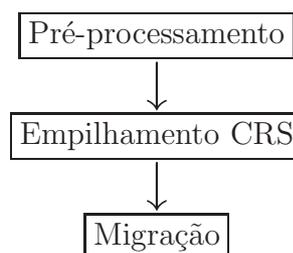


Figura 4.2: Etapas do fluxograma I.

Este fluxograma é o básico e de referência, constando das etapas de empilhamento e da migração CRS. O resultado do empilhamento CRS otimizado é mostrado na Figura 4.3. A seção coerência da Figura 4.4 mostra os eventos dominantes que são os associados aos maiores valores de coerência que tem um máximo ao redor de 0.3. As seções ângulo de emergência e curvatura da onda N são mostradas nas Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente. Elas mostram

claramente a separação entre as zonas de difração e de reflexão, e ambas estão diretamente relacionadas a mergulhos e curvaturas de eventos. A seção ângulo de emergência (Figura 4.5) apresenta como característica fortes difrações em algumas partes da seção.

A seção raio de curvatura da onda NIP é mostrada na Figura 4.7, e mostra estratificação da distribuição crescente do raio com o aumento do tempo de trânsito. A seção se mostra ruidosa para grandes valores de tempo de trânsito.

As difrações evidentes na Figura 4.3 são colapsadas através da migração CRS em tempo baseada nos atributos CRS, e se observa que um resultado mais expressivo das estruturas em subsuperfície é obtido. O resultado da migração é mostrado na Figura 4.8, onde a abertura ZO foi restrita à primeira zona de Fresnel projetada. Entretanto, a seção migrada tem uma aparência granulada, e uma proposta é realizar uma suavização dos atributos antes da etapa de migração para procurar diminuir o efeito granulado. A Figura 4.8 deve ser vista apenas como uma primeira aproximação para análise das estruturas em subsuperfície, uma vez que a migração a profundidade seria mais significativa.

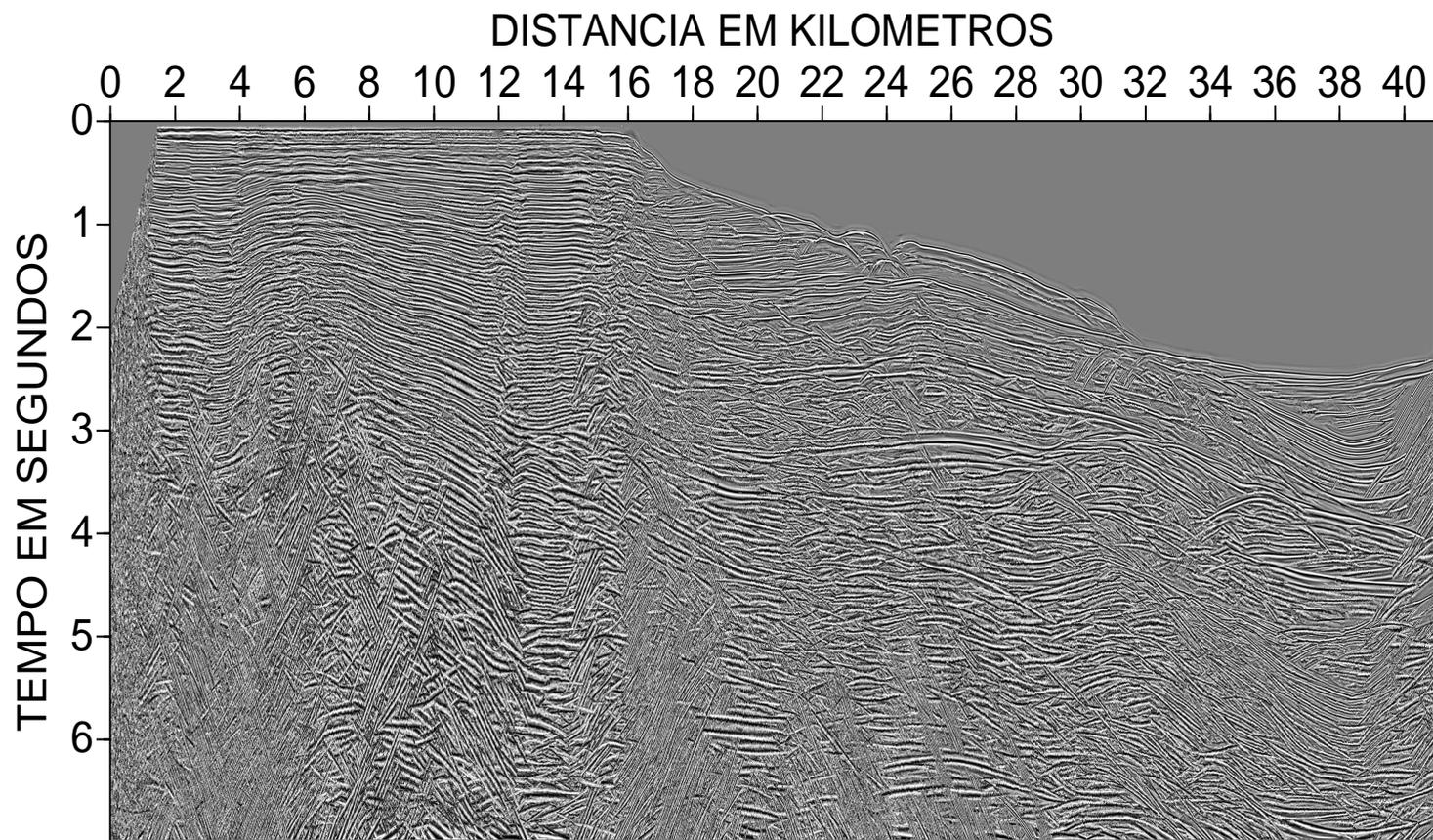


Figura 4.3: Seção empilhada resultante do fluxograma I. O ganho agc com uma janela de 0.5s e uma suavização gaussiana foram aplicadas para revelar eventos com baixa amplitude. A abertura ZO foi restrita à primeira zona de Fresnel projetada.

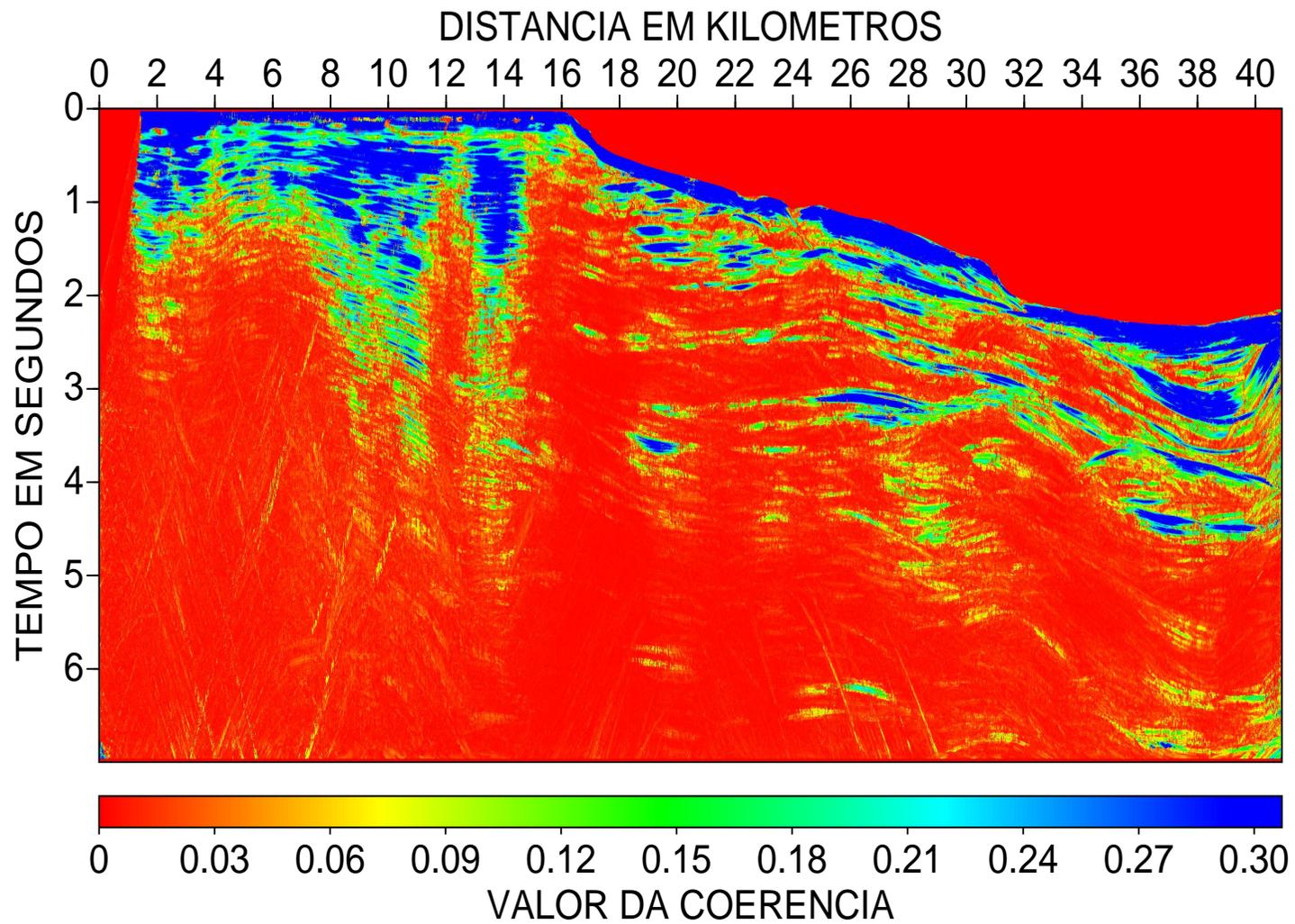


Figura 4.4: Seção coerência ( $S$ ) resultante do fluxograma I. O intervalo mostra os valores de coerência que tem um máximo ao redor de 0.3.

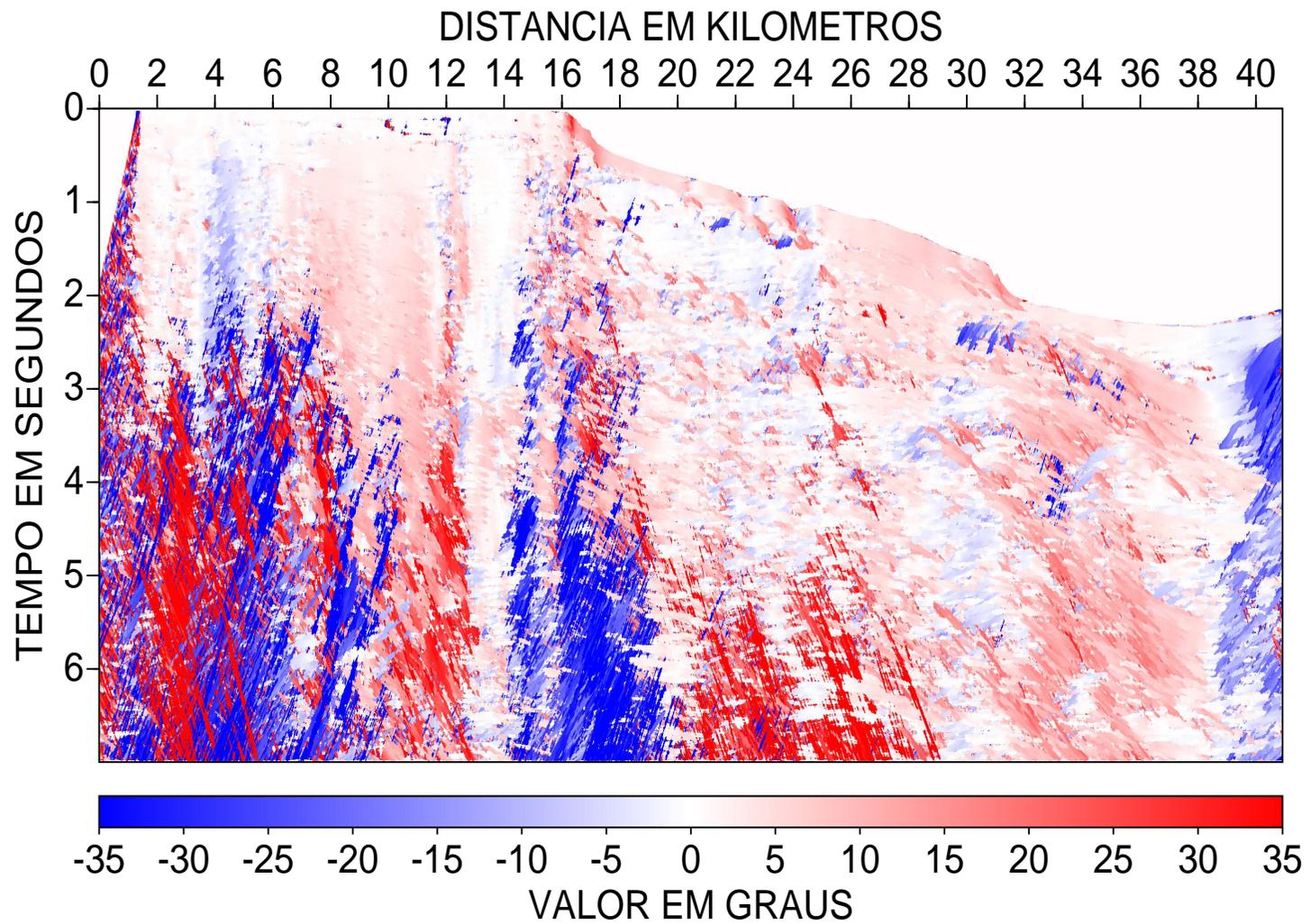


Figura 4.5: Seção ângulo ( $\beta_0$ ) resultante do fluxograma I.

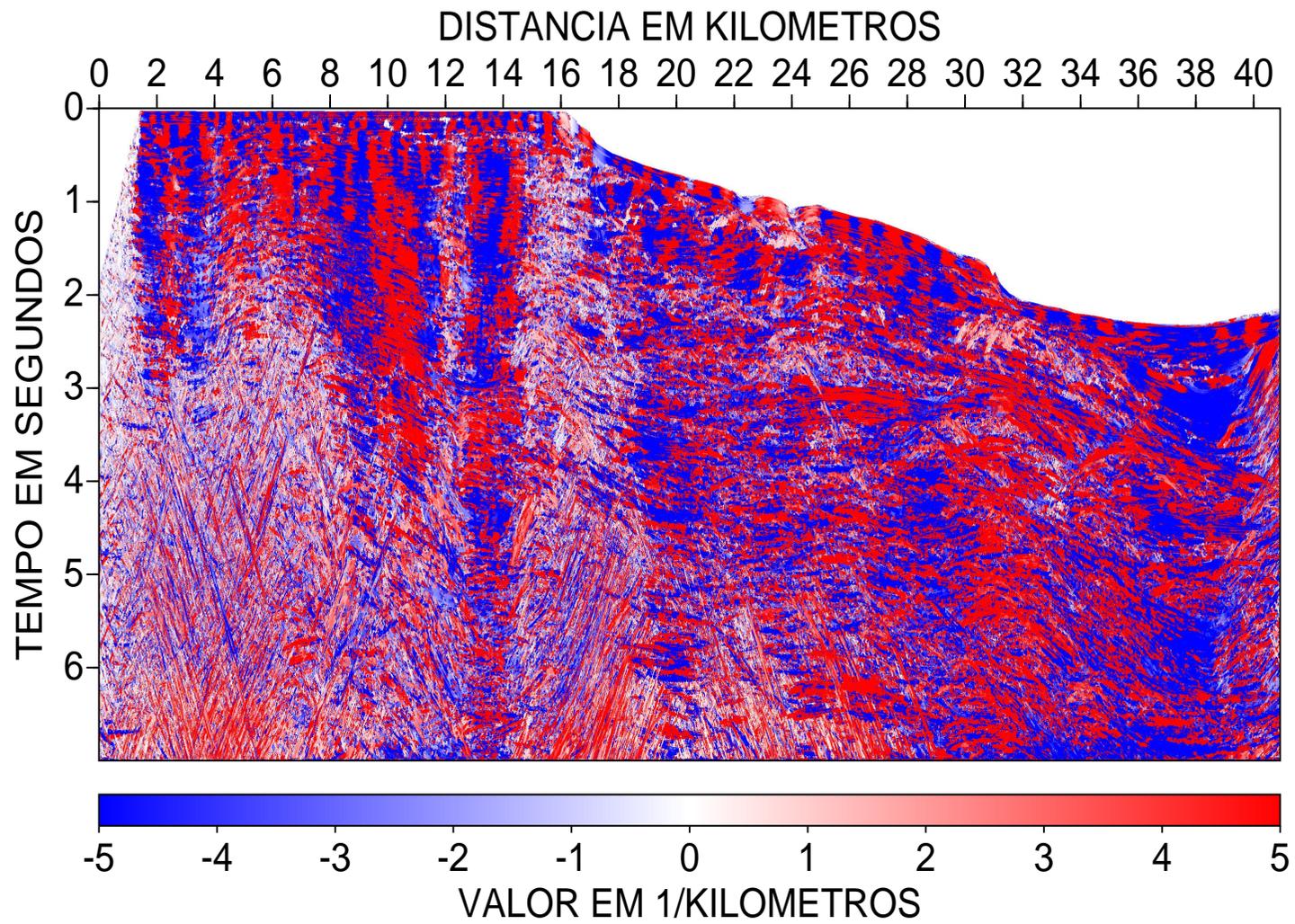


Figura 4.6: Seção curvatura da onda N ( $K_N$ ) resultante do fluxograma I.

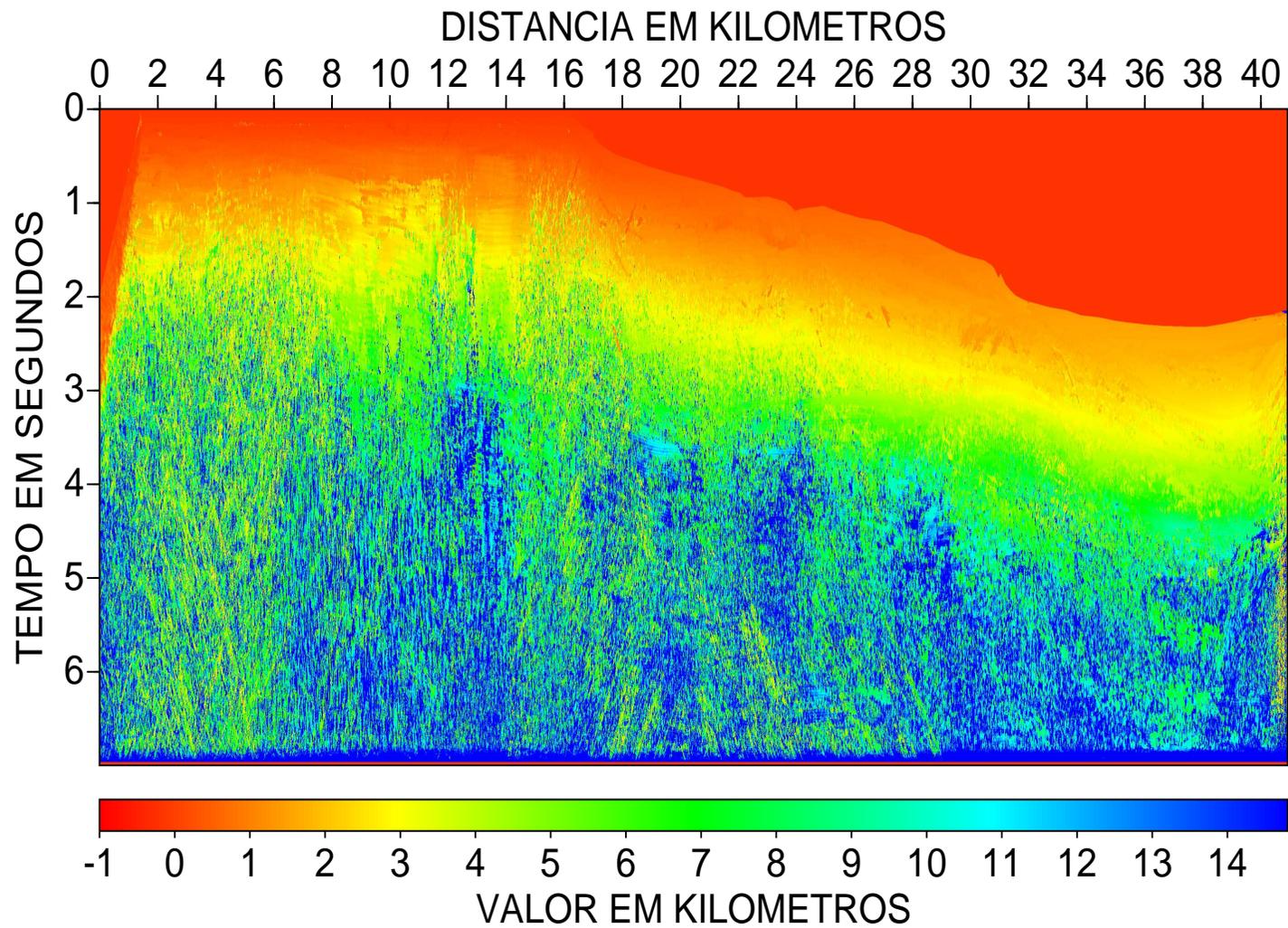


Figura 4.7: Seção raio de curvatura da onda NIP ( $R_{NIP}$ ) resultante do fluxograma I.

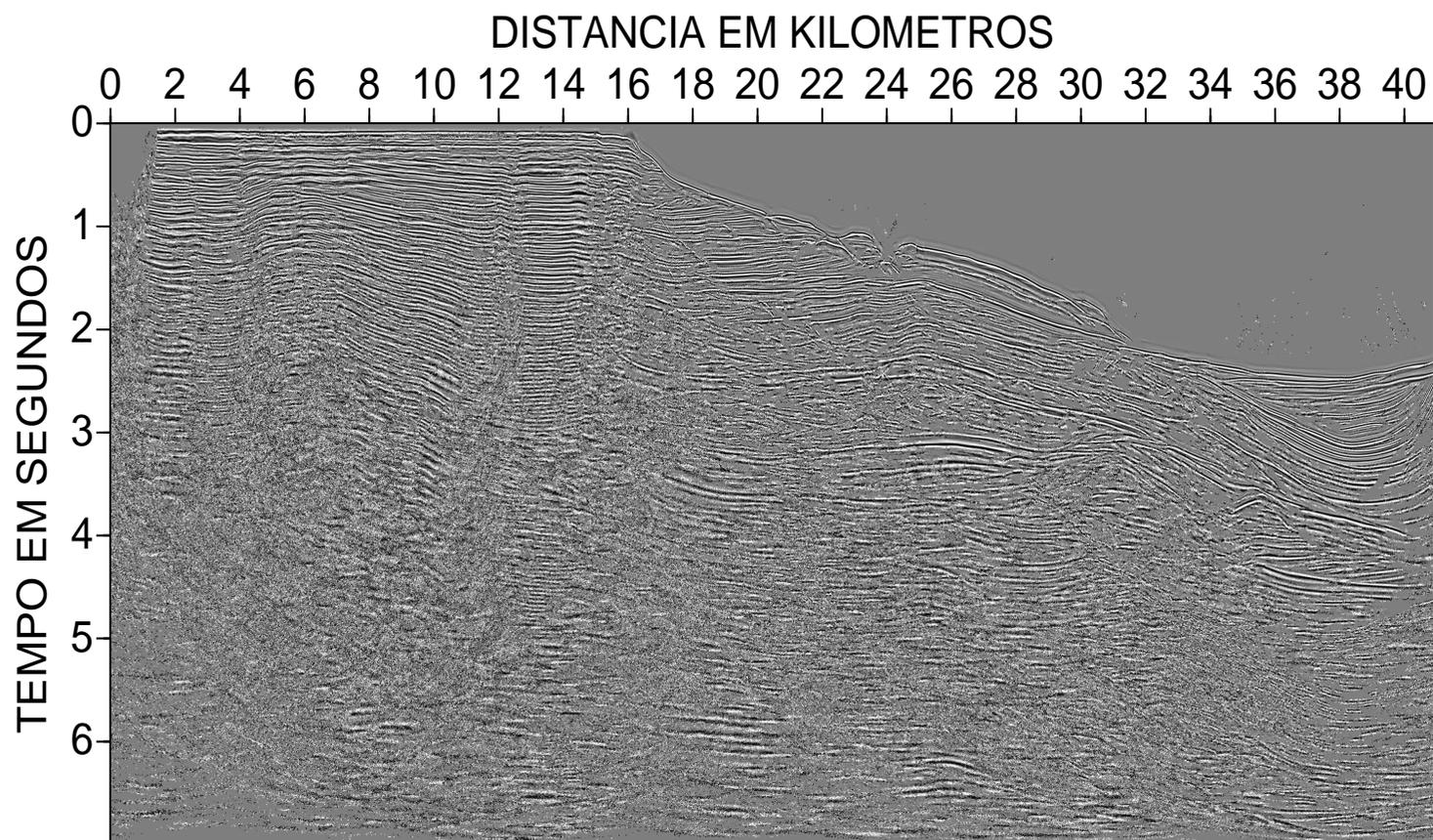


Figura 4.8: Seção migrada resultante do fluxograma I. O ganho agc com uma janela de 0.5s e uma suavização gaussiana foram aplicadas para revelar eventos com baixa amplitude. A abertura ZO foi restrita a primeira zona de Fresnel projetada.

## 4.2 FLUXOGRAMA II

O segundo fluxograma aplicado é apresentado na Figura 4.9, e gerou os resultados mostrados nas Figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15.

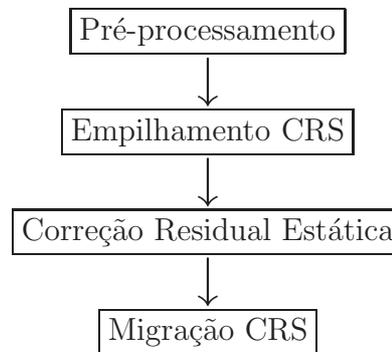


Figura 4.9: Etapas do fluxograma II.

Como se pode ver pelas figuras, este fluxograma segue o fluxograma I e consta das etapas de empilhamento CRS, correção residual estática e da migração CRS. O resultado do empilhamento CRS otimizado é mostrado na Figura 4.10. A comparação visual entre as Figuras 4.3 e 4.10 não permite perceber grandes mudanças com relação à continuidade dos eventos, mas apenas uma pequena melhora com relação ao ruído contido nas seções, principalmente nos limites entre as regiões de difração e de reflexão. A comparação entre as seções coerência da Figura 4.11 e Figura 4.4, se percebe pela escala de cores um aumento na coerência mostrando um valor máximo ao redor de 0.36. Também se pode perceber uma maior continuidade dos eventos localmente.

A comparação entre as seções ângulo de emergência, mostradas nas Figuras 4.5 e 4.12, não revela diferenças significativas. Já nas seções curvatura da onda N, mostradas nas Figuras 4.6 e 4.13, revelam uma piora, principalmente para pequenos valores de tempo de trânsito, o que pode ser visto na região da parte rasa da seção. Com relação às seções raio de curvatura da onda NIP, mostradas nas Figuras 4.7 e 4.14, se percebe uma melhora quanto a identificação de alguns eventos, como algumas difrações ao redor da distância de 18 km e no tempo dos 4 s.

A comparação entre as seções migradas, mostradas nas Figuras 4.8 e 4.15, não revelam grandes mudanças com relação a continuidade dos eventos, e se percebe que as difrações contidas na Figura 4.10 foram totalmente colapsadas. A aparência granulada é presente, como apresentado nos resultados do fluxograma I.

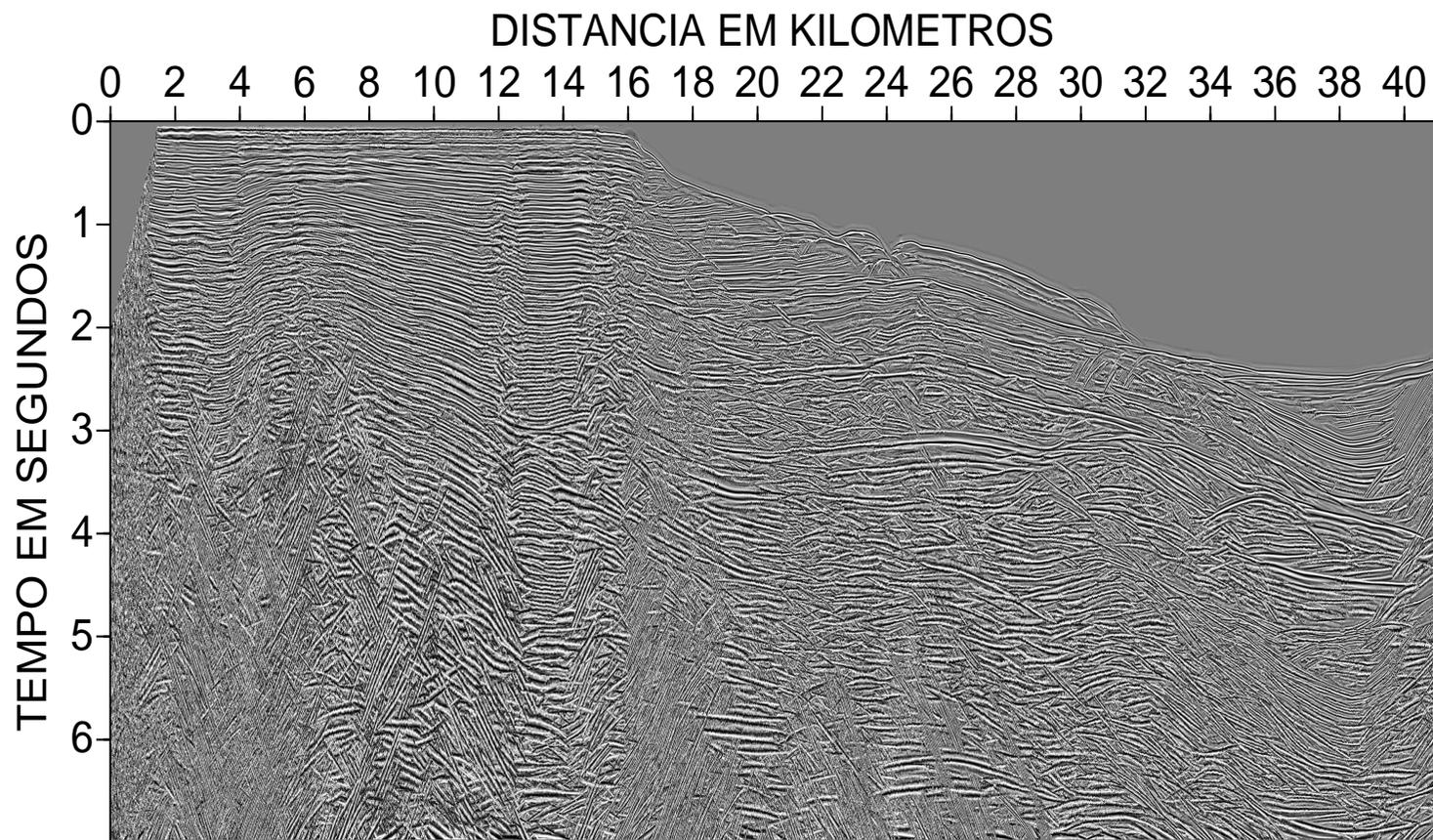


Figura 4.10: Seção empilhada resultante do fluxograma II. O ganho agc com uma janela de 0.5s e uma suavização gaussiana foram aplicadas para revelar eventos com baixa amplitude. A abertura ZO foi restrita à primeira zona de Fresnel projetada.

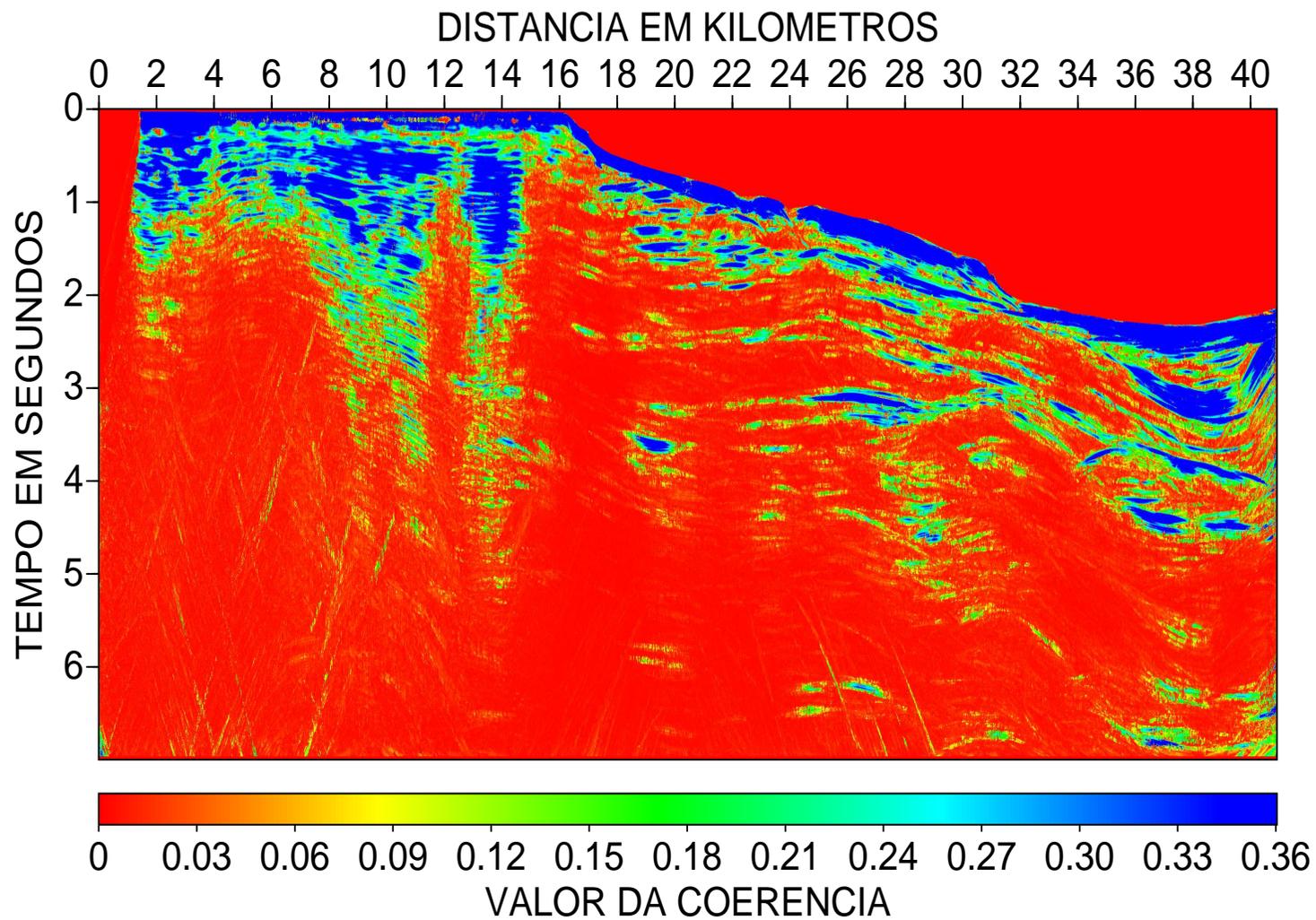


Figura 4.11: Seção coerência ( $S$ ) resultante do fluxograma II. O intervalo da escala de cores mostra os valores de coerência que tem um máximo em torno de 0.36.

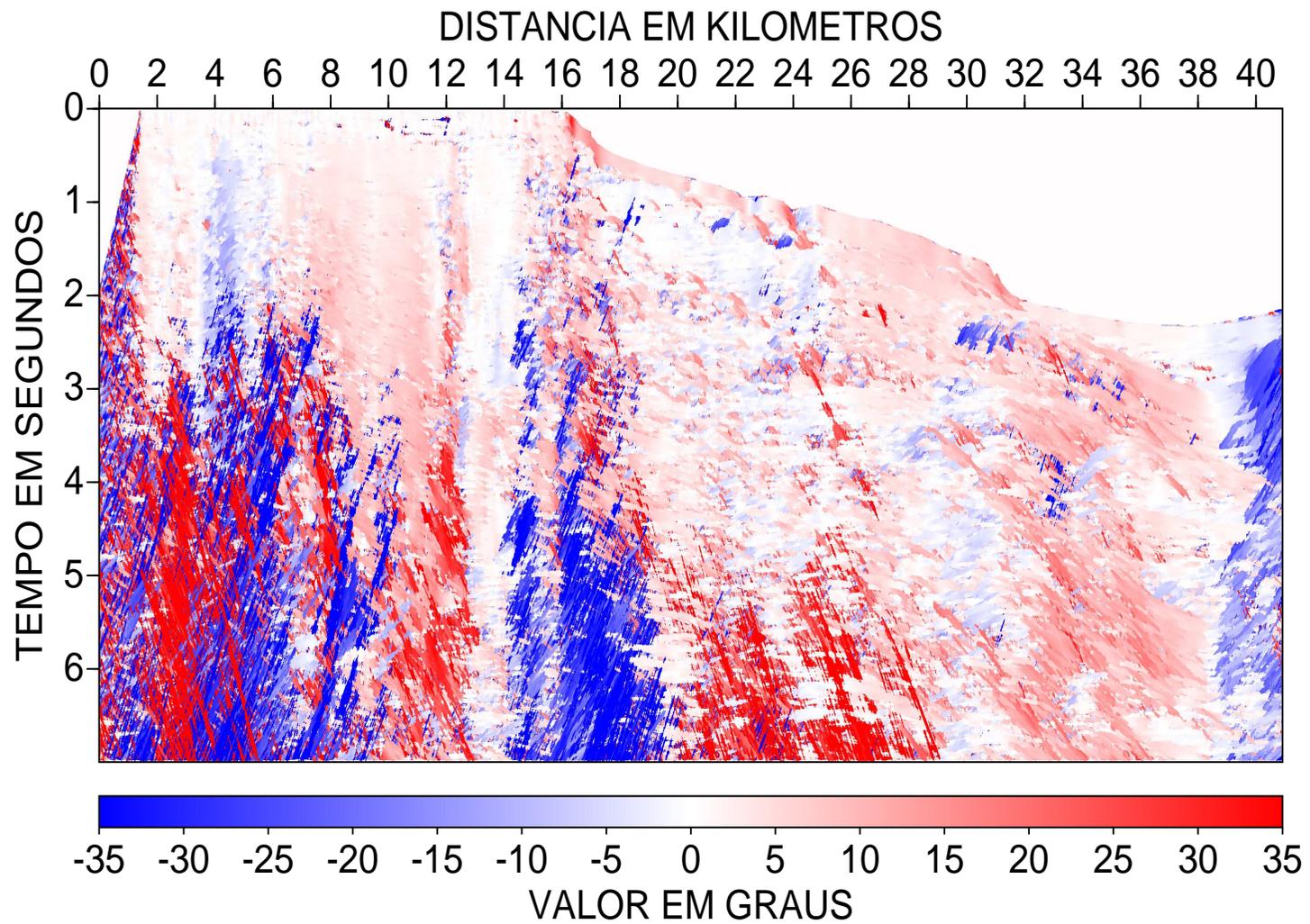


Figura 4.12: Seção ângulo ( $\beta_0$ ) resultante do fluxograma II.

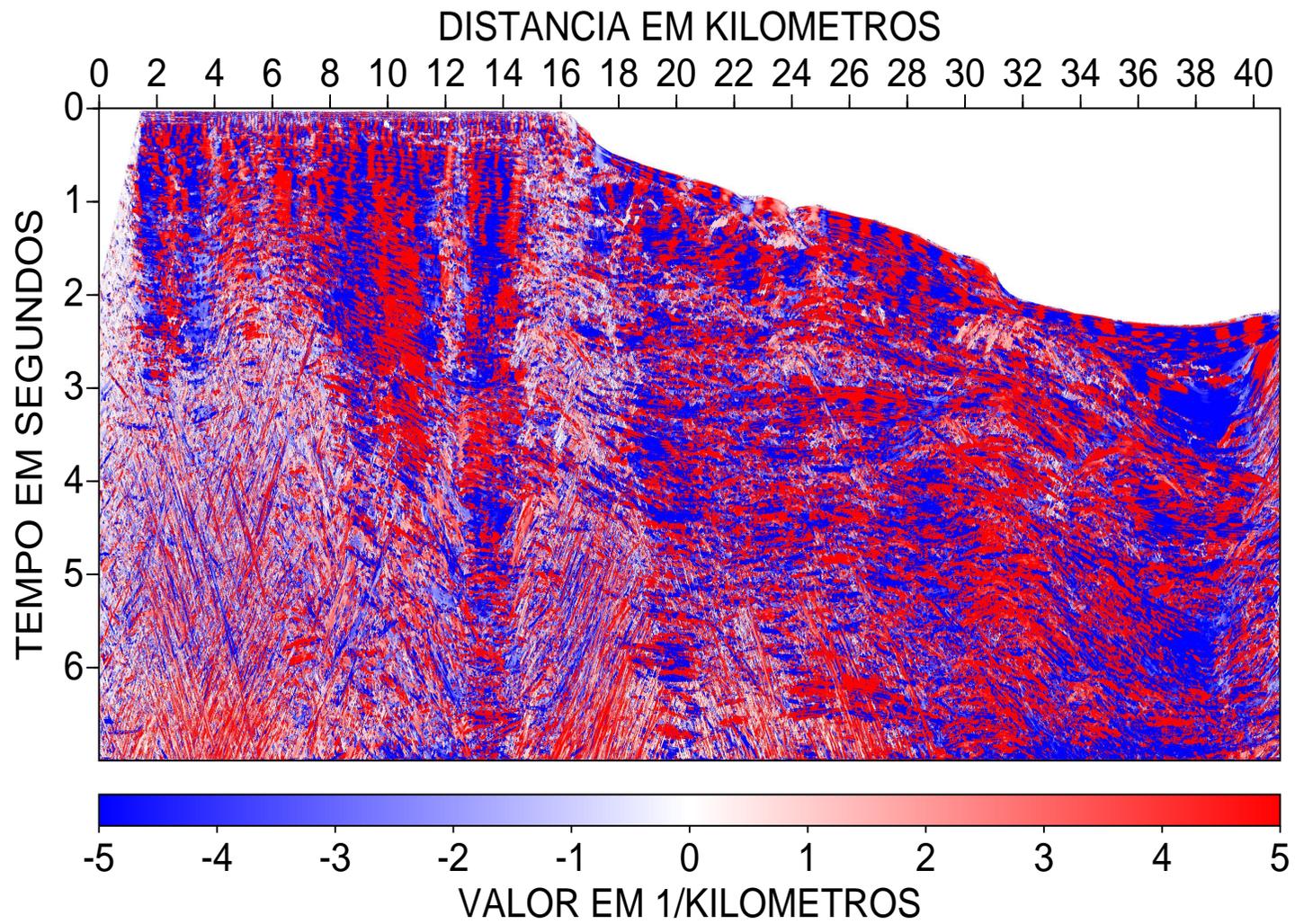


Figura 4.13: Seção curvatura da onda N ( $K_N$ ) resultante do fluxograma II.

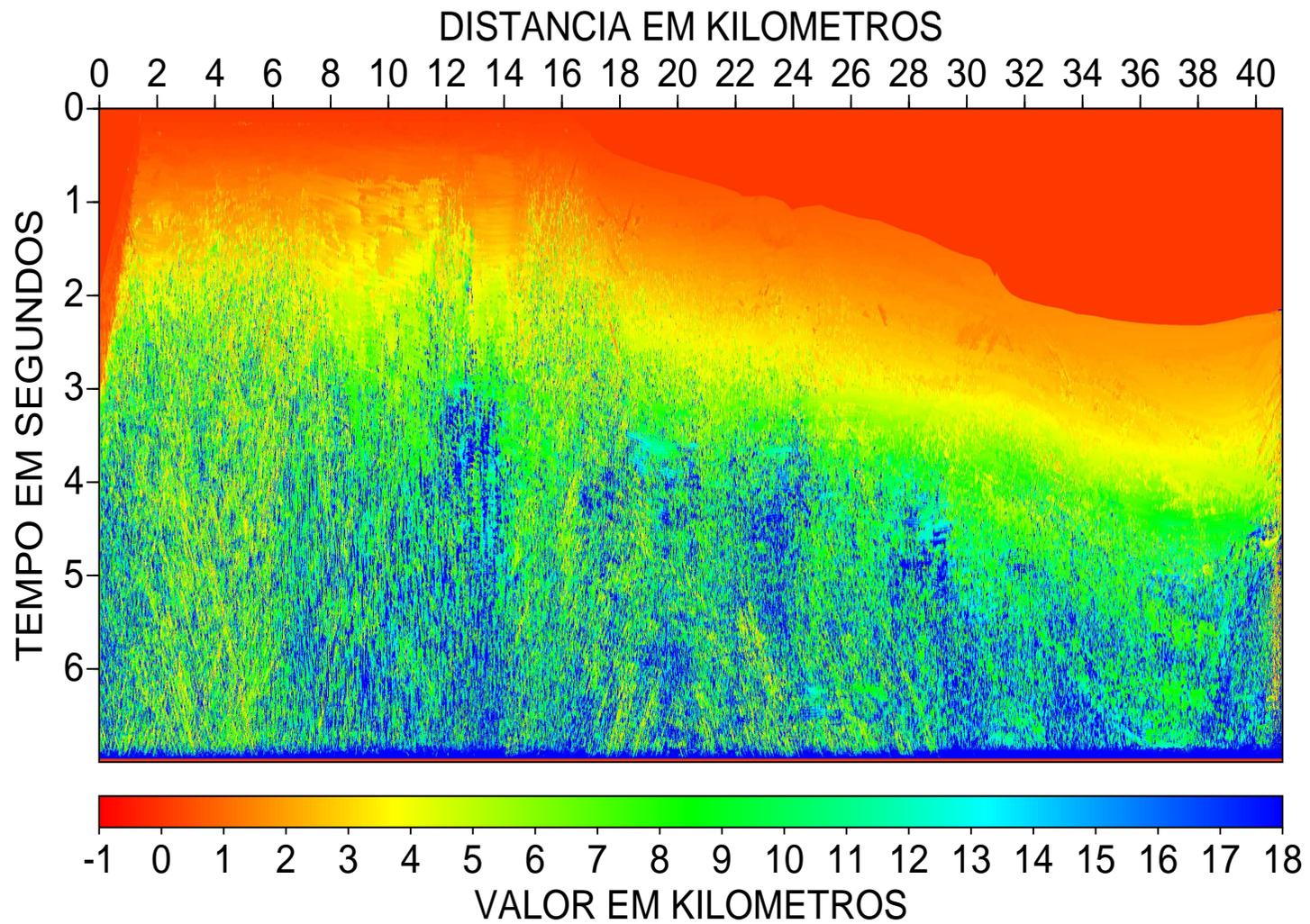


Figura 4.14: Seção raio de curvatura da onda NIP ( $R_{NIP}$ ) resultante do fluxograma II.

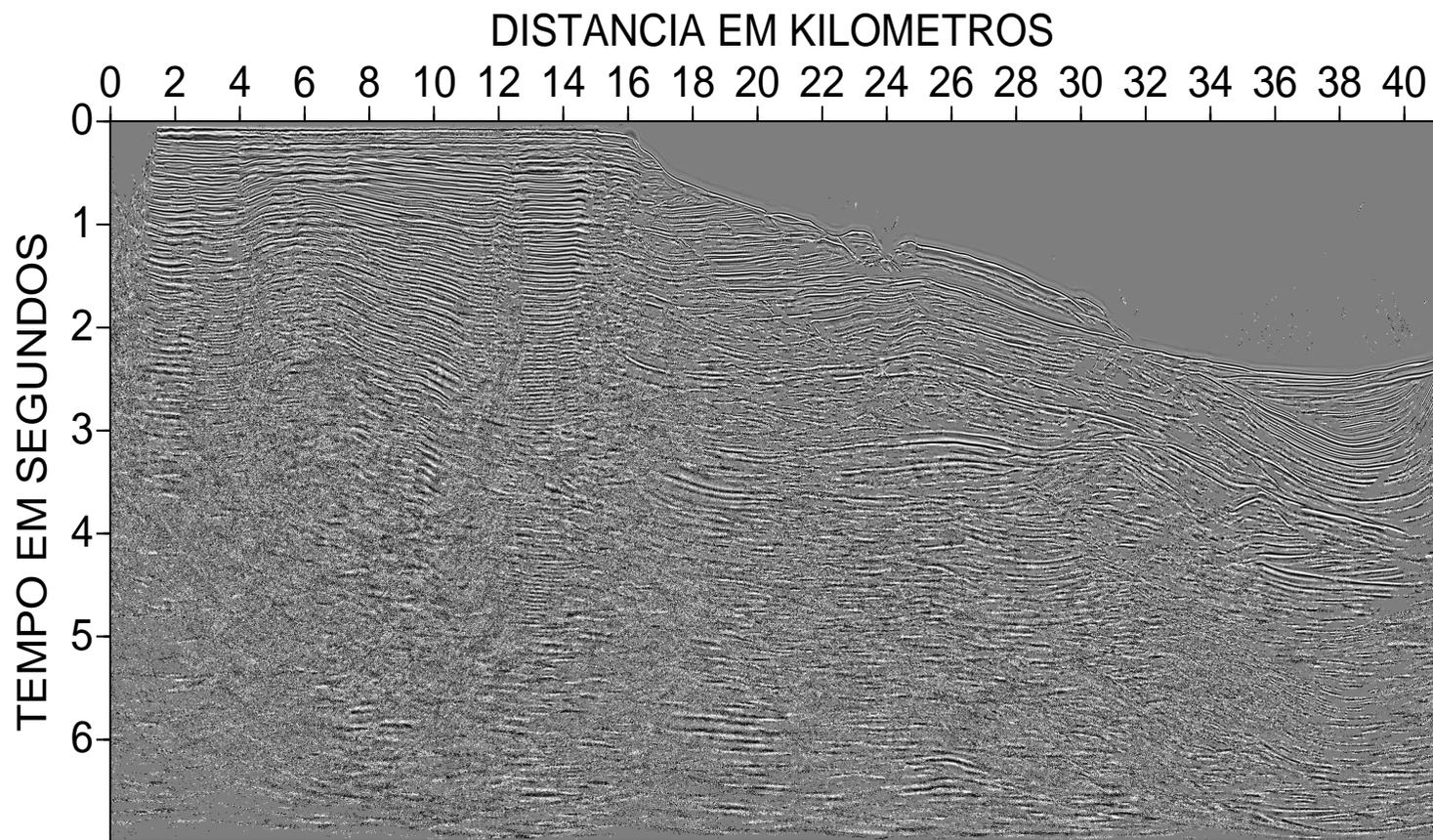


Figura 4.15: Seção migrada resultante do fluxograma II. O ganho agc com uma janela de 0.5s e uma suavização gaussiana foram aplicadas para revelar eventos com baixa amplitude. A abertura ZO foi restrita à primeira zona de Fresnel projetada.

### 4.3 FLUXOGRAMA III

O terceiro fluxograma aplicado é apresentado na Figura 4.16, e gerou os resultados mostrados nas Figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22.

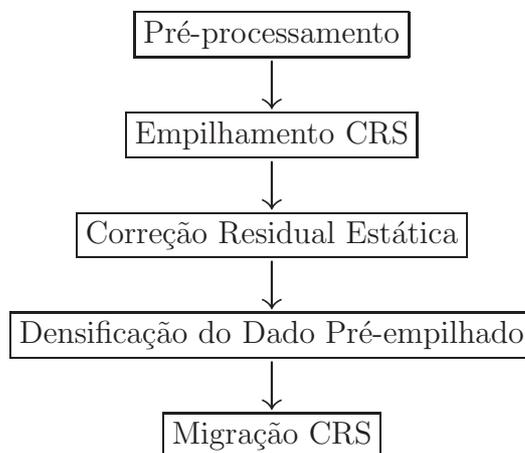


Figura 4.16: Ilustração das etapas do fluxograma III.

Como se pode ver pelas figuras, este fluxograma segue o fluxograma II e consta do empilhamento CRS, da correção residual estática, da densificação de dado pré-empilhado e da migração CRS. A comparação entre as seções empilhadas CRS, mostradas nas Figuras 4.3, 4.10 e 4.17, revela que a seção empilhada resultante do fluxograma III possui uma qualidade superior às demais, onde é possível visualizar melhor a continuidade dos eventos, e se percebe uma significativa melhora com relação ao ruído.

A comparação entre as seções coerência, mostradas nas Figuras 4.4, 4.11 e 4.18, mostra uma melhora acentuada no valor de coerência que, considerando o limite da escala de cores, a seção mostrada na Figura 4.18 apresenta um valor máximo em torno de 0.5. A comparação entre as seções ângulo, mostradas nas Figuras 4.5, 4.12 e 4.19, também se percebe uma melhora significativa quanto as difrações, e se percebe uma melhor definição do contorno do fundo oceânico.

A comparação entre as seções curvatura da onda N, mostradas nas Figuras 4.6, 4.13 e 4.20, fica prejudicada devido ao corte aplicado na Figura 4.20, mas mesmo assim se percebe uma clara divisão entre as zonas de difração e reflexão. Já a comparação entre as seções raio de curvatura da onda NIP, mostradas nas Figuras 4.7, 4.14 e 4.21, se percebe uma melhor definição dos eventos de difração, e uma melhor definição de contornos na zona rasa da seção.

Finalmente, ao comparar as seções migradas, mostradas nas Figuras 4.8, 4.15 e 4.22, é possível perceber uma melhor continuidade dos eventos, bem como uma melhoria quanto a

aparência granulada, o que acontece devido o aumento da relação sinal/ruído proporcionada pelo processo de densificação do dado pré-empilhamento. Além disso, se percebe uma melhoria nas partes para grandes tempos de trânsito.

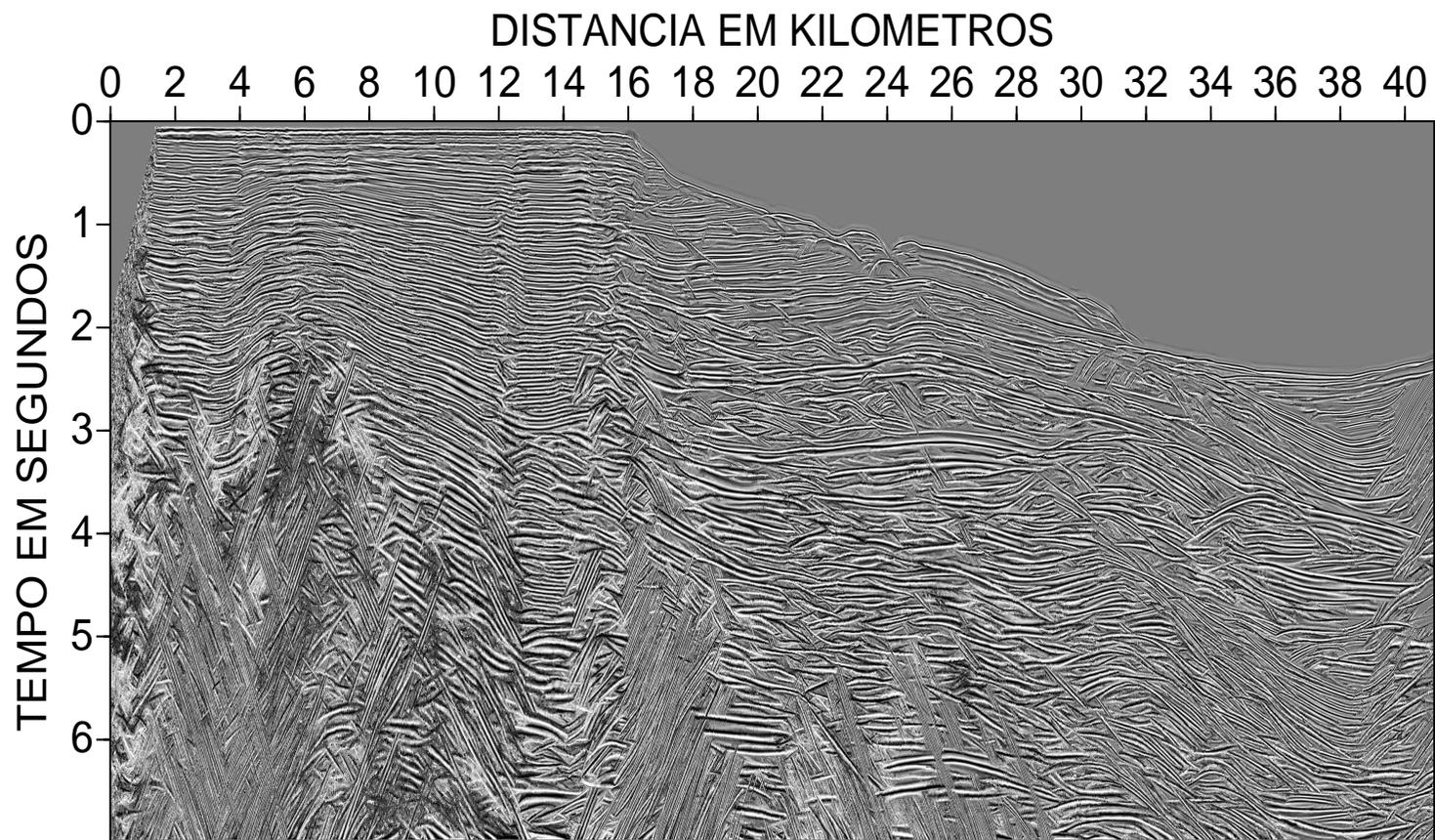


Figura 4.17: Seção empilhada resultante do fluxograma III. O ganho agc com uma janela de 0.5s e uma suavização gaussiana foram aplicadas para revelar eventos com baixa amplitude. A abertura ZO foi restrita à primeira zona de Fresnel projetada.

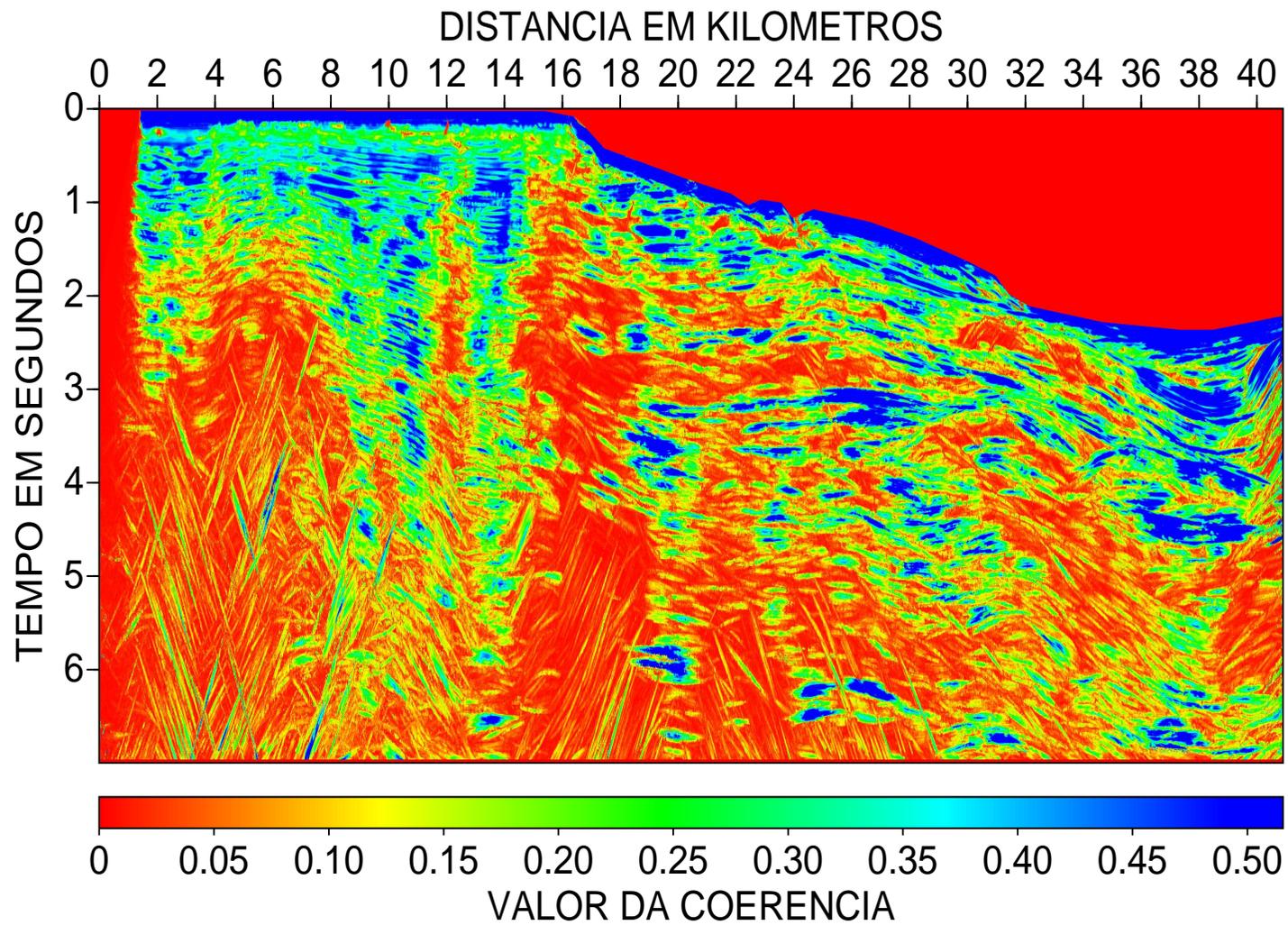


Figura 4.18: Seção coerência ( $S$ ) resultante do fluxograma III. O intervalo mostra os valores de coerência que tem um máximo em torno de 0.5.

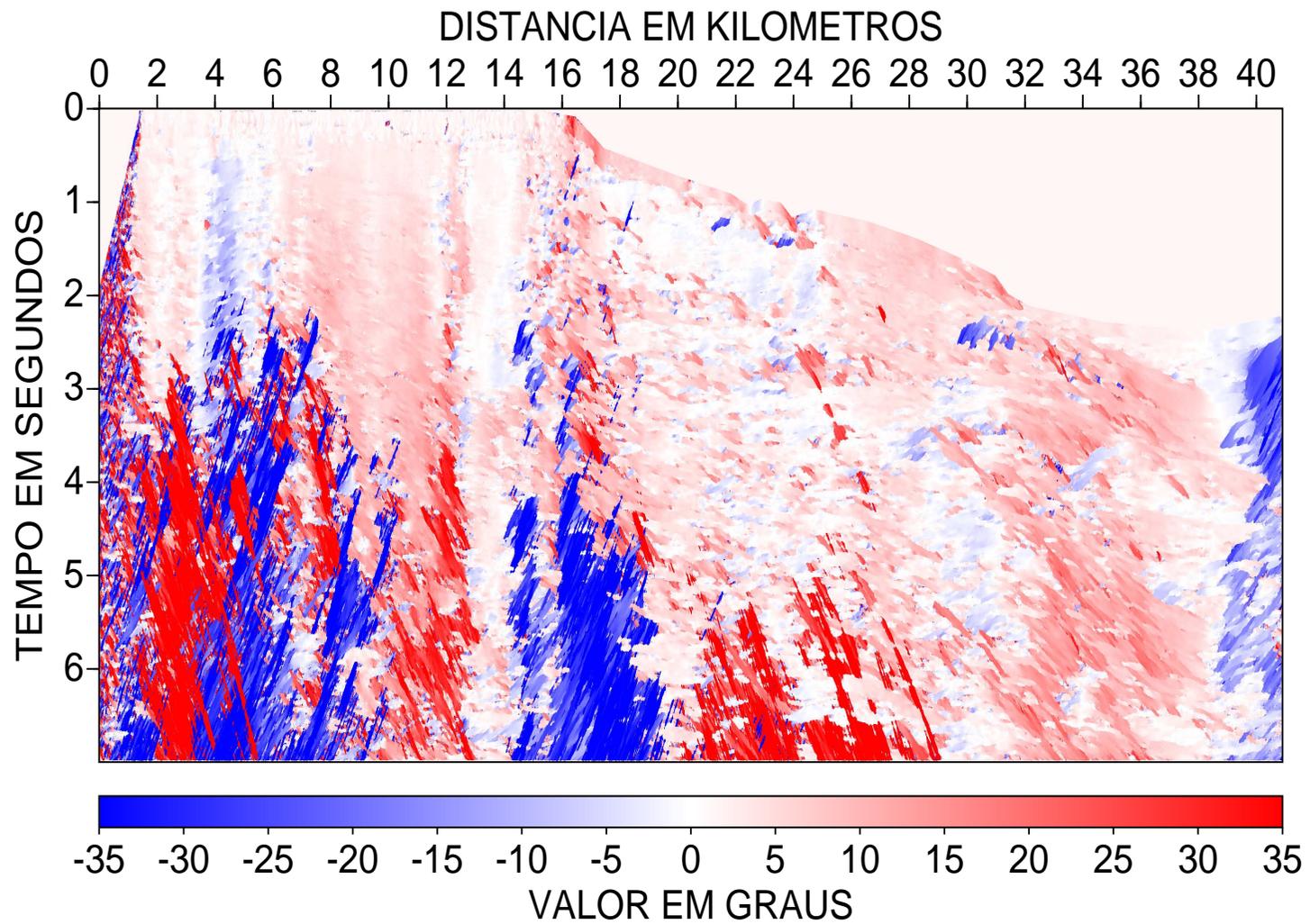


Figura 4.19: Seção ângulo ( $\beta_0$ ) resultante do fluxograma III.

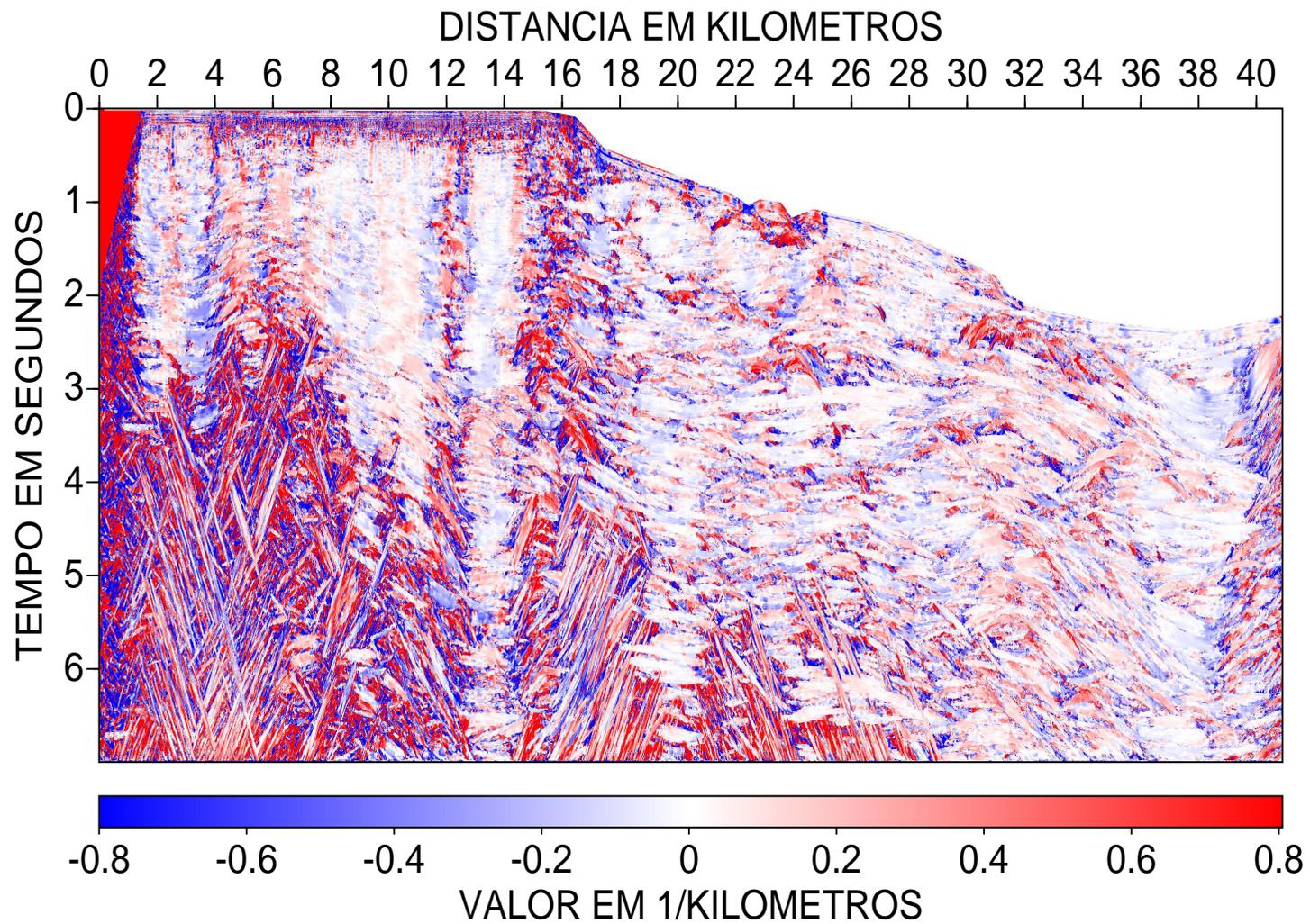


Figura 4.20: Seção curvatura da onda N ( $K_N$ ) resultante do fluxograma III.

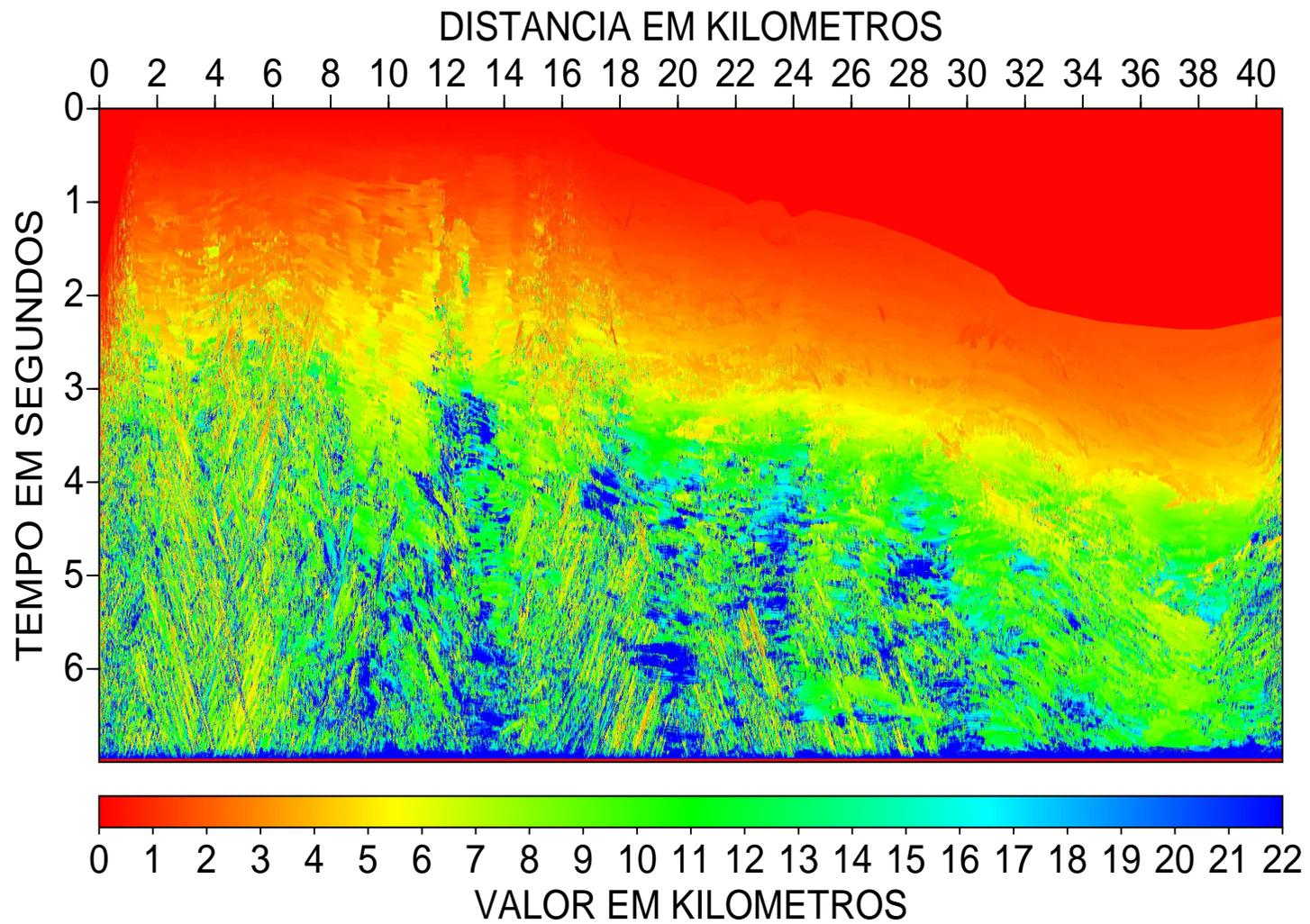


Figura 4.21: Seção raio de curvatura da onda NIP ( $R_{NIP}$ ) resultante do fluxograma III.

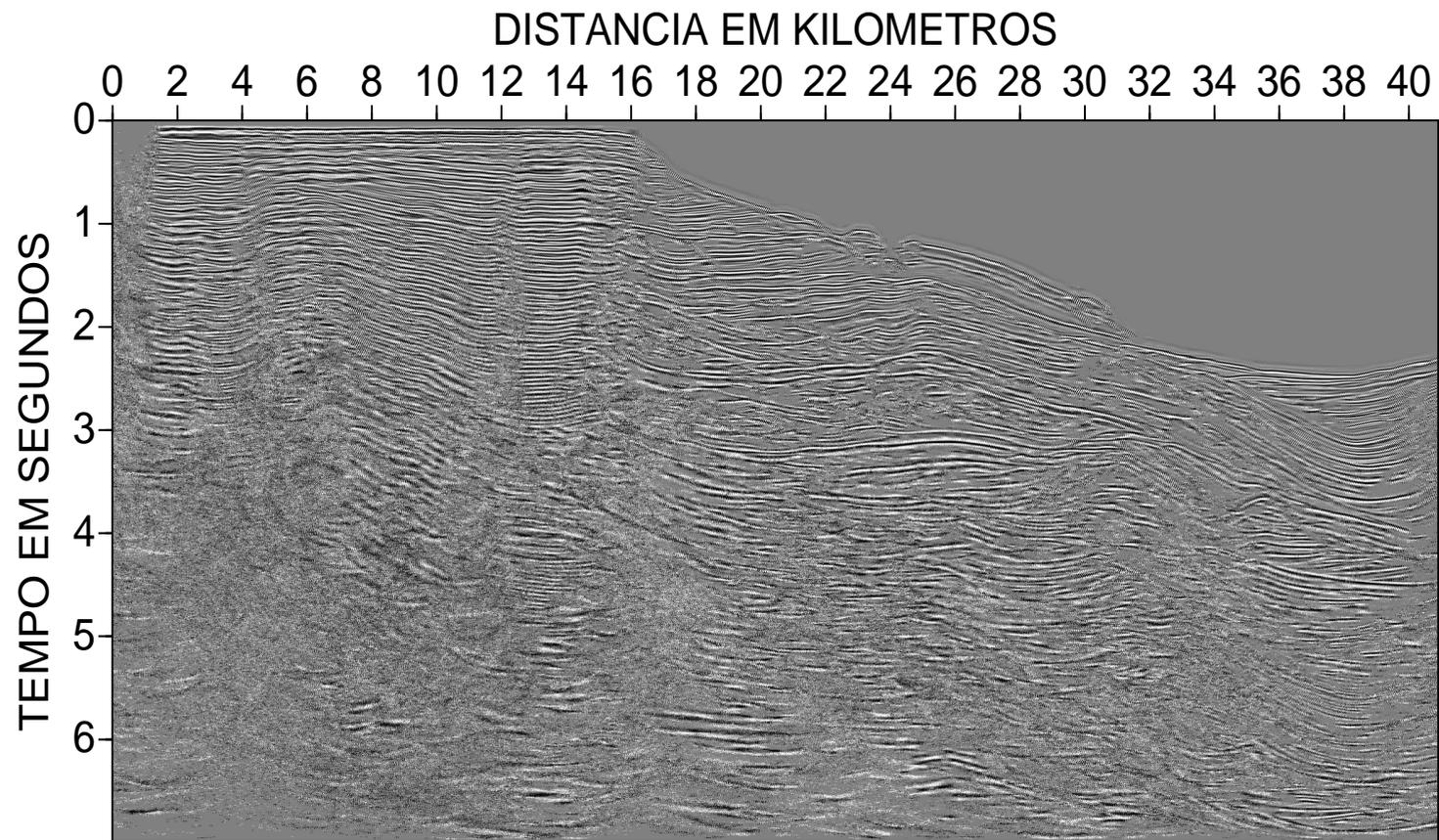


Figura 4.22: Seção migrada resultante do fluxograma III. O ganho agc com uma janela de 0.5s e uma suavização gaussiana foram aplicadas para revelar eventos com baixa amplitude. A abertura ZO foi restrita à primeira zona de Fresnel projetada.

A partir das comparações anteriormente realizadas entre os três fluxogramas, é possível perceber uma evolução das seções resultantes, principalmente observada através das seções empilhadas, coerência e migradas. Ao levar em consideração o processo de comparação realizado, e devido aos melhores resultados obtidos, se recomenda a utilização do fluxograma III para o processamento de dados marinhos com características parecidas ou iguais ao do dado utilizado neste trabalho.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como principal objetivo a aplicação de técnicas baseadas na tecnologia WIT/CRS para gerar imagens sísmicas de qualidade. A partir de um fluxograma de pré-processamento, que objetivou o aumento da relação sinal/ruído, se aplicou várias técnicas distribuídas em três fluxogramas de processamento, que tiveram seus resultados comparados para determinar qual gerou os melhores resultados.

O fluxograma de pré-processamento constou das seguintes etapas: ajuste da geometria; silenciamento de traços; filtrações  $f$  e  $f - k$ ; SRME e deconvolução preditiva. Como resultado desta fase, é possível observar a melhora da relação sinal/ruído no dado, bem como a atenuação da múltipla relacionada a superfície livre.

A segunda fase constou da aplicação do sistema WIT/CRS, onde as seguintes técnicas foram aplicadas: correção residual estática; densificação do dado pré-empilhado; e migração CRS. O objetivo foi sempre visando a melhora da relação sinal/ruído e continuidade dos eventos refletores. Os resultados destas etapas foram analisados e comparados, e é notável a evolução visual nas figuras quanto à resolução dos eventos.

Insistindo em resolução espacial, a aplicação da técnica de densificação do dado pré-empilhamento, baseada nos atributos CRS, melhorou o resultado empilhamento, o que era um resultado esperado devido esta técnica utilizar o mesmo operador de empilhamento para interpolar informação. Esta melhora pode ser medida pela quase duplicação do valor de coerência (ver Figura 4.18). A aplicação da técnica de correção residual estática para o dado marinho foi justificada com base na teoria da comunicação, em vez de conceitos físicos, geométricos e topográficos voltados à fonte e aos sensores. Sendo assim, a conceituação foi mais diretamente dirigida à teoria da correlação, considerando uma janela de deslocamento estreita, para explicar e ajustar distorções residuais devido aos conjuntos fontes-sensores. Como resultado, podemos observar muito pouca evolução na geração das figuras do empilhamento.

Como trabalho posterior aos aqui desenvolvidos, voltados ao processamento e imagea-

mento, se faz necessário uma composição da interpretação geológica das unidades reconhecíveis nas seções resultantes dos fluxogramas de processamento aplicados.

## REFERÊNCIAS

- BAYKULOV, M.; GAJEWSKI, D. Prestack seismic data enhancement with crs parameters. *WIT*, n. 11, p. 50–61, Mar. 2007.
- BEN-MENACHEM, I.; BEYDOUN, W. Range of validity of seismic ray and beam methods in general inhomogeneous media-general theory. *Geophys. Jnl. Royal Astron. Soc.*, n. 82, p. 207–234, 1985.
- BERKOUT, A. J.; VERSCHURR, D. J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion Part I: Theoretical considerations. *Geophysics*, v. 62, p. 1586–1595, 1997.
- BORTFELD, T. Geometrical ray theory: Rays and traveltimes in seismic system (second-order approximations of the traveltimes. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 54, n. 342, p. 342–349, Mar. 1989.
- BRUNE, R. H.; O’SULLIVAN, B. L.; LU, L. Comprehensive analysis of marine 3-d bin coverage. *The Leading Edge*, Tulsa, OK, v. 21, p. 1010–1015, 1994.
- CERVENY, V. *Ray methods for three-dimensional seismic modeling*. Thronheim: Norwegian Institute of Technology, 1987.
- CERVENY, V. *Seismic ray theory*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- COHEN, J. K.; STOCKWELL, J. J. W. *Seismic un\*x release n. 39*: a free package for seismic research and processing. Colorado: Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines, 2005.
- COX, M. *Static correction for seismic reflection surveys*. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 1974.
- DURBAUM, H. Zur bestimmung von wellen-schwindigkeiten reflexionxseismischen messungen. *Geophysical Prospecting*, v. 2, p. 151–167, 1954.
- DUVENECK, E. *Tomographic velocity model inversion with CRS*. Tese (Doutorado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, Dec. 2002.
- HEILMANN, B. Z. *CRS-stack-based seismic reflection imaging for land data in time and depth domains*. Tese (Doutorado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, Feb. 2007.
- HILTERMAN, F. J. Interpretative lessons form three-dimensional modeling. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 47, n. 05, p. 784–808, 1982.
- HIMMELBLAU, D. *Applied nonlinear programming*. New York: McGraw-Hill, 1972.

- 
- HOECHT, G. et al. Seismic and optics: hyperbolae and curvatures. *Journal Applied of Geophysics*, 1999.
- HUBRAL, P. Computing true ampiltude reflections in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 48, n. 8, p. 1051–1062, 1983.
- HUBRAL, P. Macro-model independent seismic reflection imaging. *Journal of Applied Geophysics*, v. 42, n. 3, p. 4, 1999.
- HUBRAL, P.; KREY, T. *Interval Velocities from Seismic Reflection Time Measurements*. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 1980.
- HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J.; TYGEL, M. Three-dimensional paraxial ray properties part I: Basics relations. *Journal of Seismic Exploration*, n. 1, p. 265–279, 1992.
- HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J.; TYGEL, M. Three-dimensional paraxial ray properties, part II. *Journal of Seismic Exploration*, n. 1, p. 347–362, 1992.
- HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J.; TYGEL, M. Determination of fresnel zones from travelttime measurements. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 58, n. 5, p. 703–712, 1993.
- HUGONNET, P. Partial surface related multiple elimination. *71st Ann. Intl. Mtg. SEG*, San Antonio, 2002.
- JAEGER, R. *The common-reflection-surface stack: Theory and application*. Dissertação (Mestrado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, 1999.
- KOGLIN, I. *Estimation of residual static time shifts by means of the CRS-based residual static correction approach*. Tese (Doutorado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, Jun. 2005.
- KRAVTSOV, Y. A.; ORLOV, Y. I. *Geometrical optics of inhomogeneous media*. Berlin: Springer Verlag, 1990.
- LIENBACH, J. Wiener spiking deconvolution and minimum-phase wavelets: A tutorial. *The Leading Edge*, Tulsa, OK, v. 14, n. 03, p. 189–192, 1995.
- LINDSEY, J. P. The fresnel zone and its interpretative significance. *The Leading Edge*, v. 8, n. 10, p. 33–39, 1989.
- LINES, L. R. A note on the application ofwiener multichannel deconvolution. *Jour. Can. Soc. Exp. Geophys.*, Canada, v. 10, n. 01, p. 65–70, 1974.
- MAGNAVITA, L. P. et al. Salt tectonics control on the distribution of drift sedimentary facies in the jequitinhonha basin. *American association of petroleum geologist*, Tulsa, OK, p. 878–879, 1998.
- MANN, J. Common-reflection-surface stack and conflicting dips. *63th Mtg. EAGE*, 2001.
- MANN, J. Common-reflection-surface stack and conflicting dips. *71st Annual Internat. Mtg. SEG*, 2001.

- 
- MANN, J. *Extensions and applications of the common reflection surface stack method*. Tese (Doutorado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, Jul. 2002.
- MANN, J. et al. Macro-model independent approximative prestack time migration. *62 Mtg. EAGE Extended Abstracts*, 2000.
- MAYNE, W. H. Common reflection point horizontal data stack techniques. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 27, n. 06, p. 927–938, 1962.
- MUELLER, T. *The common reflection surface stack method-seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model*. Tese (Doutorado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, Jul. 1999.
- NEIDELL, N. S.; TANER, M. T. Semblance and other coherency measures for multichannel data. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 36, n. 3, p. 482–497, 1971.
- NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, n. 7, p. 308–313, 1965.
- POPOV, M. M.; PSENCIK, I. Computation of ray amplitudes in inhomogeneous media with curved interfaces. *Studia Geophysics and Geod.*, v. 22, p. 248–258, 1978.
- ROBINSON, E. A.; SILVIA, M. T. *Deconvolution of geophysical time series in the exploration for oil and natural gas*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- ROBINSON, E. A.; TREITEL, S. *Geophysical signal analysis*. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 2000. 278–279 p.
- RONEN, J.; CLAERBOUT, J. F. Surface-consistent residual statics estimation by stack-power maximization. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 50, n. 12, p. 2759–2767, 1985.
- SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media. *Geophysical Prospecting*, v. 41, p. 495–513, 1993.
- SENGBUSH, R. L. *Seismic exploration methods*. New York: International Human Resources Developed Corporation, 1983.
- SHAH, P. M. Use of wavefront curvature to relate seismic data with subsurface parameters. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 38, n. 5, p. 812–825, Oct. 1973.
- SHERIFF, T. Factors affecting seismic amplitudes. *Geophysical Prospecting*, Amsterdam, v. 23, n. 1, p. 125–138, 1975.
- TANER, M. T.; KOEHLER, F. Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity functions. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 34, n. 6, p. 859–881, 1969.
- TANER, M. T.; KOEHLER, F.; ALHILALI, K. A. Estimation and correction of near-surface anomalies. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 39, n. 4, p. 441–463, 1974.

- 
- TYGEL, M. et al. Eigenwave based multiparameter travelttime expansions. *SEG Meeting, Expanded Abstracts*, Dallas, v. 67, p. 1770–1773, 1997.
- VERSCHUUR, D. J. *Surface Related Multiple Elimination*. Tese (Doutorado) — Delft University of Technology, Netherlands, 1991.
- VERSCHUUR, D. J.; BERKOUT, A. J.; WAPENAAR, P. A. Adaptive surface-related multiple elimination. *Geophysics*, v. 57, n. 9, p. 1166–1177, Sep. 1992.
- von Steht, M. *The common-reflection-surface stack under considerations of the acquisition surface topography: Combined approach and data examples*. Dissertação (Mestrado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, 2004.
- WALDEN, A. T. Robust deconvolution by modified wiener filtering. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 53, n. 02, p. 186–191, 1988.
- WIGGINS, R. A.; LARNER, K. L.; WISECUP, R. D. Residual static analysis as a general linear inverse problem. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 41, n. 5, p. 922–938, 1976.
- YILMAZ, O. *Seismic data processing*. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 1987.
- YILMAZ, O. *Seismic data analysis: Processing, inversion and interpretation of seismic data*. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 2001.

## APÊNDICE

## APÊNDICE A – TEORIA GEOMÉTRICA DO RAI0

A propagação de ondas sísmicas, descrita pela teoria do raio, é básica e fundamental para o tratamento de dados sísmicos, sendo neste caso importante a aproximação de alta frequência, que é baseada em três condições físicas:

1. A condição de alta frequência significa que o comprimento de onda é muito menor do que a distância percorrida, e menor do que a escala de comprimento das heterogeneidades do meio, e estabelece que a onda é localmente plana e satisfaz a lei de Snell.
2. Num meio homogêneo e isotrópico a direção do fluxo de energia não muda de direção, e percorre o meio ao longo de uma reta denominada *raio*.
3. O raio muda de direção quando há mudança nas propriedades físicas do meio.

A propagação em meios heterogêneos (BEN-MENACHEM; BEYDOUN, 1985), (KRAVTSOV; ORLOV, 1990) implica em que os valores dos parâmetros em qualquer ponto de um raio paraxial são linearmente dependentes de seu ponto inicial. Esta dependência é descrita pelas matrizes propagadoras do raio  $\mathbf{\Pi}$  (CERVENY, 1987), ou  $\mathbf{T}$  (BORTFELD, 1989), de onde se pode obter o tempo de trânsito 2D (HUBRAL et al., 1992a) e a zona de Fresnel ao longo do raio (HUBRAL et al., 1993). Os raios refletidos e transmitidos são descritos por aproximações que fornecem o tempo de trânsito para qualquer par de fonte-receptor num sistema sísmico, que é um meio em subsuperfície consistindo de camadas isotrópicas e homogêneas separadas por interfaces arbitrariamente curvas com variações contínuas e suaves (ver Figura A.1).

Na sísmica de reflexão são estudados raios que partem de uma superfície onde se localizam as fontes, denominada de *superfície anterior*, e chegam numa superfície onde se localizam os receptores, denominada de *superfície posterior*, e em geral estas superfícies são as mesmas ou estão próximas. No sistema sísmico, o raio que é emitido da superfície anterior a partir do ponto  $S$  e chega à superfície posterior no ponto  $G$  é denominado de *raio central*  $SG$ , tendo próximo a ele o raio paraxial  $\overline{SG}$  formado pelos pontos  $\overline{S}$  e  $\overline{G}$  (ver Figura A.2).

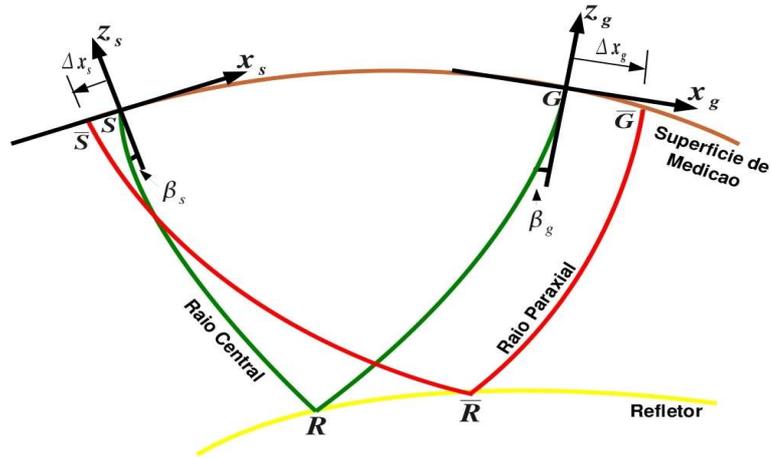


Figura A.1: Ilustração de um raio central  $SRG$  (em verde) tendo em sua vizinhança um raio paraxial  $\overline{SRG}$  (em vermelho). Os raios estão inseridos em um sistema sísmico, onde as fontes e os receptores estão localizados na mesma superfície (em laranja). Os vetores vagarosidade dos raios central e paraxial nos pontos iniciais e finais são expressos pelas coordenadas do raio  $(x_s, z_s)$  e  $(x_g, z_g)$ . Se mostra também os vetores deslocamento  $\Delta x_s$  e  $\Delta x_g$ , relacionados aos pontos  $S$  e  $G$  e que são, respectivamente, origens dos sistemas de coordenadas do raio.

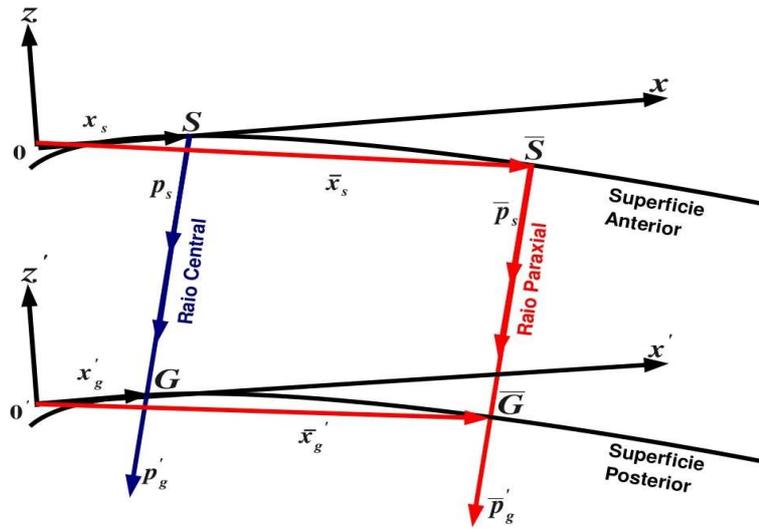


Figura A.2: Ilustração de um sistema sísmico 2D. O raio central (em azul) atravessa o meio, e o raio paraxial (em vermelho) está na vizinhança do raio central.

Para a descrição desses raios é introduzido um sistema de coordenadas cartesianas localmente definido (ver Figura A.2). O primeiro sistema  $(x, z)$  tem sua origem em  $S$  com o eixo  $x$  tangente à superfície anterior no ponto  $S$ , e o eixo  $z$  perpendicular ao eixo  $x$ . O segundo  $(x', z')$  tem sua origem em  $G$ , com o eixo  $x'$  tangente a superfície posterior no ponto  $G$ . As quantidades não-primadas do sistema de coordenadas  $(x, z)$  se referem a superfície anterior, e as quantidades primadas do sistema de coordenadas  $(x', z')$  à superfície posterior.

O raio central  $SG$  é definido pelos vetores vagarosidade e posição nos pontos  $S$  e  $G$ . Da mesma forma, o raio paraxial  $\overline{SG}$  é definido na superfície posterior nos pontos  $\overline{S}$  e  $\overline{G}$ . Do raio central são conhecidos os vetores posição  $x_s$  e o vagarosidade  $p_s$  em  $S$ ; e os vetores posição  $x'_g$  e o vagarosidade  $p'_g$  em  $G$ . Analogamente, para o raio paraxial são definidos os vetores  $\overline{x}_s$  e  $\overline{p}_s$  em  $\overline{S}$ , e  $\overline{x}'_g, \overline{p}'_g$  em  $\overline{G}$ . Os vetores vagarosidades são definidos como sendo  $v^{-1}$  vezes o vetor unitário na direção inicial do mesmo, onde  $v$  é a velocidade do meio no ponto inicial. Conhecendo as duas superfícies (anterior e posterior) e as velocidades  $v_s$  e  $v_g$  nos pontos  $S$  e  $G$ , respectivamente, se pode deduzir os vetores posição e vagarosidade para seus valores escalares. Posteriormente, estes vetores podem ser reconstruídos a partir dos seus valores escalares correspondentes. As componentes dos vetores  $x_s, \overline{x}_s, x'_g, \overline{x}'_g$ , dos vetores vagarosidades  $p_s$  e  $p'_g$  podem ser obtidos por projeções na direção  $z$  sobre o eixo  $x$  (ver Figura A.2).

Na Figura A.3 é ilustrado o vetor vagarosidade  $\overline{p}_s$  projetado na tangente à superfície anterior passando pelo ponto  $\overline{S}$ . O vetor resultante é projetado na tangente à superfície anterior passando pelo ponto  $S$  que coincide com o eixo  $x$  do sistema de coordenadas cartesianas  $(x, y)$ . Analogamente, se obtém a componente escalar do vetor  $\overline{p}'_g$ .

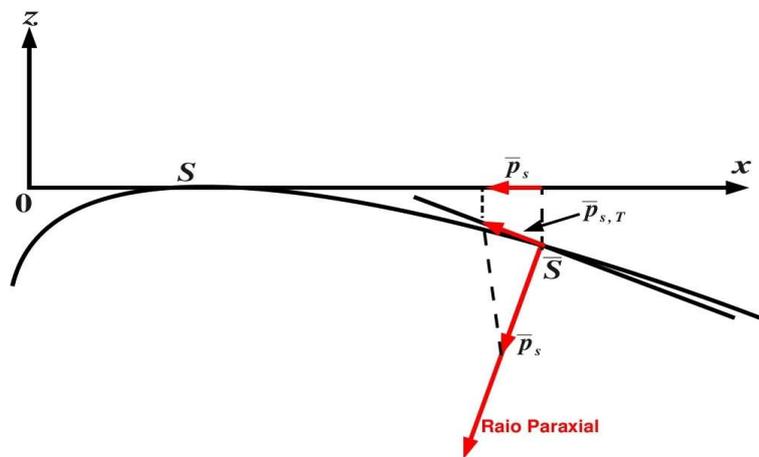


Figura A.3: Ilustração da construção das projeções do vetor vagarosidade  $\overline{p}_S$ .

Os parâmetros que descrevem o raio paraxial com relação ao raio central são o deslocamento e a diferença do vetor vagarosidade com relação ao raio central. Seguindo a teoria paraxial do raio, os valores destes parâmetros na superfície anterior são linearmente dependentes dos similares na superfície posterior.

## A.1 MATRIZES PROPAGADORA DO RAI0

Usando o formalismo de Bortfeld (1989) e a descrição de Schleicher et al. (1993), o raio central pode ser descrito por meio de uma matriz  $\mathbf{T}$  dada por:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_0 & \mathbf{B}_0 \\ \mathbf{C}_0 & \mathbf{D}_0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

onde  $\mathbf{A}_0$ ,  $\mathbf{B}_0$ ,  $\mathbf{C}_0$  e  $\mathbf{D}_0$  são submatrizes  $2 \times 2$  que caracterizam o raio central, e são descritas com o auxílio da matriz propagadora do raio  $\mathbf{\Pi}$ . A matriz propagadora  $\mathbf{T}$  ( $4 \times 4$ ) produz uma relação linear entre os pares de vetores  $(\mathbf{r}, \mathbf{o})^T$  e  $(\mathbf{r}', \mathbf{o}')^T$ , que descrevem o raio paraxial no seu ponto inicial  $\bar{S}$  na superfície anterior e no seu ponto final  $\bar{G}$  na superfície posterior. A relação linear pode ser expressa por:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{r}' \\ \mathbf{o}' \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{o} \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

que é equivalente a,

$$\mathbf{r}' = \mathbf{A}_0 \mathbf{r} + \mathbf{B}_0 \mathbf{o}, \quad (\text{A.3})$$

$$\mathbf{o}' = \mathbf{C}_0 \mathbf{r} + \mathbf{D}_0 \mathbf{o}. \quad (\text{A.4})$$

sendo que,

$$\mathbf{r} = \bar{x}_s - x_s \quad \text{e} \quad \mathbf{r}' = \bar{x}'_g - x'_g, \quad (\text{A.5})$$

são os deslocamentos da fonte paraxial  $\bar{S}$  e do receptor paraxial  $\bar{G}$  ao longo do eixo  $x$  e  $x'$  com relação a fonte  $S$  e o receptor  $G$  do raio central. De forma análoga se tem que:

$$\mathbf{o} = \bar{p}_s - p_s \quad \text{e} \quad \mathbf{o}' = \bar{p}'_g - p'_g, \quad (\text{A.6})$$

que são os deslocamentos das componentes horizontais do vetor vagarosidade do raio paraxial com relação ao raio central. A matriz propagadora  $\mathbf{T}$  descreve como as quantidades  $\mathbf{o}$  e  $\mathbf{r}$  do raio paraxial variam ao redor do raio central.

A matriz  $\mathbf{T}$  depende dos parâmetros locais da linha de aquisição, das velocidades (e gradientes) locais próximos aos pontos  $S$  e  $G$ , e para mostrar esta dependência é necessário relacionar a matriz  $\mathbf{T}$  com uma matriz intrínseca ao mesmo raio central, denominada de *matriz propagadora do raio  $\mathbf{\Pi}$* . A relação entre estas matrizes é o que garante a validade da matriz  $\mathbf{T}$  na solução do sistema composto pelas equações (A.3) e (A.4) para meios com heterogeneidade lateral.

Para descrever a matriz  $\mathbf{\Pi}$ , se usa coordenadas  $q_1$  e  $q_3 = s$ , centradas no raio, onde  $s$  é o comprimento de arco do raio central e  $q_1$  é a coordenada do raio paraxial num segmento de reta vertical e normal ao raio central. Como a coordenada  $q_1$  está deslocada em relação ao raio central, se define o vetor deslocamento  $\mathbf{q} = q_1 \mathbf{e}_1$  onde  $\mathbf{e}_i$   $i = 1, 2, 3$  é a base ortonormalizada.

No sistema de coordenadas centradas no raio, as componentes do vetor vagarosidade do raio paraxial em  $\mathbf{q}$  são  $p_1^{(q)}$  e  $p_3^{(q)}$ . Até a segunda ordem, a componente  $p_3^{(q)}$  é igual ao módulo do vetor vagarosidade do raio central,  $p_3^{(q)} = \frac{1}{v}$ , em que  $v$  é a velocidade no ponto ( $q_1 = 0, s$ ). Se define também o vetor vagarosidade do raio paraxial  $\mathbf{p}^{(q)} = p_3^{(q)} \mathbf{e}_3$ , onde  $\mathbf{e}_3$  é tangente ao raio central (POPOV; PSENCIK, 1978). Os parâmetros e vetores (deslocamento  $\mathbf{q}$  e vagarosidade  $\mathbf{p}^{(q)}$ ) são descritos no ponto inicial com símbolos não-primados, enquanto que, para o raio paraxial no ponto final, eles são escritos com símbolos primados.

Analogamente ao formalismo da matriz  $\mathbf{T}$ , a relação linear (equação A.2) entre os pares de vetores  $(\mathbf{q}, \mathbf{p}^{(q)})$  e  $(\mathbf{q}', \mathbf{p}^{(q)'})$  de um raio paraxial qualquer é dado por:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{q}' \\ \mathbf{p}^{(q)'} \end{pmatrix} = \mathbf{\Pi} \begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{p}^{(q)} \end{pmatrix}. \quad (\text{A.7})$$

a matriz propagadora centrada no raio  $\mathbf{\Pi} = \mathbf{\Pi}(G, S)$  é dada por:

$$\mathbf{\Pi} = \mathbf{\Pi}(G, S) = \begin{pmatrix} Q_{0,1} & Q_{0,2} \\ L_{0,1} & L_{0,2} \end{pmatrix}, \quad (\text{A.8})$$

na forma matricial se escreve:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{q}' \\ \mathbf{p}^{(q)'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{0,1} & Q_{0,2} \\ L_{0,1} & L_{0,2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{p}^{(q)} \end{pmatrix}. \quad (\text{A.9})$$

de onde se observa que:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}' &= Q_{0,1} \mathbf{p} + Q_{0,2} \mathbf{p}^{(q)} \\ \mathbf{p}^{(q)'} &= L_{0,1} \mathbf{p} + L_{0,2} \mathbf{p}^{(q)} \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

onde  $Q_{0,1}, Q_{0,2}, L_{0,1}$  e  $L_{0,2}$  são escalares referenciados ao raio central. Cerveny (2001) mostra que a relação entre as matrizes  $\mathbf{T}$  e  $\mathbf{\Pi}$  é dada por:

$$\mathbf{T}(G, S) = \mathbf{Y}'(G) \mathbf{\Pi}(G, S) \mathbf{Y}^{-1}(S), \quad (\text{A.11})$$

onde  $\mathbf{Y}'(G)$  e  $\mathbf{Y}^{-1}(S)$  são matrizes locais nos pontos  $G$  e  $S$  dadas por:

$$\mathbf{Y}'(G) = \epsilon'_0 \begin{pmatrix} \frac{1}{\cos \beta'_0} & 0 \\ \left( \frac{E'_0}{\cos \beta'_0} - \epsilon'_0 \frac{K'_0}{v'_0} \right) & \cos \beta'_0 \end{pmatrix}, \quad (\text{A.12})$$

e

$$\mathbf{Y}^{-1}(S) = \epsilon_0 \begin{pmatrix} \cos \beta_0 & 0 \\ - \left( \frac{E_0}{\cos \beta_0} - \epsilon_0 \frac{K_0}{v_0} \right) & \frac{1}{\cos \beta_0} \end{pmatrix}. \quad (\text{A.13})$$

Nas equações (A.12) e (A.13),  $\beta_0, K_0, v_0$  e  $E_0$  definem em  $S$  o ângulo que o raio central faz com a normal da linha de aquisição, a curvatura da linha de aquisição, a velocidade e o gradiente de velocidade do meio, respectivamente. Da mesma forma, os parâmetros  $\beta'_0, K'_0, v'_0$  e  $E'_0$  definem no ponto  $G$  os análogos citados, respectivamente. Os fatores  $\epsilon_0$  e  $\epsilon'_0$  indicam a escolha das direções normais à linha sísmica em  $S$  e  $G$ , respectivamente, com relação as direções dos vetores vagarosidades  $\mathbf{p}_S$  e  $\bar{\mathbf{p}}_S$  no mesmo ponto. Considerando que, o sentido da normal é para cima (para fora) da linha sísmica de aquisição em ambos os pontos  $S$  e  $G$ , se tem que:

$$\epsilon_0 = -1 \quad \text{e} \quad \epsilon'_0 = 1. \quad (\text{A.14})$$

Os parâmetros  $E'_0$  e  $E_0$  das equações (A.12), (A.13) são denominados de *fatores de heterogeneidade*, os quais indicam as variações de velocidade de primeira ordem na vizinhança dos pontos  $S$  e  $G$ , respectivamente (CERVENY, 2001).

A inserção das equações (A.8), (A.12), (A.13) e (A.14) na equação (A.11) faz com que as matrizes  $\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0$  e  $\mathbf{D}_0$  tomem as seguintes formas:

$$\mathbf{A}_0 = \left( \frac{E_0}{\cos \beta_0} - \frac{K_0}{v_0} \right) \frac{Q_{0,2}}{\cos \beta'_0} - \frac{Q_{0,1} \cos \beta_0}{\cos \beta'_0}, \quad (\text{A.15})$$

$$\mathbf{B}_0 = - \frac{Q_{0,2}}{\cos \beta'_0 \cos \beta_0}, \quad (\text{A.16})$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_0 &= \left( \frac{E'_0}{\cos \beta'_0} - \frac{K'_0}{v'_0} \right) \left[ \left( \frac{E_0}{\cos \beta_0} - \frac{K_0}{v_0} \right) Q_{0,2} - Q_{0,1} \cos \beta_0 \right] + \\ &+ \left( \frac{E_0}{\cos \beta_0} - \frac{K_0}{v_0} \right) L_{0,2} \cos \beta_0 - L_{0,1} \cos \beta'_0 \cos \beta_0, \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

$$\mathbf{D}_0 = - \left( \frac{E'_0}{\cos \beta'_0} - \frac{K'_0}{v'_0} \right) \frac{Q_{0,2}}{\cos \beta_0} - \frac{L_{0,2} \cos \beta'_0}{\cos \beta_0}. \quad (\text{A.18})$$

Para o caso de se considerar a linha sísmica de aquisição uma reta horizontal, onde  $K_0 = K'_0 = 0$ , e que na vizinhança inicial e final do raio central as velocidades são constantes, estas considerações resultam em:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} -\frac{Q_{0,1} \cos \beta_0}{\cos \beta'_0} & -\frac{Q_{0,2}}{\cos \beta'_0 \cos \beta_0} \\ L_{0,2} \cos \beta_0 - L_{0,1} \cos \beta'_0 \cos \beta_0 & -\frac{L_{0,2} \cos \beta'_0}{\cos \beta_0} \end{pmatrix} \quad (\text{A.19})$$

onde,

$$\mathbf{A}_0 = -\frac{Q_{0,1} \cos \beta_0}{\cos \beta'_0}; \quad (\text{A.20})$$

$$\mathbf{B}_0 = -\frac{Q_{0,2}}{\cos \beta'_0 \cos \beta_0}; \quad (\text{A.21})$$

$$\mathbf{C}_0 = -L_{0,1} \cos \beta'_0 \cos \beta_0; \quad (\text{A.22})$$

$$\mathbf{D}_0 = -\frac{L_{0,2} \cos \beta'_0}{\cos \beta_0}. \quad (\text{A.23})$$

## A.2 PROPRIEDADES DA MATRIZ PROPAGADORA

### A.2.1 Simpleticidade

A matriz propagadora  $\mathbf{T}$  possui a propriedade de simpleticidade, em que a inversa da matriz propagadora ( $\mathbf{T}^{-1}$ ) pode ser expressa através de submatrizes da matriz propagadora  $\mathbf{T}$  da seguinte forma:

$$(\mathbf{T}^{-1}) = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_0 & \mathbf{B}_0 \\ \mathbf{C}_0 & \mathbf{D}_0 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{D}_0^T & -\mathbf{B}_0^T \\ -\mathbf{C}_0^T & \mathbf{A}_0^T \end{pmatrix}. \quad (\text{A.24})$$

Usando a identidade  $\mathbf{T}^{-1}\mathbf{T} = \mathbf{I}$ , a propriedade simplética pode ser expressa por:

$$\mathbf{D}_0^T \mathbf{A}_0 - \mathbf{B}_0^T \mathbf{C}_0 = \mathbf{I} \quad (\text{A.25})$$

$$\mathbf{D}_0^T \mathbf{B}_0 - \mathbf{B}_0^T \mathbf{D}_0 = \mathbf{0} \quad (\text{A.26})$$

$$\mathbf{A}_0^T \mathbf{C}_0 - \mathbf{C}_0^T \mathbf{A}_0 = \mathbf{0} \quad (\text{A.27})$$

### A.2.2 Raio Reverso

Pelo teorema da reciprocidade na teoria da elastodinâmica as posições das fontes e receptores podem ser permutados sem qualquer alteração na trajetória do raio considerado. Sendo assim, o raio reverso conecta uma fonte pontual em  $G$  com um receptor em  $S$ , e a onda que de  $G$  para  $S$  segue uma trajetória idêntica na direção oposta. A matriz propagadora do raio reverso ( $\mathbf{T}^*$ ) é relacionada as submatrizes da matriz propagadora  $\mathbf{T}$  da seguinte forma:

$$\mathbf{T}^* = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_0^* & \mathbf{B}_0^* \\ \mathbf{C}_0^* & \mathbf{D}_0^* \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{D}_0^T & \mathbf{B}_0^T \\ \mathbf{C}_0^T & \mathbf{A}_0^T \end{pmatrix}. \quad (\text{A.28})$$

### A.2.3 Regra da Cadeia

Para aplicações em problemas sísmicos de reflexão, a propriedade denominada *regra da cadeia* estabelece que para qualquer ponto  $R$  ao longo do raio central  $SRG$  (Figura A.1) a matriz propagadora  $\mathbf{T}$  satisfaz a seguinte equação:

$$\mathbf{T}(G, S) = \mathbf{T}(G, R)\mathbf{T}(R, S). \quad (\text{A.29})$$

onde  $\mathbf{T}(R, S)$  e  $\mathbf{T}(G, R)$  denotam as matrizes propagadoras para os raios que percorrem os ramos  $SR$  e  $RG$ , respectivamente, que juntos constroem o raio que percorre  $SRG$ . Esta equação é válida para todas as posições de  $R$ , não importando se  $R$  está precisamente sobre uma interface refletora ou transmissora, ou até sobre uma interface fictícia introduzida arbitrariamente, que pode ou não coincidir com as interfaces refletora e transmissora.

As submatrizes  $2 \times 2$  da matriz propagadora do primeiro ramo  $SR$  são denotadas por  $\mathbf{A}_1, \mathbf{B}_1, \mathbf{C}_1$  e  $\mathbf{D}_1$ , as submatrizes do segundo ramo  $RG$  por  $\mathbf{A}_2, \mathbf{B}_2, \mathbf{C}_2$  e  $\mathbf{D}_2$ , e as submatrizes do raio completo  $SRG$  são expressas por:

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{A}_2\mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_2\mathbf{C}_1, \quad (\text{A.30})$$

$$\mathbf{B}_0 = \mathbf{A}_2\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2\mathbf{D}_1, \quad (\text{A.31})$$

$$\mathbf{C}_0 = \mathbf{C}_2\mathbf{A}_1 + \mathbf{D}_2\mathbf{C}_1, \quad (\text{A.32})$$

$$\mathbf{D}_0 = \mathbf{C}_2\mathbf{B}_1 + \mathbf{D}_2\mathbf{D}_1. \quad (\text{A.33})$$

### A.3 TEMPO DE TRÂNSITO EM TERMOS DA MATRIZ PROPAGADORA

Como mostrou Tygel et al. (1997), as aproximações parabólica e hiperbólica do tempo de trânsito em termos dos elementos da matriz propagadora do raio  $\mathbf{T}$ , para o caso particular de um raio central de incidência normal (raio de afastamento-nulo) e para uma superfície de observação plana, são dadas por:

$$t_{par}(x_m, h) = t_0 + 2p_s^T x_m + x_m^T (D_{0,1})^{-1} C_{0,1} x_m + h^T (B_{0,1})^{-1} A_{0,1} h; \quad (\text{A.34})$$

e

$$t_{hip}^2(x_m, h) = (t_0 + 2p_s^T x_m)^2 + 2t_0(x_m^T (D_{0,1})^{-1} C_{0,1} x_m + h^T (B_{0,1})^{-1} A_{0,1} h); \quad (\text{A.35})$$

onde,

$$x_m = \frac{(x'_g + x_s)}{2}, \quad (\text{A.36})$$

é o ponto-médio entre fonte e receptor, e

$$h = \frac{(x'_g - x_s)}{2}, \quad (\text{A.37})$$

é o meio-afastamento fonte-receptor.

### A.4 PRIMEIRA ZONA DE FRESNEL PROJETADA EM TERMOS DA MATRIZ PROPAGADORA

O conceito de primeira zona de Fresnel projetada foi introduzido por Hubral et al. (1993) como sendo a região da superfície da terra que contém eventos que foram refletidos na zona de Fresnel no refletor em profundidade. Matematicamente, a primeira zona de Fresnel projetada é representada pela seguinte condição:

$$|t(S, \bar{R}) + t(\bar{R}, G) - t(S, G)| \leq \left(\frac{T}{2}\right). \quad (\text{A.38})$$

onde  $t(S, \bar{R})$ ,  $t(\bar{R}, G)$  e  $t(S, G)$  denotam os tempos de trânsito ao longo dos ramos de raios  $S\bar{R}$ ,  $\bar{R}G$  e ao longo do raio central, respectivamente,  $T$  denota o período de um pulso sísmico monofrequência em propagação ao longo do raio  $SRG$ . Os tempos de trânsito  $t(S, \bar{R})$  e  $t(\bar{R}, G)$  podem ser expressos em termos das componentes da matriz propagadora  $\mathbf{T}$  que é

subdividida pela regra da cadeia na forma:

$$t(S, \bar{R}) = t(S, R) + \mathbf{p}_R \cdot \mathbf{r}_{\bar{R}} + \left(\frac{1}{2}\right) \mathbf{r}_{\bar{R}} D_{0,1} (B_{0,1})^{-1} \mathbf{r}_{\bar{R}}; \quad (\text{A.39})$$

e

$$t(\bar{R}, G) = t(R, G) - \mathbf{p}_R \cdot \mathbf{r}_{\bar{R}} + \left(\frac{1}{2}\right) \mathbf{r}_{\bar{R}} (B_{0,2})^{-1} A_{0,2} \mathbf{r}_{\bar{R}}. \quad (\text{A.40})$$

## A.5 TEMPO DE TRÂNSITO EM TERMOS DOS ATRIBUTOS CRS

Para se obter as aproximações do tempo de trânsito, são introduzidos experimentos hipotéticos em termos das ondas NIP e N (DURBAUM, 1954).

### A.5.1 Experimentos hipotéticos

Do ponto de vista físico, os experimentos hipotéticos são explicados com um modelo heterogêneo, formado de camadas homogêneas com interfaces curvas sobre um semi-espço. A Figura A.4 ilustra a propagação das ondas NIP e N, onde *NIP* é o ponto de incidência normal do raio afastamento-nulo com origem em  $x_0$  sobre a linha sísmica de aquisição. A onda NIP se propaga de forma ascendente a partir de uma fonte pontual localizada em *NIP* até o ponto de observação  $x_0$  (ver Figura A.4). A onda N se propaga de forma ascendente a partir do refletor em explosão na vizinhança do ponto *NIP* (ver Figura A.4), onde a curvatura inicial da frente de onda N tem a mesma curvatura do refletor no ponto *NIP*. As curvaturas finais das ondas NIP e N são medidas no ponto  $x_0$ , e o ângulo de emergência  $\beta_0$  das duas ondas coincidem com o ângulo de emergência do raio com afastamento-nulo em  $x_0$ .

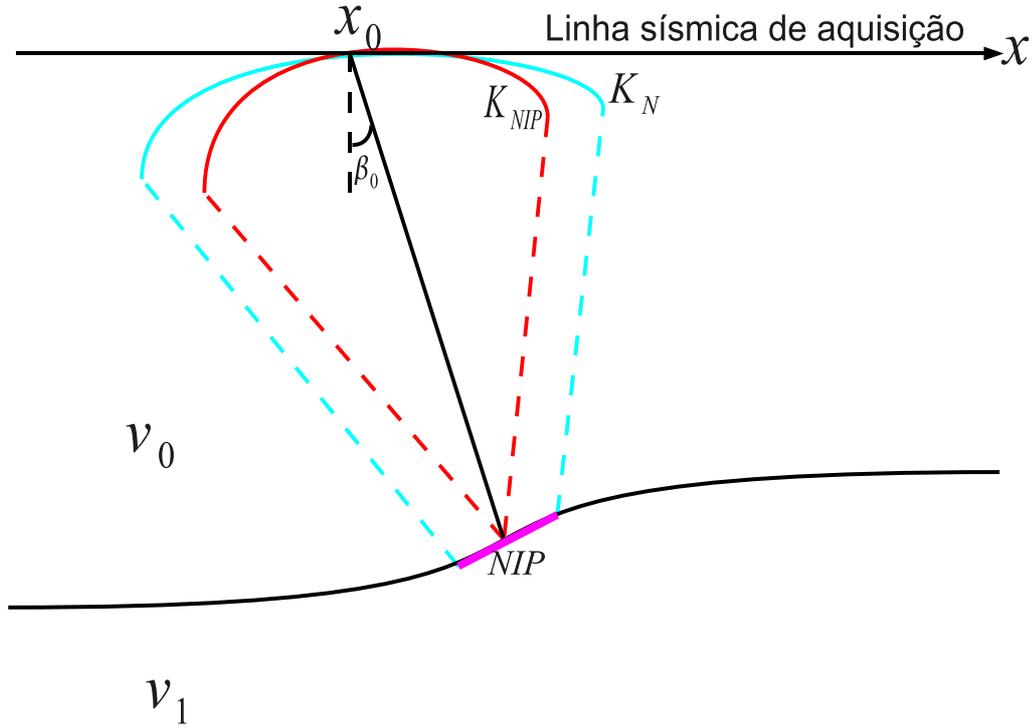


Figura A.4: Ilustração das frentes de onda para um meio homogêneo. Em vermelho se observa o experimento referente a onda NIP e em azul o experimento referente a onda N.  $K_{NIP}$  e  $K_N$  representam as curvaturas das ondas NIP e N, respectivamente.

### A.5.2 Matriz propagadora em termos dos atributos CRS

Hubral (1983) relacionou os elementos da matriz propagadora  $\mathbf{\Pi}$  com as curvaturas das ondas NIP e N, simuladas em afastamento-nulo ( $x_S = x_G = x_0$ ). Cerveny (1987) mostrou que os vetores vagarosidades inicial  $\mathbf{p}^{(q)}$  e final  $\mathbf{p}^{(q)n}$  da matriz propagadora  $\mathbf{\Pi}$  podem ser relacionados às curvaturas de frente de onda  $K_0$  e  $K'_0$  que emergem no ponto  $x_S = x_G$  da superfície de aquisição por:

$$\mathbf{p}^{(q)} = v_0^{-1} K_0 q \quad (\text{A.41})$$

e

$$\mathbf{p}^{(q)n} = v_0^{-1} K'_0 q'. \quad (\text{A.42})$$

onde nos pontos  $x_S = x_G = x_0$  as velocidades  $v_S = v_G = v_0$ .

Inserindo as equações (A.41), (A.42) nas equações (A.10), se tem que:

$$\mathbf{q}' = (Q_{0,1} + Q_{0,2}v_0^{-1}K_0)\mathbf{q} \quad (\text{A.43})$$

e

$$v_0^{-1}K'_0\mathbf{q}' = (L_{0,1} + L_{0,2}v_0^{-1}K_0\mathbf{q}). \quad (\text{A.44})$$

Substituindo o  $\mathbf{q}'$  da equação (A.44) na equação (A.43), e eliminando as dependências em  $\mathbf{q}$ , se obtém:

$$v_0^{-1}K'_0(Q_{0,1} + Q_{0,2}v_0^{-1}K_0) = L_{0,1} + L_{0,2}v_0^{-1}K_0. \quad (\text{A.45})$$

Pela definição da onda NIP, as curvaturas de frente de onda  $K_0$  e  $K'_0$  podem ser a curvatura de frente de onda NIP ( $K_{\text{NIP}}$ ) no ponto  $x_0$  onde a curvatura  $K_0$  se retrai desde o ponto  $x_0$  até o ponto refletor  $R$ , e a curvatura  $K'_0$  se expande do ponto  $R$  até o ponto  $x_0$ , ou seja,  $K_0 = -K_{\text{NIP}}$  e  $K'_0 = K_{\text{NIP}}$ , e substituindo-as na equação (A.45) é obtido a primeira relação entre a curvatura  $K_{\text{NIP}}$  e os elementos da matriz propagadora  $\mathbf{\Pi}$  dada por:

$$L_{0,1} = v_0^{-1}K_{\text{NIP}}(Q_{0,1} - Q_{0,2}v_0^{-1}K_{\text{NIP}}) + L_{0,2}v_0^{-1}K_{\text{NIP}} \quad (\text{A.46})$$

De forma análoga a definição da onda N e pela equação (A.45) é obtida outra relação entre a curvatura da frente de onda N ( $K_{\text{N}}$ ) e os elementos da matriz propagadora  $\mathbf{\Pi}$ . Semelhantemente a curvatura  $K_0$  se retrai do ponto  $x_0$  até a interface refletora na vizinhança do ponto refletor  $R$ , e a curvatura  $K'_0$  se expande desde a interface refletora na vizinhança do ponto refletor  $R$  até o ponto  $x_0$ , ou seja,  $K_0 = -K_{\text{N}}$  e  $K'_0 = K_{\text{N}}$ . Portanto:

$$L_{0,1} = v_0^{-1}K_{\text{N}}(Q_{0,1} - Q_{0,2}v_0^{-1}K_{\text{NIP}}) + L_{0,2}v_0^{-1}K_{\text{N}}. \quad (\text{A.47})$$

Utilizando a matriz propagadora reversa  $\mathbf{\Pi}_{0,r}$  para o caso especial AN 2D, intrínseco às ondas NIP e N, resulta em que  $Q_{0,1} = L_{0,2}$  (HUBRAL et al., 1992a). Inserindo a igualdade na relação  $Q_{0,1}L_{0,2} - Q_{0,2}L_{0,1} = 1$ , se tem que:

$$(Q_{0,1})^2 - Q_{0,2}L_{0,1} \Rightarrow L_{0,1} = \frac{[(Q_{0,1}^2) - 1]}{Q_{0,2}}. \quad (\text{A.48})$$

Substituindo a equação (A.48) nas equações (A.46) e (A.47) e reagrupando-as se obtém:

$$Q_{0,1} - Q_{0,2}v_0^{-1}K_{\text{NIP}} = \mp 1 \quad \text{e} \quad Q_{0,1} - Q_{0,2}v_0^{-1}K_{\text{N}} = \pm 1. \quad (\text{A.49})$$

Com o sistema de quatro equações (A.49) são encontradas os elementos da matriz propa-

gadora  $\mathbf{\Pi}$ ,  $Q_{0,1}(= L_{0,2})$  e  $Q_{0,2}$ , em termos das curvaturas  $K_{\text{NIP}}$  e  $K_{\text{N}}$ . Porém, é escolhido apenas um grupo de duas equações, uma com a igualdade negativa e a outra com a igualdade positiva para facilitar a resolução do sistema de equações (A.49), na forma:

$$\begin{cases} Q_{0,1} - Q_{0,2}v_0^{-1}K_{\text{NIP}} = 1 \\ Q_{0,1} - Q_{0,2}v_0^{-1}K_{\text{N}} = -1 \end{cases} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} Q_{0,1} - Q_{0,2}v_0^{-1}K_{\text{NIP}} = -1 \\ Q_{0,1} - Q_{0,2}v_0^{-1}K_{\text{N}} = 1 \end{cases} \quad (\text{A.50})$$

Resolvendo o sistema de equações (A.50), se obtém:

$$Q_{0,2} = \mp \frac{2v_0}{K_{\text{NIP}} - K_{\text{N}}} \quad e \quad Q_{0,1} = L_{0,2} = \mp \frac{K_{\text{NIP}} + K_{\text{N}}}{K_{\text{NIP}} - K_{\text{N}}}. \quad (\text{A.51})$$

Inserindo os elementos  $Q_{0,1}$ ,  $Q_{0,2}$ ,  $L_{0,1}$  e  $L_{0,2}$ , reescritos em termos das curvaturas das ondas NIP e N, na matriz propagadora  $\mathbf{\Pi}$  (equação (A.8)), se tem que:

$$\mathbf{\Pi} = \mathbf{\Pi}(G, S) = \begin{pmatrix} Q_{0,1} & Q_{0,2} \\ L_{0,1} & L_{0,2} \end{pmatrix} = \mp \frac{1}{K_{\text{NIP}} - K_{\text{N}}} \begin{pmatrix} K_{\text{NIP}} + K_{\text{N}} & 2v_0 \\ \frac{(2K_{\text{NIP}}K_{\text{N}})}{v_0} & K_{\text{NIP}} + K_{\text{N}} \end{pmatrix}. \quad (\text{A.52})$$

A matriz propagadora  $\mathbf{\Pi}$  acima, com o sinal negativo, inserida na equação (A.2), descreve fisicamente a solução para o caso particular de uma camada homogênea separada por um refletor com interface plana com velocidade constante, o que implica que para interfaces planas  $K_{\text{N}} = 0$ , uma vez que o refletor em explosão gera uma onda plana.

Na seção A.1 é apresentada a relação entre os elementos das matrizes propagadoras  $\mathbf{\Pi}$  e  $\mathbf{T}$  (equação (A.19)). Então, substituindo os elementos da matriz propagadora  $\mathbf{\Pi}$  (sinal negativo) (equação (A.52)), nas relações [(A.20), (A.21), (A.22), (A.23)], se obtém os elementos da matriz propagadora  $\mathbf{T}$  ( $A_0 = D_0$ ,  $B_0$  e  $C_0$ ) (HUBRAL et al., 1992b) em termos dos parâmetros ( $\beta_0$ ,  $K_{\text{NIP}}$  e  $K_{\text{N}}$ ) fica:

$$A_0 = D_0 (= -Q_{0,1} = -L_{0,2}) = \frac{K_{\text{NIP}} + K_{\text{N}}}{K_{\text{NIP}} - K_{\text{N}}}, \quad (\text{A.53})$$

$$B_0 (= \frac{-Q_{0,2}}{\cos^2 \beta_0}) = \frac{2v_0}{\cos^2 \beta_0 (K_{\text{NIP}} - K_{\text{N}})}, \quad (\text{A.54})$$

e

$$C_0 (= -L_{0,1} \cos^2 \beta_0) = \frac{2 \cos^2 \beta_0 K_{\text{NIP}} K_{\text{N}}}{v_0 (K_{\text{NIP}} - K_{\text{N}})}, \quad (\text{A.55})$$

Assim, a matriz propagadora  $\mathbf{T}$  em termos das parâmetros ( $\beta_0$ ,  $K_{\text{NIP}}$  e  $K_{\text{N}}$ ) fica com a forma:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{pmatrix} = \frac{1}{K_{\text{NIP}} - K_{\text{N}}} \begin{pmatrix} K_{\text{NIP}} + K_{\text{N}} & \frac{2v_0}{\cos^2 \beta_0} \\ \frac{2 \cos^2 \beta_0 (K_{\text{NIP}} K_{\text{N}})}{v_0} & K_{\text{NIP}} + K_{\text{N}} \end{pmatrix}. \quad (\text{A.56})$$

Após obter a matriz propagadora  $\mathbf{T}$  (equação (A.56)) em termos dos parâmetros ( $\beta_0$ ,  $R_{\text{NIP}}$

e  $R_N$ ) e fazendo a substituição nas aproximações parabólica e hiperbólica do tempo de trânsito dadas pelas equações (A.34) e (A.35) (TYGEL et al., 1997), se obtém:

$$t(x_m, h) = t_0 + 2\frac{\text{sen } \beta_0}{v_0}(x_m - x_0) + \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0} \left( \frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{\text{NIP}}} \right) \quad (\text{A.57})$$

e

$$t^2(x_m, h) = \left( t_0 + 2\frac{\text{sen } \beta_0}{v_0}(x_m - x_0) \right)^2 + 2t_0 \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0} \left( \frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{\text{NIP}}} \right). \quad (\text{A.58})$$

que são as aproximações parabólica e hiperbólica, respectivamente, do tempo de trânsito em termos dos atributos CRS.

## A.6 PRIMEIRA ZONA DE FRESNEL PROJETADA EM TERMOS DOS ATRIBUTOS CRS

A primeira zona de Fresnel projetada é definida por:

$$|x_m - x_0| = \frac{1}{\cos \beta_0} \sqrt{\frac{v_0 T}{2 |K_{\text{NIP}} - K_N|}}; \quad (\text{A.59})$$

ou

$$|x_m - x_0| = \frac{1}{\cos \beta_0} \sqrt{\frac{v_0 T}{2 \left| \frac{1}{R_{\text{NIP}}} - \frac{1}{R_N} \right|}}; \quad (\text{A.60})$$

onde  $T$  é o período dominante do pulso. Este resultado é obtido substituindo os elementos da matriz propagadora  $\mathbf{T}$  (equação (A.56)), reescritos em termos dos parâmetros ( $\beta_0$ ,  $R_{\text{NIP}}$  e  $R_N$ ), nas equações ((A.38), (A.39) e (A.40)).

## APÊNDICE B – MEDIDA DE COERÊNCIA SEMBLANCE

O empilhamento CRS é realizado com base em métodos de análise de coerência ao longo de trajetórias previstas pelos modelos teóricos das diferentes etapas, especificamente a medida Semblance em famílias CMP ((TANER; KOEHLER, 1969), (NEIDELL; TANER, 1971)), que é dada por:

$$S = S(\beta_0, R_{NIP}, R_N; v_0) = \frac{\sum_{j=k(i)-\frac{W}{2}}^{k(i)+\frac{W}{2}} \left( \sum_{i=1}^M f_{i,j(i)} \right)^2}{M \sum_{j=k(i)-\frac{W}{2}}^{k(i)+\frac{W}{2}} \sum_{i=1}^M f_{i,j(i)}^2}, \quad \text{onde } 0 \leq S \leq 1. \quad (\text{B.1})$$

O índice  $i$  denota as contribuições ao longo da coordenada  $h$  com  $M$  traços;  $k(i)$  denota as contribuições ao longo da coordenada  $t_0$  numa janela  $W$ . A amplitude  $f_{i,j(i)}$  do traço é calculada por meio de uma interpolação linear no mapa  $t_0 - h$ .

O Semblance é descrito como a razão normalizada da energia de saída para a de entrada, onde o numerador expressa a energia coerente ao longo da trajetória de empilhamento. Sendo assim, o máximo valor do semblance é 1, e o resultado é insensível à escala das amplitudes.

Uma alternativa ao Semblance é usar a amplitude instantânea, em vez da amplitude registrada no cubo de dados, o que é calculado através do sinal analítico expresso por:

$$F(t) = f(t) - i\mathcal{H}[f(t)], \quad (\text{B.2})$$

onde  $i$  denota a unidade imaginária e  $\mathcal{H}$  a transformada de Hilbert.

## APÊNDICE C – BUSCA POLIEDRO FLEXÍVEL

Como apresentado no capítulo 2, a determinação do operador de empilhamento CRS é um problema de otimização global tri-paramétrico não-linear. Para subconjuntos do cubo de dados, o número de parâmetros se reduz a problemas uni-paramétricos que podem ser resolvidos para obtenção de atributos iniciais do campo de onda. Em várias situações, estes atributos iniciais são suficientemente próximos dos valores “ótimos” dos atributos do campo de onda que maximizam o valor de coerência (ou, em situações de mergulhos conflitantes como um máximo local). A solução do problema não-linear necessita de valores iniciais, que neste caso se considera os valores obtidos nas buscas anteriores à otimização tri-paramétrica posicionados na vizinhança do máximo global.

A implementação do método de empilhamento CRS usado neste trabalho é baseado na busca poliedro flexível de Nelder e Mead (1965). Para uma função objeto de minimização,  $f(\mathbf{x})$ , onde  $\mathbf{x}$  é um vetor com  $M \geq 2$  componentes, este algoritmo propaga um poliedro com  $n + 1$  vértices sobre o espaço  $M$ -dimensional dos parâmetros. O método inicia com um certo poliedro, que requer os valores da função-objeto  $f$  nos vértices  $\mathbf{x}_i$ , e internamente calcula as novas posições dos vértices, sem o uso de derivadas.

### C.1 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

Himmelblau (1972) é uma boa fonte para a descrição do algoritmo poliedro flexível, que é baseado em quatro operações básicas: reflexão, expansão, contração e redução. É admitido que  $\mathbf{x}_i^{(k)}$  seja o  $i$ -ésimo vértice do poliedro na  $k$ -ésima iteração da otimização, e  $i = 1, \dots, n+1$ . O valor correspondente da função objeto de minimização é  $f(\mathbf{x}_i^{(k)})$ . As seguintes definições são aplicadas:

- O vértice  $\mathbf{x}_h^{(k)}$  associado ao maior valor da função objeto, tal que:  

$$f(\mathbf{x}_h^{(k)}) = \max \left[ f(\mathbf{x}_1^{(k)}), \dots, f(\mathbf{x}_{n+1}^{(k)}) \right],$$
- O vértice  $\mathbf{x}_s^{(k)}$  associado ao segundo maior valor da função objeto, tal que:  

$$f(\mathbf{x}_h^{(k)}) = \max \left[ f(\mathbf{x}_i^{(k)}) \right] \quad \forall i \neq h, \text{ e}$$

- O vértice  $\mathbf{x}_l^{(k)}$  associado ao menor valor da função objeto, tal que:  

$$f(\mathbf{x}_l^{(k)}) = \min \left[ f(\mathbf{x}_1^{(k)}), \dots, f(\mathbf{x}_{n+1}^{(k)}) \right].$$

O processo é iniciado com um poliedro inicial, cujos vértices iniciais  $\mathbf{x}_i^{(0)}$  são apresentados mais adiante.

No início de cada iteração, os vértices  $\mathbf{x}_h^{(k)}$ ,  $\mathbf{x}_s^{(k)}$  e  $\mathbf{x}_l^{(k)}$  são determinados. Para as operações básicas reflexão, expansão e contração, devemos calcular o centróide dado por:

$$\mathbf{c}^{(k)} = \frac{1}{n} \left[ \left( \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{x}_i^{(k)} \right) - \mathbf{x}_h^{(k)} \right]$$

para todos os vértices  $\mathbf{x}_h^{(k)}$ . A primeira operação é refletir o vértice  $\mathbf{x}_h^{(k)}$  sobre o centróide  $\mathbf{c}^{(k)}$  para obter o novo vértice:

$$\mathbf{r}^{(k)} = \mathbf{c}^{(k)} + a \left( \mathbf{c}^{(k)} - \mathbf{x}_h^{(k)} \right), \quad \text{com } a > 0.$$

Se  $f(\mathbf{r}^{(k)}) \leq f(\mathbf{x}_s^{(k)})$ , o mínimo é esperado na direção da reflexão. Se  $f(\mathbf{r}^{(k)}) \leq f(\mathbf{x}_l^{(k)})$ , o algoritmo tenta “acelerar” a propagação nesta direção por meio de uma equação de reflexão do poliedro:

$$\mathbf{e}^{(k)} = \mathbf{c}^{(k)} + b \left( \mathbf{c}^{(k)} - \mathbf{x}_h^{(k)} \right), \quad \text{com } b > 1.$$

Este vértice expandido é aceito se ele produz um valor baixo para  $\mathbf{x}_l^{(k)}$ . Assim, duas possíveis operações são produzidas:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{r}^{(k)}) \leq f(\mathbf{x}_l^{(k)}) \wedge f(\mathbf{e}^{(k)}) \leq f(\mathbf{x}_l^{(k)}) & \quad \text{Reflexão e expansão: } \mathbf{x}_m^{(k)} := \mathbf{e}^{(k)}; \\ f(\mathbf{x}_l^{(k)}) < f(\mathbf{r}^{(k)}) \leq f(\mathbf{x}_s^{(k)}) \wedge f(\mathbf{e}^{(k)}) > f(\mathbf{x}_l^{(k)}) & \quad \text{Reflexão: } \mathbf{x}_m^{(k)} := \mathbf{r}^{(k)}. \end{aligned}$$

Nos demais casos, o algoritmo admite que o poliedro é iniciado para buscar um mínimo. A reflexão é aceita como um vértice intermediário, isto é,  $\mathbf{x}_h^{(k)} := \mathbf{f}^{(k)}$  se  $f(\mathbf{r}^{(k)}) \geq f(\mathbf{x}_h^{(k)})$ .

A próxima operação é o poliedro contração de acordo com:

$$\mathbf{k}^{(k)} = \mathbf{c}^{(k)} + c \left( \mathbf{x}_h^{(k)} - \mathbf{c}^{(k)} \right), \quad \text{com } 0 < c < 1.$$

Esta contração, com ou sem reflexão, é aceita se  $f(\mathbf{k}^{(k)}) \leq f(\mathbf{x}_h^{(k)})$ . Se a contração não é realizada com sucesso, a procura pelo mínimo é considerada na vizinhança de  $\mathbf{x}_l^{(k)}$  e o poliedro esperado é muito grande para detectar o mínimo. Assim, a operação final é para reduzir (refletido) o poliedro em torno do vértice  $\mathbf{x}_l^{(k)}$ :

$$\mathbf{x}_i^{(k)} = \mathbf{x}_l^{(k)} + \frac{1}{2} \left( \mathbf{x}_i^{(k)} - \mathbf{x}_l^{(k)} \right), \quad i = 1, \dots, n + 1.$$

Esta etapa é composta por seis transformações que são aplicadas ao poliedro em cada iteração: reflexão, reflexão e expansão, contração, reflexão e contração, redução, reflexão e redução. Estas transformações habilitam o poliedro a se propagar sobre o espaço dos parâmetros (reflexão) com a opção de aumentar ou diminuir sua velocidade de propagação (expansão e contração). Na vizinhança do mínimo procurado, o poliedro também é capaz de encolher (redução).

As seis transformações são mostradas na Figura C.1 para um espaço tri-dimensional de parâmetros ( $M = 3$ ), e os coeficientes  $a = 1$  para reflexão,  $b = 2$  para a expansão e  $c = \frac{1}{2}$  para a contração. Estes coeficientes são usados no CRS.

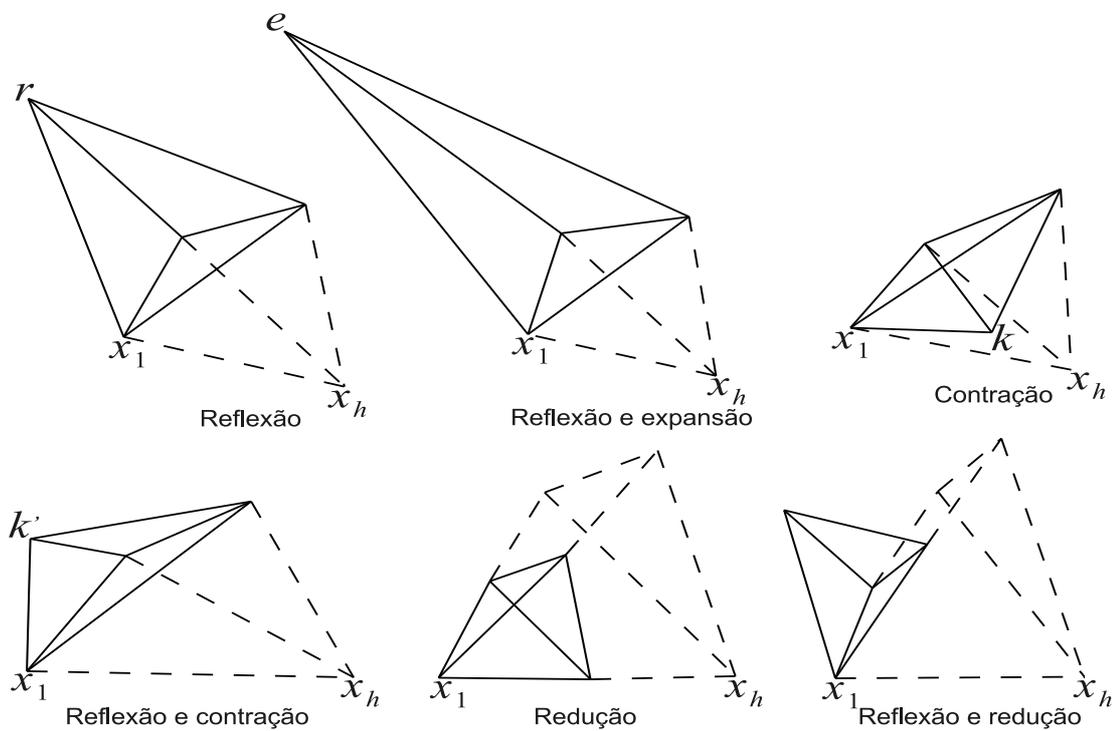


Figura C.1: Possíveis transformações do tetraedro no algoritmo de busca poliedro flexível para três parâmetros. As linhas tracejadas representam o resultado do processo anterior a iteração, que é o poliedro inicial (primeira iteração). Adaptado de Mann (2002).

Após cada iteração um critério de parada deve ser avaliado. O critério dado em Himmelblau (1972) é:

$$\sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} [f(\mathbf{x}_i^{(k)}) - f(\mathbf{c}^{(k)})]^2} \leq \varepsilon, \quad (\text{C.1})$$

que é a média quadrática da diferença da função-objeto nos vértices relativa aos vales das funções-objeto no centróide.

## C.2 ADAPTAÇÃO AO MÉTODO CRS

Apesar da busca poliedro flexível ser bastante robusta, o problema de otimização não-linear do método de empilhamento CRS requer adaptações para que os resultados sejam mais eficientes. Neste caso, o espaço dos parâmetros é tri-dimensional, e os seguintes assuntos tem uma particular importância:

- A transformação do espaço dos parâmetros deve tornar a otimização mais linear e evitar problemas numéricos;
- O cálculo dos vértices iniciais a partir dos atributos iniciais do campo de onda;
- O critério de parada.

A função objeto de minimização local é não-linear em relação aos atributos do campo de onda:  $R_N$ ,  $(-\infty, +\infty)$ ;  $R_{\text{NIP}}$ ,  $(-\infty, +\infty)$ ; e  $\beta$  ( $\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}$ )

A idéia original para endereçar este problema foi projetar o plano  $(R_{\text{NIP}}, \frac{1}{R_N})$  dentro de uma esfera de Riemman com um dado raio  $R_S$ . Desta forma, o raio  $R_{\text{NIP}}$  e a curvatura  $\frac{1}{R_N}$  são parametrizáveis por ângulos que não leva a um problema numérico. Além do mais, se revelou que com um raio apropriado  $R_S$ , o espaço dos parâmetros parece mais linear, e aumenta a performance do algoritmo de busca. Aplicações para vários conjuntos de dados mostrou que a transformação de  $R_{\text{NIP}}$  é menos crítica e pode ser evitada, e  $R_{\text{NIP}}$  é transformado de acordo com:

$$\alpha = \arctan \frac{R_S}{R_N},$$

onde valores empíricos de  $R_S$  na ordem de 100m parecem ser apropriados.

A busca poliedro flexível requer um tetraedro inicial dado pelos valores iniciais dos atributos do campo de onda. Devido a multiplicidade de máximos locais no cubo de coerência, o tamanho do tetraedro inicial é crucial para o sucesso da otimização, e Jaeger (1999) demonstrou que se o tamanho é muito grande, o processo de otimização foge imediatamente da vizinhança do máximo desejado, enquanto que, se o tetraedro inicial for muito pequeno, geralmente o processo fica preso num máximo local. O tetraedro inicial é gerado de acordo com:

$$\mathbf{x}_1^{(0)} = \begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \\ R_{\text{NIP}} \end{pmatrix}, \mathbf{x}_2^{(0)} = \begin{pmatrix} \beta - \delta_1 \\ \alpha - \delta_2 \\ R_{\text{NIP}}\delta_3 \end{pmatrix}, \mathbf{x}_3^{(0)} = \begin{pmatrix} \beta + \delta_1 \\ \alpha - \delta_2 \\ R_{\text{NIP}} \end{pmatrix}, \mathbf{x}_4^{(0)} = \begin{pmatrix} \beta \\ \alpha + \delta_2 \\ R_{\text{NIP}}/\delta_3 \end{pmatrix}.$$

Valores empíricos para as variações  $\delta_1$  e  $\delta_2$  dos ângulos são próximas de  $6^\circ$ , o fator  $\delta_3$  para a variação de  $R_{\text{NIP}}$  é próxima de 1.05, o que significa uma variação de 5%.

Em geral, a busca poliedro flexível num espaço de parâmetros  $n$ -dimensional converge após aproximadamente  $20n$  iterações. Para o problema do empilhamento CRS, em que  $n = 3$ , é observado que 60 à 70 iterações são realizadas no caso de convergência. Para evitar cálculos desnecessários, um número máximo de iterações  $k_{\text{max}}$  é introduzido como um critério de parada adicional, em geral o valor de  $k_{\text{max}}$  está em torno de 100.

O critério de parada dado na equação (C.1) depende da escala da função-objeto, que pode ter uma variação muito forte, dependendo da localização ZO a ser simulada e usada no critério de coerência. Para remover esta dependência, é proposto a normalização pela média quadrática do valor da função-objeto no centróide.

Outro problema específico no empilhamento CRS é que, para pequenos valores absolutos de  $R_{\text{NIP}}$  e/ou  $R_{\text{N}}$ , o operador torna-se muito íngreme e sai rapidamente do volume do dado pré-empilhado, e em tais situações, diminui o número de traços contribuindo ao empilhamento. Como mencionado no capítulo 2, os valores de coerência calculados a partir de diferentes números de traços não são comparáveis, mas tende a aumentar com a diminuição do número de traços. Como uma consequência, a otimização pode convergir sistematicamente reduzindo o número de traços participantes. Para evitar este comportamento indesejado, a otimização é parada se o número de traços  $n_T^{(k)}$  contribuindo para o cálculo do vértice final na iteração  $k$  é mais do que 10% abaixo do número de traços  $n_T^{(0)}$  contribuindo para o vértice  $\mathbf{x}_1^{(0)}$  dado pelos atributos iniciais. Com estas extensões, o critério de parada fica da seguinte forma:

$$\frac{1}{|f(\mathbf{c}^{(k)})|} \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} [f(\mathbf{x}_i^{(k)}) - f(\mathbf{c}^{(k)})]^2} \leq \varepsilon \quad \vee \quad k > k_{\text{max}} \quad \vee \quad \frac{n_T^{(k)}}{n_T^{(0)}} < 0.9. \quad (\text{C.2})$$

## APÊNDICE D – HARDWARE E SOFTWARE USADOS

O algoritmo de aplicação do método de empilhamento CRS é escrito em C++. Esta implementação é da Universidade de Karlsruhe (Alemanha) versão 5.1.

O pré-processamento do dado foi realizado no pacote CWP/SU, versão 4.1.

Esta dissertação foi escrita num PC (Linux Ubuntu 8.10) utilizando o processador de texto (distribuição livre)  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ , e o pacote  $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ , e diversas extensões. A bibliografia foi gerada através do  $\text{B}_{\text{i}}\text{B}_{\text{T}}\text{E}_{\text{X}}$ .

As figuras contidas nesta dissertação foram geradas com o pacote CWP/SU versão 4.1, com o pacote openoffice-3.1 e com o pacote GNU-octave 3.0.1.