



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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ESTUDO DO MÉTODO DE INVERSÃO TOMOGRÁFICA 2D BASEADA  
NOS ATRIBUTOS CINEMÁTICOS DA ONDA NIP E CONSTRUÇÃO DE  
INTERFACE GRÁFICA PARA O PROCESSO DE PICKING**

**IRAN GADELHA DE OLIVEIRA**

**BELÉM**

**2007**

**IRAN GADELHA DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DO MÉTODO DE INVERSÃO TOMOGRÁFICA 2D BASEADA NOS  
ATRIBUTOS CINEMÁTICOS DA ONDA NIP E CONSTRUÇÃO DE INTERFACE  
GRÁFICA PARA O PROCESSO DE PICKING**

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

**Área de Concentração:  
Métodos Sísmicos**

**Orientador: German Garabito Callapino**

**BELÉM**

**2007**

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

---

- O48e Oliveira, Iran Gadelha de  
Estudo do método de inversão tomográfica 2D baseada nos atributos cinemáticos da onda NIP e construção de interface gráfica para o processo de *picking*. / Iran Gadelha de Oliveira; Orientador, German Garabito Callapino– 2007  
100 f. : il.  
Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2006.
1. Velocidade. 2. Tomografia. 3. Inversão. 4. Reflexões. 5. *Picking*. I. Universidade Federal do Pará. II. Garabito Callapino, German, Orient. III. Título.

CDD 20º ed.:531.112

---

**IRAN GADELHA DE OLIVEIRA**

**Estudo do Método de Inversão Tomográfica 2D Baseada nos Atributos Cinemáticos da Onda NIP e Construção de Interface Gráfica para o Processo de Picking**

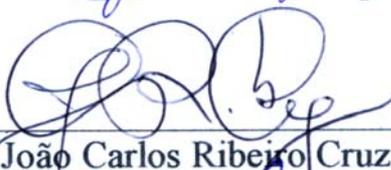
**Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, para obtenção do título de Mestre em Geofísica.**

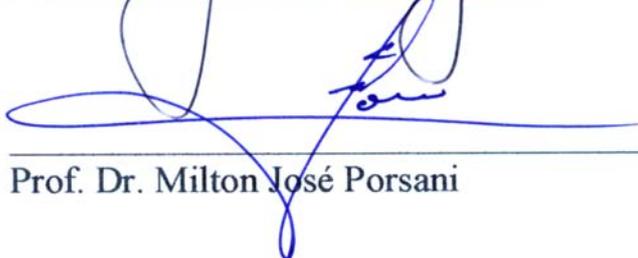
**Área de Concentração:  
Métodos Sísmicos**

**Data da aprovação:**

**COMITÊ DE TESE:**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. German Garabito Callapino (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. João Carlos Ribeiro Cruz

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Milton José Porsani

## **AGRADECIMENTOS**

À Agência Nacional do Petróleo, ANP, pela cessão das linhas sísmicas para uso acadêmico, processo CNPq 465.529/00-3.

Ao CPGF/UFPA pela oportunidade de concretizar mais um importante passo na minha vida profissional e acadêmica.

## RESUMO

Neste trabalho, estuda-se um novo método de inversão tomográfica de reflexão para a determinação de um modelo isotrópico e suave de velocidade por meio da aplicação, em dados sintéticos e reais, do programa Niptomo que é uma implementação do método de inversão tomográfica dos atributos cinemáticos da onda hipotética do ponto de incidência normal (PIN). Os dados de entrada para a inversão tomográfica, isto é, o tempo de trânsito e os atributos da onda PIN (raio de curvatura da frente de onda emergente e ângulo de emergência), são retirados de uma série de pontos escolhidos na seção afastamento nulo (AN) simulada, obtida pelo método de empilhamento por superfícies de reflexão comum (SRC). Normalmente, a escolha destes pontos na seção AN é realizada utilizando-se programas de *picking* automático, que identificam eventos localmente coerentes na seção sísmica com base nos parâmetros fornecidos pelo usuário. O *picking* é um dos processos mais críticos dos métodos de inversão tomográfica, pois a inclusão de dados de eventos que não sejam de reflexões primárias podem ser incluídos neste processo, prejudicando assim o modelo de velocidades a ser obtido pela inversão tomográfica. Este trabalho tem por objetivo de construir um programa de *picking* interativo para fornecer ao usuário o controle da escolha dos pontos de reflexões sísmicas primárias, cujos dados serão utilizados na inversão tomográfica. Os processos de *picking* e inversão tomográfica são aplicados nos dados sintéticos Marmousi e nos dados da linha sísmica 50-RL-90 da Bacia do Tacutu. Os resultados obtidos mostraram que o *picking* interativo para a escolha de pontos sobre eventos de reflexões primárias favorece na obtenção de um modelo de velocidade mais preciso.

Palavras-chave: Tomografia. Inversão. Reflexões. *Picking*. Velocidade.

## ABSTRACT

In this work, a new tomographic reflection inversion method is studied, with the objective of determining smooth and isotropic velocity models for real and synthetic seismic data. The velocity model is obtained by the program NIPTOMO, which is an implementation of a tomographic inversion method of the kinematic attributes of the hypothetical waves NIP (normal incidence point). The input data for the tomographic inversion, e. g., traveltimes and NIP attributes (wavefront curvature radius and emergence angle) are obtained through a set of picked points on a simulated zero-offset (ZO) section, previously obtained by the common-reflection surface (CRS) method. The choice of picked points in a ZO section is normally made using automatic picking programs that identify locally coherent events in a seismic section, based in user-defined parameters. The picking process is one of the most critical steps in this new method, since the choice of non primary reflection events, such as diffractions and multiples, may lead to errors in the velocity model obtained by the tomographic inversion. This work has as main objective develop an interactive picking program to give to the user the control of the choice of primary reflection points that are used as input for the tomographic inversion. The present picking program was tested on the synthetic Marmousi dataset and on a real data from the Tacutu Basin, Brazil (seismic line 50-RL-90). The results obtained show that the interactive picking process for the choice of primary reflection events points favors the determination of a precise velocity model.

Keywords: Tomographic. Inversion. Reflections. Picking. Velocity.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	DESCRIÇÃO	Pág
Figura 2.1	Experimento fonte-comum. Fonte sísmica e um conjunto de receptores sísmicos na superfície de medida com afastamentos (offsets) diferentes entre fonte e receptor.....	19
Figura 2.2	Configurações: SRC, PMC, RC, FC e AC .....	20
Figura 2.3	Configuração ponto médio comum (PMC).....	21
Figura 2.4	Frentes de ondas hipotéticas para um meio homogêneo: os instantâneos das frentes de ondas PIN formadas por uma fonte pontual em P são mostradas em vermelho, instantâneos das frentes de onda da onda N formadas por um segmento do refletor explosivo em torno do ponto P são mostradas em verde.....	22
Figura 2.5	Fluxograma simplificado da estratégia de busca SRC global-local (Waldomiro, 2005).....	29
Figura 2.6	Modelo de velocidades Marmousi.....	30
Figura 2.7	Seção empilhada com afastamento nulo resultante do empilhamento SRC global-local.....	31
Figura 2.8	Seção de coerência ( <i>semblance</i> ).....	32
Figura 2.9	Seções de atributos de frentes de ondas: a) ângulo de emergência, a) raio de curvatura da onda PIN e c) raio de curvatura da onda N.....	32
Figura 2.10	Mapa que mostra os limites da Bacia do Tacutu e as linhas sísmicas 2D adquiridas.....	33
Figura 2.11	Seção empilhada com afastamento nulo resultante do método de empilhamento SRC global-local.....	34
Figura 2.12	Seção de coerência ( <i>semblance</i> ).....	35
Figura 2.13	Seções de atributos de frentes de ondas: a) ângulo de emergência, a) raio de curvatura da onda PIN e c) raio de curvatura da onda N.....	35

Figura 3.1	Definição do modelo e dos componentes dos dados para a inversão tomográfica 2D. Os componentes dos dados descrevem a curva do tempo de trânsito de segunda ordem associada com a frente de onda emergente PIN. Os correspondentes componentes do modelo PIN são as posições espaciais do PIN e o ângulo inicial do raio normal, enquanto os parâmetros do modelo de velocidade são os coeficientes <i>B-splines</i> na equação (3.2).....	39
Figura 4.1	Resultado do <i>picking</i> automático na seção AN dos dados Marmousi empilhada pelo método SRC.....	61
Figura 4.2	Velocidade NMO dos eventos marcados pelo <i>picking</i> automático na seção AN dos dados Marmousi.....	62
Figura 4.3	Modelo de velocidades obtido pela inversão dos dados resultantes do <i>picking</i> automático mostrado na Figura 4.1.....	62
Figura 4.4	Resultado do <i>picking</i> interativo na seção AN dos dados Marmousi empilhada pelo método SRC. Marmousi.....	63
Figura 4.5	Velocidade NMO dos eventos marcados pelo <i>picking</i> interativo na seção AN dos dados Marmousi.....	64
Figura 4.6	Modelo de velocidades obtido pela inversão dos dados resultantes do <i>picking</i> interativo na seção AN dos dados Marmousi.....	64
Figura4.7	Resultado do <i>picking</i> automático na seção AN da linha 50-RL-90 empilhada pelo método SRC.....	66
Figura4.8	Velocidade NMO dos eventos marcados pelo <i>picking</i> automático na seção AN da linha 50-RL-90.....	66
Figura4.9	Modelo de velocidades obtido pela inversão dos dados resultantes do <i>picking</i> automático mostrado na Figura 4.5.....	67
Figura4.10	Resultado do <i>picking</i> interativo na seção AN da linha 50-RL-90 empilhada pelo método SRC.....	68
Figura4.11	Velocidade NMO dos eventos marcados pelo <i>picking</i> interativo na seção AN da linha 50-RL-90.....	68
Figura4.12	Modelo de velocidades obtido pela inversão dos dados resultantes do <i>picking</i> interativo mostrado na Figura 4.7.....	69

Figura 5.1	Pontos de alta (área A), média (área B) e baixa (área C) coerência...	71
Figura 5.1a	Seção de coerência ( <i>semblance</i> ).	71
Figura 5.2	Valores do ângulo de emergência $\beta$ , do raio de curvatura $R_{PIN}$ , e de $M_{PIN}$ dos pontos com alta coerência.....	73
Figura 5.3	Valores do ângulo de emergência $\beta$ , do raio de curvatura $R_{PIN}$ , e de $M_{PIN}$ dos pontos com média coerência.....	73
Figura 5.4	Valores do ângulo de emergência $\beta$ , do raio de curvatura $R_{PIN}$ , e de $M_{PIN}$ dos pontos com baixa coerência.....	73
Figura 5.5	Migração dos dados Marmousi utilizando o modelo verdadeiro de velocidades suavizado.....	76
Figura 5.6	Migração dos dados Marmousi utilizando o modelo de velocidades resultante do <i>picking</i> automático.....	76
Figura 5.7	Migração dos dados Marmousi utilizando o modelo de velocidades resultante do <i>picking</i> editado.....	76
Figura 5.8	Migração dos dados Tacutu utilizando o modelo de velocidades resultante do <i>picking</i> automático.....	78
Figura 5.9	Migração dos dados Tacutu utilizando o modelo de velocidades resultante do <i>picking</i> editado.....	78
Figura A1	Display do Programa <i>Picking Tool</i> .....	85
Figura B.1	Perfil geológico da bacia de Cuanza localizado em Quenguela Norte (Angola), utilizado para construção do modelo Marmousi.....	92
Figura B.2	Modelo de velocidades dos dados sísmicos Marmousi.....	92
Figura B.3	Configuração geométrica (2D) do cabo flutuador para geração dos dados sísmicos Marmousi.....	94
Figura D.1	<i>Splines</i> com graus 2, 3 e 4 formadas com 4 pontos de controle, linha rosa=polígono de controle, linha preta= <i>Spline</i> .....	99

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

	DESCRIÇÃO
$\beta$	Ângulos de emergência do raio normal
$\lambda$	Fator de atualização do modelo
$\tau_0$	Tempo de trânsito do raio normal
$\xi_0$	Ponto de emergência
$\sigma_i$	Elementos diagonais da matriz $\underline{C}_D$
$\beta_j(x)$	Funções básicas
$\beta_k(z)$	Funções básicas
$\xi_m$	Coordenadas do ponto médio entre a fonte e o receptor
$\theta^{PIN}$	Mergulho do refletor
$(x, z)^{PIN}$	Coordenadas do PIN na subsuperfície
$\varepsilon_{zz}, \varepsilon_{xx}$ e $\varepsilon$	Fatores para normalização
AC	Afastamento-comum
AN	Afastamento nulo
$\underline{C}_D$	Matriz covariante dos dados
$C_p$	Curvatura da frente de onda N
<b>d</b>	vetor de dados
DMO	Correção Sobretempo oblíquo
$f$	Operador não linear da modelagem direta pelo traçamento dinâmico do raio
$\underline{F}$	Matriz que contém as derivadas de Fréchet
$h$	Coordenadas do meio afastamento entre a fonte e o receptor
IFP	Instituto Francês de Petróleo
$K_N$	Curvatura da frente de onda normal emergente em $\xi_0$
$K_{NIP}$	Curvatura da frente de onda emergente PIN em $\xi_0$
m	Grau da função <i>B-spline</i>

<b>m</b>	vetor modelo
$M_{PIN}^{(\xi)}$	Segunda derivada espacial horizontal do tempo de trânsito
N	Normal
NMO	Correção sobretempo normal
$n_{pontos}$	Quantidade total de pontos escolhidos pelo processo de <i>picking</i>
$n_x$	Número de colunas do <i>grid</i> da inversão tomográfica
$n_z$	Número de linhas do <i>grid</i> da inversão tomográfica
$P^{(\xi)}$	Primeira derivada espacial horizontal do tempo de trânsito
$P_0$	Ponto de amostragem da seção afastamento nulo (AN)
PIN	Ponto de incidência normal
PMC	Ponto médio comum
RC	Receptor-comum
$R_N$	Raio de curvatura da frente de onda N medida no ponto $\xi_0$
$R_{PIN}$	Raio de curvatura da frente de onda PIN medida no ponto $\xi_0$
S	Função custo
S/R	Razão sinal/ruído
SDC	Superfície de difração comum
SRC	Superfícies de reflexão comum
t	Tempo de reflexão
$T_0$	Tempo de trânsito afastamento nulo medido em $\xi_0$
$V(x, y)$	Modelo de velocidade 2D
$v_0$	Velocidade próxima à superfície
$v_{jk}$	Coefficientes <i>B-splines</i>
WIT	<i>Wave Inversion Technology</i>
ZO	<i>Zero offset</i> (Afastamento nulo)

## SUMÁRIO

		p.
1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	17
2	<b>EMPILHAMENTO SRC-2D (SUPERFÍCIE DE REFLEXÃO COMUM)</b> .....	18
2.1	DADOS SÍSMICOS .....	18
2.2	ONDAS HIPOTÉTICAS PIN e N .....	21
2.3	APROXIMAÇÃO HIPERBÓLICA DOS TEMPOS DE TRÂNSITO .....	23
2.4	ASPECTOS TEÓRICOS DO MÉTODO DE EMPILHAMENTO SRC .....	25
2.4.1	<b>Algoritmo 2D-SRC global-Local</b> .....	27
2.4.1.1	Otimização global pré-empilhamento .....	27
2.4.1.2	Otimização global pós-empilhamento .....	28
2.4.1.3	Otimização local pré-empilhamento.....	28
2.5	EXEMPLOS DE APLICAÇÕES .....	30
2.5.1	<b>Modelo e Dados sintéticos Marmousi</b> .....	30
2.5.1.1	Processamento dos dados Marmousi .....	31
2.5.2	<b>Dados reais – Tacutu</b> .....	33
2.5.2.1	Processamento da linha 50-RL-90 .....	34
3	<b>INVERSÃO TOMOGRÁFICA</b> .....	36
3.1	INVERSÃO TOMOGRÁFICA DOS ATRIBUTOS SRC-2D .....	36
3.1.1	<b>Componentes do modelo</b> .....	37
3.1.2	<b>Modelagem</b> .....	39
3.2	PROBLEMA INVERSO .....	40
3.2.1	<b>Solução do problema inverso</b> .....	41
3.2.2	<b>Solução dos mínimos quadrados</b> .....	43
3.2.3	<b>Regularização</b> .....	44
3.2.4	<b>Matriz tomográfica</b> .....	49
3.3	ALGORITMO DE INVERSÃO .....	51
4	<b>APLICAÇÃO DO MÉTODO DE INVERSÃO TOMOGRÁFICA DOS ATRIBUTOS SRC-2D EM DADOS SINTÉTICOS E DADOS REAIS</b> .....	54
4.1	DADOS DE ENTRADA PARA A INVERSÃO .....	54
4.2	PARÂMETROS DA INVERSÃO .....	55
4.3	<i>PICKING DOS ATRIBUTOS SRC</i> .....	57

4.3.1	<b>Picking Automático</b> .....	57
4.3.2	<b>Picking Interativo</b> .....	59
4.4	APLICAÇÕES DO <i>PICKING</i> E DA INVERSÃO TOMOGRÁFICA .....	60
4.4.1	<b>Resultados dos dados Marmousi</b> .....	60
4.4.1.1	<i>Picking</i> Automático/Inversão .....	60
4.4.1.2	<i>Picking</i> Interativo/Inversão .....	63
4.4.2	<b>Resultados dos dados da linha 50-RL-90</b> .....	65
4.4.2.1	<i>Picking</i> Automático/Inversão .....	65
4.4.2.2	<i>Picking</i> Interativo/Inversão .....	67
5	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	70
5.1	<i>PICKING</i> AUTOMÁTICO .....	70
5.2	COERÊNCIA .....	72
5.3	INVERSÃO .....	74
5.4	MIGRAÇÃO .....	75
6	<b>CONCLUSÕES</b> .....	79
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	81
	<b>APÊNDICES</b> .....	83
	<b>APÊNDICE A - MANUAL DO PROGRAMA <i>PICKING TOOL</i></b> .	84
	<b>APÊNDICE B - MODELO MARMOUSI</b> .....	92
	<b>APÊNDICE C - GEOLOGIA E DADOS DA BACIA TACUTU</b> .	96
	<b>APÊNDICE D - B-SPLINE</b> .....	98

## 1 INTRODUÇÃO

O modelo de velocidade é uma das informações mais importantes para o processo de imageamento sísmico em profundidade (migração), principalmente em meios lateralmente heterogêneos que representam estruturas geológicas complexas. Para se obter um modelo de velocidade confiável são necessárias técnicas sofisticadas para estimar a velocidade, sendo a tomografia de reflexão um dos métodos tradicionais utilizados para a determinação do modelo de velocidade, por determinar iterativamente um ótimo modelo através de um modelo geral atualizado, de tal forma, que minimize a diferença entre os tempos de trânsito dos pontos escolhidos ao longo dos eventos de reflexão nos dados sísmicos e os seus correspondentes valores calculados no modelo, por meio do traçamento dinâmico do raio. Billete e Lambaré (1998) introduziram um algoritmo de inversão tomográfica denominado de estéreo tomografia que, além dos tempos de trânsito de reflexões primárias, também usa o vetor vagarosidade para atualizar o modelo de velocidades durante o processo iterativo.

Recentemente, foi desenvolvido um novo método de inversão tomográfica (DUVENECK, 2004a) que utiliza o tempo de trânsito e os atributos cinemáticos do campo de onda da onda hipotética do ponto de incidência normal (PIN) extraídos da seção simulada afastamento nulo (AN) do método de empilhamento por superfícies de reflexão comum (SRC). Os atributos associados a onda PIN são o ângulo de emergência do raio normal e o raio de curvatura da onda PIN, ambos medidos no ponto de emergência do raio central. Antes de iniciar a inversão tomográfica, por meio do processo de *picking*, é necessário determinar dois atributos cinemáticos da onda PIN de um grande número de pontos de reflexões primárias ao longo de horizontes contínuos e espalhados pela seção afastamento nulo (AN). Os parâmetros de inversão associados ao tempo de trânsito hiperbólico de segunda ordem são: a primeira derivada espacial horizontal do tempo de trânsito (vetor  $\mathbf{p}^{(x)}$ ), a segunda derivada espacial horizontal do tempo de trânsito (matriz simétrica  $\mathbf{M}^{(x)}_{PIN}$ ). Os valores de  $\mathbf{p}^{(x)}$  e  $\mathbf{M}^{(x)}_{PIN}$  estão associados ao ângulo de emergência e ao raio de curvatura da onda PIN no ponto de reflexão. O novo método de inversão tomográfica (DUVENECK, 2004a) tenta encontrar por modelagem direta, através do traçamento cinemático e dinâmico de raio, um modelo definido pelos parâmetros  $(\tau_0, M_{PIN}^{(\xi)}, \mathbf{p}^{(\xi)}, \xi_0)_i^{\text{mod}}$  a fim de que a diferença entre estes parâmetros e seus respectivos parâmetros dos dados  $(\tau_0, M_{PIN}^{(\xi)}, \mathbf{p}^{(\xi)}, \xi_0)_i$  seja minimizada pelo método dos mínimos quadrados. Nos métodos de inversão tomográfica de

reflexões, o processo de *picking* é um ponto crítico, principalmente quando este processo é realizado em seções pré-empilhadas (estéreo tomografia), isto é, a marcação ou escolha dos pontos sobre os eventos de reflexão toma muito tempo e quando a razão sinal-ruído é pequena, torna-se difícil ou quase impossível identificar e escolher os pontos em eventos de reflexões contínuas. No método de inversão de atributos da frente de onda da onda PIN proposta por Duveneck (2004a), o processo de *picking* é menos crítico por ser realizado na seção empilhada AN resultante do método SRC, que em geral apresenta uma razão sinal-ruído alta. Nesse novo método, cada ponto escolhido é independente um do outro devido a cada parâmetro da inversão tomográfica estar associado a um ponto de incidência normal (PIN) em subsuperfície e o modelo de velocidade suave ser descrito pela função *B-spline*.

Uma das maneiras escolhidas para se fazer o *picking* neste trabalho foi utilizar o programa *Kinautopick-2D* (KLÜVER; MANN, 2005), este programa escolhe os pontos automaticamente na seção AN utilizando os dados da seção de coerência do processamento SRC e parâmetros de distâncias e amplitudes fornecidas pelo usuário. O problema encontrado no uso desse programa foi a falta de visualização dos pontos escolhidos sobre a seção AN e de um controle mais efetivo sobre cada ponto, sendo que os pontos escolhidos podem corresponder também a outros eventos sísmicos como reflexões múltiplas e difrações. Devido a este fato, o processo de inversão para a determinação de um modelo de velocidade ótimo pode ser seriamente comprometido.

## 1.1 OBJETIVOS

Para melhor determinar o modelo de velocidade por meio da inversão tomográfica dos atributos da onda PIN, este trabalho tem como objetivo principal a construção do programa de *picking* interativo para escolha (*picking*) dos pontos de reflexão e assim ter um melhor controle dos dados a serem submetidos ao processo de inversão. Este programa permite que o próprio usuário escolha os pontos, baseando-se na sua interpretação dos eventos de reflexões primárias, evitando as reflexões múltiplas e difrações, pois elas comprometem significativamente os resultados do método de inversão tomográfica.

Como objetivo deste trabalho, também é realizado um estudo da influência dos parâmetros de inversão no modelo de velocidades obtido. Com este propósito serão processados

os dados sísmicos sintéticos Marmousi e dos dados sísmicos reais da linha 50-RL-90 da Bacia do Tacutu (SILVA, 2004) pelo método de empilhamento SRC para a obtenção das seções AN. Posteriormente, será determinado o modelo de velocidades suavizado pela inversão tomográfica dos atributos da onda PIN provenientes dos resultados do método SRC.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada da seguinte maneira:

No capítulo 1 temos a introdução que nos fornece uma visão geral do que será apresentado neste trabalho.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão teórica do método SRC necessária para o bom entendimento do trabalho, bem como sobre aquisição de dados sísmicos. Ainda neste capítulo é mostrado o algoritmo 2D-SRC-global-local do método de empilhamento aplicado e um resumo sobre o modelo sintético Marmousi e o dado real linha 50-RL-90 da bacia do Tacutu.

No capítulo 3 descrevem-se os fundamentos do novo método de inversão tomográfica feito através dos atributos cinemáticos da onda PIN.

No capítulo 4 são apresentados os resultados do método descrito no capítulo 3 sobre os dados Marmousi e Tacutu, bem como a diferença nos resultados entre o *picking* automático e o *picking* interativo.

No capítulo 5 temos uma breve discussão dos resultados.

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões deste trabalho e algumas perspectivas para futuras pesquisas.

Esta dissertação ainda contém um apêndice que contém o manual do programa *Picking Tool*, as informações adicionais sobre os dados Marmousi e Tacutu e os detalhes sobre os coeficientes *B-splines*.

## 2 EMPILHAMENTO SRC-2D (SUPERFÍCIE DE REFLEXÃO COMUM)

O empilhamento sísmico é freqüentemente realizado durante o processamento convencional denominado ponto médio comum (PMC), através das correções sobretempo normal e sobretempo oblíquo (NMO/DMO). O processamento convencional PMC exige, a priori, o conhecimento das velocidades de empilhamento. Estas velocidades servem para correções de sobretempo nos tempos de trânsito de reflexão sísmica na configuração PMC.

No presente capítulo introduziremos o empilhamento por superfície de reflexão comum (SRC). O método SRC tem como principal característica a construção de uma superfície de empilhamento formada por curvas definidas pela aproximação do tempo de trânsito de reflexões de raios na vizinhança de um raio normal. Esta aproximação tem como parâmetros os ângulos de emergência do raio normal ( $\beta$ ) e os raios de curvatura de duas ondas hipotéticas denominadas onda ponto de incidência normal (onda PIN) e onda normal (onda N). Para a determinação destes parâmetros é necessário uma estratégia de busca que utilize casos particulares da aproximação de segunda ordem hiperbólica dos tempos de trânsito, por exemplo, a estratégia de busca SRC global-local (GARABITO CALLAPINO, 2001).

O empilhamento SRC é um método que não necessita do conhecimento a priori de um modelo de velocidade como acontece com os outros métodos sísmicos convencionais (e.g., empilhamento NMO/DMO), é necessário apenas o conhecimento da velocidade próxima à superfície. Nos últimos anos, este método vem sendo desenvolvido no âmbito do consórcio *Wave Inversion Technology* (WIT) do qual o grupo de pesquisa sísmica do departamento de Geofísica da UFPA faz parte desde 2003.

### 2.1 DADOS SÍSMICOS

Para se criar uma imagem da subsuperfície é necessário termos informações (dados sísmicos) sobre ela e quanto maior for a quantidade de informações que tivermos melhor será as nossas chances de gerar uma boa imagem. Baseado nessas informações, a linha (2D) na região de exploração é coberta densamente por arranjos de fontes e receptores. Essa grande quantidade de

arranjos dispostos ao longo da linha sísmica serve para formar um conjunto de dados de cobertura múltipla.

Este conjunto de dados geralmente envolve um grande número de experimentos sísmicos fonte-comum, onde cada experimento consiste de uma fonte sísmica e um conjunto de receptores sísmicos na superfície de medida com afastamentos (*offsets*) diferentes entre fonte e receptor, veja figura 2.1.

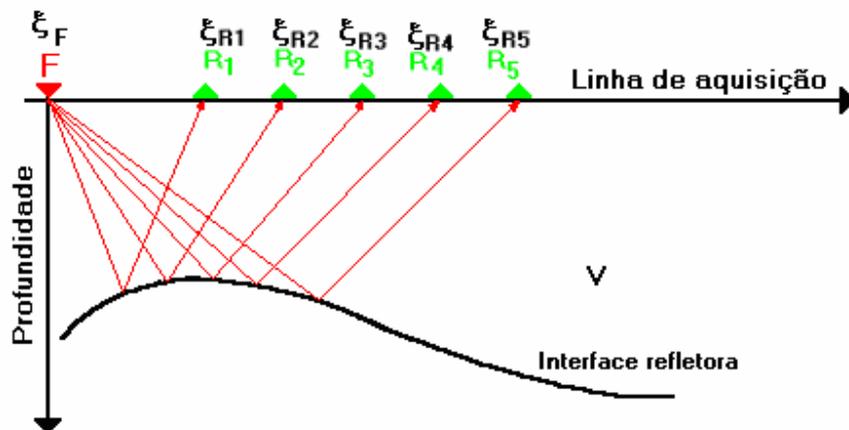


Figura 2.1: Experimento fonte-comum. Fonte sísmica e um conjunto de receptores sísmicos na superfície de medida com afastamentos (*offsets*) diferentes entre fonte e receptor

Dentro destes experimentos, temos o conjunto fonte e receptores (arranjo fonte-comum) deslocados para uma nova posição sempre com uma distância regular (Figura 2.2). Este procedimento gera uma redundância nos dados da estrutura geológica de subsuperfície. Esta redundância de informações de um mesmo ponto refletor em subsuperfície será utilizada para melhorar a razão sinal/ruído pela interferência construtiva dos eventos sísmicos coerentes, como as reflexões sísmicas primárias, e pela interferência destrutiva do ruído aleatório e eventos sísmicos como reflexões múltiplas.

Como observado na figura 2.2, os dados de cobertura múltipla podem ser classificados em diferentes arranjos de fontes e receptores, como: Receptor-comum (RC), Afastamento-comum (AC) e ponto médio comum (PMC).



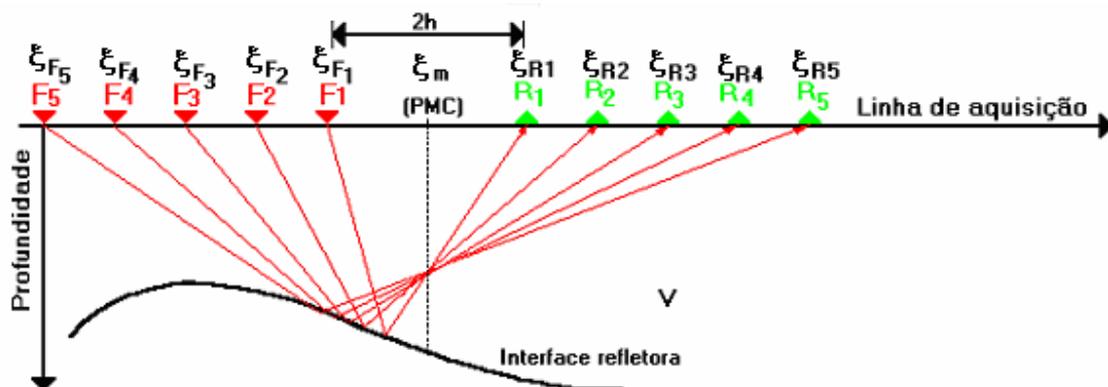


Figura 2.3: Configuração ponto médio comum (PMC).

Na aquisição dos dados marinhos as fontes são geralmente um conjunto de canhões de ar comprimido, rebocadas por um barco. As ondas acústicas refletidas são medidas através de um número de hidrofones sensíveis as variações de pressão, os quais são colocados em um cabo com vários quilômetros de comprimento atrás do barco. Como foi mencionado anteriormente, os dados de cobertura múltipla são adquiridos na configuração fonte-comum. No entanto, para aplicar o processamento PMC estes dados devem ser classificados em famílias PMC cuja configuração de fontes e receptores é mostrada na figura 2.3. Quando o meio é composto por camadas planas horizontais, com esta configuração PMC são mostrados pontos de reflexão comum em profundidade, mas quando as reflexões não são mais planas e horizontais há uma dispersão dos pontos de reflexão como mostrado na figura 2.3.

## 2.2 ONDAS HIPOTÉTICAS PIN e N

A onda de ponto de incidência normal (onda PIN) e a onda normal (N) são ondas hipotéticas que foram descritas por Hubral (1983) para resolver problemas de propagação de ondas com direção normal ao refletor. Estas ondas também são chamadas de auto-ondas (*eigenwaves*) porque representam matematicamente auto-soluções do problema do raio normal.

A figura 2.4 exibe a propagação das duas ondas hipotéticas em um meio homogêneo com uma interface encurvada sobre um semi-espço. O ponto P é o ponto de incidência normal do raio de afastamento nulo (cor azul) com a origem na posição  $\xi_0$  sobre a linha sísmica.

A onda PIN é uma onda ascendente emitida por uma fonte hipotética que se localiza no ponto P sobre o refletor. A direção inicial de propagação da onda PIN é perpendicular ao refletor no ponto P e a propagação das suas frentes de ondas em diferentes instantes no tempo até alcançar o ponto de emergência  $\xi_0$  é mostrada em vermelho.

O raio de curvatura da frente de onda medida no ponto de emergência  $\xi_0$  é denotado por  $R_{PIN}$ .

A onda normal (N) também é uma onda ascendente originada por um conjunto de fontes pontuais localizadas sobre a interface refletora próximas ao ponto P. Estas fontes são acionadas simultaneamente como se nesta interface o refletor estivesse explodindo e pelo princípio de Huygens as frentes de onda geradas por cada fonte pontual geram uma única frente de onda N, onde a curvatura ( $C_P$ ) da frente de onda N no ponto P é igual à curvatura local do refletor e a direção de propagação é perpendicular à interface refletora. As frentes de ondas em verde representam a propagação da onda N em diferentes instantes até a sua chegada na posição de emergência  $\xi_0$ . Também neste caso, o raio de curvatura da frente de onda emergente medida no ponto  $\xi_0$  é denotado por  $R_N$ .

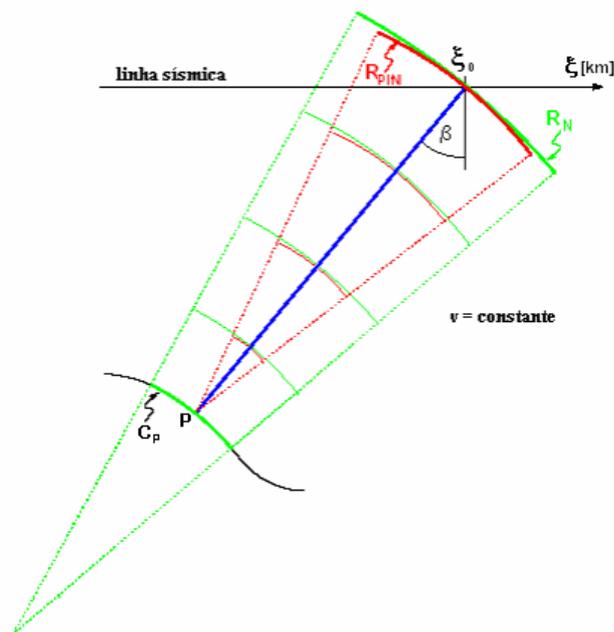


Figura 2.4: Frentes de ondas hipotéticas para um meio homogêneo: os instantâneos das frentes de ondas PIN formadas por uma fonte pontual em P são mostradas em vermelho, instantâneos das frentes de onda da onda N formadas por um segmento do refletor explosivo em torno do ponto P são mostradas em verde.

Através da figura 2.4 nota-se que a propagação das frentes de ondas PIN e N está relacionada com a trajetória do raio de incidência normal (cor azul) em P, logo o ângulo de emergência comum ( $\beta$ ) das duas ondas PIN e N coincide com o ângulo de emergência do raio com afastamento nulo em  $\xi_0$ .

### 2.3 APROXIMAÇÃO HIPERBÓLICA DOS TEMPOS DE TRÂNSITO

Nesta seção será mostrado a relação dos coeficientes da aproximação hiperbólica dos tempos de trânsito com os atributos cinemáticos das frentes de ondas da onda PIN e da onda N.

A aproximação de segunda ordem do tempo de reflexão  $t$  com relação as coordenadas do ponto médio e do meio afastamento na vizinhança de  $\xi_m = \xi_0$  e  $\mathbf{h} = 0$  (SCHLEICHER; TYGEL; HUBRAL, 1993) é:

$$t(\xi_0 + \Delta\xi, \mathbf{h}) = t_0 + \frac{\partial t}{\partial \xi} \Delta\xi + \frac{1}{2} \Delta\xi^T \frac{\partial^2 t}{\partial \xi^2} \Delta\xi + \frac{1}{2} \mathbf{h}^T \frac{\partial^2 t}{\partial \mathbf{h}^2} \mathbf{h} \quad (2.1)$$

onde,  $\Delta\xi = \xi_m - \xi_0$  e a medida do tempo de trânsito afastamento nulo medido em  $\xi_0$  é denotado por  $t_0$ . As derivadas parciais em relação aos vetores ponto médio e meio afastamento representam as derivadas parciais em relação aos correspondentes componentes do vetor, tomados em  $\xi_m = \xi_0$  e  $\mathbf{h}=0$ . Portanto,  $\frac{\partial t}{\partial \xi}$  é um vetor com duas componentes,  $\frac{\partial^2 t}{\partial \xi^2} = 2\mathbf{M}_N$  e  $\frac{\partial^2 t}{\partial \mathbf{h}^2} = 2\mathbf{M}_{PIN}$  são matrizes simétricas 2x2.

Elevando ao quadrado a equação (2.1) e desconsiderando os termos de alta ordem, uma aproximação de segunda ordem de  $t^2$  será:

$$t^2(\xi_0 + \Delta\xi, \mathbf{h}) = \left( t_0 + \frac{\partial t}{\partial \xi} \Delta\xi \right)^2 + t_0 \left( \Delta\xi^T \frac{\partial^2 t}{\partial \xi^2} \Delta\xi + \mathbf{h}^T \frac{\partial^2 t}{\partial \mathbf{h}^2} \mathbf{h} \right) \quad (2.2)$$

Como mostrado em Duveneck (2004a), os coeficientes  $\frac{\partial t}{\partial \xi}$  e  $\frac{\partial^2 t}{\partial \xi^2}$  da equação (2.1) podem ser escritos em função das propriedades cinemáticas da onda normal emergente em  $\xi_0$ , como:

$$\frac{\partial t}{\partial \xi} = 2\mathbf{p}^{(\xi)} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial \xi^2} = 2\mathbf{M}_N^{(\xi)} \quad (2.4)$$

e de forma semelhante o coeficiente  $\frac{\partial^2 t}{\partial \mathbf{h}^2}$  pode ser expresso em função das propriedades cinemáticas da onda do ponto de incidência normal, como:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial \mathbf{h}^2} = 2\mathbf{M}_{PIN}^{(\xi)} \quad (2.5)$$

Substituindo 2.3, 2.4 e 2.5 em 2.2 temos:

$$t^2(\xi_0 + \Delta\xi, \mathbf{h}) = (t_0 + 2\mathbf{p}^{(\xi)}\Delta\xi)^2 + 2t_0(\Delta\xi^T \mathbf{M}_N^{(\xi)}\Delta\xi + \mathbf{h}^T \mathbf{M}_{PIN}^{(\xi)}\mathbf{h}) \quad (2.6)$$

No caso de aquisição de dados sísmicos em uma linha reta (aquisição 2D) os vetores  $\xi_m$ ,  $\xi_0$  e  $\mathbf{h}$  podem ser escritos no sistema de coordenadas cartesianas como:

$$\xi_m = \begin{pmatrix} \xi_m \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \xi_0 = \begin{pmatrix} \xi_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{h} = \begin{pmatrix} h \\ 0 \end{pmatrix}$$

e as expressões  $\Delta\xi^T \mathbf{M}_N^{(\xi)}\Delta\xi$  e  $\mathbf{h}^T \mathbf{M}_{PIN}^{(\xi)}\mathbf{h}$  se reduzem para  $M_N^{(\xi)}\Delta\xi^2$  e  $M_{PIN}^{(\xi)}h^2$  (DUVENECK, 2004a). Com esta redução a equação (2.6) na aquisição 2D fica:

$$t^2(\xi_0 + \Delta\xi, h) = (t_0 + 2p^{(\xi)}\Delta\xi)^2 + 2t_0(M_N^{(\xi)}\Delta\xi^2 + M_{PIN}^{(\xi)}h^2) \quad (2.7)$$

Considerando que a velocidade  $v_0$  em  $\xi_0$  é conhecida e constante e que as estruturas da subsuperfície são invariantes na direção perpendicular a linha sísmica, os parâmetros no domínio do tempo  $p^{(\xi)}$ ,  $M_N^{(\xi)}$ ,  $M_{PIN}^{(\xi)}$  podem ser reescritos através das frente de ondas emergentes N e PIN no plano vertical a linha sísmica.

$$p^{(\xi)} = \frac{\text{sen}(\beta)}{v_0},$$

$$M_N^{(\xi)} = \frac{\cos^2(\beta)}{v_0} K_N, \quad (2.8)$$

$$M_{PIN}^{(\xi)} = \frac{\cos^2(\beta)}{v_0} K_{PIN}.$$

Onde  $\beta$  é o ângulo de emergência do raio normal em  $\xi_0$  (com relação a reta normal à superfície).  $K_N$  é a curvatura da frente de onda da onda normal emergente em  $\xi_0$  e  $K_{PIN}$  é a curvatura da frente de onda emergente PIN em  $\xi_0$ . Substituindo (2.8) em (2.7) temos na aquisição 2D:

$$t^2(\xi_m, h) = \left( t_0 + 2 \frac{\sin(\beta)}{v_0} \Delta \xi \right)^2 + 2t_0 \frac{\cos^2(\beta)}{v_0} \left( K_N \Delta \xi^2 + K_{PIN} h^2 \right) \quad (2.9)$$

A equação (2.9) é idêntica a equação publicada por Mann et al. (1999) e Jager et al. (2001) se chamarmos  $K_N = R_N^{-1}$  e  $K_{PIN} = R_{PIN}^{-1}$ , onde  $R_N$  e  $R_{PIN}$  são os raios de curvatura da frente de onda relacionados com a onda normal e com a onda PIN, respectivamente (DUVENECK, 2002). As variáveis  $R_N$  e  $R_{PIN}$  e  $\beta$  são chamadas de atributos cinemáticos de campo de onda ou também são definidos como parâmetros SRC.

## 2.4 ASPECTOS TEÓRICOS DO MÉTODO DE EMPILHAMENTO SRC

O método SRC usa informações de um grande conjunto de traços sísmicos, dos dados de cobertura múltipla (pares de fontes e receptores arbitrariamente dispostos em torno de um ponto central), para obter uma simulação da seção afastamento nulo AN (ZO – *zero offset*). Este fato já representa uma melhora do clássico método PMC (ponto médio comum) que utiliza famílias de pares fonte-receptor simetricamente dispostos em torno do ponto central (figura 2.2). O aumento da razão sinal-ruído (S/N) no método SRC é devido a uma soma, ao longo da superfície, usando muito mais traços para simular cada amostra de tempo AN (ZO).

O método de empilhamento SRC baseia-se em uma aproximação hiperbólica de segunda ordem dos tempos de trânsito e pode ser entendido como uma generalização da técnica de empilhamento do ponto médio comum (PMC). A aproximação do tempo de trânsito SRC define uma superfície (ou curvas) de empilhamento SRC, também chamada de operador de empilhamento SRC ou apenas superfície SRC, que se ajusta aos tempos de trânsitos exatos dos eventos sísmicos contidos nos dados de cobertura múltipla. A aproximação hiperbólica do tempo de trânsito pode ser expressa no caso 2D em função de três parâmetros cinemáticos de frentes de ondas relacionados a duas ondas hipotéticas (PIN e N – veja figura 2.4) associadas a um raio de incidência normal, são eles: o ângulo de emergência do raio central com fonte e receptor coincidente ( $\beta$ ), o raio de curvatura da onda do ponto de incidência normal – PIN ( $R_{PIN}$ ) e o raio de curvatura da onda normal – N ( $R_N$ ). Os parâmetros cinemáticos das ondas hipotéticas PIN e N são denominados de parâmetros de empilhamento SRC ou apenas parâmetros SRC. A aproximação hiperbólica de tempos de trânsito, expressa em função destes parâmetros, é formulada por Tygel et al. (1997):

$$t^2(\xi_m, h) = \left[ t_0 + 2 \frac{\text{sen} \beta}{v_0} (\xi_m - \xi_0) \right]^2 + 2t_0 \frac{\cos^2 \beta}{v_0} \left[ \frac{(\xi_m - \xi_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{PIN}} \right] \quad (2.10)$$

Observamos que a equação (2.10) necessita a priori da velocidade próxima à superfície  $v_0$  e não de um modelo de velocidade como acontece nos métodos sísmicos convencionais. Na equação (2.10)  $t_0$  é o tempo duplo do raio central de afastamento nulo,  $\xi_m$  é o ponto médio entre a fonte e o receptor ( $\xi_m = \frac{(\xi_R + \xi_F)}{2}$ ) e  $h$  é o meio afastamento entre a fonte e o receptor ( $h = \frac{(\xi_R - \xi_F)}{2}$ ), sendo  $\xi_F$  e  $\xi_R$  as coordenadas horizontais do par fonte e receptor respectivamente veja figura 2.3.

O método SRC utiliza uma equação multiparamétrica que representa uma extensão natural do tempo de trânsito NMO, chamada de tempo hiperbólico geral. O tempo de trânsito hiperbólico geral é válido para configurações arbitrárias de pares fonte-receptor numa vizinhança de um dado ponto  $\xi_0$ , denominado ponto central, geralmente este ponto central é o ponto médio comum. Devido ao tempo de trânsito do método SRC utilizar configurações arbitrárias relativamente ao ponto central, ele tem capacidade de empilhar uma quantidade significativamente maior de traços para simular cada traço AN, o que resulta em uma seção com maior razão sinal-ruído e com melhor resolução quanto a definição e a continuidade dos eventos de reflexões sísmicas.

Para se obter os parâmetros SRC pelo processo de busca automática no processamento SRC, são necessárias algumas particularizações da equação de aproximação do tempo de trânsito SRC (equação 2.10), pois estas particularizações são utilizadas para desenvolver estratégias para a determinação dos parâmetros.

Uma das particularizações é quando consideramos uma interseção da superfície SRC com o plano da seção afastamento nulo (AN), isto é,  $h = 0$ . Substituindo  $h = 0$  na equação (2.10) temos:

$$t^2(\xi_m, 0) = \left[ t_0 + 2 \frac{\text{sen} \beta}{v_0} (\xi_m - \xi_0) \right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta (\xi_m - \xi_0)^2}{v_0 R_N} \quad (2.11)$$

A equação (2.11) é uma aproximação hiperbólica do tempo de trânsito do afastamento nulo (AN), porém com um deslocamento do ápice da hipérbole com relação ao  $\xi_0$ . Com esta particularização, o tempo de trânsito passa a ter somente dois parâmetros SRC que são:  $\beta$  e  $R_N$ .

Uma segunda particularização para a aproximação hiperbólica de tempo de trânsito é quando a curvatura do segmento refletor converge para um ponto difrator tornando o raio de curvatura da onda hipotética N igual a curvatura da onda hipotética PIN, isto é,  $R_N = R_{PIN}$ , contudo, não teremos mais a informação da curvatura do segmento refletor significando que os parâmetros SRC não estão vinculados de forma unívoca a um ponto de reflexão em subsuperfície. Fazendo  $R_N = R_{PIN}$  (condição de difração) na equação (2.10) temos:

$$t^2(\xi_m, h) \Big|_{R_N = R_{PIN}} = \left[ t_0 + 2 \frac{\text{sen } \beta}{v_0} (\xi_m - \xi_0) \right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta}{v_0} \left[ \frac{(\xi_m - \xi_0)^2 + h^2}{R_{PIN}} \right] \quad (2.12)$$

Observamos que a equação (2.12) depende apenas dos dois parâmetros SRC  $\beta$  e  $R_{PIN}$  e é conhecida como aproximação de tempo de trânsito de superfície de difração comum (SDC) (GARABITO CALLAPINO, 2001).

#### 2.4.1 Algoritmo 2D-SRC global-Local

No presente trabalho, para o processamento SRC dos dados foi utilizada a estratégia de busca SRC global-local que foi proposta por Garabito Callapino (2001) e consiste de três etapas automáticas para estimar os três parâmetros de empilhamento SRC ( $\beta$ ,  $R_{PIN}$ ,  $R_N$ ).

Duas buscas destes parâmetros são realizadas por meio de otimização global sobre dados sísmicos de cobertura múltipla e uma usa a seção de afastamento nulo (AN) resultante da primeira busca automática.

Finalmente, usando os três parâmetros determinados pela otimização global, calcula-se os três parâmetros ótimos através do processo da otimização local.

As três etapas da estratégia de busca SRC global-local são:

##### 2.4.1.1 Otimização global pré-empilhamento

Nesta primeira fase, os dados de cobertura múltipla são usados para determinar os parâmetros SRC  $\beta$  e  $R_{PIN}$  através de uma busca global bidimensional que se utiliza do algoritmo *Simulated Annealing* (KIRKPATRICK; GELATT; VECCHI, 1983).

O resultado desta fase são pares de parâmetros SRC correspondentes a um extremo global e a um extremo local onde este último está relacionado com os eventos de mergulho conflitantes da seção afastamento nulo (AN).

O *semblance* é o critério de corte utilizado para a gravação ou não do par de parâmetros SRC ao longo da superfície, definida pela equação (2.12). Através do *semblance* os extremos locais menos significativos são eliminados.

Os principais resultados desta primeira fase são:

- 1- uma seção de coerência correspondente ao extremo global e outra correspondente ao extremo local.
- 2- uma seção do parâmetro SRC  $\beta$  correspondente ao extremo global e outra correspondente ao extremo local.
- 3- uma seção do parâmetro SRC  $R_{PIN}$  correspondente ao extremo global e outra correspondente ao extremo local.
- 4- uma seção afastamento nulo (AN) simulada.

#### 2.4.1.2 Otimização global pós-empilhamento

Nesta segunda fase determina-se o terceiro parâmetro SRC  $R_N$  para cada ponto de amostragem  $P_0$  da seção afastamento nulo (AN) a ser simulada. A busca global agora é unidimensional e é realizada novamente pelo algoritmo *Simulated Annealing* sobre a seção AN simulada na primeira fase ao longo de curvas hiperbólicas definidas pela equação (2.11) que depende somente dos parâmetros SRC  $\beta$  e  $R_N$ .

Nesta fase intermediária é determinada uma seção  $R_N$  para os extremos globais e outra seção  $R_N$  para os extremos locais, e ainda uma seção intermediária de coerência correspondente ao extremo global e outra correspondente ao extremo local.

#### 2.4.1.3 Otimização local pré-empilhamento

Nesta terceira e última etapa utiliza-se o algoritmo de otimização local *Quase-Newton* para determinar os valores ótimos dos três parâmetros SRC e assim teremos a melhor superfície de empilhamento SRC.

A busca local tridimensional é feita nos dados de cobertura múltipla utilizando como valores iniciais o par de parâmetros SRC ( $\beta^{0i}$ ,  $R_{PIN}^{0i}$ ,  $R_N^{0i}$ ) correspondente aos extremos globais e extremos locais determinados nas etapas anteriores.

A medida de coerência (*Semblance*) é realizada ao longo da superfície de empilhamento definida pela equação (2.10) resultando nos três parâmetros SRC ótimos que produzirão a seção afastamento nulo (AN) simulada.

Os resultados otimizados finais são:

- 1- Uma seção de coerência correspondente ao extremo global e outra correspondente ao extremo local.
- 2- Uma seção dos parâmetros SRC  $\beta$  otimizada correspondente ao extremo global e outra correspondente ao extremo local.
- 3- Uma seção dos parâmetros SRC  $R_{PIN}$  otimizada correspondente ao extremo global e outra correspondente ao extremo local.
- 4- Uma seção dos parâmetros SRC  $R_N$  otimizada correspondente ao extremo global e outra correspondente ao extremo local.
- 5- Uma seção afastamento nulo (AN) simulada.

A figura 2.5 mostra o fluxograma simplificado das três etapas básicas de processamento do empilhamento SRC através da estratégia de busca global-local.

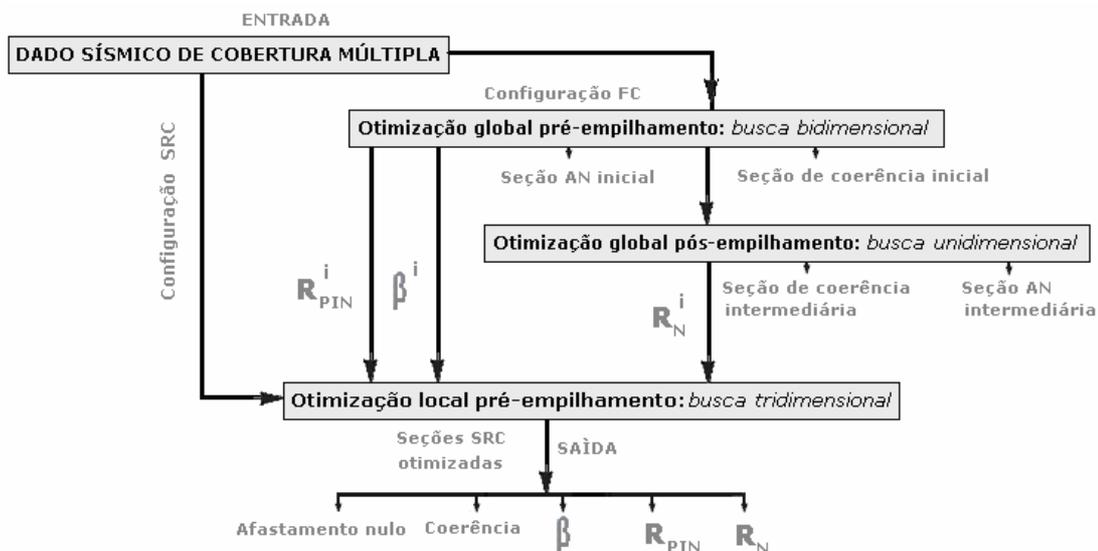


Figura 2.5: Fluxograma simplificado da estratégia de busca SRC global-local

Fonte: Gomes (2005).

## 2.5 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES

Nesta seção são apresentados os resultados da aplicação do método de empilhamento SRC nos dados sintéticos do modelo Marmousi e em dados reais da linha RL-50-90 da Bacia do Tacutu. A implementação do método SRC utilizada neste trabalho foi desenvolvido por Garabito Callapino (2001).

### 2.5.1 Modelo e Dados sintéticos Marmousi

Com base nas informações do perfil geológico da Bacia de Cuanza localizado em Quenguela Norte (Angola-Africa), em 1988 um modelo sintético de velocidades e densidades para um modelo estrutural complexo 2D foi criado pelo Instituto Francês de Petróleo (IFP). Este modelo denominado Marmousi serve de referência para testes com técnicas diferentes de inversão e imageamento de reflexão sísmica. O modelo Marmousi foi criado com 160 camadas, com 9200m na horizontal, com 3000m na vertical e com um forte contraste de velocidade lateral (Figura 2.6).

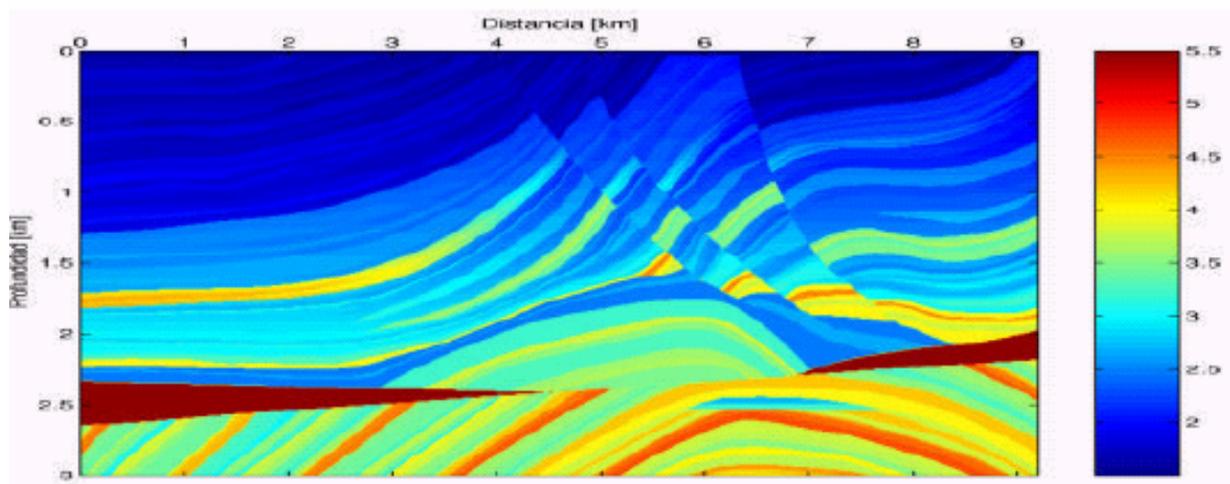


Figura 2.6: Modelo de velocidades Marmousi;

O conjunto de dados sísmicos Marmousi gerados por meio da técnica de diferenças finitas consiste de 240 seções de fonte comum, com o primeiro e último tiros nas estações 3000m e 8975m, respectivamente. O intervalo entre tiros consecutivos é de 25m. Cada configuração de

tiro comum tem 96 canais, com afastamento mínimo de 200m e intervalo entre canais consecutivos de 25m. O tempo total de registro dos sismogramas é de 3s, com um intervalo de amostragem dos traços sísmicos é de 0.004s. Maiores informações sobre o modelo e dos dados Marmousi encontram-se no apêndice B.

### 2.5.1.1 Processamento dos dados Marmousi

O método de empilhamento sísmico por Superfície de Reflexão Comum (SRC) produz uma seção simulada de afastamento nulo (AN), com alta razão sinal-ruído a partir de dados de cobertura múltipla. Do processamento dos dados marmousi com o método SRC resulta a seção empilhada AN mostrada na Figura 2.7. Como resultados adicionais deste processamento tem-se uma seção de coerência (Figura 2.8) e três seções de atributos cinemáticos de frentes de onda, a saber: o ângulo de emergência  $\beta^l$ , o raio de curvatura da frente de onda PIN e o raio de curvatura da frente de onda normal N (Figura 2.9) (GOMES, 2005).

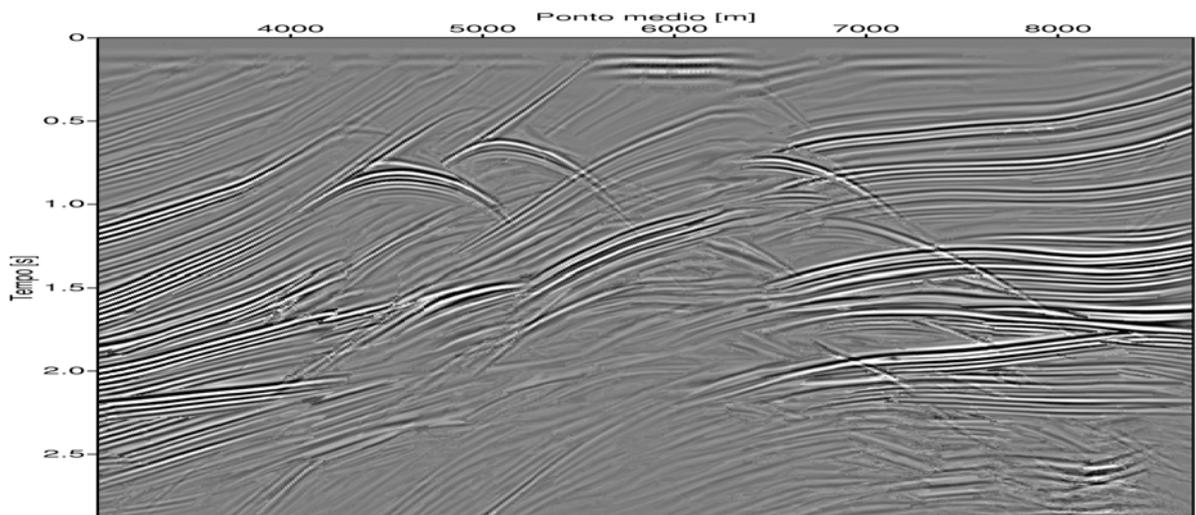


Figura 2.7: Seção empilhada com afastamento nulo resultante do empilhamento SRC global-local.

1- A unidade dos valores dos ângulos de emergência é grau e a unidade dos valores de raios de curvaturas das frentes de onda PIN e N é metro.

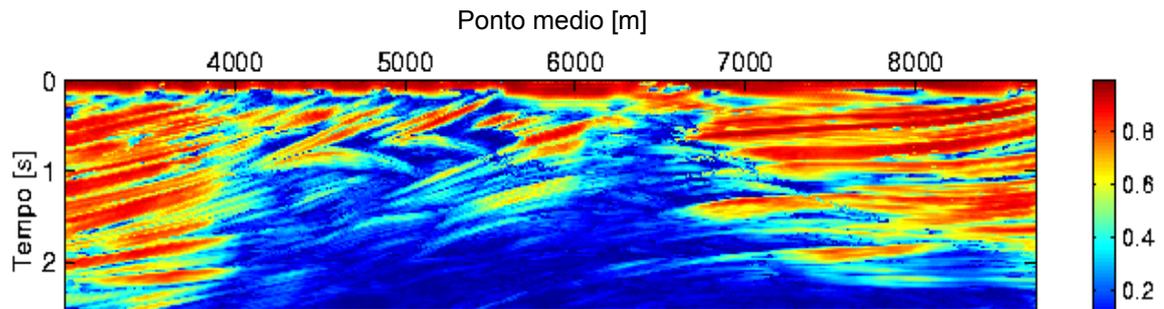


Figura 2.8: Seção de coerência (*semblance*).

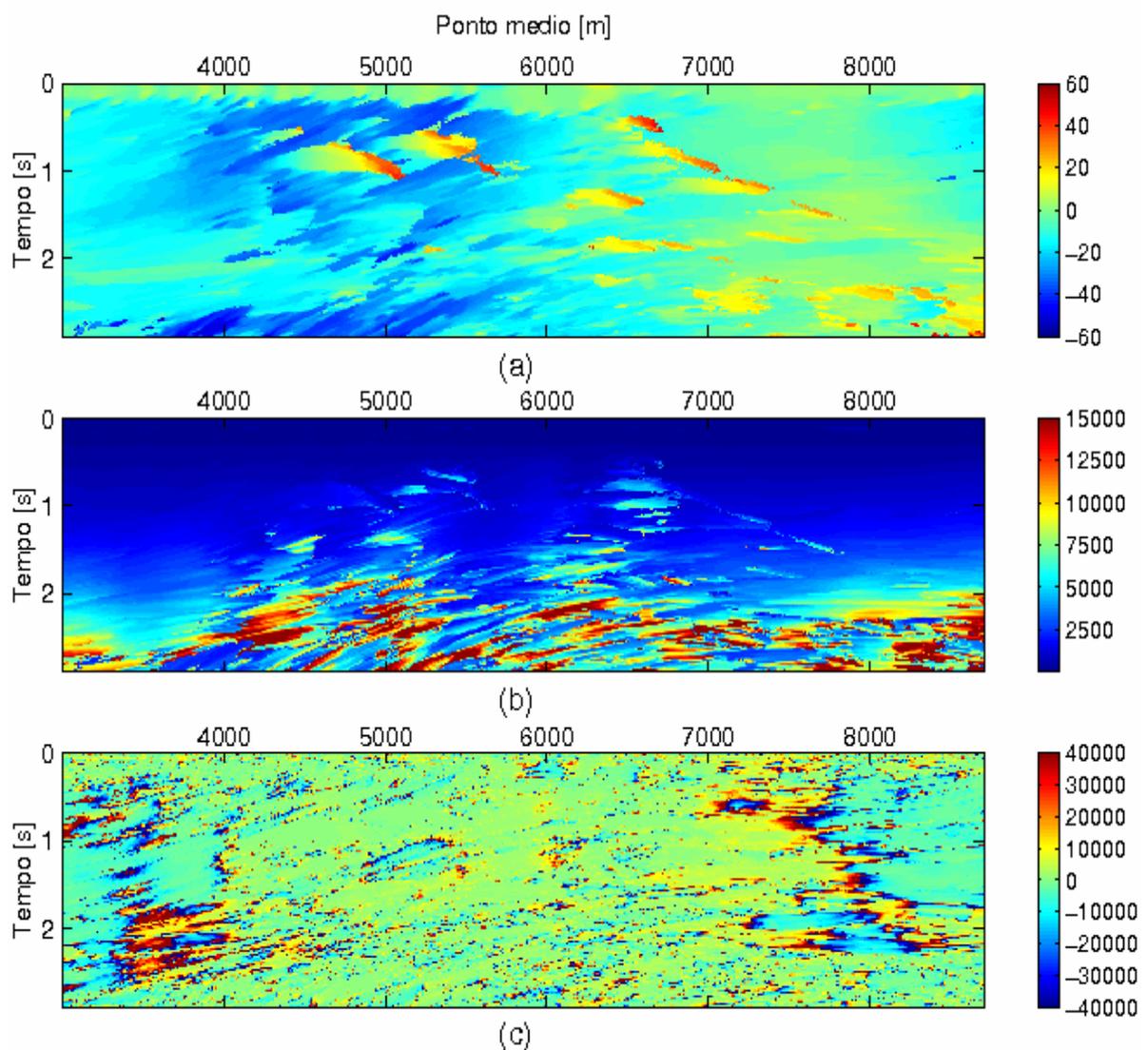


Figura 2.9: Seções de atributos de frentes de ondas: a) ângulo de emergência, a) raio de curvatura da onda PIN e c) raio de curvatura da onda N.

### 2.5.2 Dados Reais – Bacia do Tacutu

A bacia sedimentar mesozóica do Tacutu está localizada na fronteira do Brasil com a Guiana, mais precisamente entre o estado de Roraima no Brasil e o Distrito de Rupununi na República Cooperativa da Guiana. O *gráben* do Tacutu com as distribuições de linhas sísmicas é mostrado na Figura 2.10. Os dados sísmicos das linhas mostradas na Figura 2.10 foram adquiridas em campanhas de exploração da PETROBRAS, realizadas entre os anos de 1980 a 1987.

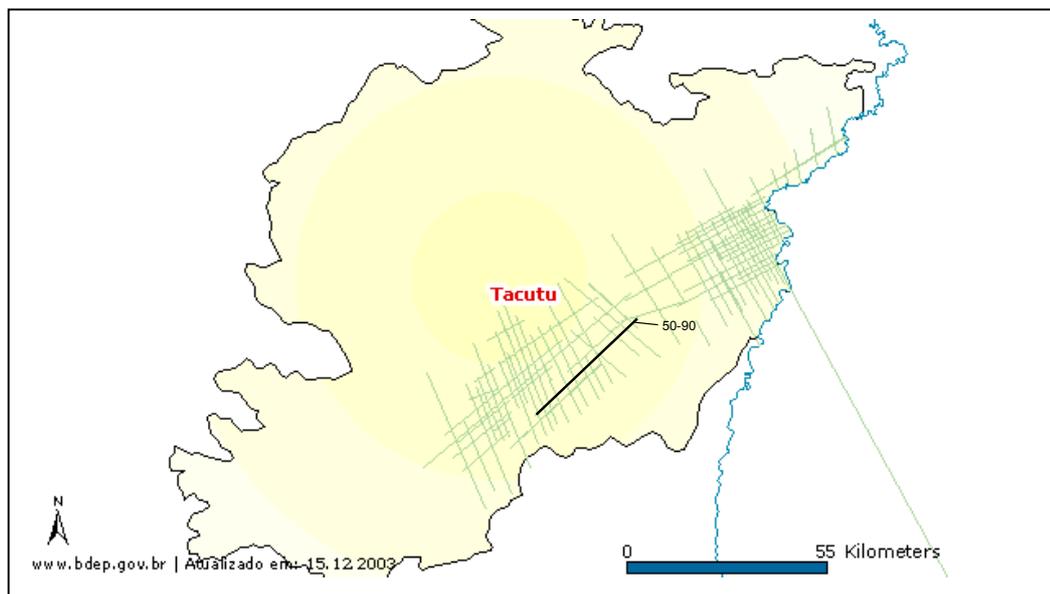


Figura 2.10: Mapa que mostra os limites da Bacia do Tacutu e as linhas sísmicas 2D adquiridas (dados da ANP cedidos para fins acadêmico).

Os dados sísmicos da Bacia do Tacutu foram processados na década de 80 com o método de empilhamento ponto médio comum (PMC) e migração pós-empilhamento no tempo, que forneceu informações sobre o *gráben* e a evolução da Bacia do Tacutu. Porém, acredita-se que para se fazer uma interpretação mais detalhada, é necessário usar métodos mais sofisticados que forneçam imagens sísmicas com melhor resolução. Maiores informações sobre o modelo e os dados da Bacia do Tacutu estão no apêndice C. No presente trabalho, a linha 50-RL-90 (na Figura 2.10, linha preta) foi processada utilizando o método SRC.

A linha sísmica 50-RL-90 está composta por 179 seções fonte comum adquiridas com um arranjo simétrico de receptores em relação à fonte (*split-spread*) e com um intervalo de 200m entre fontes consecutivas. O número de receptores por tiro ou fonte são 96, tendo um intervalo de

50m entre receptores consecutivos. Os afastamentos mínimo e máximo são 150m e 2500m, respectivamente. O tempo de registro é de 4s e o intervalo de amostragem é de 4ms.

#### 2.5.2.1 Processamento da linha 50-RL-90

Antes de aplicar o método de empilhamento SRC nos dados sísmicos, foi realizado o pré-processamento da linha 50-RL-90 aplicando-se os seguintes processos: edição, construção da geometria, correção da amplitude devido à divergência esférica, deconvolução e aplicação do filtro F-K para remoção do *groundroll*. Não foi aplicada a correção estática por não se dispor das informações necessárias, mas não foram percebidos os efeitos nos dados processados pela falta de aplicação desta correção, uma vez que o terreno onde a linha sísmica esta localizada é plano.

Da aplicação do método SRC foi obtida a seção empilhada de afastamento nulo (Figura 2.11) a seção de coerência (Figura 2.12) e as três seções de atributos<sup>2</sup> cinemáticos de frentes de ondas das ondas PIN e N (Figura 2.13).

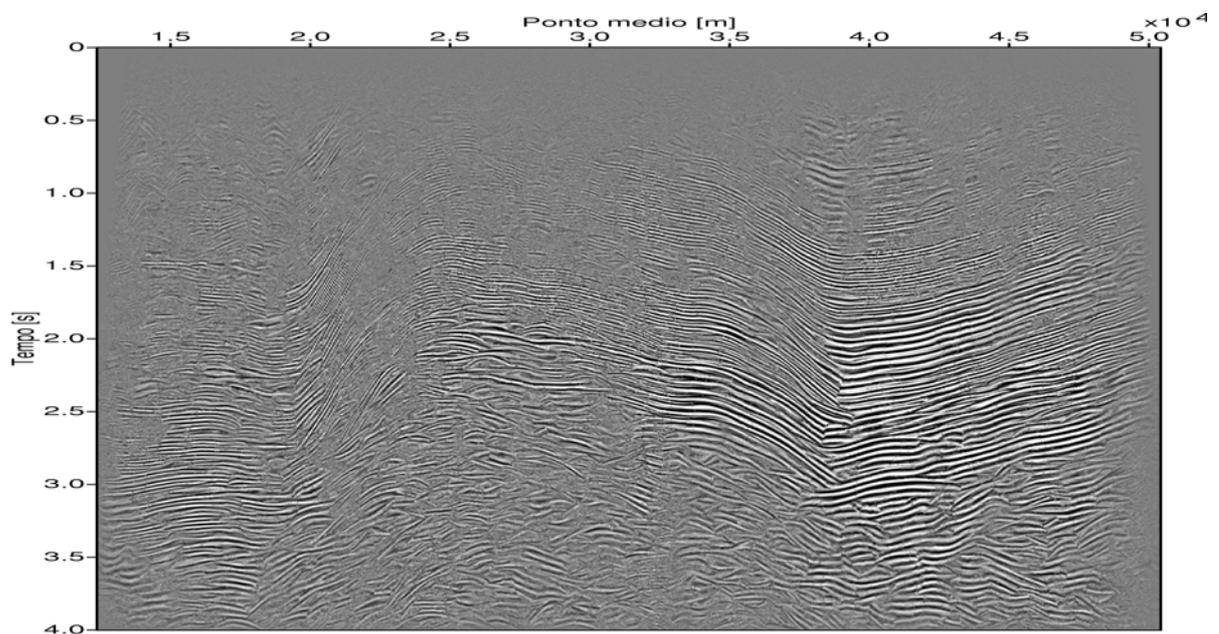


Figura 2.11: Seção empilhada com afastamento nulo resultante do método de empilhamento SRC global-local.

2- De forma similar ao dado Marmousi, a unidade dos valores dos ângulos de emergência é grau e a unidade dos valores de raios de curvaturas das frentes de onda PIN e N é metro.

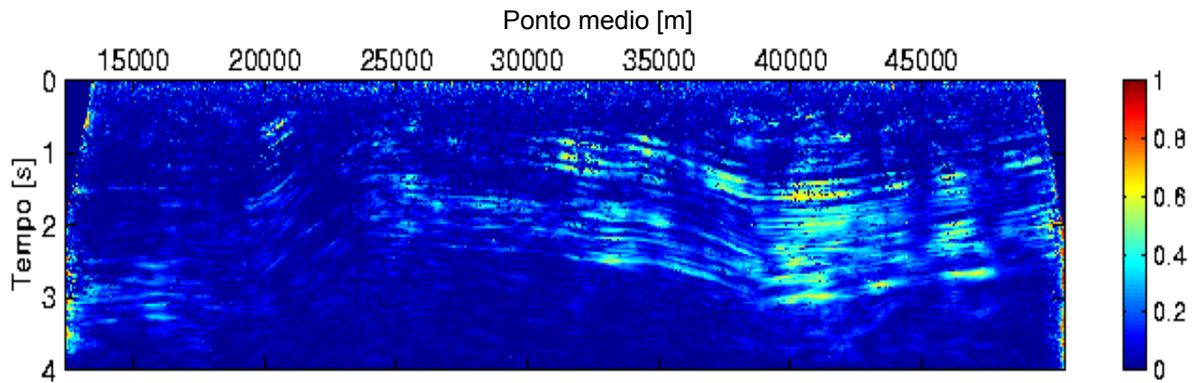


Figura 2.12: Seção de coerência (*semblance*).

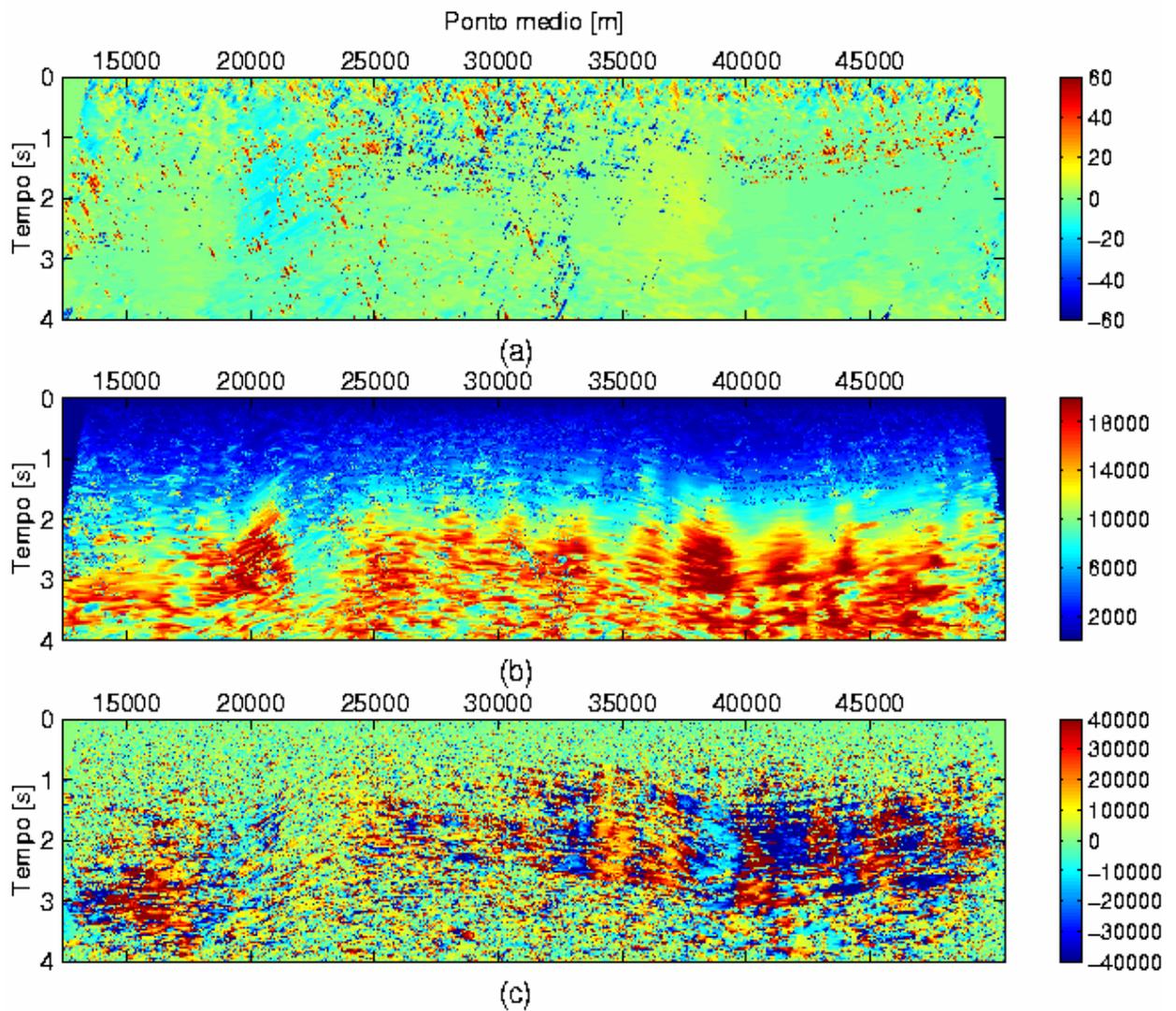


Figura 2.13: Seções de atributos de frentes de ondas: a) ângulo de emergência, a) raio de curvatura da onda PIN e c) raio de curvatura da onda N.

### 3 INVERSÃO TOMOGRÁFICA

A tomografia de reflexão sísmica usa dados sísmicos digitais para a construção de imagens do interior da Terra. Basicamente este processo inicia-se com a localização e caracterização de um conjunto de pontos de reflexão significativos. O tempo que as ondas sísmicas levam até chegarem a determinadas estações sismográficas pode então ser utilizado para determinar a velocidade destas ondas através das camadas em subsuperfície. Ao combinar análises de muitos pontos, localizados em vários refletores espalhados pela subsuperfície, pode construir-se um mapa de velocidades das ondas sísmicas no subsolo. A maior dificuldade na tomografia está no fato de envolver inversão de matrizes de dimensões muito grandes. Porém, novas técnicas estão surgindo para evitar a inversão dessas matrizes.

#### 3.1 INVERSÃO TOMOGRÁFICA DOS ATRIBUTOS SRC-2D

O empilhamento SRC descrito no capítulo anterior é considerado como uma ferramenta para se obter informações do tempo de trânsito de reflexões primárias dos dados sísmicos e também de atributos cinemáticos do campo de onda. Considerando os tempos de trânsito dos eventos de reflexão, juntamente com as informações contidas nos atributos cinemáticos do campo de onda, é possível determinar um modelo de velocidade lateralmente heterogêneo para imageamento em profundidade. É importante lembrar que os tempos de trânsito dos eventos de reflexão devem ser bem descritos pela aproximação de segunda ordem 2D (equação 2.6).

Outro fator importante para a tomografia de reflexão é o valor da razão sinal/ruído (S/R), pois um valor baixo dificulta a identificação confiável dos eventos de reflexão para que a marcação dos pontos de reflexão (*picking*) seja feita.

Os dados sísmicos gravados na superfície da Terra não possuem informações suficientes para descrever a verdadeira distribuição de velocidade na subsuperfície e além disso, existem informações redundantes e espaços nulos que impedem a obtenção de uma solução única e estável para o problema inverso. Portanto, vínculos podem ser introduzidos para um modelo de

velocidade suave ou um modelo de velocidade por camada ou por blocos onde a velocidade pode ser descontínua nos blocos ou camadas. Um fator importante para a melhor escolha do tipo de modelo de velocidade a ser levado em conta é a geometria do modelo geológico a ser estudado.

Os atributos cinemáticos do campo de onda associados com uma onda hipotética emergente PIN são usados para formular um método de inversão tomográfica de um modelo de velocidade. Para cada onda PIN os atributos cinemáticos do campo de onda serão considerados e as informações cinemáticas para a determinação de um modelo de velocidade serão extraídas dos resultados do empilhamento SRC-2D baseado na equação (2.6).

### 3.1.1 Componentes do modelo

O tempo de trânsito de segunda ordem da frente de onda emergente PIN é descrito pelos parâmetros: tempo de trânsito do raio normal  $\tau = t_0 / 2$ , a primeira e a segunda derivada espacial do tempo de trânsito  $p^{(\xi)}$  e  $M_{PIN}^{(\xi)}$  na respectiva posição  $\xi_0$  do raio normal emergente.

Os dados necessários para a inversão tomográfica 2D são

$$(\tau_0, M_{PIN}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi_0)_i \quad i = 1, \dots, n_{\text{pontos}} \quad (3.1)$$

Onde  $n_{\text{pontos}}$  é a quantidade total de pontos escolhidos pelo processo de *picking* feito no resultado do empilhamento SRC-2D.

As grandezas  $M_{PIN}^{(\xi)}$  e  $p^{(\xi)}$  são calculadas através do ângulo de emergência e do raio de curvatura da onda PIN pela equação (2.8). Cada ponto dos dados está associado com um ponto de incidência normal PIN na subsuperfície definido pelas coordenadas  $(x, z)^{PIN}$ , com  $z^{PIN} < 0$ , e o mergulho do refletor  $\theta^{PIN}$  (Figura 3.1). O modelo de velocidade 2D é descrito através da função *B-splines* de grau  $m = 4$ .

$$V(x, y) = \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{k=1}^{n_z} v_{jk} \beta_j(x) \beta_k(z) \quad (3.2)$$

A função *B-spline* deve ser de grau  $m=4$ , pois necessitamos de sua terceira derivada a fim de fazermos a inversão tomográfica 2D (KLÜVER, 2003). Os coeficientes  $\beta_j(x)$  e  $\beta_k(z)$  são detalhados no apêndice D.

As quantidades  $n_x$  e  $n_z$  são respectivamente: o número de colunas e linhas do *grid* da inversão tomográfica.

Na equação (3.2) temos  $n_x n_z$  coeficientes  $v_{jk}$  que são os parâmetros do modelo de velocidade que devem ser determinados. Então na inversão tomográfica, o modelo é definido pelos seguintes parâmetros do modelo (DUVENECK, 2002):

$$\begin{aligned} (x, z, \theta)_i^{\text{PIN}} & \quad i = 1, \dots, n_{\text{pontos}} & (3.3) \\ v_{jk} & \quad j = 1, \dots, n_x ; k = 1, \dots, n_z \end{aligned}$$

Portanto, tem-se  $4n_{\text{pontos}}$  componentes dos dados e  $(3n_{\text{pontos}} + n_x n_z)$  componentes do modelo.

Caso se tenha vínculos adicionais no modelo de velocidade, para reduzir a ambigüidade do problema inverso, estes serão tratados junto com os componentes dos dados (3.1), ou seja, os vínculos adicionais serão tratados como dados extras.

$$V(x_i, z_i) \quad i = 1, \dots, n_{\text{vpontos}} \quad (3.4)$$

Desta maneira, teremos  $(4n_{\text{pontos}} + n_{\text{vpontos}})$  componentes dos dados e  $(3n_{\text{pontos}} + n_x n_z)$  componentes do modelo.

Outro tipo de vínculo adicional ao modelo é da hipótese de que a estrutura da velocidade deve seguir localmente a estrutura do refletor nos pontos PIN considerados (DUVENECK, 2004c), isto significa que as variações de velocidade devem ocorrer principalmente na direção perpendicular ao refletor e ao longo do refletor o gradiente de velocidade deve ser mínimo para cada PIN considerado. A minimização do gradiente de velocidade é razoável, pois mudanças de velocidade ocorrem principalmente em diferentes camadas geológicas e não ao longo delas. A direção na qual a maior variação de velocidade deve ocorrer coincide com a direção do raio normal no ponto de incidência normal (PIN). Utilizando coordenadas centradas no raio, o vínculo adicional ao modelo é implementado com a minimização da primeira derivada da velocidade local ao longo do refletor.

$$\left| \nabla_q V \right|_{(x,z)_i^{\text{PIN}}} = 0 \quad i = 1, \dots, n_{\text{pontos}} \quad (3.5)$$

Onde  $q$  correspondendo a direção normal ao raio (DUVENECK, 2004a), com isso, teremos mais  $n_{\text{pontos}}$  a mais nos componentes dos dados. Adicionando estes vínculos temos um total de  $(5n_{\text{pontos}} + n_{\text{vpontos}})$  componentes dos dados por  $(3n_{\text{pontos}} + n_x n_z)$  componentes do modelo.

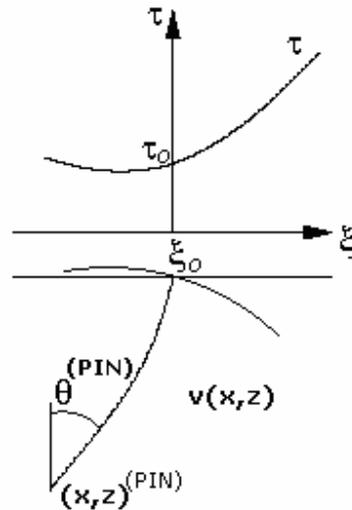


Figura 3.1: Definição do modelo e dos componentes dos dados para a inversão tomográfica 2D. Os componentes dos dados descrevem a curva do tempo de trânsito de segunda ordem associada com a frente de onda emergente PIN. Os correspondentes componentes do modelo PIN são as posições espaciais do PIN e o ângulo inicial do raio normal, enquanto os parâmetros do modelo de velocidade são os coeficientes *B-splines* na equação (3.2).

### 3.1.2 Modelagem

O cálculo dos atributos cinemáticos do campo de onda (3.1) pode ser feito pela modelagem direta, como resultado teremos:

$$(\tau_0, M_{\text{PIN}}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi_0)_i^{\text{mod}} \quad i = 1, \dots, n_{\text{pontos}} \quad (3.6)$$

o sobrescrito *mod* indica que estas variáveis foram calculadas pela modelagem direta.

O cálculo dos parâmetros por modelagem direta é feito através do traçamento cinemático e dinâmico de raio (DUVENECK, 2004b).

Usando o sistema de traçamento cinemático do raio 2D, podemos calcular a posição emergente  $\xi_0$  do raio e a componente horizontal  $p^{(\xi)}$  do vetor vagarosidade do raio normal em  $\xi_0$ .

$$\frac{\partial x_i}{\partial s} = \frac{\partial \tilde{H}}{\partial p_i^{(x)}} = V p_i^{(x)} \quad i = 1, 2 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial p_i^{(x)}}{\partial s} = \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x_i} = -\frac{1}{V^2} \frac{\partial V}{\partial x_i} \quad i = 1, 2$$

Na equação (3.7),  $\tilde{H}$  é chamada de função Hamiltoniana e  $s$  é o comprimento do arco ao longo da curva do raio  $\frac{\partial x_i}{\partial s}$  é o vetor unitário tangente a curva do raio e  $\frac{\partial p_i^{(x)}}{\partial s}$  permite avaliar o vetor vagarosidade  $\mathbf{p}$  ao longo de um raio contínuo em um meio de variações suave.

Usando a integral da equação

$$\frac{\partial \tau}{\partial s} = \sum_{i=1}^2 p_i^{(x)} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial p_i^{(x)}} = \frac{1}{V} \quad (3.8)$$

ao longo do raio, obtemos o tempo de trânsito ao longo do raio.

O cálculo de  $M_{PIN}^{(\xi)}$  pode ser feito em diferentes sistemas de coordenadas através do traçamento dinâmico de raio, por oferecer maior flexibilidade usaremos coordenadas centradas no raio. No caso 2D, a segunda derivada espacial do tempo de trânsito da onda PIN no raio central é:

$$M_{PIN} = P_2 / Q_2 \quad (3.9)$$

Onde  $P_2$  e  $Q_2$  são as soluções do sistema dinâmico de traçamento de raio correspondente a uma fonte pontual.

Em coordenadas cartesianas a equação (3.9) fica

$$M_{PIN}^{(\xi)} = (\cos^2 \beta) M_{PIN} = (\cos^2 \beta) P_2 / Q_2 \quad (3.10)$$

onde  $M_{PIN}^{(\xi)}$  é dado pela equação (2.8).

Para a solução numérica dos dois sistemas de traçamento de raio, dinâmico e cinemático, foi utilizado o método *Runge-Kutta* de quarta ordem.

### 3.2 PROBLEMA INVERSO

Ao fazer o *picking* nos resultados do empilhamento SRC, obtemos  $n_{pontos}$  componentes dos dados, equação (3.1). Então devemos encontrar um modelo definido pelos parâmetros (3.3) de tal forma que a diferença entre os componentes dos dados escolhidos (3.1) e seus respectivos componentes do modelo (3.6) seja minimizada. Para obtermos a minimização, trataremos o problema inverso como um problema de mínimos quadrados.

### 3.2.1 Solução do problema inverso

Organizando os componentes dos dados (3.1) e os parâmetros do modelo (3.3) em um vetor de dados  $\mathbf{d}$  e um vetor modelo  $\mathbf{m}$  respectivamente, o problema inverso é resolvido da seguinte maneira: procurar um ótimo valor de  $\mathbf{m}$  de tal forma que a diferença entre  $\mathbf{d}$  e seu correspondente valor modelado  $\mathbf{d}_{mod} = \mathbf{f}(\mathbf{m})$  seja minimizado (DUVENECK, 2004c). O operador não linear  $\mathbf{f}$  representa a modelagem direta pelo traçamento dinâmico do raio para se obter os valores (3.6) (DUVENECK; KLÜVER; MANN, 2003). Usando a norma 2 dos mínimos quadrados como uma medida de ajuste, o melhor modelo será encontrado pela minimização da função custo

$$S(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})\|_D^2 = \frac{1}{2} \|\Delta\mathbf{d}(\mathbf{m})\|_D^2 = \frac{1}{2} \Delta\mathbf{d}^T(\mathbf{m}) \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} \Delta\mathbf{d}(\mathbf{m}) \quad (3.11)$$

onde  $\Delta\mathbf{d}(\mathbf{m}) = \mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})$  e  $\underline{\mathbf{C}}_D$  uma matriz definida simétrica e positiva cujos elementos atuam como pesos aplicados a diferentes componentes dos dados para o cálculo de  $S$ .

A matriz  $\underline{\mathbf{C}}_D$  é algumas vezes chamada de matriz covariante dos dados (TARANTOLA, 1987). Seus elementos diagonais são os desvios padrões ao quadrado  $(\underline{\mathbf{C}}_D)_{ii} = \sigma_i^2$  relacionados com os diferentes componentes dos dados. Portanto, cada ponto dos dados é tratado de acordo com sua incerteza.  $\underline{\mathbf{C}}_D$  é diagonal, pois os erros dos dados não são correlacionados. Os pesos para diferentes componentes dos dados são devido ao fato de termos diferentes tipos de dados com diferentes dimensões físicas envolvidas. Estes pesos ou fatores de escala são necessários para estabilizar o processo de inversão transformando os diferentes valores numéricos dos dados para valores compatíveis. Cada ponto dos dados, equação (3.1), contém quatro diferentes tipos de dados, portanto a escolha dos valores dos seus respectivos fatores de escala  $\sigma_\tau$ ,  $\sigma_M$ ,  $\sigma_p$ ,  $\sigma_\xi$  é muito importante. Segundo Duvneck (2004a) se o tempo de trânsito  $\tau_0$  tem ordem de grandeza de  $10^{-3}$  s, a segunda derivada do tempo de trânsito  $M_{PIN}^{(\xi)}$  tem ordem de grandeza de  $10^{-9}$  s/m<sup>2</sup>, a primeira derivada do tempo de trânsito  $p^{(\xi)}$  tem ordem de grandeza de  $10^{-6}$  s/m e a posição  $\xi_0$  for medida em metros, os fatores de escala terão valores adequados respectivamente de  $\sigma_\tau=1$ ,  $\sigma_M=1$ ,  $\sigma_p=2$ ,  $\sigma_\xi=1$ .

Os fatores  $\sigma_v$  e  $\sigma_{vq}$  são os pesos dos vínculos adicionados ao modelo de velocidade (equação 3.4 e 3.5). Estes pesos determinam o quanto estes vínculos contribuem para a solução

do problema inverso. A escolha do valor dos pesos  $\sigma_v$  e  $\sigma_{vq}$  deve estar de acordo com a confiança na informação a priori que se tem do modelo. Experiências práticas sugerem que se a velocidade for medida em  $m/s$  o valor de  $\sigma_v$  deve ser 1, (DUVENECK, 2004a).

Devido ao operador  $f$  da modelagem direta não ser linear o problema inverso resolvido pela minimização da função custo (3.11) é também não linear. A princípio, a solução do problema inverso exige a aplicação de métodos de otimização global não linear (e.g., SEN; STOFFA, 1995). Porém, tais métodos são muitos demorados computacionalmente, portanto usaremos uma aproximação local iterativa.

Na vizinhança de um vetor modelo  $\mathbf{m}_n$  relacionado com a  $n$ -ésima iteração, o operador de modelagem pode ser aproximado localmente por (DUVENECK, 2004b)

$$\mathbf{f}(\mathbf{m}_n + \Delta\mathbf{m}) \approx \mathbf{f}(\mathbf{m}_n) + \underline{\mathbf{F}}\Delta\mathbf{m} \quad (3.12)$$

onde  $\underline{\mathbf{F}}$  é a matriz que contém as derivadas de Fréchet  $F_{ij} = \partial f_i / \partial m_j$ , derivadas de  $f$  em função de  $\mathbf{m}_n$ .

A aproximação linear (3.12) do operador de modelagem permite que encontremos um mínimo de  $S$  iterativamente pelo cálculo dos mínimos quadrados para o problema linearizado localmente durante cada passo da iteração. Iniciando com um modelo inicial  $\mathbf{m}_0$ , uma seqüência de atualizações do modelo  $\Delta\mathbf{m}$  é encontrada e de acordo com as condições favoráveis nos conduz para um mínimo global de  $S$ .

### 3.2.2 Solução dos mínimos quadrados

Para que a função custo  $S$  (3.11) tenha um mínimo é necessário que as primeiras derivadas em relação aos parâmetros do modelo sejam nulas.

$$\nabla_{\mathbf{m}} S = 0 \quad (3.12)$$

Rescrevendo (3.11) obtém-se

$$S(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})) \quad (3.13)$$

Levando em conta a aproximação (3.11) em (3.13)

$$\begin{aligned} S(\mathbf{m}) &= \frac{1}{2} (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}_n) - \underline{\mathbf{F}}\Delta\mathbf{m})^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}_n) - \underline{\mathbf{F}}\Delta\mathbf{m}) \\ &= \frac{1}{2} (\Delta\mathbf{d}(\mathbf{m}_n) - \underline{\mathbf{F}}\Delta\mathbf{m})^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} (\Delta\mathbf{d}(\mathbf{m}_n) - \underline{\mathbf{F}}\Delta\mathbf{m}) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Então, calculando o gradiente de  $S$  em relação a  $\mathbf{m}$  e assumindo que  $\nabla_{\mathbf{m}} S$  é calculada próximo a  $\mathbf{m}_n$ , temos:

$$\begin{aligned} \nabla_{\mathbf{m}} S &= \nabla_{\mathbf{m}} \left[ \frac{1}{2} (\Delta\mathbf{d}(\mathbf{m}_n) - \underline{\mathbf{F}}\Delta\mathbf{m})^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} (\Delta\mathbf{d}(\mathbf{m}_n) - \underline{\mathbf{F}}\Delta\mathbf{m}) \right] \\ &= \frac{1}{2} \nabla_{\mathbf{m}} \left[ \Delta\mathbf{d}(\mathbf{m}_n)^T - \Delta\mathbf{m}^T \underline{\mathbf{F}}^T \right] \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} (\Delta\mathbf{d}(\mathbf{m}_n) - \underline{\mathbf{F}}\Delta\mathbf{m}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

considerando  $\nabla_{\mathbf{m}} \Delta\mathbf{d}(\mathbf{m}_n)^T = 0$  e que os parâmetros sejam linearmente independentes  $\nabla_{\mathbf{m}} \Delta\mathbf{m}^T = \mathbf{I}$ , resulta em

$$\nabla_{\mathbf{m}} S = -\underline{\mathbf{F}}^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} (\Delta\mathbf{d}(\mathbf{m}_n) - \underline{\mathbf{F}}\Delta\mathbf{m}) \quad (3.16)$$

Igualando  $\nabla_{\mathbf{m}} S$  a zero

$$-\underline{\mathbf{F}}^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} (\Delta\mathbf{d}(\mathbf{m}_n) - \underline{\mathbf{F}}\Delta\mathbf{m}) = 0 \quad (3.17)$$

A equação (3.15) produz a solução dos mínimos quadrados para o sistema linear.

$$\underline{\mathbf{C}}_D^{-1/2} \underline{\mathbf{F}}\Delta\mathbf{m} = \underline{\mathbf{C}}_D^{-1/2} \Delta\mathbf{d}(\mathbf{m}_n) \quad (3.18)$$

Esta equação pode ser resolvida para  $\Delta \mathbf{m}$  se a inversa de  $\underline{\mathbf{F}}^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} \underline{\mathbf{F}}$  existir e pode ser calculada de maneira estável.

Problemas ocorrem quando  $\underline{\mathbf{F}}^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} \underline{\mathbf{F}}$  é singular ou próxima de singular, pois não teremos uma inversão estável. Isto significa que o sistema de equações (3.18) não contém informações suficientes para determinar todos os parâmetros do modelo. Esta situação é muito comum em problemas de tomografia, em tais casos, necessitamos de vínculos adicionais que devem ser introduzidos para regularizar o problema.

### 3.2.3 Regularização

A maneira utilizada para adicionar vínculos ao modelo a fim de regularizá-lo é que o modelo de velocidade tenha uma segunda derivada mínima (DUVENECK, 2004a). A segunda derivada nos dá uma medida da curvatura do modelo de velocidade, e portanto, da complexidade do modelo de velocidade. A minimização da segunda derivada do modelo de velocidade é um vínculo razoável, pois estamos procurando durante o processo de inversão um modelo simples que se ajuste aos dados. A suavidade do modelo de velocidade também assegura um limite confiável da teoria paraxial do raio ao redor de cada raio central, assegurando uma relação dos atributos cinemáticos do campo de ondas calculados com aqueles obtidos dos dados sísmicos.

Segundo Duvenceck (2004a), a medida da curvatura do modelo de velocidade é feita pela integral bidimensional sobre o quadrado das segundas derivadas do modelo de velocidade em relação ao domínio espacial considerado (derivadas mistas não são consideradas). A medida total da curvatura do modelo de velocidade 2D é escrita em relação ao vetor modelo de velocidade  $\mathbf{m}^{(v)}$  (DUVENECK, 2002):

$$\iint_{z \ x} \left[ \varepsilon_{xx} \left( \frac{\partial^2 V(x, z)}{\partial x^2} \right)^2 + \varepsilon_{zz} \left( \frac{\partial^2 V(x, z)}{\partial z^2} \right)^2 + \varepsilon V^2(x, z) \right] dx dz = \mathbf{m}^{(v)T} \underline{\mathbf{D}} \mathbf{m}^{(v)} \quad (3.19)$$

Os coeficientes *B-splines*  $v_{ij}$  estão organizados no vetor coluna  $\mathbf{m}^{(v)}$  (DUVENECK, 2004a).

$$m_{[(i-1)n_z + j]}^{(v)} = v_{ij} \quad (3.20)$$

e  $\underline{\mathbf{D}}'' = \varepsilon_{xx}\underline{\mathbf{D}}^{xx} + \varepsilon_{zz}\underline{\mathbf{D}}^{zz} + \varepsilon\underline{\mathbf{D}}$ . Onde

$$\begin{aligned} \mathbf{D}^{xx} &= D_{[(i-1)n_z + j], [(k-1)n_z + l]}^{xx} = \tilde{D}_{ik}^{xx} \hat{D}_{jl} \\ \mathbf{D}^{zz} &= D_{[(i-1)n_z + j], [(k-1)n_z + l]}^{zz} = \tilde{D}_{ik} \hat{D}_{jl}^{zz} \\ \underline{\mathbf{D}} &= D_{[(i-1)n_z + j], [(k-1)n_z + l]} = \tilde{D}_{ik} \hat{D}_{jl} \end{aligned} \quad (3.21)$$

e

$$\begin{aligned} \tilde{D}_{ik}^{xx} &= \int_x \frac{\partial^2 \beta_i(x)}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \beta_k(x)}{\partial x^2} dx \\ \hat{D}_{jl} &= \int_z \beta_j(-z) \beta_l(-z) dz \\ \tilde{D}_{ik} &= \int_x \beta_i(x) \beta_k(x) dx \\ \hat{D}_{jl}^{zz} &= \int_z \frac{\partial^2 \beta_j(-z)}{\partial z^2} \frac{\partial^2 \beta_l(-z)}{\partial z^2} dz \end{aligned} \quad (3.22)$$

Os fatores  $\varepsilon_{zz} > 0$ ,  $\varepsilon_{xx} > 0$  e  $\varepsilon > 0$  são usados para normalização. O fator  $\varepsilon$  deve ser muito menor que  $\varepsilon_{zz}$  e  $\varepsilon_{xx}$ , mas não nulo, pois pretendemos minimizar a curvatura da velocidade e não a própria velocidade.

Considerando um vetor modelo  $\mathbf{m}$  que contém os termos extras  $\mathbf{m}^{(v)}$  tal que

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} \mathbf{m}^{(PIN)} \\ \mathbf{m}^{(v)} \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

A função custo com os termos de regularização adicionais será:

$$S(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \Delta \mathbf{d}^T(\mathbf{m}) \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} \Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}) + \frac{1}{2} \varepsilon'' \mathbf{m}^{(v)T} \underline{\mathbf{D}}'' \mathbf{m}^{(v)} \quad (3.24)$$

O termo de regularização pode ser interpretado como uma norma quadrática do vetor modelo de velocidade  $\mathbf{m}^{(v)}$  multiplicada pelo fator  $\varepsilon''$ . Este fator de peso balanceia as contribuições relativas às diferenças nos dados e a dos termos de regularização da função custo.

Fazendo novamente o gradiente da função custo  $S$  em relação aos parâmetros do modelo e igualando a zero temos:

$$(\underline{\mathbf{F}}^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} \underline{\mathbf{F}} + \varepsilon'' \tilde{\mathbf{D}}'') \Delta \mathbf{m} = \underline{\mathbf{F}}^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} \Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}_n) - \varepsilon'' \tilde{\mathbf{D}}'' \mathbf{m}_n \quad (3.25)$$

Esta equação deve ser resolvida para se obter o vetor modelo atualizador  $\Delta \mathbf{m}$ . A matriz  $\tilde{\mathbf{D}}''$  é simétrica e foi obtida da matriz  $\mathbf{D}''$  pela adição de linhas e colunas extras contendo somente zeros para que o termo de regularização pudesse ser escrito em função do vetor modelo completo  $\mathbf{m}$ .

$$\mathbf{m}^T \tilde{\mathbf{D}}'' \mathbf{m} = \mathbf{m}^{(v)T} \tilde{\mathbf{D}}'' \mathbf{m}^{(v)} \quad (3.26)$$

Se definirmos um vetor  $\hat{\mathbf{F}}$  e um vetor  $\Delta \hat{\mathbf{d}}$  como:

$$\hat{\mathbf{F}} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_D^{-1/2} \mathbf{F} \\ \tilde{\mathbf{B}} \end{pmatrix} \text{ e } \Delta \hat{\mathbf{d}} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_D^{-1/2} \Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}_n) \\ -\tilde{\mathbf{B}} \mathbf{m}_n \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

A equação (3.25) pode ser escrita na forma da equação normal.

$$\hat{\mathbf{F}}^T \hat{\mathbf{F}} \Delta \mathbf{m} = \hat{\mathbf{F}}^T \Delta \hat{\mathbf{d}} \quad (3.28)$$

A matriz  $\tilde{\mathbf{B}}$  é definida da forma que  $\tilde{\mathbf{B}}^T \tilde{\mathbf{B}} = \varepsilon'' \tilde{\mathbf{D}}''$ .  $\Delta \mathbf{m}$  pode ser calculada como a solução dos mínimos quadrados da equação matricial (DUVENECK, 2003)

$$\hat{\mathbf{F}} \Delta \mathbf{m} = \Delta \hat{\mathbf{d}} \quad (3.29)$$

As linhas da matriz  $\tilde{\mathbf{B}}$  em  $\hat{\mathbf{F}}$  e  $\Delta \hat{\mathbf{d}}$  que correspondem aos parâmetros do modelo PIN são nulas. Obtido o modelo atualizador  $\Delta \hat{\mathbf{d}}$ , o vetor modelo é atualizado:

$$\mathbf{m}_{n+1} = \mathbf{m}_n + \lambda \Delta \mathbf{m} \quad (3.30)$$

Segundo Duvencek (2004), o fator  $\lambda \leq 1$  é necessário devido a linearização ter sido aplicada em (3.14) e a função custo não ser uma função quadrática de  $\mathbf{m}$ .

Para se resolver a equação (3.29) e obter o vetor modelo atualizador, é necessário calcular os elementos da matriz  $\hat{\mathbf{F}}$  que são as derivadas de Fréchet  $F_{ij} = \partial f_i / \partial m_j$ . Estes cálculos podem ser feitos durante a modelagem direta aplicando a teoria da perturbação do raio ao longo do raio normal.

As derivadas em relação aos parâmetros do modelo de velocidade são calculadas separadamente para cada  $v_{jk}$  que passa a afetar o raio normal considerado. As derivadas de Fréchet dos componentes dos dados (3.1) são calculadas pelas equações (DUVENECK, 2004a):

$$\frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} = \frac{\cos \theta_j}{\cos \alpha_j} Q_1(s_{1j}, s_{0j}) \delta_{ij}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \xi_i}{\partial z_j} &= -\frac{\cos \theta_j}{\cos \alpha_j} Q_1(s_{1j}, s_{0j}) \delta_{ij} \\ \frac{\partial \xi_i}{\partial \theta_j} &= \frac{1}{v(s_{0j}) \cos \alpha_j} Q_2(s_{1j}, s_{0j}) \delta_{ij} \\ \frac{\partial \xi_i}{\partial v_{jk}} &= \frac{1}{\cos \alpha_j} \left[ Q_1(s_{1j}, s_{0j}) \frac{\partial \tilde{q}_i}{\partial v_{jk}} + Q_2(s_{1j}, s_{0j}) \frac{\partial \tilde{p}_i}{\partial v_{jk}} \right]\end{aligned}\quad (3.31)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial p_i^{(\xi\xi)}}{\partial x_j} &= \cos \alpha_j \cos \theta_j P_1(s_{1j}, s_{0j}) \delta_{ij} \\ \frac{\partial p_i^{(\xi\xi)}}{\partial z_j} &= -\cos \alpha_j \cos \theta_j P_1(s_{1j}, s_{0j}) \delta_{ij} \\ \frac{\partial p_i^{(\xi\xi)}}{\partial \theta_j} &= \frac{\cos \alpha_j}{v(s_{0j})} P_2(s_{1j}, s_{0j}) \delta_{ij} \\ \frac{\partial p_i^{(\xi\xi)}}{\partial v_{jk}} &= \cos \alpha_j \left[ P_1(s_{1j}, s_{0j}) \frac{\partial \tilde{q}_i}{\partial v_{jk}} + P_2(s_{1j}, s_{0j}) \frac{\partial \tilde{p}_i}{\partial v_{jk}} \right]\end{aligned}$$

Onde

$$\frac{\partial \tilde{q}_i}{\partial v_{jk}} = -\int_{s_{0i}}^{s_{1i}} Q_2(s, s_{0i}) \left\{ -\frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial q} [\beta_j(x(s)) \beta_k(-z(s))] + \frac{1}{v^3} \frac{\partial v}{\partial q} [\beta_j(x(s)) \beta_k(z(s))] \right\} ds \quad (3.32)$$

e

$$\frac{\partial \tilde{p}_i}{\partial v_{jk}} = \int_{s_{0i}}^{s_{1i}} Q_1(s, s_{0i}) \left\{ -\frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial q} [\beta_j(x(s)) \beta_k(-z(s))] + \frac{1}{v^3} \frac{\partial v}{\partial q} [\beta_j(x(s)) \beta_k(z(s))] \right\} ds \quad (3.33)$$

O índice  $i$  indica as propriedades relacionadas com o  $i$ -ésimo raio e  $\delta_{ij}$  é o símbolo de Kronecker. Isto significa que as perturbações em um determinado raio não influenciam nenhum outro raio. A derivada de Fréchet para o parâmetro  $M_i^{(\xi)}$  é dada por (DUVENECK, 2004a):

$$\frac{\partial M_i^{(\xi\xi)}}{\partial x_j} = -2 \sin \alpha_j \cos \alpha_j \cos \theta_j v(s_{1j}) P_1(s_{1j}, s_{0j}) \frac{P_2(s_{1j}, s_{0j})}{Q_2(s_{1j}, s_{0j})}$$

$$\begin{aligned}
& + \cos^2 \alpha_j \left( \frac{\partial M_j}{\partial q_{0j}} \cos \theta_j + Q_2^{-2}(s_{1j}, s_{0j}) v(s_{0j}) \text{sen} \theta_j \right) \delta_{ij} \quad (3.34) \\
\frac{\partial M_i^{(\xi\xi)}}{\partial z_j} & = 2 \text{sen} \alpha_j \cos \alpha_j \cos \theta_j v(s_{1j}) P_1(s_{1j}, s_{0j}) \frac{P_2(s_{1j}, s_{0j})}{Q_2(s_{1j}, s_{0j})} \\
& + \cos^2 \alpha_j \left( -\frac{\partial M_j}{\partial q_{0j}} \text{sen} \theta_j + Q_2^{-2}(s_{1j}, s_{0j}) v(s_{0j}) \cos \theta_j \right) \delta_{ij} \\
\frac{\partial M_i^{(\xi\xi)}}{\partial \theta_j} & = -2 \text{sen} \alpha_j \cos \alpha_j \frac{v(s_{1j})}{v(s_{0j})} P_2(s_{1j}, s_{0j}) \frac{P_2(s_{1j}, s_{0j})}{Q_2(s_{1j}, s_{0j})} + \frac{1}{v(s_{0j})} \frac{\partial M_j}{\partial p_{0j}} \delta_{ij} \\
\frac{\partial M_i^{(\xi\xi)}}{\partial v_{jk}} & = -2 \text{sen} \alpha_j \cos \alpha_j \frac{P_2(s_{1j}, s_{0j})}{Q_2(s_{1j}, s_{0j})} \left( P_1(s_{1j}, s_{0j}) \frac{\partial \tilde{q}_i}{\partial v_{jk}} + P_2(s_{1j}, s_{0j}) \frac{\partial \tilde{p}_i}{\partial v_{jk}} \right) + \frac{\partial M_i}{\partial v_{jk}}
\end{aligned}$$

A derivada de Fréchet para o tempo de trânsito  $\tau$  é dada por (DUVENECK, 2004a):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \tau_i}{\partial x_j} & = -\frac{\text{sen} \theta_j}{v(s_{0j})} \delta_{ij} \\
\frac{\partial \tau_i}{\partial z_j} & = -\frac{\cos \theta_j}{v(s_{0j})} \delta_{ij} \quad (3.35) \\
\frac{\partial \tau_i}{\partial \theta_j} & = 0 \\
\frac{\partial \tau_i}{\partial v_{jk}} & = -\int_{s_{0i}}^{s_{1i}} \frac{\beta_j(x(s)) \beta_k(z(s))}{v^2(s)} ds
\end{aligned}$$

Na modelagem direta, as informações de velocidade a priori (equação 3.4), que são aquelas velocidades em posições específicas  $(x_i, z_i)$  do modelo, dependem somente dos parâmetros de velocidade  $v_{jk}$  e não dos parâmetros do modelo PIN  $(x, z, \theta)_i^{PIN}$ , portanto, somente as derivadas de Fréchet em relação aos parâmetros  $v_{jk}$  são diferentes de zero.

$$\frac{\partial V(x_i, z_i)}{\partial v_{jk}} = \beta_j(x_i) \beta_k(z_i) \quad (3.36)$$

Os vínculos dados pela equação (3.5) dependem dos parâmetros do modelo de velocidade  $v_{jk}$  e dos parâmetros do modelo PIN  $(x, z, \theta)_i^{PIN}$ , porém, é razoável assumir que nenhuma posição PIN nem o correspondente refletor local em profundidade mude drasticamente de uma iteração

para outra ao ponto de ter algum significado importante no cálculo de  $\nabla_q v$ . Portanto as derivadas de Fréchet com relação aos parâmetros o modelo PIN serão desconsideradas. Calculando apenas em função dos parâmetros do modelo de velocidade:

$$\frac{\partial}{\partial v_{jk}} \left[ \left( \nabla_q V \right) \Big|_{(x,z)_i^{(PIN)}} \right] = \text{sgn} \left[ \left( \nabla_q V \right) \Big|_{(x,z)_i^{(PIN)}} \right] \frac{\partial}{\partial v_{jk}} \left[ \left( \nabla_q V \right) \Big|_{(x,z)_i^{(PIN)}} \right] \quad (3.37)$$

A função  $\text{sgn}$  resulta em +1, -1 ou 0, dependendo do sinal dos argumentos.

### 3.2.4 Matriz tomográfica

Com as derivadas de Fréchet calculadas, podemos montar a matriz tomográfica  $\hat{\underline{F}}$  da equação (3.29).

$$\hat{\underline{F}} = \left[ \begin{array}{ccc|ccc} \frac{1}{\sigma_\tau} \left[ \frac{\partial \tau_0}{\partial x^{NIP}} \right] & \frac{1}{\sigma_\tau} \left[ \frac{\partial \tau_0}{\partial z^{NIP}} \right] & \frac{1}{\sigma_\tau} \left[ \frac{\partial \tau_0}{\partial \theta^{NIP}} \right] & \frac{1}{\sigma_\tau} \left[ \frac{\partial \tau_0}{\partial v} \right] & & \\ \frac{1}{\sigma_M} \left[ \frac{\partial M_{NIP}^{(x)}}{\partial x^{NIP}} \right] & \frac{1}{\sigma_M} \left[ \frac{\partial M_{NIP}^{(x)}}{\partial z^{NIP}} \right] & \frac{1}{\sigma_M} \left[ \frac{\partial M_{NIP}^{(x)}}{\partial \theta^{NIP}} \right] & \frac{1}{\sigma_M} \left[ \frac{\partial M_{NIP}^{(x)}}{\partial v} \right] & & \\ \frac{1}{\sigma_p} \left[ \frac{\partial p^{(x)}}{\partial x^{NIP}} \right] & \frac{1}{\sigma_p} \left[ \frac{\partial p^{(x)}}{\partial z^{NIP}} \right] & \frac{1}{\sigma_p} \left[ \frac{\partial p^{(x)}}{\partial \theta^{NIP}} \right] & \frac{1}{\sigma_p} \left[ \frac{\partial p^{(x)}}{\partial v} \right] & & \\ \frac{1}{\sigma_x} \left[ \frac{\partial x_0}{\partial x^{NIP}} \right] & \frac{1}{\sigma_x} \left[ \frac{\partial x_0}{\partial z^{NIP}} \right] & \frac{1}{\sigma_x} \left[ \frac{\partial x_0}{\partial \theta^{NIP}} \right] & \frac{1}{\sigma_x} \left[ \frac{\partial x_0}{\partial v} \right] & & \\ \hline & \left[ 0_v \right] & & \frac{1}{\sigma_v} \left[ \frac{\partial V(\text{vinculo})}{\partial v} \right] & & \\ & \left[ 0_{v_q} \right] & & \frac{1}{\sigma_{v_q}} \left[ \frac{\partial (\nabla_q V)}{\partial v} \right] & & \\ & \left[ 0_B \right] & & \left[ B \right] & & \end{array} \right] \quad (3.38)$$

A parte superior esquerda de  $\hat{\mathbf{F}}$  é formada por matrizes diagonais  $n_{\text{pontos}} \times n_{\text{pontos}}$  contendo as derivadas de Fréchet em relação aos parâmetros do modelo PIN dados pelas equações (3.31) (3.34) e (3.35). A parte superior direita é formada por matrizes  $n_{\text{pontos}} \times n_x n_z$  contendo as derivadas de Fréchet em relação aos parâmetros do modelo de velocidade  $v_{jk}$ .

A matriz  $n_{\text{pontos}} \times n_x n_z \left[ \frac{\partial V(\text{vínculo})}{\partial v} \right]$  contém as derivadas de Fréchet dos vínculos de informação a priori de velocidade (3.4), calculadas pela equação (3.36). A derivadas destes vínculos em relação aos parâmetros do modelo PIN são zero, resultando em uma matriz nula  $n_{\text{pontos}} \times 3n_{\text{pontos}} [0_v]$ . Os elementos da matriz  $n_{\text{pontos}} \times n_x n_z \left[ \frac{\partial(\nabla_q V)}{\partial v} \right]$  são as derivadas de Fréchet dos vínculos (3.5) em relação aos parâmetros do modelo de velocidade  $v_{jk}$  calculados pela equação (3.37). A derivada de Fréchet destes vínculos em relação aos parâmetros do modelo PIN também são consideradas nulas, resultando em uma matriz  $n_{\text{pontos}} \times 3n_{\text{pontos}} [0_{vq}]$ .

$[B]$  é uma matriz  $n_x n_z \times n_x n_z$  triangular superior. Ela é calculada da matriz  $\varepsilon'' \tilde{\mathbf{D}}$  através da decomposição de Cholesky e  $[0_B]$  é uma matriz nula  $n_x n_z \times 3n_{\text{pontos}}$ .

O vetor dos dados  $\mathbf{d}$  contendo os vínculos adicionais do modelo é definido como:

$$\mathbf{d} = \begin{pmatrix} \mathbf{d}^{(PIN)} \\ \mathbf{d}^{\text{vínculo}} \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

com

$$\mathbf{d}^{(PIN)} = (\tau_{01}, \dots, \tau_{0n_{\text{pontos}}}, M_{(PIN)1}^{(x)}, \dots, M_{(PIN)n_{\text{pontos}}}^{(x)}, p_1^{(x)}, \dots, p_{n_{\text{pontos}}}^{(x)}, \varepsilon_{01}, \dots, \varepsilon_{0n_{\text{pontos}}})^T \quad (3.40)$$

e

$$\mathbf{d}^{(\text{vínculo})} = (V(x_1, z_1), \dots, V(x_{n_{\text{pontos}}}, z_{n_{\text{pontos}}}), 0_1, \dots, 0_{n_{\text{pontos}}})^T \quad (3.41)$$

O vetor modelo é

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} \mathbf{m}^{(PIN)} \\ \mathbf{m}^{(v)} \end{pmatrix} \quad (3.42)$$

com

$$\mathbf{m}^{(PIN)} = (x_1^{(PIN)}, \dots, x_{n_{\text{pontos}}}^{(PIN)}, z_1^{(PIN)}, \dots, z_{n_{\text{pontos}}}^{(PIN)}, \theta_1^{(PIN)}, \dots, \theta_{n_{\text{pontos}}}^{(PIN)})^T \quad (3.43)$$

e

$$\mathbf{m}^{(v)} = (v_{11}, \dots, v_{1nz}, \dots, v_{nx\,nz})^T \quad (3.44)$$

Substituindo a matriz (3.38) na equação (3.29) teremos um sistema de equações lineares muito grandes para ser resolvido por decomposição de valores singulares. A matriz  $\hat{\mathbf{F}}$  é uma matriz esparça e o método LSQR, introduzido por Paige e Saunders (1982a,b), é um método eficiente para resolver sistemas lineares espaços da forma da equação (3.38). O LSQR é um método iterativo equivalente analiticamente ao algoritmo gradiente-conjugado (GILL; MURRAY; WRIGHT, 1981), mas tem propriedades numéricas mais favoráveis, em particular para sistemas mal postos. O algoritmo LSQR permite armazenar a matriz  $\hat{\mathbf{F}}$  na forma de uma matriz esparça e resolver diretamente a equação (3.29) para encontrar  $\Delta \mathbf{m}$  sem precisar inverter uma matriz. A versão simplificada do algoritmo LSQR usada no programa niptomo evita a necessidade de se especificar um grande número de parâmetros como exige o algoritmo original publicado por Paige e Saunders (1982b).

### 3.3 ALGORITMO DE INVERSÃO

Na seção anterior apresentamos os elementos principais para a inversão tomográfica 2D com os atributos cinemáticos do campo de onda. Nesta seção descreveremos o algoritmo geral de inversão tomográfica baseados nos atributos do empilhamento SRC. Os parâmetros dos dados para a inversão tomográfica utilizados por este algoritmo devem ser extraídos de forma apropriada a partir dos dados sísmicos resultantes do empilhamento SRC. Normalmente, estes parâmetros dos dados são extraídos por meio de um processo automático de *picking* ou através da escolha manual de pontos de reflexões sísmicas primárias diretamente na seção afastamento nulo (AN). O algoritmo procede da seguinte maneira:

- 1- Criação de um modelo de velocidade com valores significativos para os elementos  $m^{(v)}$  considerando os fatores de escala  $\sigma_r$ ,  $\sigma_M$ ,  $\sigma_p$ ,  $\sigma_\xi$  (matriz diagonal  $\underline{\mathbf{C}}_D$ ), os pesos dos vínculos  $\sigma_v$  e  $\sigma_{vq}$  e os fatores de regularização  $\varepsilon_{zz}$ ,  $\varepsilon_{xx}$  e  $\varepsilon$ .

- 2- Traçamento cinemático de raios em forma descendente para determinar os parâmetros do modelo (3.3). Para cada conjunto dos parâmetros dos dados (3.1) é traçado um raio normal até atingir o tempo de trânsito  $\tau_0$ . Este raio tem origem na superfície ( $z = 0$ ) na posição  $\xi_0$  e sua direção é definida pelo ângulo de emergência do raio central calculado pelos correspondentes componentes dos dados. O ponto final do raio define a localização do ponto PIN (ponto de incidência normal) e o vetor vazarosidade do raio no ponto PIN é a normal ao refletor.
  
- 3- Traçamento dinâmico de raios na direção ascendente a partir do ponto PIN para determinar os parâmetros da modelagem direta (3.6). Nesta etapa, são calculadas simultaneamente ao longo de cada raio normal as derivadas de Fréchet por meio da teoria da perturbação do raio.
  
- 4- Avaliação da função custo da inversão (3.24) pelo calculo da diferença entre os dados (3.1) e o modelo (3.6), e calculando o termo de regularização do vetor do modelo de velocidade  $\mathbf{m}^{(v)}$ .
  
- 5- Construção do sistema linear de equações (3.29) e solução pelo método dos mínimos quadrados usando um método numérico apropriado (LSQR – PAIGE; SAUNDERS, 1982a,b), obtendo-se assim o modelo de velocidades atualizado.
  
- 6- Determinar o novo modelo por meio da adição do modelo atual com o último modelo calculado multiplicado pelo fator  $\lambda \leq 1$ .
  
- 7- Traçamento dinâmico de raios com os novos parâmetros do modelo para a determinação dos novos parâmetros da modelagem (3.6).
  
- 8- Avaliação da função custo da inversão através do cálculo da diferença dos parâmetros dos dados (3.1) e os novos parâmetros da modelagem (3.6).

- 9- Se a função custo aumentou, o modelo atualizado é rejeitado, o fator  $\lambda$  deve ser diminuído e os passos 6, 7 e 8 devem ser repetidos até que a função custo diminua ou  $\lambda$  fique abaixo do valor especificado. Se a função custo não diminui, mesmo para pequenos valores de  $\lambda$ , um mínimo da função custo foi atingido.
- 10- Se a função custo diminui, o modelo atualizado é aceito, o peso da regularização  $\epsilon''$  é diminuído e a próxima iteração é iniciada retornando para o passo 3 onde será utilizado o novo modelo de velocidade.
- 11- O procedimento é interrompido quando é executado um certo número de iterações ou quando a função custo tiver atingido um valor menor que um valor pré-estabelecido.

## 4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE INVERSÃO TOMOGRÁFICA DOS ATRIBUTOS SRC-2D EM DADOS SINTÉTICOS E DADOS REAIS

No Capítulo 3 foi apresentada uma revisão dos aspectos teóricos do novo método de inversão tomográfica de atributos da onda PIN, obtidos do empilhamento SRC. Com base no algoritmo de inversão apresentado na seção 3.3, Duveneck (2004a) desenvolveu o programa de inversão tomográfica dos atributos da onda PIN denominado *niptomo*. Neste capítulo, apresenta-se uma descrição dos parâmetros de uso desse programa e também os resultados da aplicação nos dados sintéticos Marmousi e em dados reais da linha RL-50-90 da Bacia do Tacutu. Ainda neste capítulo será apresentado o estudo da influência do processo de *picking* nos resultados da inversão tomográfica. Para este propósito será utilizado o programa de *picking* automático e outro programa de *picking* interativo desenvolvido durante esta dissertação.

### 4.1 DADOS DE ENTRADA PARA A INVERSÃO

Os dados necessários para a inversão tomográfica através do programa *niptomo* (DUVENECK, 2004a) são os atributos cinemáticos do campo de onda: o tempo de trânsito do raio normal  $\tau_0 = t_0 / 2$ , a primeira e a segunda derivada espacial do tempo de trânsito  $p^{(\xi)}$  e  $M_{PIN}^{(\xi)}$  e a posição  $\xi_0$  do raio normal emergente. Estes dados são obtidos através dos pontos escolhidos na seção afastamento nulo (AN) que resulta do método de empilhamento SRC-2D, onde cada ponto escolhido terá os 4 parâmetros, sendo  $\tau_0$  e  $\xi_0$  medidos diretamente da seção AN e os dois parâmetros  $p^{(\xi)}$  e  $M_{PIN}^{(\xi)}$  calculados pela equação (2.8) a partir dos valores extraídos das seções do ângulo de emergência e do raio de curvatura da onda PIN. As unidades e a ordem de grandeza de cada parâmetro são:  $[\tau_0] = 10^{-3}$  s,  $[\xi_0] =$  m,  $[p^{(\xi)}] = 10^{-6}$  s/m e  $[M_{PIN}^{(\xi)}] = 10^{-9}$  s/m<sup>2</sup>.

Os pontos escolhidos na seção AN são independentes entre si e por isso não necessitam seguir horizontes de reflexão, porém necessitam estar localizados nos eventos de reflexões primárias. Uma boa escolha destes pontos é crucial para o sucesso da inversão tomográfica. No momento da escolha dos pontos de reflexões devem-se evitar os pontos que representem múltiplas ou difrações.

A determinação estável e confiável dos atributos cinemáticos do campo de onda são pré-requisitos para o processo de inversão tomográfica. O cálculo dos parâmetros de empilhamento feito separadamente amostra por amostra em uma seção AN conduz a flutuações indesejadas nos valores dos atributos cinemáticos. Estas flutuações justificam a aplicação de um processo de suavização nas seções dos atributos. Em Garabito Callapino (2001) foi mostrado que os valores dos atributos cinemáticos obtidos pelo algoritmo de empilhamento SRC global-local utilizado neste trabalho apresentam pequenas flutuações, e por esta razão, neste trabalho, não foi considerado necessário a aplicação do processo de suavização dos atributos SRC.

#### 4.2 PARÂMETROS DA INVERSÃO

Os parâmetros requeridos para a inversão tomográfica pelo programa *niptomo* podem ser agrupados em dois grupos: parâmetros obrigatórios e parâmetros opcionais.

Os parâmetros obrigatórios são:

- input*= - Nome do arquivo que contém os dados para a inversão.  $[T]=10^{-3}$ s,  $[M]=10^{-9}$ s/m<sup>2</sup>,  $[p]=10^{-6}$ s/m.
- xknots*= - nome do arquivo que contém a seqüência das posições dos nós na horizontal para a formação da malha onde será determinado o modelo de velocidade.  $[x]=$ m
- zknots*= - nome do arquivo que contém a seqüência das posições dos nós na vertical para a formação da malha onde será determinado o modelo de velocidade.  $[z]=$ m

Os parâmetros opcionais para a inversão são:

- v0*= - velocidade próxima a superfície em m/s.  $[v0]=$ m/s
- grad0*= - gradiente vertical de velocidade.  $[grad0]=$ 1/s.  $v(z) = v0 + grad0 * (z - zknots(0))$  (válido somente para o caso em que os nós na direção vertical forem espaçados igualmente).
- output*= - nome do arquivo de saída dos dados em formato ASCII. Neste arquivo

são gravados  $\tau_0$ ,  $\xi_0$ ,  $p^{(\xi)}$  e  $M_{PIN}^{(\xi)}$ .

- vinput*= - nome arquivo contendo informações adicionais sobre a velocidade em subsuperfície,  $x \ z \ v(x,z)$ , onde  $[x]=[z]=m$  e  $[v]=m/s$ . Estes valores de velocidade são utilizados como informação a priori.
- voutput*= - nome arquivo de saída contendo os valores adicionais “*vinput*” juntamente com seus correspondentes valores calculados,  $x \ z \ v(x,z) \ v\_out$ , onde  $[x]=[z]=m$  e  $[v]=[v\_out]=m/s$ .
- endmodel*= - nome do arquivo de saída do modelo de velocidade final em m/s, escrito no formato SU.
- startmodel*= - nome do arquivo de entrada do modelo de velocidade inicial a ser utilizado na inversão e que serão os valores dos coeficientes *B-spline*,  $[v]=m/s$ .
- ds*= - comprimento do passo de integração,  $[ds]=m$ .
- hmax*= - máximo meio afastamento utilizado para o cálculo das derivadas da velocidade, em *m*.
- epsilonzz*= - pesos para a regularização, minimização da segunda derivada espacial de *v* na direção *z*.
- epsilonxx*= - pesos para a regularização, minimização da segunda derivada espacial de *v* na direção *x*.
- epsilon*= - pesos para a regularização, minimização de *v*.
- epsilonxxmodel*= - nome do arquivo que contém os pesos variáveis no espaço para modificar os valores dos pesos de regularização *epsilonxx*. Valores entre 1 e 100.
- epsilonzzmodel*= - nome do arquivo que contém os pesos variáveis no espaço para modificar os valores dos pesos de regularização *epsilonzz*. Valores entre 1 e 100.
- niteration*= - número máximo de iterações.
- maxcond*= - condição máxima de números em LSQR.
- sigT*= - =1 assume erro nas medidas dos tempos.
- sigM*= - =1 assume erro nas medidas de M.
- sigp*= - =2 assume erro nas medidas do vetor vagarosidade horizontal  $p_x$ .
- sigxi*= - =1 assume erro nas posições em superfície.
- sigv*= - =1 assume erro para as informações adicionais sobre a velocidade em subsuperfície.
- sigvq*= - =0 assume pesos para a minimização da primeira derivada da velocidade na direção tangente ao refletor local.

Uma das etapas mais críticas na preparação dos parâmetros de inversão é a geração do arquivo *input* que contém os dados de entrada  $\tau_0$ ,  $\xi_0$ ,  $p^{(\xi)}$  e  $M_{PIN}^{(\xi)}$  através do processo de *picking*. A necessidade de uma boa escolha dos pontos sobre os eventos de reflexão é fundamental para o cálculo dos atributos cinemáticos do campo de onda.

#### 4.3 PICKING DOS ATRIBUTOS SRC

A escolha dos pontos sobre os eventos de reflexão na seção afastamento nulo (AN) é uma etapa que precede a inversão tomográfica uma vez que já se tenham as seções dos atributos cinemáticos do campo de onda calculados através do método de empilhamento SRC-2D. Esta escolha pode ser feita diretamente pelo usuário na seção simulada AN, através do programa interativo denominado *2D-ZO-CRS Attributes Picking Tool* desenvolvido neste trabalho ou por meio do programa de *picking* automático denominado *Autopicking* (KLÜVER; MANN, 2005). A seguir detalharemos os dois programas de *picking*.

##### 4.3.1 *Picking* Automático

O programa de *picking* automático (KLÜVER; MANN, 2005) necessita obrigatoriamente dos dados de entrada: seção AN, seção de coerência, seção dos raios de curvatura da onda PIN e a seção dos ângulos de emergência do raio normal.

Na seção AN, os pontos são escolhidos seguindo a seqüência dos traços sísmicos e percorrendo até o fim o traço selecionando. A quantidade de pontos deve ser um valor máximo opcionalmente definido pelo usuário do programa. Para cada traço o programa busca a coerência máxima e vai para o máximo mais próximo do envelope do sinal empilhado. Porém, os pontos não são selecionados somente de acordo com o seu valor de coerência, pois ruídos também possuem valores elevados de coerência, então a informação dos pontos vizinhos ao mesmo evento de reflexão é levada em consideração. Esta informação adicional permite verificar se o ponto escolhido faz realmente parte de um evento de reflexão.

O programa alinha uma janela com o evento de reflexão usando a primeira derivada do tempo de trânsito. O programa também verifica se uma porcentagem de todas as amostras de dentro da janela tem coerência mais alta que a exigida pelo usuário e possui uma diferença no

mergulho  $\theta$  abaixo de um valor em relação à amostra central. Opcionalmente é verificado se a amplitude excede o valor definido pelo usuário.

Os parâmetros obrigatórios para a utilização do programa *picking* automático são:

- survel*= - velocidade próxima a superfície. [*survel*]=m/s
- radius*= - valor da distância mínima entre dois pontos, [*radius*]=m
- timewidth*= - valor do intervalo de tempo mínimo entre dois pontos escolhidos, [*timewidth*]=s.
- rnip*= - nome do arquivo de entrada que contém os dados da seção  $R_{PIN}$ . [*R<sub>PIN</sub>*]=m.
- angle*= - nome do arquivo de entrada que contém os dados da seção ângulo de emergência do raio normal. [ $\beta$ ]=grau.
- coher*= - nome do arquivo de entrada que contém os dados da seção de coerência.
- stack*= - nome do arquivo de entrada que contém os dados da seção empilhada AN.
- kin*= - nome do arquivo de saída para a inversão tomográfica
- geom*= - nome do arquivo de saída com as coordenadas dos pontos escolhidos,  $T[s]$   $x[m]$   $y[m]$ . Este arquivo é gravado no formato ASCII.

Os parâmetros opcionais ajudam muito na melhoria do *picking*, são eles:

- dalpha*= - ângulo máximo permitido entre o vetor normal e o vetor da onda plana local em grau.
- mincoher*= - valor de coerência mínima para cada ponto escolhido.
- perc*= - coerência mínima que as amostras vizinhas devem ter,  $perc * mincoher$ .
- fraction*= - fração mínima de amostras necessárias para validar um ponto escolhido dentro de uma janela de amostras.
- maxpicks*= - número máximo de pontos por traço.
- skip*= - número de traços que devem ser ignorados entre um traço e outro usado para a escolha dos pontos.
- absmax*= - amplitude máxima em torno da coerência máxima
- dt*= - tempo mínimo válido entre dois pontos escolhidos, em segundos.
- ampperc*= - fração mínima da amplitude média que o envelope empilhado da amostra

central dever ter dentro do intervalo de tempo “*amptimewidth*” no traço central.

*amptimewidth*= - intervalo de tempo em segundos do critério de amplitude.

#### 4.3.2 *Picking* Interativo

O programa de *picking* automático (KLÜVER; MANN, 2005) é de grande ajuda na escolha dos pontos de reflexão na seção afastamento nulo (AN), porém a falta de visualização dos pontos escolhidos bem como a falta de controle sobre cada ponto nos induziu a criação de um programa de *picking* interativo denominado 2D-ZO-CRS *Attributes Picking Tool*, onde é possível não somente escolher como também eliminar cada ponto diretamente na seção AN.

O programa de *picking* interativo foi totalmente criado dentro da interface gráfica (GUIDE) do Matlab que está licenciado para o Laboratório de Processamento Sísmico (PROSIS). O referido programa de *picking* interativo utiliza um código escrito em linguagem de programação do Matlab para ler arquivos gravados no formato Seismic Unix (SU) vindos do programa SRC.

Os dados de entrada para o programa de *picking* interativo são os mesmos do programa de *picking* automático, estes são: Seção AN, seção de coerência, seção dos raios de curvatura da onda PIN e a seção dos ângulos de emergência do raio normal. Os parâmetros são os fatores de escala da seção AN e  $R_{PIN}$ , a unidade de medida do ângulo de emergência, os limites de proximidade entre dois pontos, a velocidade próxima à superfície e a coerência mínima de cada ponto escolhido. Para todos estes parâmetros, o programa tem um valor pré-determinado ou padrão onde o usuário deve efetuar mudanças conforme as características dos dados a serem processados.

O manuseio do programa é simples. Primeiramente o usuário entra com a seção AN e em seguida escolhe os pontos de reflexões primárias. Após a escolha dos pontos o programa determina os quatro parâmetros necessários para a inversão tomográfica SRC-2D. Os parâmetros  $\tau_0$  e  $\xi_0$  são extraídos diretamente da seção AN,  $p^{(\xi)}$  e  $M_{PIN}^{(\xi)}$  são calculados através da equação (2.8). Maiores informações sobre o programa 2D-ZO-CRS *Attributes Picking Tool* veja o apêndice A.

#### 4.4 APLICAÇÕES DO *PICKING* E DA INVERSÃO TOMOGRÁFICA

Na presente seção, mostraremos os resultados dos programas de *picking* automático e interativo e seus respectivos resultados da inversão tomográfica dos atributos da onda PIN. Todos os dados usados nos dois programas de *picking* foram obtidos pelo método de empilhamento SRC global-local (GARABITO, 2001) e, conseqüentemente, também os atributos cinemáticos das frentes de onda da onda PIN.

##### 4.4.1 Resultados dos dados Marmousi

O modelo e os dados Marmousi aqui utilizados estão descritos em detalhes em 2.5.1 e as seções AN,  $R_{PIN}$ , coerência e ângulo de emergência do raio normal em 2.5.1.1.

##### 4.4.1.1 *Picking* Automático/Inversão

Para o *picking* feito no programa *Picking* Automático (KLÜVER; MANN, 2005) obteve-se como resultados 3602 pontos distribuídos em toda seção AN (figura 4.1) através da utilização dos seguintes parâmetros:

<i>survel</i> =	- 1500m/s
<i>radius</i> =	- 50
<i>timewidth</i> =	- 0.04
<i>refx</i> =	- 0.0
<i>refy</i> =	- 0.0
<i>mincoher</i> =	- 0.05
<i>perc</i> =	- 0.5
<i>fraction</i> =	- 0.1
<i>maxpicks</i> =	- 100
<i>skip</i> =	- 3

Na inversão utilizamos além do *picking* da figura 4.1 os seguintes parâmetros:

- Uma malha com  $n_x \times n_z = 31 \times 16 = 496$  nós com um espaçamento horizontal constante de 200m e um espaçamento vertical constante de 200m. Os limites dos nós na horizontal são de 3000m até 9000m o que abrange os dados Marmousi que estão entre 3000m e 8700m e na vertical de 0m até 3000m.
- Uma velocidade de 1500m/s.
- Um gradiente vertical de  $0,85s^{-1}$ .

Na figura 4.2 mostra-se o gráfico da velocidade NMO dos eventos marcados com o *picking* automático e na figura 4.3 o modelo de velocidades que resulta da inversão tomográfica a partir dos atributos da onda PIN extraídos pelo programa de *picking* automático da Figura 4.1.

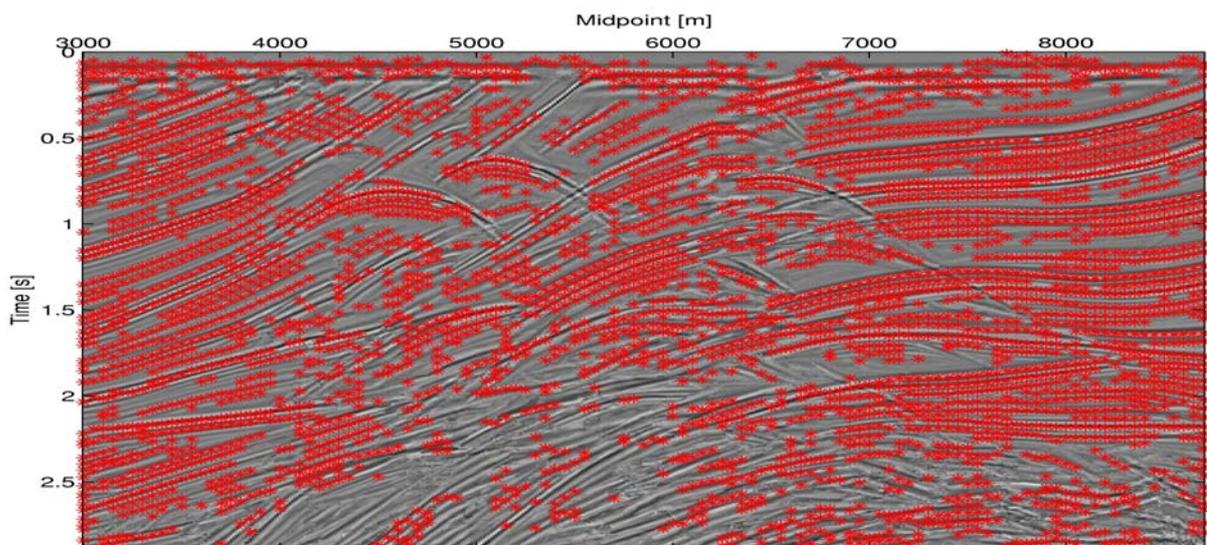


Figura 4.1: Resultado do *picking* automático na seção AN dos dados Marmousi empilhada pelo método SRC.

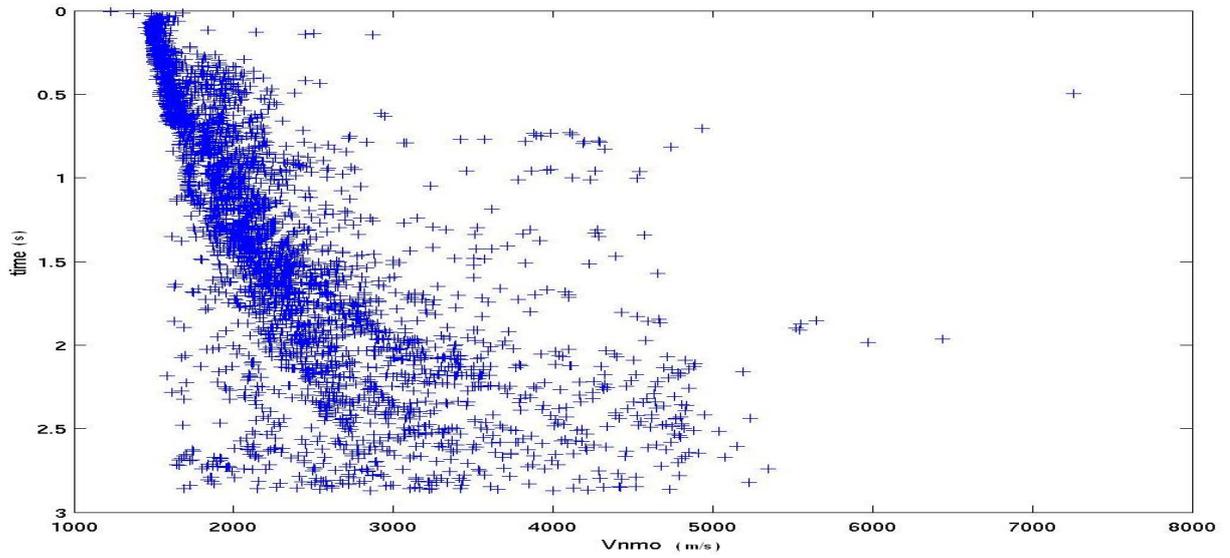


Figura 4.2: Velocidade NMO dos eventos marcados pelo *picking* automático na seção AN dos dados Marmousi.

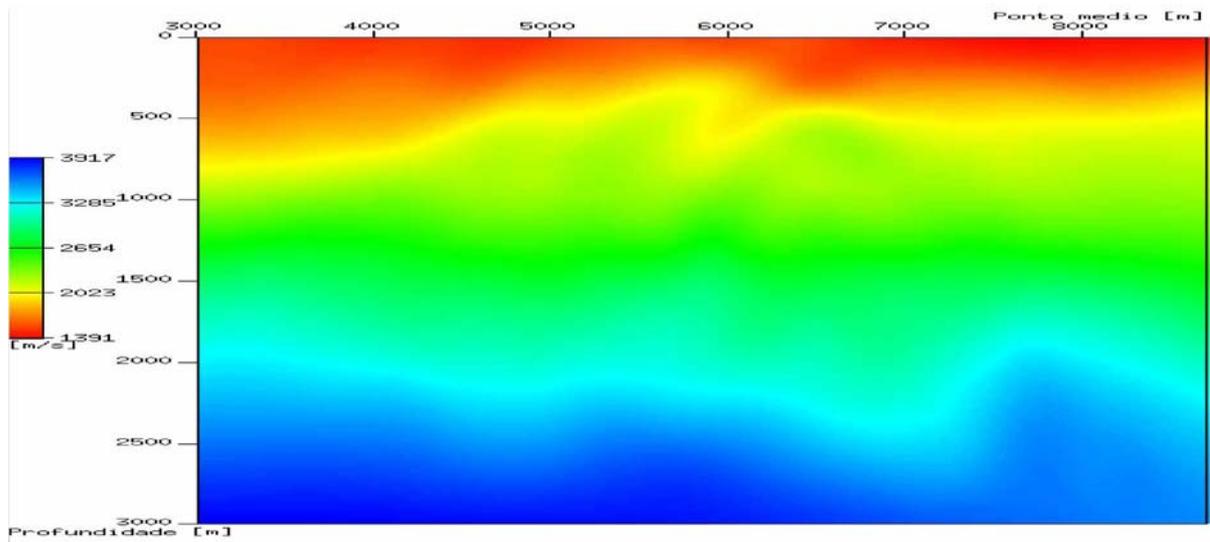


Figura 4.3: Modelo de velocidades obtido pela inversão dos dados resultantes do *picking* automático mostrado na Figura 4.1.

#### 4.4.1.2 *Picking* Interativo/Inversão

No *picking* interativo foi utilizado como dados iniciais o resultado do *picking* automático e da qual foi retirado alguns pontos que apesar de apresentarem um alto valor de coerência, representavam ruídos ou estavam sobre reflexões que não são primárias e também retiramos pontos muito próximos à superfície devido representarem eventos rasos e consequentemente com valores elevados para a segunda derivada do tempo de trânsito,  $M_{PIN}^{(2)}$ , o que tendem a desestabilizar o processo de inversão. Foram acrescentados outros pontos correspondentes a reflexões primárias, estes novos pontos se encontram em regiões de alta e baixa coerência. Nos locais de baixa coerência consideramos que estes dados são informações a priori do interprete na hora do *picking* manual. O resultado final do processo de *picking* forneceu um total de 2586 pontos para a inversão tomográfica e que podem ser vistos na Figura 4.4. Na figura 4.5 mostra-se o gráfico da velocidade NMO para cada evento escolhido no *picking* interativo.

A inversão tomográfica utilizando os 2586 pontos foi realizada com os mesmos parâmetros da inversão realizada com os dados do *picking* automático, isto a fim de possibilitar uma comparação entre os dois resultados. A Figura 4.6 mostra o resultado da inversão dos atributos vindos do *picking* editado utilizando programa de *picking* interativo.

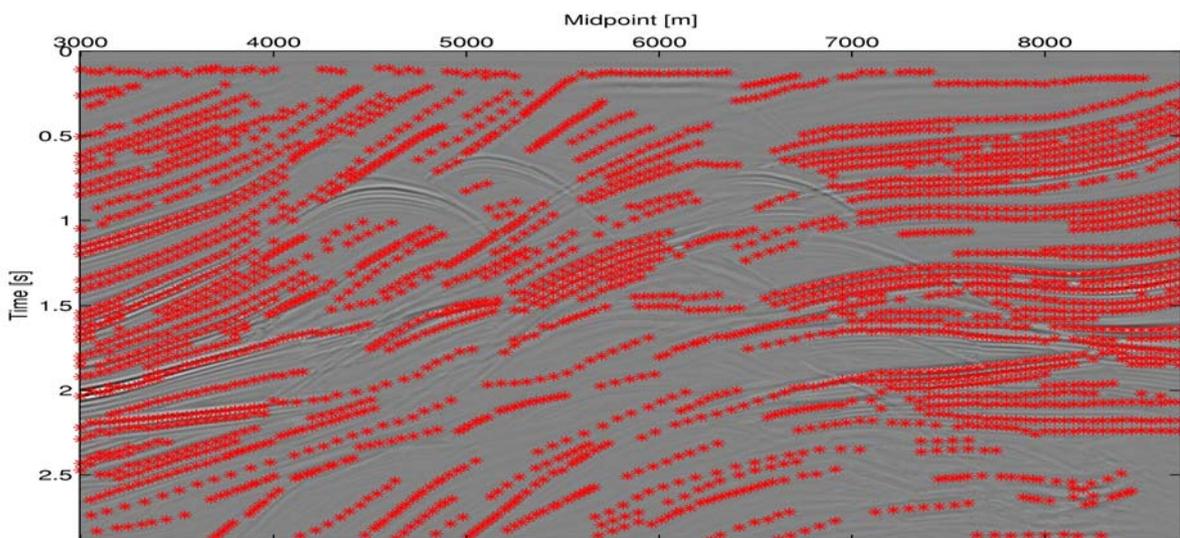


Figura 4.4: Resultado do *picking* interativo na seção AN dos dados Marmousi empilhada pelo método SRC. Marmousi.

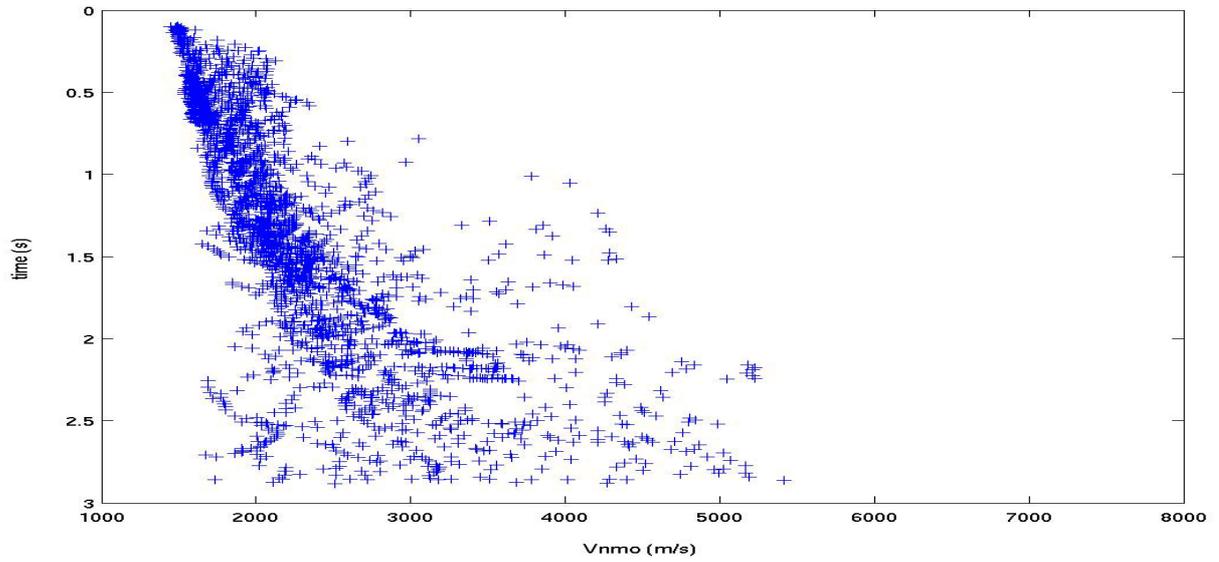


Figura 4.5: Velocidade NMO dos eventos marcados pelo *picking* interativo na seção AN dos dados Marmousi.

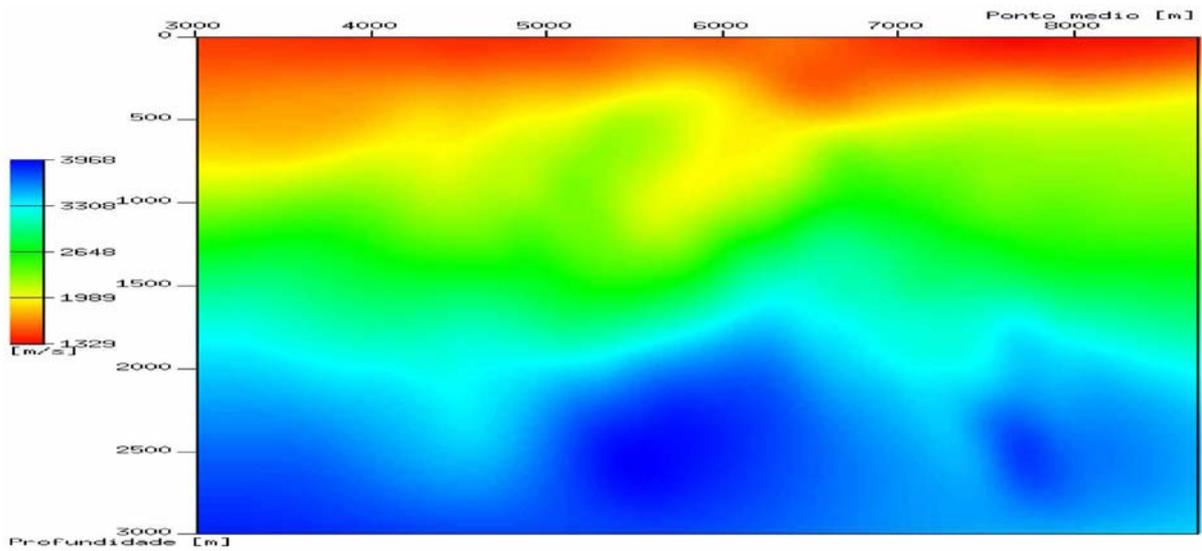


Figura 4.6: Modelo de velocidades obtido pela inversão dos dados resultantes do *picking* interativo na seção AN dos dados Marmousi

#### 4.4.2 Resultados dos dados da linha 50-RL-90

A Bacia do Tacutu mais especificamente a linha sísmica 50-RL-90 é o dado real que será usado para testar o programa de inversão tomográfica dos atributos da onda PIN para determinação do modelo de velocidades suavizado. Os detalhes destes dados são encontrados em 2.5.2 e os dados para a inversão em 2.5.2.1.

##### 4.4.2.1 *Picking* Automático/Inversão

A escolha dos pontos de reflexões primárias na seção AN da linha 50-RL-90 resultou em 4099 pontos (Figura 4.7). Os parâmetros usados para a escolha dos pontos foram:

<i>survel</i> =	- 1800m/s
<i>radius</i> =	- 200
<i>timewidth</i> =	- 0.04
<i>refx</i> =	- 0.0
<i>refy</i> =	- 0.0
<i>mincoher</i> =	- 0.05
<i>perc</i> =	- 0.5
<i>fraction</i> =	- 0.1
<i>maxpicks</i> =	- 100
<i>skip</i> =	- 3

Para a inversão tomográfica usando o programa *niptomo*, definimos um modelo inicial de velocidade com o valor de velocidade próxima à superfície de 1800 m/s e um gradiente vertical de  $0,25 \text{ s}^{-1}$ . De acordo com os parâmetros obrigatórios (seção 4.2), foi criada uma malha de  $n_x \times n_z = 77 \times 11 = 847$  nós, com um espaçamento horizontal constante de 500m e um espaçamento vertical constante de 350m. A malha está compreendida entre os limites de 12400m e 50400m na horizontal e vai de 0m até 3500m na vertical. Uma velocidade de 1800 m/s e um gradiente de  $0,25 \text{ s}^{-1}$ . O resultado da inversão está na Figura 4.9 e na figura 4.8 o gráfico da velocidade NMO de cada evento.

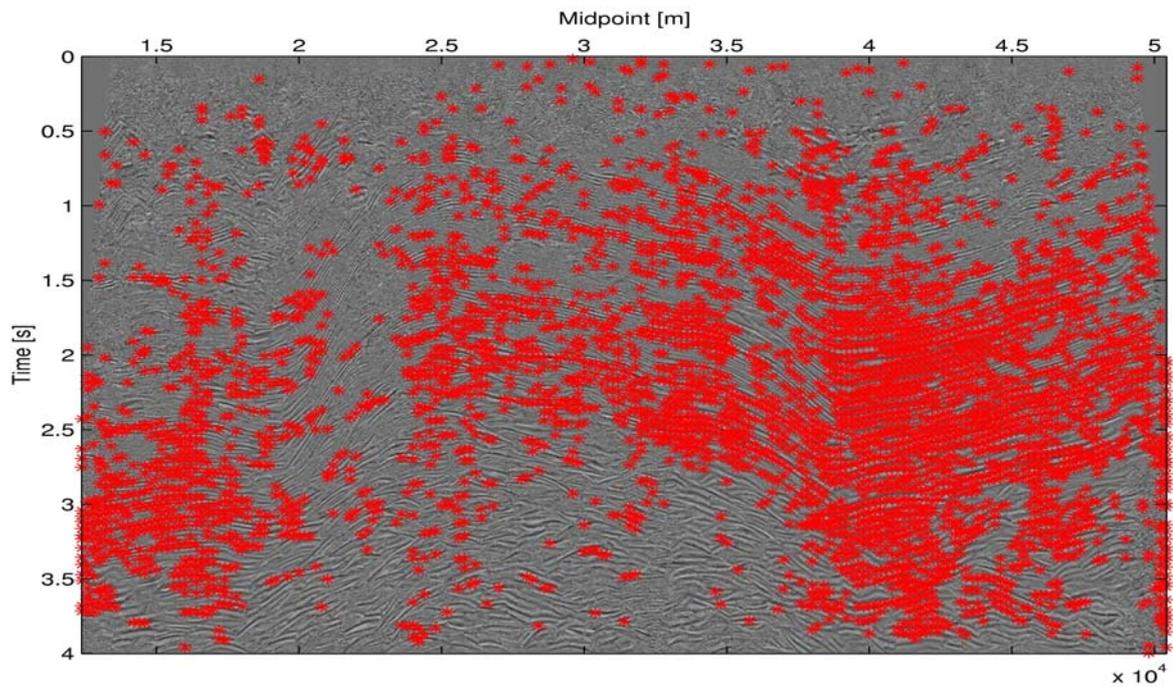


Figura 4.7: Resultado do *picking* automático na seção AN da linha 50-RL-90 empilhada pelo método SRC.

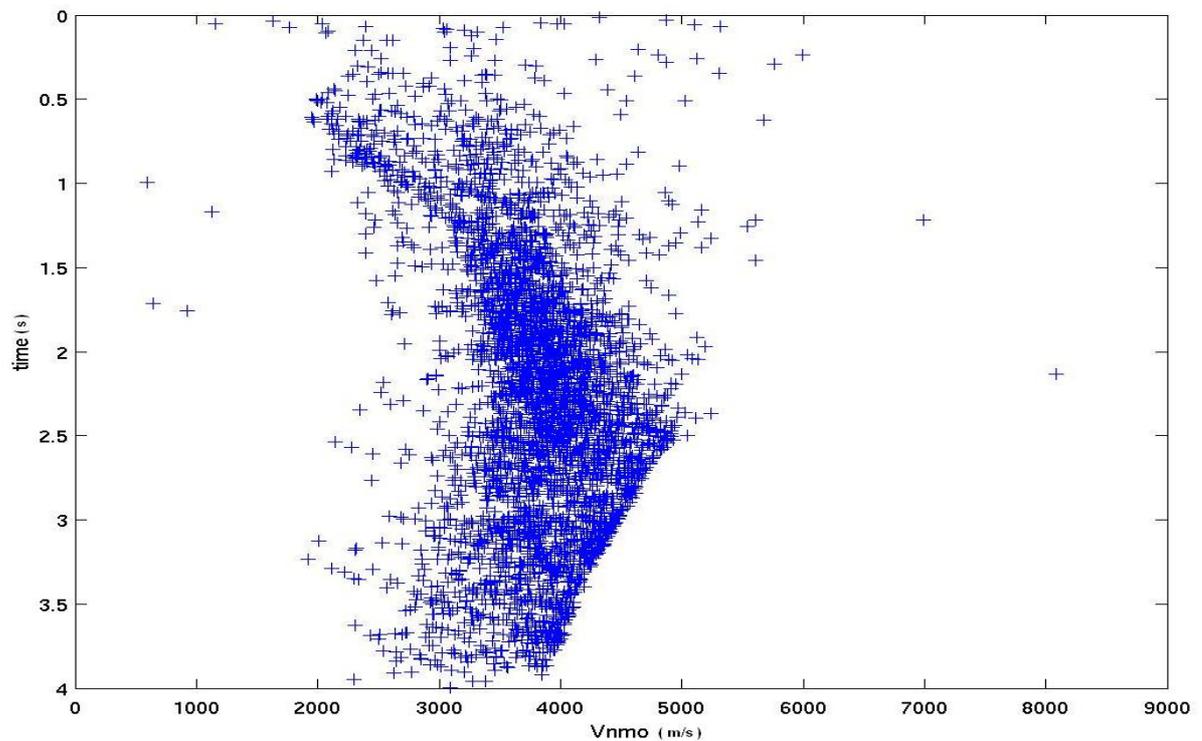


Figura 4.8: Velocidade NMO dos eventos marcados pelo *picking* automático na seção AN da linha 50-RL-90.

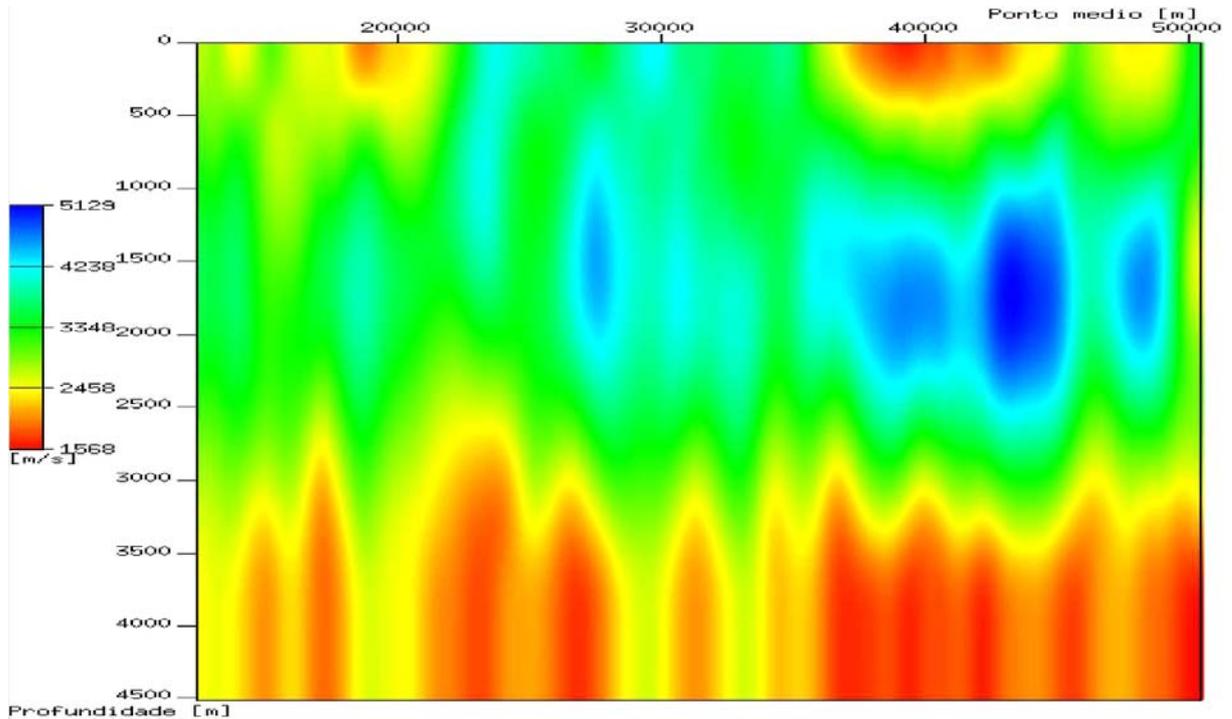


Figura 4.9: Modelo de velocidades obtido pela inversão dos dados resultantes do *picking* automático mostrado na Figura 4.7.

#### 4.4.2.2 *Picking* Interativo/Inversão

No processo de *picking* interativo, com ajuda do programa CRS-2D-ZO *Attributes Picking Tool*, foram editados os pontos escolhidos pelo programa de *picking* automático, onde foram alterados de forma significativa as posições ou localizações dos pontos marcados, obtendo-se dessa forma um total de 2274 pontos sobre eventos sísmicos identificados como reflexões primárias. O resultado do *picking* pode ser conferido na figura 4.10 e da velocidade NMO na figura 4.11. Os parâmetros utilizados para o cálculo dos dados de entrada para o programa de inversão foram os mesmos utilizados no *picking* automático.

Os parâmetros utilizados na inversão tomográfica dos pontos editados foram os mesmos da inversão tomográfica dos pontos feitos pelo *picking* automático e o resultado pode ser visto na Figura 4.12

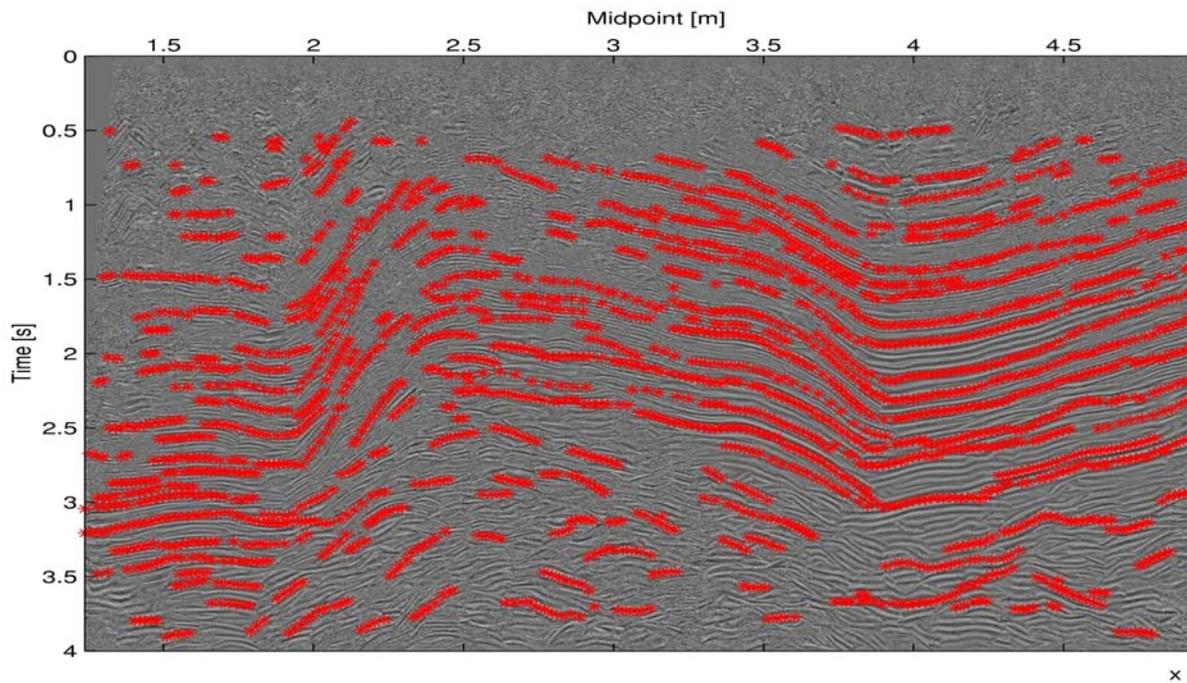


Figura 4.10: Resultado do *picking* interativo na seção AN da linha 50-RL-90 empilhada pelo método SRC.

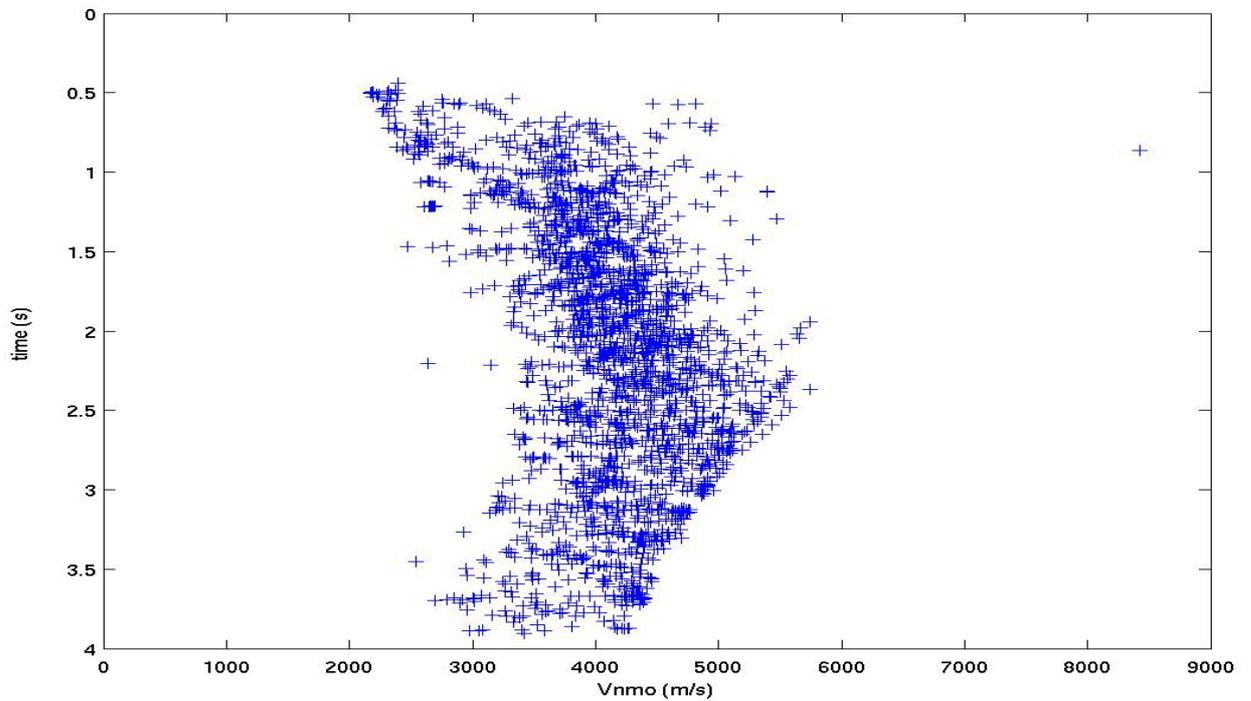


Figura 4.11: Velocidade NMO dos eventos marcados pelo *picking* interativo na seção AN da linha 50-RL-90.

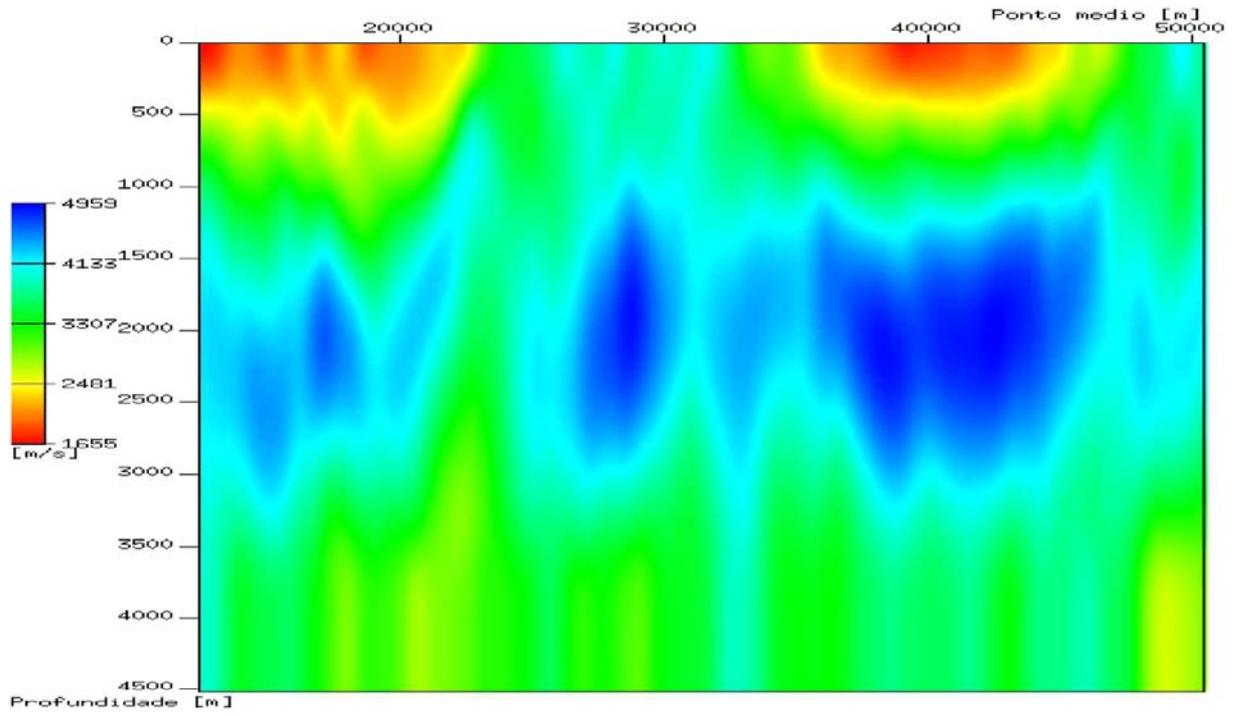


Figura 4.12: Modelo de velocidades obtido pela inversão dos dados resultantes do *picking* interativo mostrado na Figura 4.10.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No capítulo 4 foi aplicado nos dados sintéticos Marmousi e no dado real linha 50-RL-90 da Bacia do Tacutu o programa de inversão tomográfica baseado nos atributos cinemáticos do campo de onda da onda PIN. Os resultados mostrados no capítulo 4 foram os mais satisfatórios de uma série de testes. Esses testes foram feitos alterando-se os parâmetros do programa de inversão como intervalo de malha e gradiente vertical de velocidade. No presente capítulo será discutido os aspectos práticos do novo método de inversão.

### 5.1 *PICKING* AUTOMÁTICO

O programa de *picking* automático é realizado sobre a seção afastamento nulo AN auxiliado pela seção de coerência onde tenta localizar os eventos de reflexões primárias. Porém, o programa sempre escolhe eventos com valores de coerência acima de um certo limite predefinido e conseqüentemente eventos de reflexões, múltiplas e difrações acabam sendo selecionados (DUVENECK, 2004b), pois estes eventos geralmente apresentam valores relativamente elevados de coerência. A única maneira de se eliminar estes eventos que prejudicaram posteriormente a inversão é através da edição dos pontos escolhidos automaticamente. Neste trabalho usamos o programa *Picking Tool* para fazer esta edição.

Um dos parâmetros do *picking* automático *skip* é importante para que não tenhamos muitos pontos próximos um dos outros, pois indica a quantidade de traços sísmicos que não devem ser usados para a escolha dos eventos de reflexão entre um traço e outro usado. O parâmetro *skip* ajuda os parâmetros *radius* (distância mínima entre dois pontos escolhidos) e *timewidth* (intervalo de tempo mínimo entre dois pontos escolhidos) a melhorar a distribuição dos pontos na seção AN. Valores elevados para o parâmetro *fraction* (0-1) fazem com que o programa pegue poucos pontos, com o valor 0,8 obtêm-se 44 pontos apenas e com 0,1 obtêm-se 2.863, pois o parâmetro *fraction* é a porcentagem mínima de amostra necessária dentro de uma janela para validar um *picking*.

O valor de coerência mínima não deve ter valores elevados, pois pontos de baixa coerência ainda podem ser confiáveis, dependendo apenas da interpretação do usuário (informação a priori) na hora da edição dos pontos escolhidos (capítulos 4.4.1.2 e 5.2).

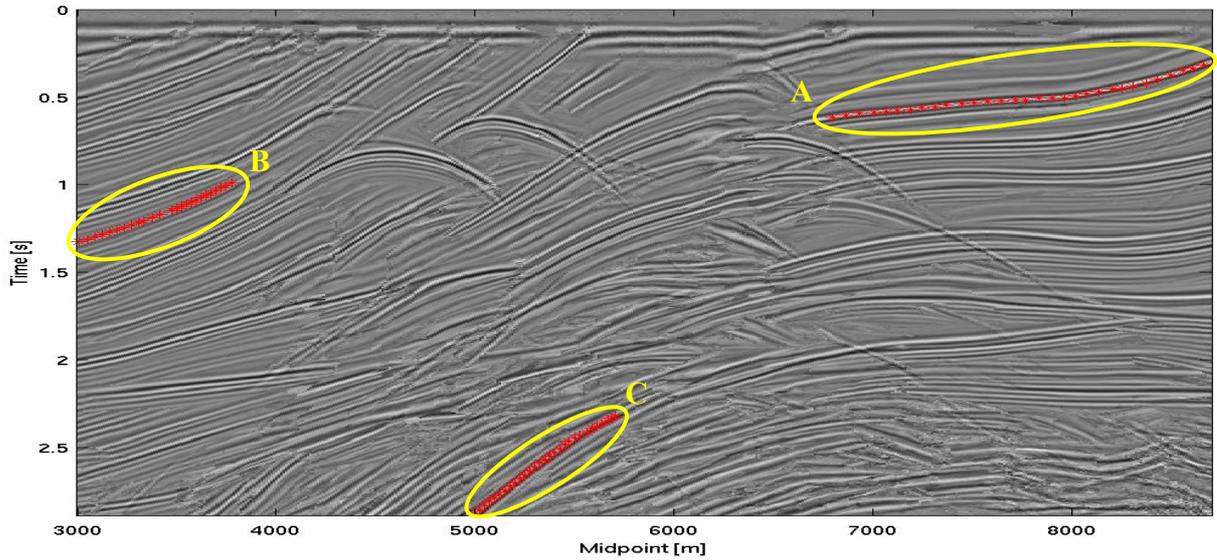


Figura 5.1: Pontos de alta (área A), média (área B) e baixa (área C) coerência.

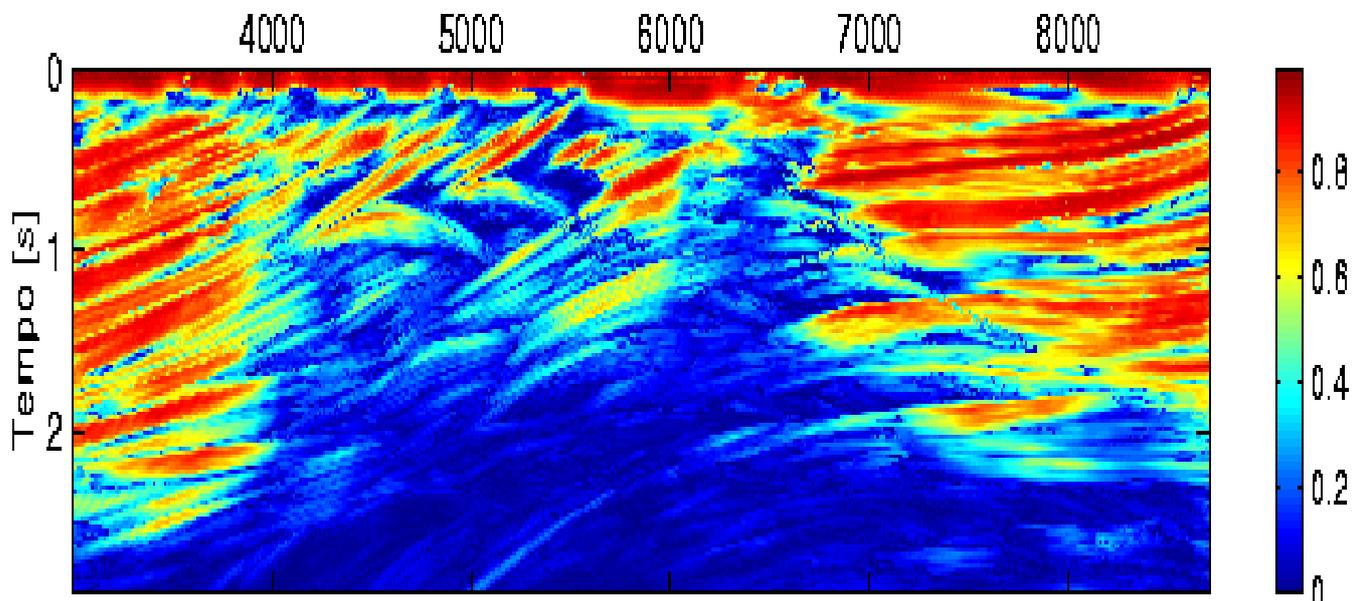


Figura 5.1a: Seção de coerência (*semblance*).

## 5.2 COERÊNCIA

É importante que os pontos de reflexão escolhidos pelo programa *picking* automático ou pelo programa *Picking Tool* tenham alta coerência, porém pontos com baixa coerência podem servir para o processo de inversão, pois alguns deles possuem valores coerentes para o ângulo de emergência ( $\beta$ ), raio de curvatura ( $R_{PIN}$ ) e conseqüentemente para o  $M_{PIN}$ . Os pontos com baixa coerência que possuem bons valores para a inversão dependem muito da interpretação do usuário sobre os eventos de reflexão, pois não é qualquer ponto de baixa coerência que possuirá bons valores de  $\beta$ ,  $R_{PIN}$  e  $M_{PIN}$  para o processo de inversão, estes pontos podem ser considerados como informações a priori no processo de inversão.

Na figura 5.1 temos pontos de alta, média e baixa coerência identificados pelas áreas A, B e C, respectivamente, e com coerências aproximadamente 0,99, 0,55 e 0,20, respectivamente. Os valores de  $\beta$ ,  $R_{PIN}$  e  $M_{PIN}$  para cada ponto podem ser vistos na figura 5.2 para os pontos de alta coerência (área A), na figura 5.3 para os pontos de média coerência (área B) e na figura 5.4 para os pontos de baixa coerência (área C). Os valores de  $\beta$ ,  $R_{PIN}$  e  $M_{PIN}$  para os pontos de alta coerência demonstram pouca flutuação nos atributos cinemáticos do campo de onda o que permite um melhor desempenho do processo de inversão, pois os atributos cinemáticos do campo devem variar suavemente ao longo dos eventos de reflexão (DUVENECK, 2004a). Os eventos de reflexões com valores médios (0,55 aproximadamente, área B) de coerência possuem bons valores para os atributos cinemáticos do campo de onda a fim de serem usados no processo de inversão. A figura 5.3 mostra que não existem grandes variações nos valores dos atributos cinemáticos dos eventos com coerência média. Os eventos de reflexão com baixa coerência (0,22 aproximadamente, área C) possuem pequenas flutuações nos valores dos atributos cinemáticos do campo de onda, mas ainda assim é possível utilizar os atributos cinemáticos para a inversão tomográfica. Eventos de baixa coerência devem ser escolhidos através da interpretação do usuário.

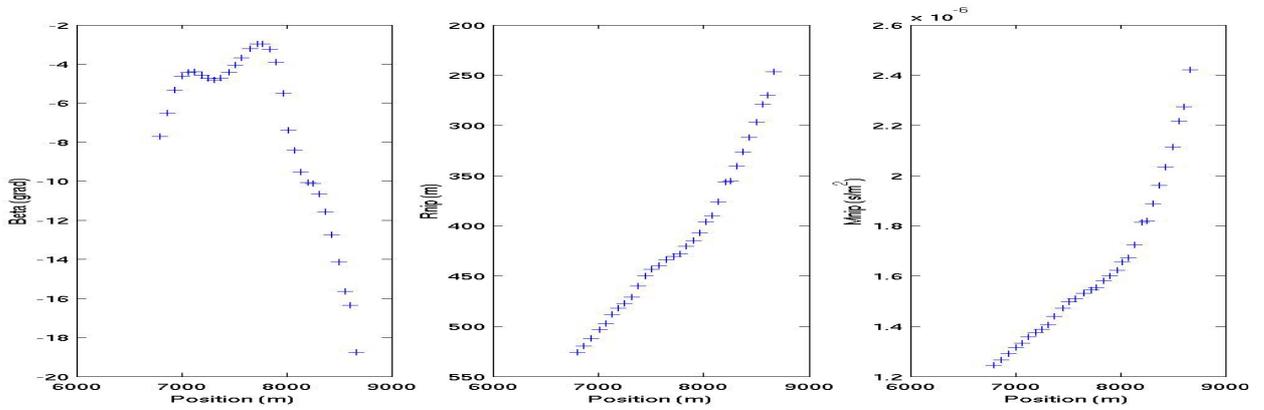


Figura 5.2: Valores do ângulo de emergência  $\beta$ , do raio de curvatura  $R_{PIN}$ , e de  $M_{PIN}$  dos pontos com alta coerência (região A).

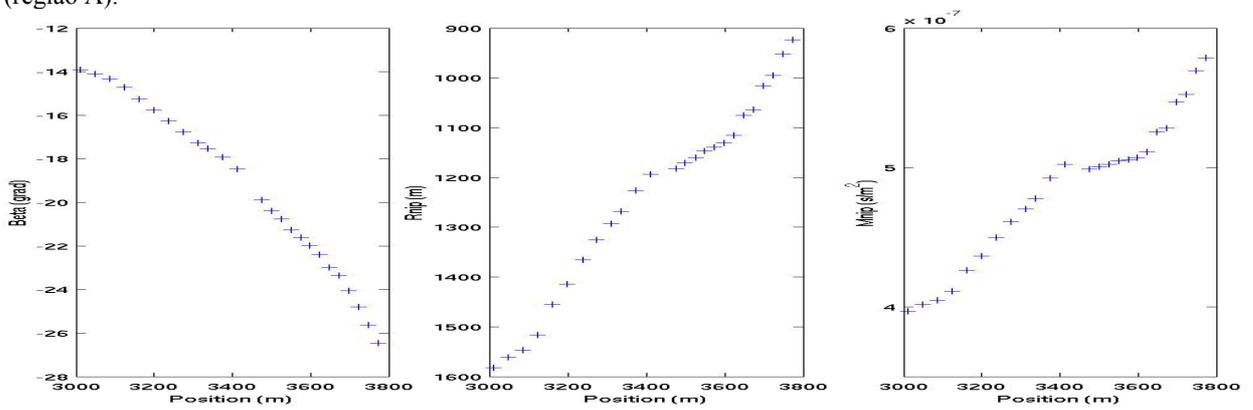


Figura 5.3: Valores do ângulo de emergência  $\beta$ , do raio de curvatura  $R_{PIN}$ , e de  $M_{PIN}$  dos pontos com média coerência (região B).

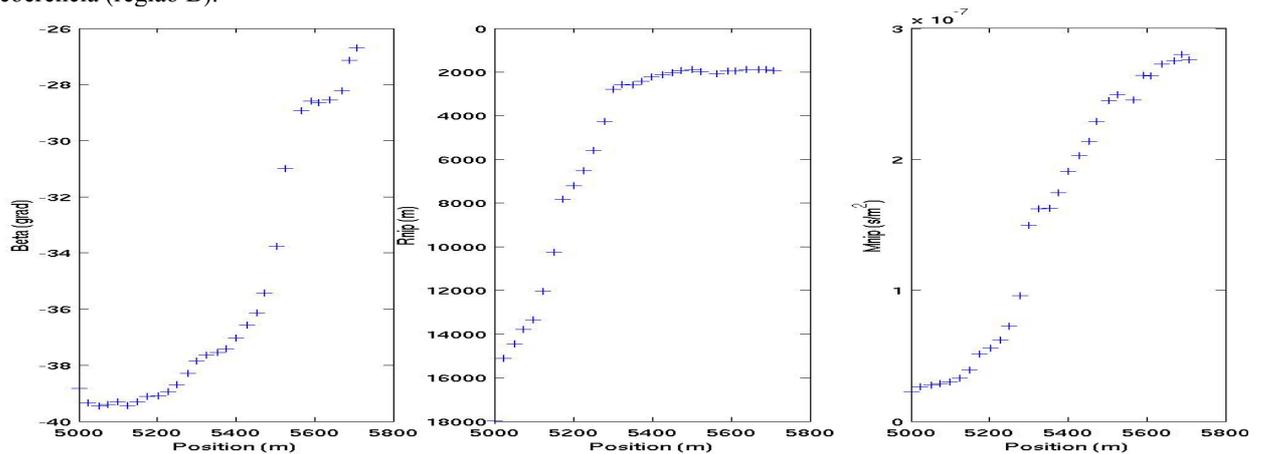


Figura 5.4: Valores do ângulo de emergência  $\beta$ , do raio de curvatura  $R_{PIN}$ , e de  $M_{PIN}$  dos pontos com baixa coerência (região C).

### 5.3 INVERSÃO

Para uma boa inversão dos dados é necessário um intervalo médio para a malha. Um intervalo grande para a malha com espaçamentos horizontal e vertical iguais a 1.000m, resultará num modelo de velocidade horizontalizado. Um intervalo pequeno para a malha com espaçamentos iguais 20m na direção horizontal e 20m na direção vertical resultará em um modelo de velocidade horizontalizado, porém com pequenas ondulações. O intervalo médio para a malha com espaçamentos horizontais e verticais de 200m foi o que teve melhor desempenho na inversão dos dados Marmousi e o intervalo na direção horizontal de 500m com um intervalo na direção vertical de 350m para os dados da Bacia do Tacutu, pois obteve-se com mais de 8 iterações um modelo de velocidade que não fosse totalmente horizontalizado.

A variável *grad* responsável pelo gradiente de velocidade vertical deve possuir um valor adequado a fim de que o modelo de velocidade inicial, definido pelos coeficientes *B-splines*, seja razoável para cada camada em profundidade. Valores elevados para os parâmetros *grad* e  $v_0$  (velocidade próxima à superfície) não somente afastam o modelo de velocidade de um valor aceitável para cada evento em profundidade como também podem provocar instabilidade no processo de inversão.

Os valores dos pesos de regularização *epsilon<sub>xx</sub>* e *epsilon<sub>zz</sub>* da minimização da segunda derivada da velocidade devem ser encontrados interativamente. Escolhas diferentes para estes pesos provocam suavidades diferentes no modelo final de velocidade. Valores elevados para os *epsilon<sub>s</sub>* forçam o modelo de velocidade ser muito suave e valores muito pequenos provocam uma instabilidade no processo de inversão. O melhor valor encontrado para este trabalho foi 0,005.

Fixando a velocidade em toda a superfície através da informação a priori (*input.dat*) se obteve um melhor resultado, pois se evitou flutuações de velocidade na parte mais rasa do modelo.

O valor 1 para o parâmetro *sigvq* ( $\sigma_{vq}$ , capítulo 3.2.1) mostrou-se eficiente, pois esta informação a priori reduz a ambigüidade do problema inverso gerando um resultado com maior número de iterações. Para os parâmetros *sigT* ( $\sigma_\tau$ ), *sigxi* ( $\sigma_\xi$ ), *sigM* ( $\sigma_M$ ) o valor deve ser 1 e para *sigp* ( $\sigma_p$ ) o valor deve ser 2 para balancear as diferenças entre as dimensões dos dados envolvidos. O valor 0 (zero) ou valores muito distantes dos valores mencionados acima para estes

parâmetros, fazem com que o programa retorne o valor infinito para a função custo e conseqüentemente não conclui a inversão.

Os arquivos *epsilonxxmodel* e *epsilonzzmodel* que possuem os pesos da variação espacial dos coeficientes *B-spline* devem ter o valor 1 (atribuído pelo programa), pois valores maiores (máximo 100) tendem a horizontalizar o resultado da inversão.

#### 5.4 MIGRAÇÃO

A migração pós empilhamento em profundidade usada neste trabalho foi a migração *Kirchoff*. Todas as migrações relativas aos dados Marmousi e Tacutu foram realizadas na seção AN empilhada pelo método de empilhamento SRC-2D (capítulo 2). A figura 5.5 mostra a migração feita nos dados Marmousi utilizando-se o modelo de velocidade verdadeiro suavizado. As figuras 5.6 e 5.7 mostram a migração dos dados Marmousi com os modelos de velocidades obtidos da inversão dos dados do *picking* automático e interativo respectivamente.

Observa-se que as posições dos refletores na figura 5.7 estão mais próximas à posição obtida com o modelo de velocidade verdadeiro suavizado figura 5.5 (refletores na posição 1.000m e 2.500m), também se percebe que estes eventos estão mais horizontalizados na figura 5.7 do que na figura 5.6 se aproximando mais da figura 5.5 que foi obtida pelo modelo de velocidade verdadeiro suavizado. Na área A da figura 5.6, observa-se um forte refletor inclinado o que não existe no modelo verdadeiro.

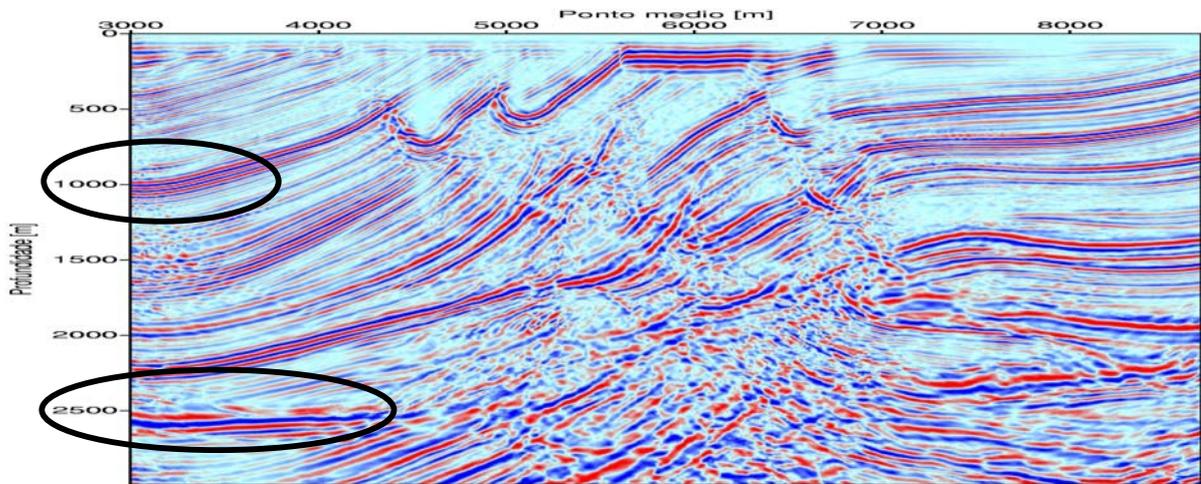


Figura 5.5: Migração pós empilhamento em profundidade da seção AN do modelo Marmousi utilizando o modelo verdadeiro de velocidades suavizado.

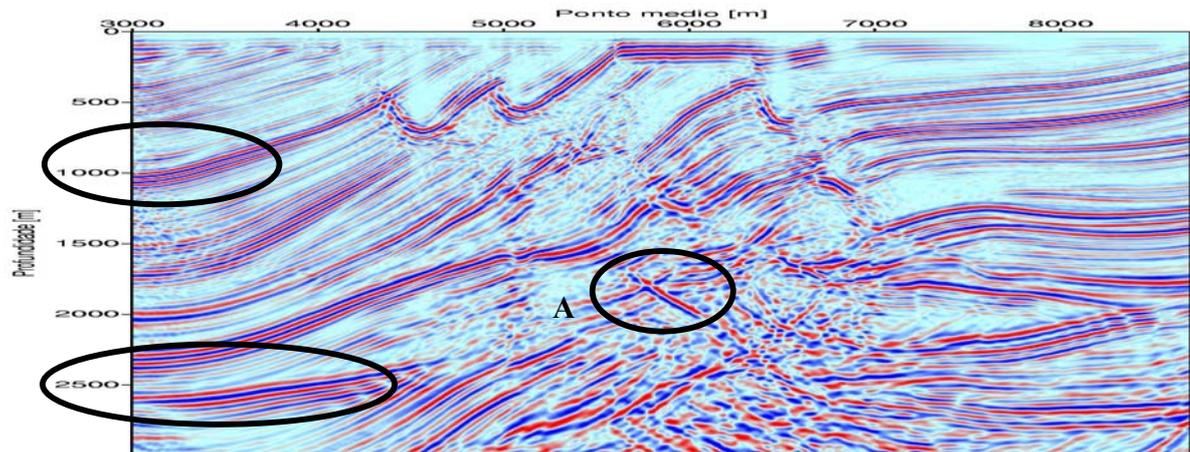


Figura 5.6: Migração pós empilhamento em profundidade da seção AN do modelo Marmousi utilizando o modelo de velocidades resultante do *picking* automático.

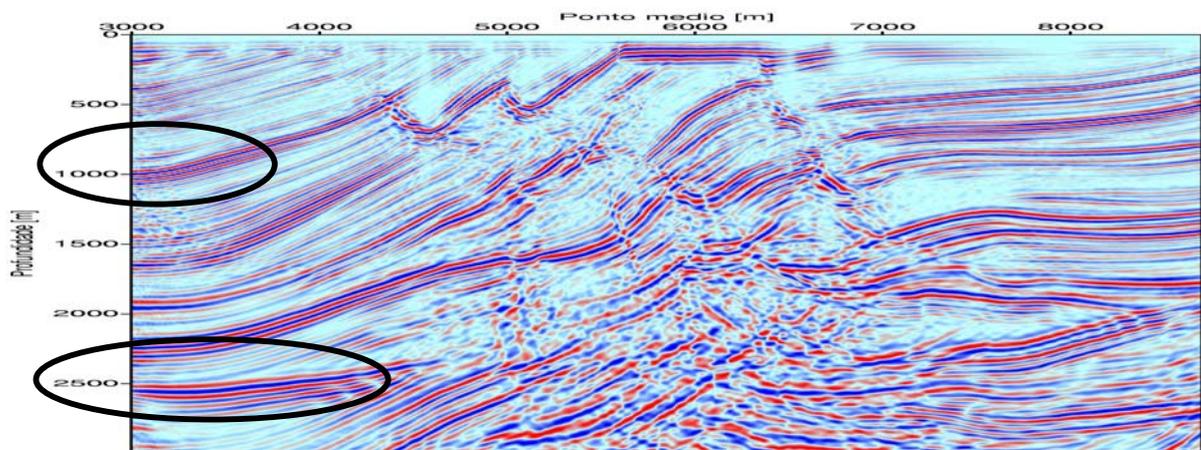


Figura 5.7: Migração pós empilhamento em profundidade da seção AN do modelo Marmousi utilizando o modelo de velocidades resultante do *picking* editado.

A figura 5.8 mostra o resultado da migração da seção AN empilhada pelo método SRC-2D a partir dos dados da linha 50-RL-90 da Bacia do Tacutu com o modelo de velocidade obtido da inversão dos dados resultantes do *picking* automático. A falta de uma edição do *picking* dos eventos de reflexão em profundidade provocou a perda da imagem a partir de 5.500m na figura 5.8. Este fato acontece porque o modelo de velocidades obtido pela inversão não é representativo, tendo-se velocidades muito elevadas. A figura 5.9 mostra a migração *Kirchoff* com os dados feitos pelo *picking* interativo. Diferente do *picking* automático, a migração feita com os dados do *picking* interativo (figura 5.9) mostra toda região abaixo de 5.500m, isto é devido ao modelo de velocidade resultante da inversão dos dados obtidos pelo *picking* interativo possuir valores mais satisfatórios nestas profundidades. Em ambos os resultados da migração pós empilhamento dos dados Tacutu (Figuras 5.8 e 5.9), algumas áreas como por exemplo na região A entre 21.000m e 24.000m, não se teve boa recuperação de imagem, pois não houve boa cobertura de pontos nesta região (ver figuras 4.7 e 4.10) devido ao baixo nível de coerência e a impossibilidade de visualizar refletores através de interpretação. Os refletores na região B estão melhor definidos na figura 5.9, pois o *picking* editado desta região propiciou uma melhor inversão tomográfica.

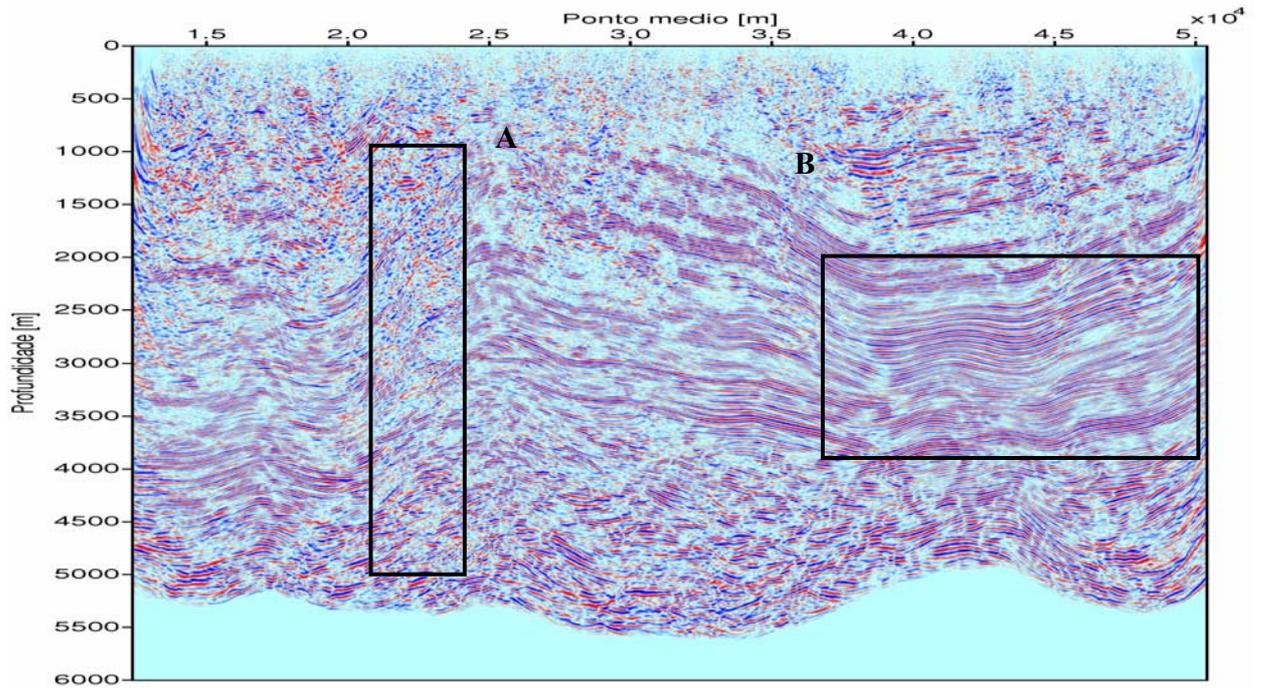


Figura 5.8: Migração pós empilhamento em profundidade da seção AN dos dados Tacutu utilizando o modelo de velocidades resultante do *picking* automático.

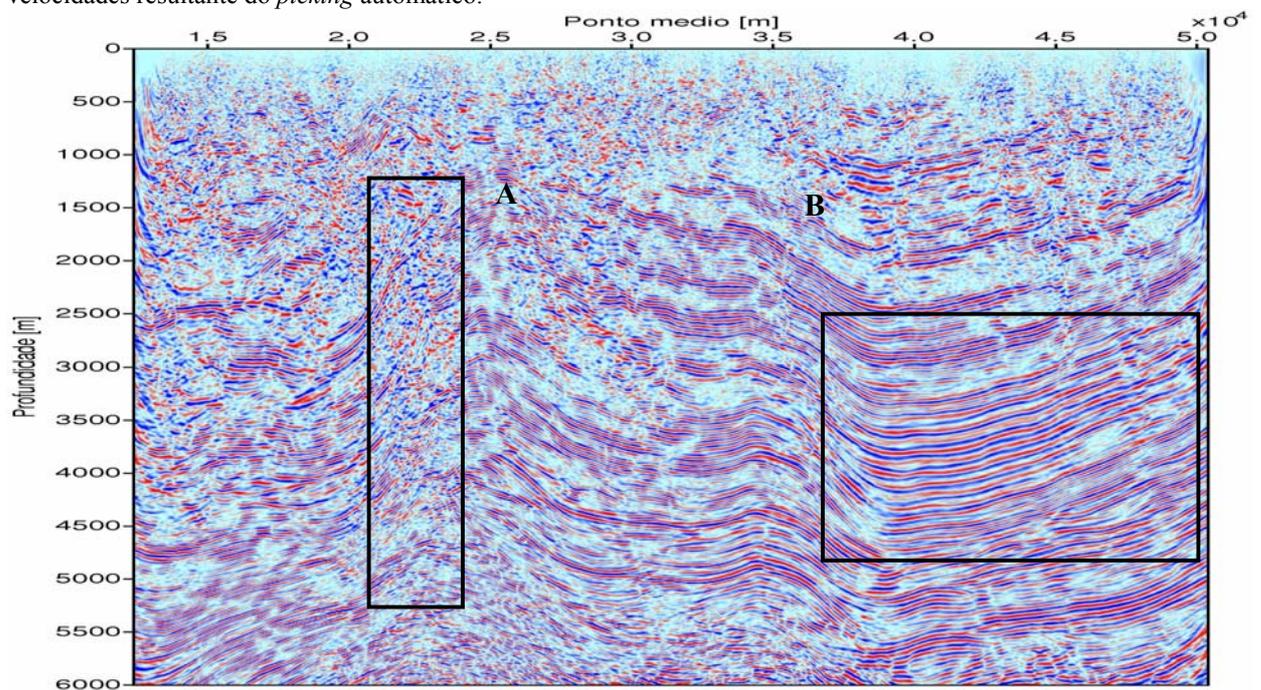


Figura 5.9: Migração pós empilhamento em profundidade da seção AN dos dados Tacutu utilizando o modelo de velocidades resultante do *picking* editado.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, por meio da aplicação em dados sintéticos e reais, foi analisado o programa *Niptomo* que é uma implementação numérica do novo método de inversão tomográfica dos atributos cinemáticos da onda PIN desenvolvido por Duveneck (2004a). Para melhor entendimento dos dados a serem utilizados na inversão, foi apresentada uma revisão dos aspectos teóricos do método de empilhamento SRC. Também com o mesmo propósito é apresentada uma revisão dos aspectos teóricos do novo método de determinação do modelo de velocidades por inversão tomográfica dos atributos da onda PIN.

Para se obter os parâmetros de inversão a serem usado pelo programa *Niptomo*, a escolha de pontos na seção AN resultante do empilhamento SRC, é realizada com o programa de *picking* automático denominado *Kinautopick-2D* (KLÜVER; MANN, 2005). Este programa não permite ajustes posteriores sobre os pontos já escolhidos, e na tentativa de evitar ou acrescentar pontos em determinadas regiões da seção AN, o programa altera a distribuição dos pontos em toda a seção AN de forma não conveniente para a inversão tomográfica.

Para analisar a influência do processo de *picking* na determinação do modelo de velocidades pelo método de inversão tomográfica dos atributos da onda PIN, foi construído, durante a realização deste trabalho, um programa de *picking* interativo denominado *ZO-2D-CRS Attributes Picking Tool*. Este programa permite um controle total sobre cada ponto escolhido na seção AN e também permite editar os pontos escolhidos pelo programa *Kinautopick-2D*.

A aplicação dos processos de *picking* automático e interativo e posteriormente da inversão tomográfica nos dados sintéticos Marmousi e nos dados reais da Bacia do Tacutu, mostra que os modelos de velocidades determinados a partir dos parâmetros de inversão fornecidos pelo programa de *picking* interativo são consideravelmente melhores que os obtidos com o *picking* automático. Portanto, esses resultados mostram a importância crucial de um *picking* adequadamente realizado, pois o mesmo pode comprometer toda a inversão.

Considera-se o programa de *picking* interativo uma ferramenta útil para o processo de *picking* que é uma etapa crucial na inversão tomográfica. Esse programa interativo foi construído no ambiente *Linux* e utilizando a linguagem de programação e recursos gráficos do *Matlab*. A entrada de dados sísmicos é em formato SU (*Seismic Unix*) o que permite a sua aplicação direta

nos dados provenientes do processamento SRC. Para facilitar o uso desse programa é fornecido um manual completo no apêndice A deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- BILLETTE, F.; LAMBARÉ, G. Velocity macro-model estimation from seismic reflection data by stereotomography. *Geophys. J. Int.*, v. 135, p. 671-690, 1998.
- BOURGEOIS, A.; BOUGET, M.; LAILLY, P.; POULET, M.; RICARTE, P.; VERSTEEG, R. Marmousi, Model and Data. In: EAEG MEETING, 52., Copenhagen. *Proceedings of the on Practical Aspects of Seismic Data Inversion*. Copenhagen:[s.n.], 1991. p. 56.
- DUVENECK, E.. Tomographic velocity model inversion with CRS attributes: *Annual WIT. report*. p. 92-106, 2002.
- 3D tomographic velocity model estimation with CRS attributes: *Annual WIT. report*. p. 116-127, 2003.
- *Tomographic determination of seismic velocity models with kinematic wavefield attributes*. 2004. 181. Dissertation (Máster) - University of Karlsruhe, Germany, 2004.
- Velocity model estimation with data-derived wavefront attributes. *Geophysics*, V69, p.265-274, 2004b.
- 3D tomografia velocity model estimation with kinematic wavefield attributes. *Geophysics Prospecting*. V52, p.535-545, 2004c.
- DUVENECK, E.; KLÜVER, T.; MANN, J.. Tomographic velocity model estimation with data-derived first and second travelttime derivatives. In: INTERNATIONAL CONGRESS O THE SBGf , 8, 2003, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBGf, 2003. 1 CD-ROM.
- EIRAS, J. F.; KINOSHITA, E. M. Geology and petroleum perspectives of the takutu basin. In: RAJA GABAGLIA, G. P.; MILANI, E. J. *Origen and evolution of sedimentary basins*. [S. l.: s.n.], 1990. p. 97-220.
- GARABITO CALLAPINO, G. *Empilhamento de superfícies de reflexão comum: uma nova seqüência de processamento usando otimização global e local*. 2001. 66f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2001.
- GILL, P. E.; MURRAY, W.; WRIGHT, M. H.. *Practical Optimization*. [S.l.]:Academic Press, 1981.
- HUBRAL, P. H. W. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogenous earth. *Geophysics*, V.48, p.1051-1062, 1983.
- JÄGER, R.; MANN, J.; HÖCHT, G.; HUBRAL, P. Common reflection surface stack: Image and attributes. *Geophysics*, V.66, p.97-109, 2001.

- KIRKPATRICK, S.; GELATT, C.; VECCHI, M. Optimization by simulated annealing. *Science*, V.220, p.671–680, 1983.
- KLÜVER, T. Tomographic velocity model estimation using finite-offset kinematic wavefield attributes: *Annual WIT. report*. p. 128-139, 2003.
- KLÜVER, T.; MANN, J. Smoothing and automated picking of kinematic wavefield attributes. In: INTERNATIONAL CONGRESS O THE SBGf , 9, 2005, Salvador. *Anais...* Salvador: SBGf, 2005. 1 CD-ROM.
- MANN, J.; JÄGER, R.; MÜLLER, T.; HÖCHT, G.; HUBRAL, P. Common reflection surface stack – a real data example. *Journal of Applied Geophysics*, V.42, p.283-300, 1999.
- PAIGE, C. C.; SAUNDERS, M. A. Algorithm 583 - LSQR: Sparse linear equations and least squares problems. *ACM Trans. Math. Softw.*, v.8, n.2, p.195-209, 1982a.
- PAIGE, C. C.; SAUNDERS, M. A. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Trans. Math. Softw.*, v.8, n.1, p.43-71, 1982b..
- SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. Parabolic and hyperbolic paraxial twopoint traveltimes in 3D media. *Geophysical Prospecting*, V.41(n.4), p.495–514, 1993.
- SEN, M.; STOFFA, P. L. *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*. Amsterdam: Elsevier, 1995.
- SILVA, M. G. *Processamento de dados sísmicos da bacia do Tacutu*. 2004. Dissertação (Mestrado em geofísica) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.
- TARANTOLA, A. *Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*. Amsterdam: Elsevier, 1987.
- TYGEL, M.; MÜLLER, T.; HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J., Eigenwave based multiparameter travelttime expansions. In: SEG MEETING, 67., Dallas, 1997. *Expanded Abstracts*, p.1770–1773.
- GOMES, W., *Estudo do Método de Empilhamento SRC e Aplicação em Dados Sintéticos e Reais*. 2005. Dissertação (Mestrado em geofísica). Centro de Geociência, Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A

### Manual do Programa *Picking Tool*

Devido ao programa *Picking* Automático (veja cap.4) não nos possibilitar maior controle sobre os pontos escolhidos e não permitir a visualização dos pontos, foi necessária a criação de um programa com interface gráfica que possibilitasse a escolha dos pontos de reflexão primária pelo usuário, diretamente na seção afastamento nulo (AN).

O programa *Picking Tool* (figura A1), gerado no Matlab-6.0 dentro do ambiente Linux-Fedora, foi desenvolvido para trabalhar com os mesmos arquivos de entrada do Programa *Autopicking*, ou seja, os dados de entrada devem estar no formato SU. Porém, os dados de saída estão no formato ASCII. A interface gráfica do Programa *Picking Tool* foi criada através do ambiente de desenvolvimento gráfico de relação com usuário (GUIDE - *Graphical User Interface Development Environment*) do Matlab-6.0. Neste ambiente, é possível criar todos os componentes necessários para uma maior interação entre o usuário e o programa, como: botões, campos de textos e outras ferramentas para criar uma interface agradável e de fácil manuseio pelo usuário.

O programa inicia com a leitura dos dados da seção AN coletando várias informações como: número de traços, espaçamento do ponto médio, tempo de amostragem e outros. Logo em seguida é exibida a janela com a seção AN. A escolha dos pontos pelo usuário está condicionada à janela de tempo *time width* e a janela de espaço *radius* onde os valores são fornecidos pelo usuário ou automaticamente pelo programa para que não se tenha pontos muito próximos uns dos outros. Quando o usuário escolhe um ponto, o programa verifica se este ponto não está próximo dos pontos escolhidos anteriormente para poder aceitá-lo. No momento de calcular os atributos cinemáticos do campo de onda que serão usados posteriormente na inversão tomográfica, o programa só aceitará os pontos que estiverem acima ou igual à coerência exigida pelo usuário, *coherency threshold*. Os pontos descartados são excluídos da seção AN. Ao salvar os dados, o programa também salva os parâmetros utilizados em um arquivo com o mesmo nome do arquivo de dados, porém com a extensão “.ppt”. O programa é de fácil manuseio, o usuário deve se preocupar basicamente com as unidades dos dados de entrada, pois os mesmos podem possuir

diferentes unidades, como por exemplo, para o comprimento (km, m, ...) e para o ângulo (radiano ou grau ). Uma seqüência segura para se fazer um bom *picking* é mostrado logo a seguir.

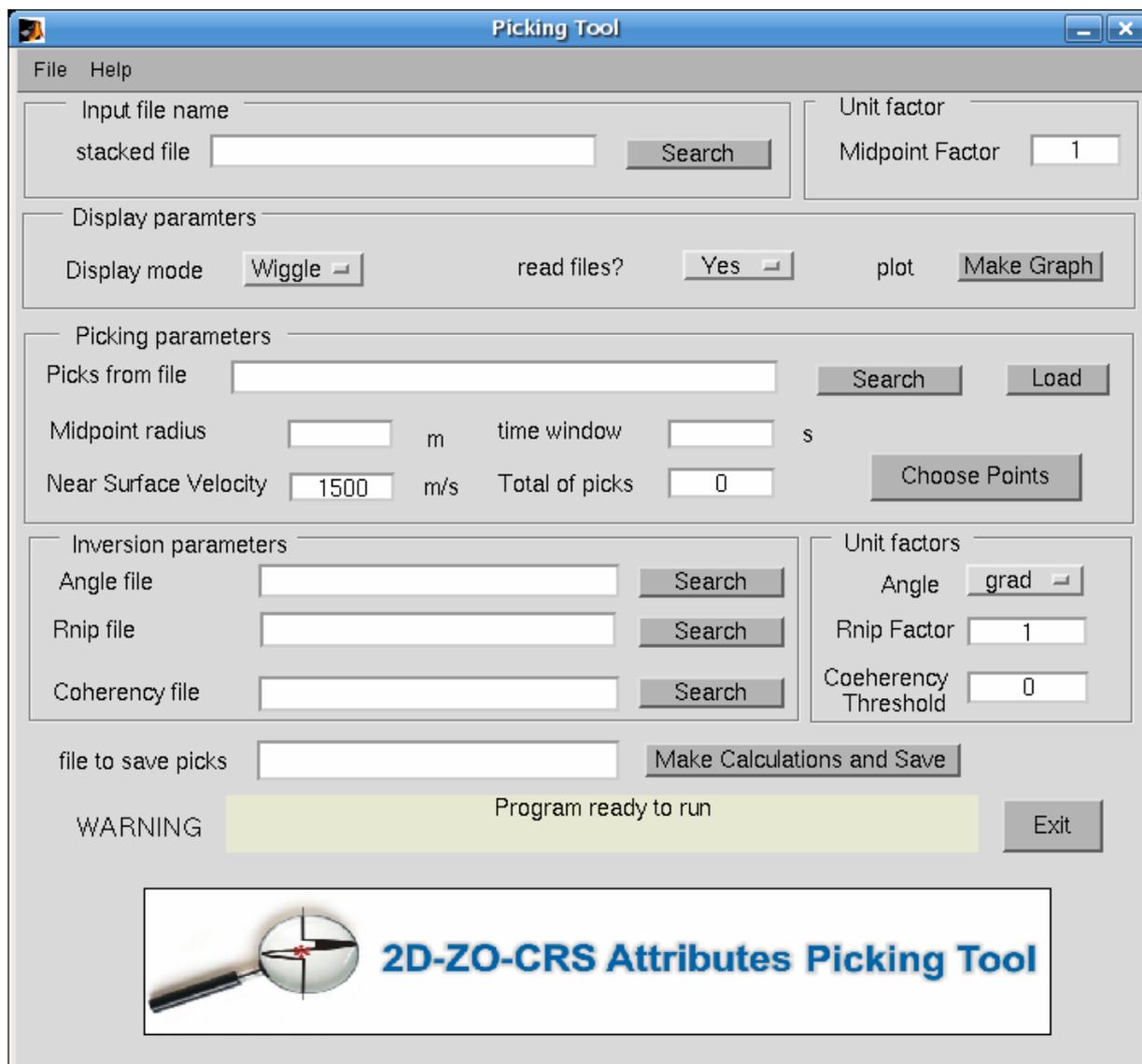
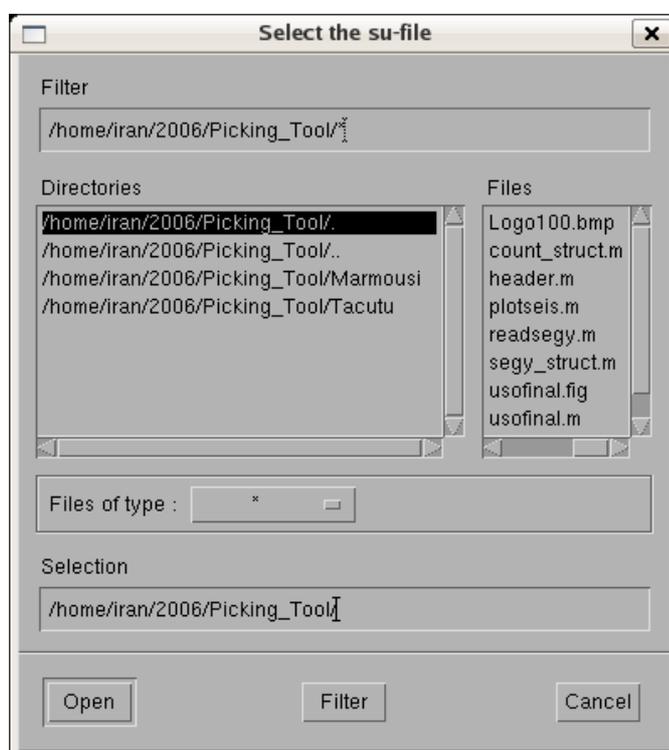


Figura A1: Display do Programa *Picking Tool*.

1º passo: Escrever o nome do arquivo que contém a seção empilhada afastamento nulo (AN) obtida pelo método SRC no espaço indicado por *stacked file*. Este arquivo deve estar no formato SU e no diretório onde o Programa *Picking Tool* foi aberto ou procurar o arquivo através do botão *Search*.



A janela *Search* informa inicialmente em *Filter* o diretório atual e logo abaixo nas janelas inferiores esquerda (*Directories*) e direita (*Files*) as pastas e os arquivos contidos no atual diretório respectivamente. O usuário clicando duas vezes no diretório que finaliza com “/.” atualizará as informações contidas no diretório atual e duas vezes no diretório que finaliza com “/..” recuará para o diretório anterior. Para exibir o conteúdo de um determinado diretório basta o usuário clicar duas vezes no mesmo e depois de escolher o arquivo é só clicar em *Open*.



2º passo: Escolher o tipo de gráfico da seção empilhada. Em *Display mode* deve-se escolher entre *Wiggle* (formato dos traços sísmicos) ou *Image* ( formato de imagem ) e depois clicar no botão *Make Graph* e esperar que o programa leia os dados e mostre a seção empilhada no tipo de gráfico escolhido.



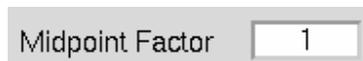
3º passo: Antes da escolha dos pontos é importante escolher um certo limite (janela) onde não se poderá escolher pontos um perto do outro. Na janela *Picking parameters* deve-se digitar ao lado de *time window* o tempo mínimo entre dois pontos próximos, caso não seja digitado nenhum valor o programa escolherá o valor 5 vezes maior que o valor do tempo de amostragem. Ao lado de *Midpoint radius* deve-se digitar a distância mínima horizontal entre os pontos e novamente, caso não seja informado este valor, o programa atribuirá o dobro do espaçamento do ponto médio.



Midpoint radius  m      time window  s

4º passo: Nesta etapa o usuário tem duas opções:

4.1 Começar um novo *picking* clicando no botão *Choose Points*. Assim o programa abrirá a janela que contém a seção empilhada onde você poderá marcar os pontos desejados. É importante que antes de clicar neste botão o usuário já tenha selecionado/aumentado a área onde deseja marcar os pontos, pois vai ser mais fácil escolher os pontos com maior amplitude correspondentes aos eventos de reflexões. Outro detalhe importante na escolha dos pontos é a escala da seção empilhada. A escala dos intervalos entre os traços sísmicos no eixo das coordenadas do ponto médio (eixo x) será sempre considerada em m. Caso os dados da seção empilhada e da seção *Rnip* estejam em quilômetro, o usuário deve colocar o valor 1000 no espaço ao lado de *Midpoint Factor* que está dentro da janela *Unit factor*, caso estejam em centímetro o fator deve ser 0.01. O programa inicia considerando que os dados estejam em metro, portanto, o valor um é considerado.



Midpoint Factor

4.2 Recomeçar de um *picking* feito anteriormente. Para isto será necessário que o usuário escreva o nome do arquivo onde foram salvos os dados do *picking* ao lado de *Picks from file* ou procurar o arquivo através do botão *Search* e em seguida clicar no botão *Load*. Assim que os dados forem lidos e os pontos aparecerem na seção empilhada o usuário deve retornar ao passo 4.1

Picks from file

5° passo: A escolha dos pontos deve ser feita clicando no botão esquerdo do *mouse*. Para cancelar um ponto já escolhido clica-se em cima do ponto com o botão do meio do *mouse* e para parar a escolha dos pontos clica-se no botão direito do *mouse*. Caso se deseje escolher mais pontos após ter cancelado a seleção de pontos, deve-se clicar no botão *Choose more points*.

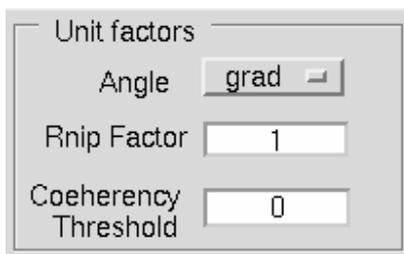
6° passo: Após a escolha dos pontos desejados, deve-se informar o valor da velocidade próxima a superfície em *Near Surface Velocity*. O programa considera de início que a velocidade seja de 1500m/s.

Near Surface Velocity  m/s

7° passo: Escrever os nomes dos arquivos que contêm os dados dos atributos cinemáticos: raio de curvatura da frente de onda PIN e o ângulo de emergência respectivamente ao lado de *Rnip file* e *Angle file* ou procurar os arquivos através de seus respectivos botões *Search*. Também digitar o nome do arquivo que contém as informações de coerência dos dados em *Coherency file* ou procurar através do seu botão *Search*.

Angle file	<input type="text"/>	<input type="button" value="Search"/>
Rnip file	<input type="text"/>	<input type="button" value="Search"/>
Coherency file	<input type="text"/>	<input type="button" value="Search"/>

8° passo: Informar na janela *Unit factors* as unidades dos ângulos e dos raios bem como o valor da coerência. Os ângulos podem estar em graus (*grad*) ou em radianos (*rad*), a escala do Rnip deve ser informada exatamente como a escala dos intervalos entre os traços sísmicos (passo 4.1) e o valor de coerência mínima deve ter valor entre 0 e 1.



Unit factors

Angle

Rnip Factor

Coehereency Threshold

9º passo: Digitar o nome do arquivo de saída na janela *file to save picks* e em seguida clicar no botão *Make Calculations* e esperar pelo aviso *file saved*.



file to save picks

10º passo: Para sair do programa basta clicar no botão *Exit* e confirmar a saída.

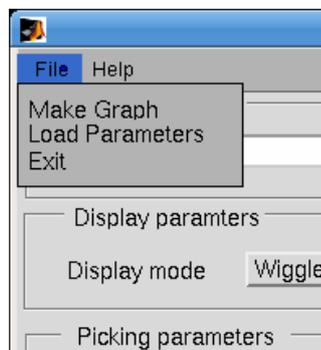


## INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

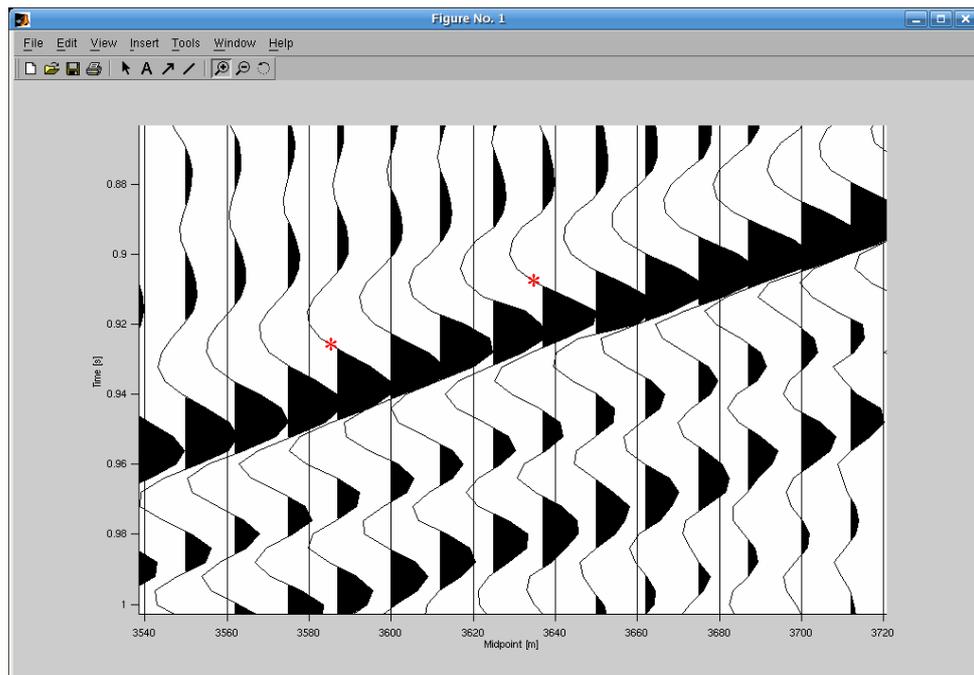
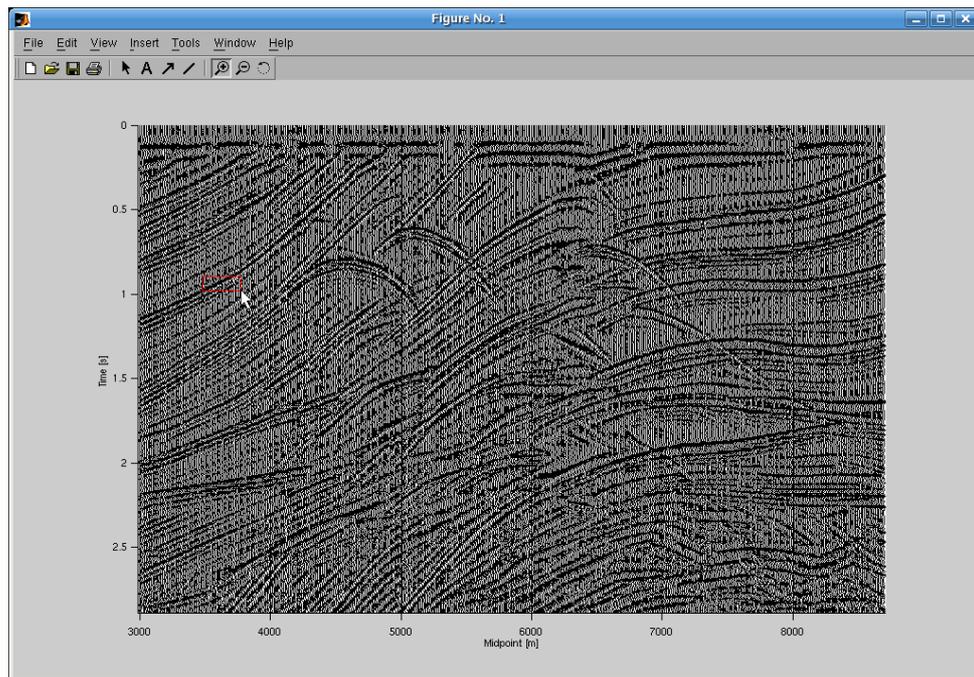
1. Depois de ter escolhido alguns pontos iniciais, deve-se gravar os dados tão logo que possível executando a partir do 6° passo. Após salvar os dados, a opção *No* em *read files?* deve ser escolhida, pois caso se queira mudar o tipo de gráfico, ou fazer um novo *picking* ou salvar novamente os pontos escolhidos, os dados não mais serão lidos porque os dados já estarão carregados na área de trabalho do Matlab-6.0, logo a tarefa será executada rapidamente.



2. Quando o usuário salvar os pontos escolhidos, o programa criará um arquivo com o mesmo nome, porém com a extensão “.ppt”. Este arquivo conterá os dados utilizados para se fazer o *picking*: a velocidade próxima a superfície (*Near Surface Velocity*), a distância mínima entre os pontos (*Midpoint radius*), o intervalo de tempo mínimo entre os pontos (*time window*), a unidade do ângulo (*grad* ou *rad*), o valor da coerência mínima (*Coherency Threshold*), a unidade do Rnip (*Rnip Factor*) e a unidade dos pontos médios (*Midpoint Factor*). As informações do *picking* podem ser recuperadas executando o passo 4.1 e em seguida clicando em *File - Load Parameters*. É importante salientar que: se o arquivo que contém os pontos de reflexão foi obtido através do *picking* automático, o arquivo suplementar com a terminação “.ppt” não existirá logo o programa não poderá ler as informações utilizadas para o *picking*.



3. Para ampliar a imagem a fim de visualizar o gráfico com mais detalhes o usuário deve utilizar as ferramentas disponíveis na própria janela gráfica do *Matlab*, clicando no desenho da lupa com o sinal positivo (+) e em seguida marcando a região desejada com o botão esquerdo do mouse pressionado. Logo após soltar o botão esquerdo do mouse a região selecionada aparecerá ampliada. Ao escolher os pontos de reflexão o programa marcará o local com um asterístico vermelho (\*)



## APÊNDICE B

### Modelo Marmousi

O modelo Marmousi foi baseado em um perfil do Norte de Quenguela na Bacia de Cuanza (Angola) (Figura B.1). Com este perfil geológico criou-se um modelo com 160 camadas utilizando o programa MIMIC<sup>TM</sup> do pacote SIERRA. As distribuições de velocidades e densidades foram definidas pela introdução dos gradientes de velocidades horizontais e verticais (figura B.2). A distribuição de velocidade na parte mais rasa do modelo tem um elevado gradiente vertical e uma forte compactação. O modelo Marmousi foi criado com uma malha 2D de velocidade/densidade com dimensões de 9200m na horizontal por 3000m na profundidade com um comprimento da malha de 4m tanto na horizontal como na vertical.

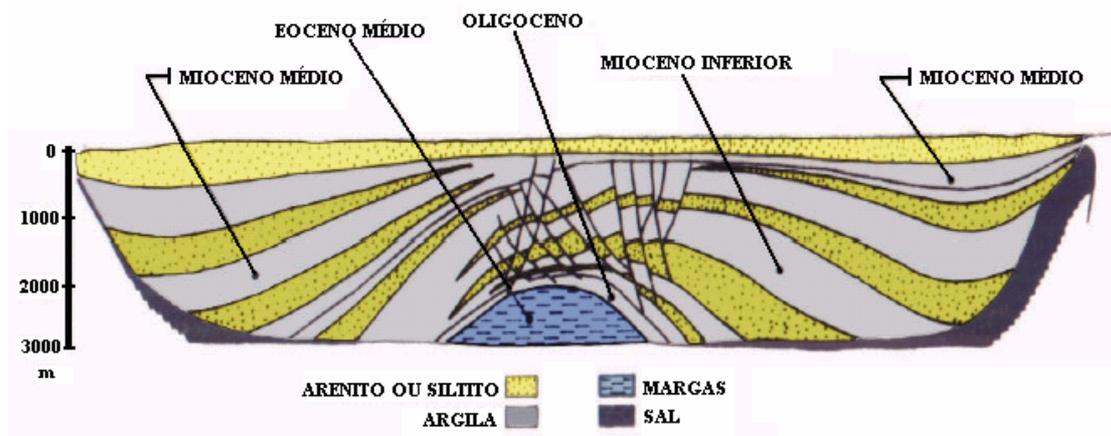


Figura B.1: Perfil geológico da bacia de Cuanza localizado em Quenguela Norte (Angola), utilizado para construção do modelo Marmousi.

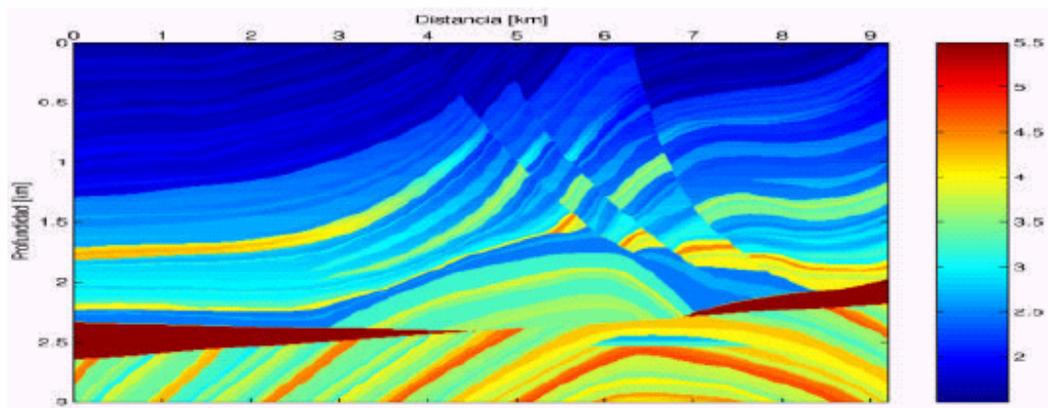


Figura B.2: Modelo de velocidades dos dados sísmicos Marmousi.

Geologicamente, segundo Bourgeois et al. (1991), o modelo Marmousi tem um intervalo de sedimentos deltaicos com espaçamento de oeste para leste, depositado sobre uma série de evaporitos salíferos; a parte mais oriental do modelo parece ter sido mais afetada pela movimentação lateral do deslizamento da camada de sal, com desenvolvimento de falhas normais. Uma armadilha estrutural de hidrocarbonetos é esperada devido a ocorrência de depósitos de carbonatos plataformais dobrados.

A história geológica baseada no perfil geológico pode ser reconhecida em duas fácies distintas:

- Fácies 1: Corresponde a uma contínua sedimentação plataformal (de margas e carbonatos), que no final desta sedimentação os depósitos foram suavemente dobrados e então erodidos (com a superfície de erosão sendo plana).
- Fácies 2: Iniciou-se com a deposição de uma série de evaporitos salíferos. Nesta série uma outra Fácies rica em argilas e margas com matéria orgânica foram depositadas. Em seguida foram depositadas fácies espessas de sedimentos detríticos de folhelhos e arenitos, cujas as espessuras das Fácies são controladas pelas ocorrências de deslocamentos laterais contínuos no sal, resultante da pressão de sobrecarga. Tais deslizamentos da camada de sal podem causar, localmente, o desaparecimento de sal e também são responsáveis pelo aparecimento de falhas e ativamento das mesmas durante a deposição dos sedimentos detríticos.

A prospecção de petróleo no modelo Marmousi tem como base duas séries de sedimentos:

- Primeira Série (sedimentos detríticos): as armadilhas foram formadas pelas estruturas associadas à tectônica de sal dificultadas pelas falhas envolvidas. O abastecimento de hidrocarbonetos nos arenitos ocorre pela ascensão da série de rocha geradora pós-evaporítica.
- Segunda Série (antisalíferos): está mais abaixo da primeira e tem uma grande quantidade de estruturas anticlinais na ausência do sal (que desaparece pelo deslizamento lateral), onde este foi suprido pelo abaixamento da cobertura da série de rocha geradora.

Os três poços para os quais os dados foram disponibilizados atravessam uma série sedimentar sem falhas, na qual as rochas geradoras, folhelhos e margas, são ausentes.

O conjunto de dados sísmicos Marmousi é gerado na seguinte disposição geométrica: A progressão das fontes na linha sísmica é realizada de oeste para leste, a primeira e a última

coordenada da fonte sísmica estão localizadas, respectivamente, na posição 3000m e 8975m, a partir da extremidade oeste do modelo. A distância entre um disparo e outro é de 25m, totalizando 240 disparos de oeste para leste. A fonte sísmica é formada por um conjunto de 6 canhões de ar comprimidos distribuídos em uma extensão de 40 m, a distância entre os canhões é de 8m. A profundidade da fonte sísmica é de 8m e sua posição é considerada o meio do conjunto dos 6 canhões (Figura B.2). Todas as fontes são emitidas com o mesmo pulso e disparadas simultaneamente. O pulso sísmico dos canhões marinhos é obtido através da digitalização de um pulso sísmico real utilizado no campo, cujo pulso é filtrado com um filtro trapezoidal de frequência (0, 10, 40, 60Hz). Aplicando este filtro, tem-se aproximadamente o mesmo efeito de um filtro passa-baixa aplicado durante o registro.

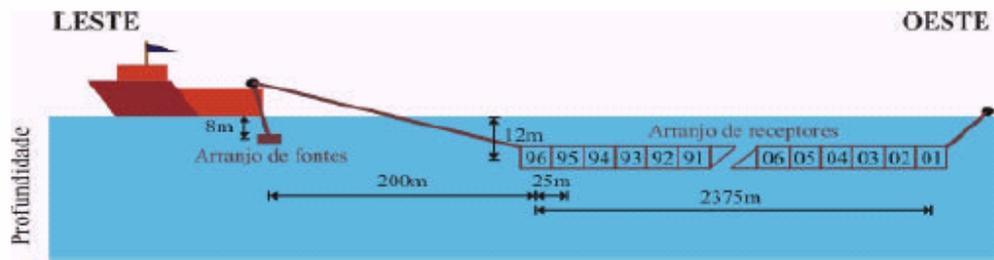


Figura B.3: Configuração geométrica (2D) do cabo flutuador para geração dos dados sísmicos Marmousi

O cabo flutuador possui um arranjo de receptores com 96 grupos de hidrofones a uma profundidade de 12m. A distância entre dois grupos consecutivos é de 25m. O grupo mais próximo da fonte está a uma distância de 200m e o mais longe a 2575m. Cada grupo de hidrofones consiste de 5 hidrofones com uma distância de 4 m entre cada um. O traço sísmico para cada grupo é obtido pela soma dos traços dos 5 hidrofones.

Para gerar computacionalmente os dados sísmicos de cobertura, utiliza-se um pacote de modelagem, que realiza a simulação de uma linha sísmica inteira de um lado à outro de uma bacia geológica pela computação sucessiva de diferentes registros dos disparos das fontes, no modelo Marmousi, mais especificamente, foi usado um modelador de propagação de onda acústica 2D. Este modelador usa um esquema de diferenças finitas explícito de segunda ordem (no espaço e no tempo). Condições de fronteira de terceira ordem são utilizadas para reduzir os efeitos de borda não-desejáveis.

Para cada um esquema e para as velocidades e frequências sísmicas, considerou-se o espaçamento ótimo entre células da malha de 4m a fim de evitar problemas de dispersão numérica e altos custos computacionais. Depois de gerado os dados sísmicos, este foi filtrado no domínio do tempo com um filtro de frequência trapezoidal (0, 10, 35, 55Hz) para remover, parcialmente, a dispersão numérica ainda existente. No entanto, mesmo com esta filtragem e o espaçamento pequeno entre células da malha, alguma dispersão numérica é provável que ocorra para o longo alcance da propagação de baixa velocidade. Tentou-se usar um esquema de quarta ordem o qual permitiria ter um espaçamento maior entre células da malha e conseqüentemente baixo custo computacional, porém a complexidade das geometrias dos refletores teria criado rede de difrações se uma malha de dimensões maiores fosse utilizada.

O modelo Marmousi possui um alto grau de complexidade e, por conseguinte, um alto grau de dificuldade para ser processado. Os dados sísmicos sintéticos Marmousi são compostos de 240 disparos e 96 traços sísmicos (com uma janela temporal de 3s).

## APÊNDICE C

### Geologia e dados da Bacia Tacutu

Segundo Eiras e Kinoshita (1990), esta bacia se desenvolveu como um *rift* intracontinental na parte central da região cratônica denominada de Escudo das Guianas. O arcabouço sedimentar dessa bacia compreende rochas sedimentares e vulcano-sedimentares. Na direção NE-SO, com cerca de 300km de comprimento e 30km a 50km de largura, o *rifte* apresenta-se alongado.

O limite do *gráben* a NE são os afloramentos do basalto das Colinas Toucan na Guiana e a NE, em território brasileiro, é a Serra de Nova Olinda. As grandes falhas normais de Lethem e do Kanuku limitam o *gráben* a SE, sendo que a Kanuku margeia o sopé das montanhas de rochas metamórficas Kanuku, na Guiana. O limite NO são as falhas normais do Surumu e do Maú, esta segunda beirando os sopés da serra metavulcânica de Pacaraima e da montanha granítica Makarapan, na Guiana.

A topografia simples do interior do *gráben* só é interrompida pela Serra do Tucano, um conjunto de morros suaves formados pela erosão diferencial de remanescentes arenosos da Formação Tucano.

A estrutura da Bacia do Tacutu caracteriza-se por *horsts*, *grabens*, anticlinais, sinclinais, estrutura em flor, e inversão de mergulho (*roll overs*). Falhas transcorrentes são consideradas como sendo reativações que se desenvolveram em estágios de *rift*.

A estratigrafia da Bacia do Tacutu divide-se em quatro estágios deposicionais.

- Primeiro estágio: é uma seqüência basal representada por formações vulcânicas Apoteri e pela formação de folhelho Manari, ambas relacionadas à fase pré-*rift*.
- Segundo estágio: é representado pela formação evaporítica Pirara, e relacionada ao estágio de máxima tensão na fase *rift*.
- Terceiro estágio: é uma seqüência de arenitos e conglomerados das formações Tacutu e Tucano, e interpretada por corresponder ao contínuo decréscimo de tensão.
- Quarto estágio: é representado por lateritos e aluviões das formações Boa Vista e Savanas do Norte e é interpretado como corresponder à continua diminuição do alongamento do *gráben*.

Os dados sísmicos da linha 50-RL-90 da Bacia do Tacutu foram adquiridos pela PETROBRAS nas campanhas de 1980 a 1987.

A linha sísmica 50-RL-90 é composta por 179 seções fonte-comum adquiridas com um arranjo simétrico de receptores em relação à fonte e com um intervalo de 200m entre fontes consecutivas. A distância entre geofones consecutivos é de 50m totalizando 96 *geofones* por tiro. A menor distância entre a fonte e um geofone é de 150m e o maior é de 2500m. O tempo de registro é de 4s e o intervalo de amostragem é 4ms.

A linha 50-RL-90 foi pré-processada aplicando-se os seguintes processos:

- Edição.
- Construção da geometria.
- Correção da amplitude devida à divergência esférica.
- Deconvolução.
- Aplicação do filtro F-K para remoção do *ground roll*

A correção estática não foi necessária, pois a linha 50-RL-90 se encontra em uma região onde não se verifica grandes variações verticais na superfície.

## APÊNDICE D

### *B-Spline*

A Função *B-spline* é uma interpolação que permite maior manipulação e controle da curva ou superfície gerada, e conseqüentemente, maior versatilidade na representação de formas complexas. A função *B-Spline* é definida da seguinte maneira:

Para um conjunto de pontos, pretendemos construir uma curva suficientemente suave que passe pelos pontos dados, numa ordem específica.

Se temos  $i + 1$  pontos de controle  $v_i$ , podemos então derivar uma função contínua  $V(x)$  como

$$V(x) = \sum_{i=0}^{i=n} v_i \beta_i(x) \quad (D.1)$$

Aqui  $v_i$  são chamados de coeficientes *B-splines* e  $\beta_i(x)$  são as funções básicas em uma seqüência crescente de pontos

$$\dots < x_i < x_{i+1} < \dots$$

não sendo necessário ser constante o intervalo entre os pontos. *B-splines* são funções *spline* de comprimento mínimo. Sendo de grau  $m$ , elas são diferentes de zero somente em  $m+1$  intervalos dos pontos consecutivos. A função *B-spline* pode ser definida na forma recursiva por

$$\beta_{[x_i, \dots, x_{i+m+1}]}^{[m]}(x) = \frac{x - x_i}{x_{i+m} - x_i} \beta_{[x_i, \dots, x_{i+m}]}^{[m-1]}(x) + \frac{x_{i+m+1} - x}{x_{i+m+1} - x_{i+1}} \beta_{[x_{i+1}, \dots, x_{i+m+1}]}^{[m-1]}(x) \quad D.2$$

com

$$\beta_{[x_i, x_{i+1}]}^{[0]}(x) = \begin{cases} 1 & \text{para } x \in [x_i, x_{i+1}] \\ 0 & \text{para os demais} \end{cases} \quad D.3$$

As curvas *B-splines* possuem algumas vantagens:

- A mudança de um ponto de controle afeta a curva somente no local do ponto.

- Uma quantidade de pontos pode ser adicionada sem aumentar o grau do polinômio.
- Adicionando vários pontos perto de uma única posição a curva é atraída para essa posição.
- As curvas fechadas podem ser criadas fazendo o primeiro e o último ponto os mesmos, embora a continuidade não seja mantida automaticamente.

A figura D1 mostra *splines* com 4 pontos de controle com grau 2,3, e 4. Para o grau 2 a *spline* é somente uma interpolação linear, conforme o grau vai aumentando as curvas vão se tornando mais suaves. A linha cor-de-rosa mostra o polígono formado pelos pontos de controle e a preta é a curva *Spline*.

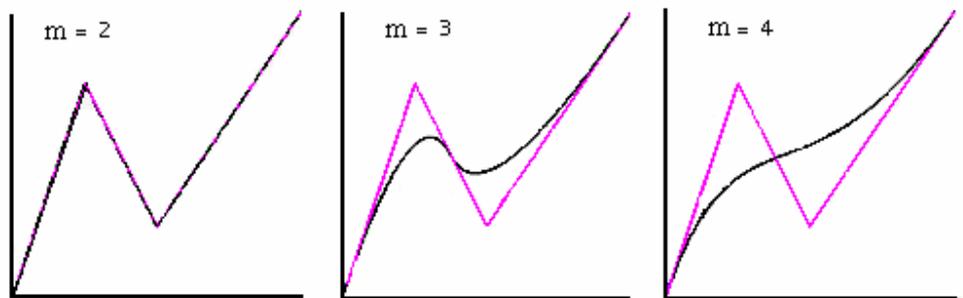


Figura D.1: *splines* com graus 2, 3 e 4 formadas com 4 pontos de controle, linha rosa=polígono de controle, linha preta=*Spline*.

#### D.1- MODELO DE VELOCIDADE DESCRITO POR *B-SPLINE*

Para a inversão tomográfica 2D descrita no capítulo 3, é necessário a segunda e a terceira derivadas do modelo de velocidade serem contínuas. Portanto é usado uma *B-spline* de grau  $m=4$ . Para descrever um modelo de velocidade 2D, um *gride* de  $(n_x + m - 1) \times (n_z + m - 1)$  nós é definido por duas seqüências crescentes,  $[x_{-1}, \dots, x_{-n_x + m - 1}]$  e  $[z_{-1}, \dots, z_{-n_z + m - 1}]$ .

As quantidades  $n_x$  e  $n_z$  são os números de colunas e linhas respectivamente.

A função velocidade 2D é escrita em termos de *B-spline* como:

$$V(x,z) = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{k=1}^{n_z} v_{ik} \beta_i(x) \beta_k(z) \quad D.4$$

$$= \sum_{i=1}^{n_x} v_i(z) \beta_i(x) \quad \text{com} \quad v_i(z) = \sum_{k=1}^{n_z} v_{ik} \beta_k(z)$$

As derivadas de D.4 podem ser escritas como:

$$\frac{\partial^{(n+l)} V(x,z)}{\partial x^n \partial z^l} = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{k=1}^{n_z} v_{ik} (-1)^l \frac{\partial^n \beta_i(x)}{\partial x^n} \frac{\partial^l \beta_k(z)}{\partial z^l} \quad D.5$$

A função D.5 representa o elemento básico para o qual os modelos de velocidades são construídos no caso 2D e representa também a perturbação da velocidade usada na aplicação da teoria da perturbação 2D do raio para calcular as derivadas de Fréchet em relação a velocidade para a matriz tomográfica.

Os modelos de velocidades descritos através de *B-splines* são diferentes de zero somente entre o mínimo e o máximo dos pontos utilizados. A fim de assegurar que o modelo de velocidade obtido pela tomografia seja definido significativamente também fora da região confinada pelos dados, os comprimentos dos intervalos dos nós da *B-spline* nas margens do modelo são ajustados a valores elevados. A velocidade, assim, permanece virtualmente constante em uma grande região em torno da parte central do modelo.