



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

ANTONIO RIZIMAR DE ANDRADE CUNHA

**MIGRAÇÃO KIRCHHOFF PRÉ EMPILHAMENTO EM
PROFUNDIDADE USANDO APROXIMAÇÃO PARAXIAL DO
TEMPO DE TRÂNSITO**

BELÉM

2014

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

ANTONIO RIZIMAR DE ANDRADE CUNHA

**MIGRAÇÃO KIRCHHOFF PRÉ EMPILHAMENTO EM
PROFUNDIDADE USANDO APROXIMAÇÃO PARAXIAL DO
TEMPO DE TRÂNSITO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará-UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Ribeiro Cruz

BELÉM
2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Cunha, Antonio Rizimar De Andrade, 1983-

Migração Kirchhoff pré Empilhamento em profundidade usando aproximação paraxial do tempo de trânsito / Antonio Rizimar de Andrade Cunha – 2014

110 f. : il.; 30cm

Inclui bibliografias

Orientador: João Carlos Ribeiro Cruz

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2014.

1. Métodos de reflexão sísmica. 2. Ondas sísmicas. 3. Modelos matemáticos. I. Título.

CDD 22.ed.622.1592

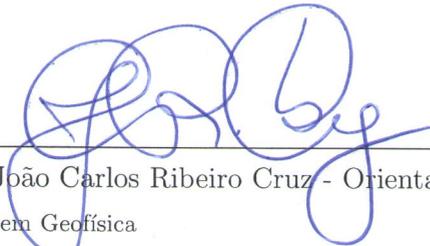
ALUNO: ANTONIO RIZIMAR DE ANDRADE CUNHA

**MIGRAÇÃO KIRCHHOFF PRÉ EMPILHAMENTO EM
PROFUNDIDADE USANDO APROXIMAÇÃO PARAXIAL DO
TEMPO DE TRÂNSITO**

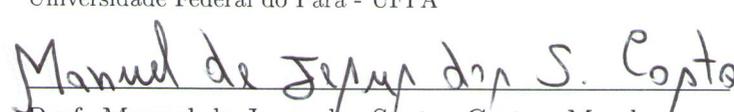
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará- UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Geofísica.

Data de Aprovação: ____/____/____

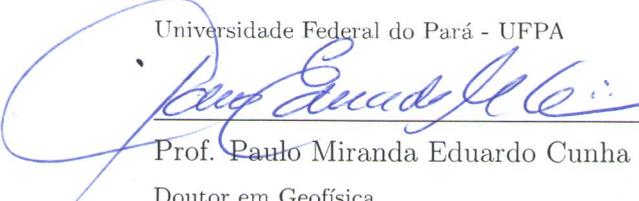
Banca Examinadora:



Prof. João Carlos Ribeiro Cruz - Orientador
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará - UFPA



Prof. Manuel de Jesus dos Santos Costa - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará - UFPA



Prof. Paulo Miranda Eduardo Cunha - Membro
Doutor em Geofísica
Cenpes - PETROBRAS

BELÉM
2014

Ao meu avô, Darcy Paes de Andrade, pelo
coração bondoso e humilde ...

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível se não fosse pela graça e amor de Deus em minha vida, que o impossível pode realizar.

É óbvio que amamos nossos pais, porém sempre é bom reforçar esta ideia mostrando gratidão por tudo o que fizeram por mim, por isso, os agradecimentos ao meu Pai Manoel Ribar de Andrade Cunha e minha mãe Zilda de Andrade Cunha são imensuráveis.

Foi seguindo aos exemplos de dedicação e responsabilidade dos meus irmãos que sonhei um dia ter as mesmas virtudes, por isso, agradeço-lhes do fundo do coração aos conselhos, apoio e inspiração que, Diego e Denise, disponibilizaram a mim no decorrer de nossas vidas.

Nos momentos de dúvidas, recorria ao meu orientador que nunca hesitou em direcionar as minhas ideias para o caminho correto, desta forma, deixo explícito meus agradecimentos ao Professor João Carlos Ribeiro Cruz.

Foram várias as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente na continuidade deste trabalho, mas gostaria de agradecer especialmente aos amigos Josafat Lopes Cardoso, Zoraida Tejarada, Raphael D'Carlos, Alexandre Sodré e Wildiney Vieira pelas valiosas ajudas e conselhos.

Agradeço aos Professores Manuel de Jesus e Paulo Miranda por terem aceitado ao convite de participarem desta banca.

Se desejas um comportamento perfeito, livre de todo o mal, guarda-te contra o vício da ganância (Ptah-Hotep, 1900 A.C).

RESUMO

Para obter-se imagens mais realísticas possíveis da subsuperfície, necessita-se de técnicas eficientes de avaliar o campo de onda. A literatura geofísica apresenta vários métodos baseados na solução numérica da equação da onda sísmica. Dentre às várias técnicas de imageamento sísmico, a Migração Kirchhoff Pré-Empilhamento em Profundidade continua sendo largamente utilizada devido a sua praticidade no tratamento de dados organizados em diversas configurações sísmica e na solução de problemas relacionados a imagens. Devido a isto, busca-se criar alternativas mais eficientes para o cálculo dos parâmetros envolvidos nos processos de migração. Considera-se como ponto crítico o cálculo dos tempos de trânsito, fundamentais na focalização das amplitudes em seus respectivos pontos em profundidade. O método baseia-se na Teoria Paraxial do Raio utilizando o método Runge-Kutta de Quarta Ordem. A extrapolação paraxial dos tempos de trânsito pertence ao sistema de traçamento dinâmico de raios onde, através deste, é possível determinar informações em regiões complexas do meio geológico que, comumente, causam o aparecimento de zonas de sombras. A aplicação desta técnica exige quantidades previamente dispostas em um raio central de referência que é obtido pelo traçamento cinemático de raios. É necessário um macro modelo de velocidade do meio para o cálculo dos tempos de trânsito. Para este fim utilizamos modelos exatos de velocidades determinados a partir do software MATLAB. Para efeito de comparação, consideramos duas maneiras distintas de calcular as tabelas dos tempos de trânsito: A primeira foi realizada por meio da rotina RAYT2D do pacote SEISMIC UNIX (SU) que é considerado um método robusto de avaliação; na segunda, utilizou-se o Método Paraxial05. A realização da migração em profundidade requer como dados de entradas o dado sísmico e as tabelas dos tempos de trânsito. As imagens obtidas foram determinadas com um algoritmo escrito em SHELL e uma terceira imagem foi obtida por meio da subtração entre os resultados iniciais.

Palavras-chave: Migração Kirchhoff Pré-Empilhamento em Profundidade. Tempos de Trânsito. Teoria Paraxial do Raio. Modelo de Velocidade.

ABSTRACT

In order to get an accurate image of the subsurface we need efficient techniques for evaluating the wave field. In literature we find several geophysical methods based on the numerical solution of the seismic wave equation. Among the various techniques of seismic imaging, Kirchhoff prestack depth migration remains widely used because of its flexibility in processing data through several geometries of acquisition, and its practicality in solving problems related to imaging. Assuming this view, we seek to create more efficient alternatives for the accurate calculation of the parameters involved in migration processes. We consider the efficient calculation of the traveltimes as a critical factor, focusing on the fundamental amplitude in their respective points in depth using the Paraxial Ray Theory through the Runge-Kutta method of fourth order. The paraxial extrapolation of the traveltimes belongs to the class of dynamic ray tracing, where it is possible to determine information in complex geological environment on regions influenced by shadow zones. The application of this technical demands amounts previously arranged in a central reference beam that is obtained from the kinematic ray tracing, furthermore a macro velocity model of the medium is necessary for the traveltimes calculation. For comparison, we consider two different ways to calculate the traveltimes tables: The first was performed by routine RAYT2D from SEISMIC UNIX (SU) package, which is considered a robust method of evaluation; the second is based on Paraxial05 method. The depth migration required the seismic data input and the traveltimes. The images were obtained from an algorithm written in SHELL and a third image is obtained through the difference between the two initial results.

Keywords: Kirchhoff Prestack Depth Migration. Traveltimes. Ray Paraxial Theory. Velocity Model.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 Modelo da Terra com 4 camadas sobre um semi-espaco ilustrando as reflexões das ondas sísmicas. 25
- Figura 2.2 Configuração FC de aquisição de dados sísmicos unilateral utilizada na aquisição dos dados com raios que partem da fonte localizada na superfície da Terra, viajam pelo meio, sofrem reflexão na interface e partem até o receptor localizado na superfície do terreno. 26
- Figura 2.3 Representação da propagação de ondas no meio geradas artificialmente na superfície da Terra. 27
- Figura 2.4 Configuração de levantamento sísmico de FC disposta simetricamente com receptores à esquerda e à direita da fonte. Este tipo de levantamento é denominado de Spred-Sprad. 27
- Figura 2.5 Configuração de levantamento sísmico de FC com receptores somente à direita da fonte. Este tipo de levantamento é denominado de End-on. 28
- Figura 2.6 Tempo de trânsito total, $T(z, x)$, de reflexão das ondas. 29
- Figura 2.7 Representação dos traços sísmicos organizados em Afastamento-Comum (AC). Os traços sísmicos são caracterizados pela distância fonte receptor constante. 30
- Figura 2.8 Representação dos traços sísmicos organizados em Ponto-Médio-Comum (PMC). Os traços com afastamento fixo são organizados a partir das coordenadas localizadas nos pontos médios. 30
- Figura 2.9 Representação dos traços sísmicos organizados em Afastamento-Nulo (AN). A distância entre a fonte e o receptor é nula ou desprezível em relação ao tamanho do modelo. 31
- Figura 2.10 Representação dos traços sísmicos organizados em Superfície-de-Reflexão-Comum (SRC). Quando as camadas estão inclinadas a onda sísmica se espalha em uma determinada região do refletor representada por vários pontos. 31
- Figura 2.11 Definição geométrica da Zona de Fresnel (ZF) no espaço. A fonte está localizada no ponto S . Onde h_0 é a distância vertical ao refletor, R_n representa os raios de ZF medidos

a partir do ponto P_0 .	34
Figura 2.12 Modelo de camadas plano-horizontais homogêneas e isotrópicas, onde estão representados: a fonte S , o receptor R , a velocidade da N -ésima camada V_N , o tempo de trânsito vertical simples Δt_N e o ponto onde ocorre a reflexão D .	36
Figura 3.1 Sistema de coordenadas do raio σ, γ_1 , representado o vetor vagarosidade $\vec{\mathbf{p}}_0$ com suas componentes e o parâmetro σ monotônico ao longo de todo o raio central (em verde).	41
Figura 4.1 Interpretação geométrica da extrapolação dos tempos de trânsito a partir do Traçamento paraxial de raios.	45
Figura 4.2 Interpretação geométrica da propagação do campo pelo método Runge-Kutta de quarta ordem.	46
Figura 5.1 Representação de uma reflexão primárias P_G , correspondente ao raio SRG (curva vermelha) a partir de um refletor desconhecido (curva azul), definida para o par fonte-receptor.	50
Figura 5.2 Curvas de tempos de trânsito de reflexões (τ_R) e de difrações (τ_D) para diferentes escolhas do ponto M em uma configuração de AC.	52
Figura 6.1 Modelo simples com 3 camadas sobre um semi-espaço obtido a partir da rotina TRIMODEL do pacote Seismic Unix (SU). Este modelo é composto pelas vagarosidades diferentes embutidas no limite de cada camada. A diferença na tonalidade entre estas informa isto.	56
Figura 6.2 Dado sísmico do modelo da Figura 6.1 gerado a partir de um algoritmo escrito em SHELL SCRIPT.	58
Figura 6.3 Inclusão de ruído aleatório no dado sísmico de entrada.	59
Figura 6.4 Modelo de vagarosidade Uniformizado. Primeiro passo necessário à obtenção do modelo exato de velocidade.	61
Figura 6.5 Modelo de vagarosidade suavizado. Este modelo deve ser usado no processo de obtenção do modelo de velocidade final suavizado.	62
Figura 6.6 Modelo de velocidade suavizado. Este modelo deve ser usado no processo de obtenção das tabelas dos tempos de trânsito calculados de duas formas: Rotina do SU e método Paraxial05.	63
Figura 6.7 Tempos de trânsito para um disparo localizado no centro de modelo de veloci-	

dade. São mostrados os raios paraxiais disparados a partir da fonte localizada na coordenada horizontal $x = 1500$ m.	66
Figura 6.8 Velocidade do modelo geológico Marmousi. Este é um modelo sintético apresentando um auto grau de complexidade geológica.	68
Figura 6.9 Modelo simples com 3 camadas obtido a partir da rotina TRIMODEL do pacote Seismic Unix (SU). Este modelo é composto pelas vagarosidades diferentes embutidas no limite de cada camada. A diferença na tonalidade entre estas informa isto.	70
Figura 6.10 Resultado da migração em profundidade para o modelo simples livre de ruídos. Os tempos de trânsito usados neste resultado são provenientes da extrapolação paraxial feita com o auxílio do SU.	70
Figura 6.11 Migração com ruído adicionado ao dado.	72
Figura 6.12 Representação do resultado da migração no formato do traço sísmico. ...	73
Figura 6.13 Resultado da migração em profundidade para o modelo simples livre de ruídos. Os tempos de trânsito usados neste resultado são provenientes da extrapolação Paraxial05.	74
Figura 6.14 Migração para os tempos Paraxial05.	75
Figura 6.15 Diferença entre as seções migradas: Paraxial05 - SU.	77
Figura 6.16 Representação das diferenças como traço sísmico: Paraxial05 - SU.	78
Figura 6.17 Modelo de velocidade Marmousi.	81
Figura 6.18 Resultado da migração em profundidade para o modelo Marmousi 2D usando as tabelas de trânsito provenientes dos algoritmos em das rotinas do pacote SU.	82
Figura 6.19 Resultado da migração em profundidade para o modelo Marmousi 2D usando as tabelas de trânsito provenientes do método Paraxial05.	83
Figura 6.20 Diferença entre as migrações Marmousi 2D usado os tempos Paraxial05 e os tempos SU, exatamente nesta ordem.	84
Figura 6.21 Modelos de velocidades reamostrados.	87
Figura 6.22 Resultado das migrações SU para os modelos reamostrados.	88
Figura 6.23 Resultado das migrações Paraxial05 para os modelos reamostrados.	89
Figura 6.24 Modelos de velocidades reamostrados.	91

Figura 6.25 Resultado das migrações SU para os modelos reamostrados.	92
Figura 6.26 Resultado das migrações Paraxial05 para os modelos reamostrados.	93

LISTA DE TABELAS

6.1	Tabela dos parâmetros usados no modelo de 3 camadas sobre um semi-espço. Este modelo foi gerado a partir da função TRIMODEL do pacote SU. Esta função compõe o modelo a partir da interpolação por triangularização. . . .	57
6.2	Tabela dos parâmetros usados na obtenção do dado sísmico por meio de um algoritmo escrito em SHELL SCRIPT baseado em rotinas do pacote SU. . .	60
6.3	Tabela dos parâmetros usados na obtenção do modelo exato de velocidade necessário à obtenção das tabelas dos tempos de trânsito de reflexão da onda sísmica.	64
6.4	Tabela dos parâmetros usados na obtenção dos tempos de trânsito a partir da extrapolação paraxial.	65
6.5	Tabela dos parâmetros usados na obtenção dos tempos de trânsito a partir da extrapolação Paraxial05.	67
6.6	Tabela de discriminação do Modelo exato de velocidade Marmousi.	68
6.7	Tabela de discriminação do Modelo exato de velocidade Marmousi.	69
6.8	Tabela de parâmetros usados na rotina de migração.	80
6.9	Tabela de parâmetros usados na rotina de migração para o dado Marmousi 2D.	85
6.10	Valores das discretizações para reamostragem do modelo de referência. . . .	86
6.11	Valores das discretizações para reamostragem do modelo de referência. . . .	90

LISTA DE ABREVIATURAS

ABREVIATURA	DESCRIÇÃO
HC	Hidrocarboneto
FC	Fonte-Comum
PMC	Ponto-Médio-Comum
RC	Receptor-Comum
RK4	Runge-Kutta de quarta ordem
AC	Afastamento-Comum
FR	Fonte-Receptor
SH e SV	Ondas secundárias horizontal e vertical, respectivamente
ZF	Zona de Fresnel

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS GREGOS	DESCRIÇÃO
$\tau(x_0)$	Tempo de trânsito do raio central
$\tau(x)$	Tempo de trânsito extrapolado para pontos da malha
$\varepsilon(t)$	Função refletividade do meio
ρ	Densidade do meio
λ, μ	Parâmetros elásticos de Lamé
∇	Operador gradiente
$\nabla \cdot$	Operador divergente
∇^2	Operador laplaciano
λ_c	Comprimento de onda
ω	Frequência angular
$\mathcal{L}[\cdot]$	Operador diferencial
∂	Derivada parcial
σ_0	Parâmetro monotônico inicial
σ	Parâmetro monotônico ao longo do raio
γ_1	Ângulo do raio em relação à superfície de aquisição
$d\tau$	Intervalo de tempo
α	Ângulo de partida
$\delta \mathbf{x}$	Variação do vetor posição
$\delta \mathbf{p}$	Variação do vetor vagarosidade
$\delta \gamma$	Variação do ângulo
\mathcal{O}	Termos de terceira ordem
${}^\sigma \mathcal{J}$	Jacobiano em coordenadas do raio
ϵ	Fator que controla a extrapolação por série de Taylor
θ	Ângulo de abertura inicial
$\Delta \sigma$	Passo do método RK4
$\Delta \tau$	Passo temporal para o método RK4
$\Delta \theta$	Intervalo de ângulo entre dois vetores de vagarosidade

ω_t	Peso para os tempos de trânsito extrapolados
$\tilde{\tau}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0)$	Matrizes temporárias de tempos de trânsito para cada tiro
$\omega_t(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0)$	Matrizes temporárias dos pesos para os tempos de trânsito para cada tiro
$\Delta\tau_m$	Tempos correspondentes às máximas amplitudes
ξ	Variável de posição de medida na abertura A
\mathcal{L}	Fator de espalhamento geométrico
$\tau_D(\xi, M)$	Tempo de difração
$\tau(S, M)$	Tempo fonte-refletor
$\tau(M, G)$	Tempo refletor-receptor
$d\xi$	Diferencial da variável de posição na abertura A
$\tau_F(\xi, M)$	Função fase
ξ^*	Ponto estacionário
$\frac{1}{\sqrt{-i\omega}}$	Fator causador do deslocamento de fase de $\frac{\pi}{4}$

SÍMBOLOS LATINOS	DESCRIÇÃO
1D,2D e 3D	Possíveis dimensões do modelo
P	Ondas primárias
S	Ondas secundárias
$T(z, x)$	Tempo total de reflexão
$t1(z, x)$	Tempo da fonte ao refletor
$t2(z, x)$	Tempo da fonte ao receptor
R	Ponto de reflexão
$g(t)$	Resposta ao impulso
$r(t)$	ruído ao dado
$w(t)$	Pulso-Fonte-Relativo
$s(t)$	sinal medido
*	Operador convolução
\ddot{u}_i	Segunda derivada do movimento da partícula
U_i	Amplitude do campo de deslocamento
S	Localização da fonte
h_0	Distância Vertical ao refletor
R_n	Raios da ZF
P_0	Ponto central da ZF localizado sobre o refletor
$\overline{SP_n}$	Distâncias perpendiculares ao plano refletor em relação a R_0
λ_c	Comprimento de onda
v	Velocidade média do meio
T	Período temporal da onda
f	Frequência temporal
v_{RMS}	Velocidade 'Root-Mean-Square'
v_i	Velocidade intervalar da i -ésima camada
z_i	Profundidade da i -ésima camada
t_0	Tempo duplo vertical para o modelo de camadas plano-horizontal
W	Campo de onda
C	Velocidade do meio
$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$	Vetores unitários
A	Amplitude da onda
$\nabla^2 A$	Laplaciano da amplitude

$\Delta\tau$	Laplaciano do tempo de trânsito
x_i	Componentes do vetor posição
p_i	Componentes do vetor vagarosidade
J_a	Jacobiano do raio
x_1, x_2	Sistema de coordenadas cartesianas
$C_i(\gamma_1)$	Constante de integração
J	Matriz de operação
$\mathbf{X}(\sigma_0) = \mathbf{X}_0$	Índice do RK4 que guarda os valores iniciais do vetor posição
\langle , \rangle	Produto interno
$\mathbf{F}(\sigma_0) = \mathbf{F}_0$	Função que propaga os sistemas cinemáticos
$\Delta\mathbf{p}$	Passo do RK4 para vagarosidade
$\Delta\mathbf{s}$	Passo do RK4 para o comprimento de arco
ρ_c	Curvatura do raio
$\Delta s_{min} \leq \Delta s \leq \Delta s_{max}$	Controle do intervalo temporal
$\mathbf{X}_S = X_S(\xi)$	Posição das fontes que dependem da abertura de configuração
$\mathbf{X}_G = X_G(\xi)$	Posição dos receptores que dependem da abertura de configuração
\mathcal{A}	Perda total de amplitude devido à transmissão
$V(M, t)$	Empilhamento de difrações
$\hat{V}(M, t)$	Transformada de Fourier de $V(M, t)$
$\mathbf{F}(\mathbf{t} - \tau_{\mathbf{R}(\xi)})$	Sinal analítico da fonte
$\hat{F}(\omega)$	Transformada de Fourier do sinal analítico da fonte
H_F	Matriz hessiana de segunda ordem
R_c	Coefficiente de reflexão
\hat{U}_F	Dado sísmico filtrado
sng	Função sinal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
2	MÉTODOS SÍSMICOS	24
2.1	SÍSMICA DE REFLEXÃO	24
2.1.1	Geometria de Aquisição	25
2.1.2	Traço Sísmico	32
2.1.3	Resolução Plano Horizontal ou Zona de Fresnel	33
2.1.4	Modelo Verticalmente Heterogêneo	34
3	REVISÃO DA TEORIA DO RAIOS	37
3.1	EQUAÇÃO ICONAL E DO TRANSPORTE	37
3.2	SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO ICONAL	39
3.3	SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DO TRANSPORTE	40
4	TRAÇAMENTO PARAXIAL DE RAIOS	43
4.1	INTRODUÇÃO	43
4.2	TRAÇADO CINEMÁTICO E DINÂMICO	43
4.3	EXTRAPOLAÇÃO DOS TEMPOS DE TRÂNSITO	44
5	MIGRAÇÃO KIRCHHOFF	49
5.1	INTRODUÇÃO	49
5.2	PRINCÍPIOS BÁSICOS DA MIGRAÇÃO KIRCHHOFF	49
5.3	EMPILHAMENTO DE DIFRAÇÕES	51
5.4	INTEGRAL DE EMPILHAMENTO DE DIFRAÇÕES	52
5.5	AVALIAÇÃO ASSINTÓTICA DA INTEGRAL DE EMPILHAMENTO	53
6	RESULTADOS	55

6.1	MODELO SIMPLES	55
6.2	AQUISIÇÃO DO DADO SÍSMICO DO MODELO	57
6.3	OBTENÇÃO DO MODELO DE VELOCIDADE	60
6.4	CÁLCULO DOS TEMPOS DE TRÂNSITO PELO MÉTODO PROPOSTO	64
6.4.1	Tempos-SU	64
6.4.2	Tempos - Paraxial05	65
6.5	MODELO MARMOUSI	67
6.6	RESULTADOS DA MIGRAÇÃO	69
6.6.1	Migração com Aproximação Paraxial - SU.	69
6.6.2	Migração com Aproximação Paraxial - Paraxial05.	74
6.6.3	Diferença entre as Seções Migradas: Paraxial05 - SU.	76
6.7	MIGRAÇÃO PARA O DADO MARMOUSI	80
6.7.1	Migração SU.	81
6.7.2	Migração Para os Tempos Paraxial05.	82
6.7.3	Diferença Entre as Seções Migradas.	83
6.7.4	Migração Reamostrada Modelo Simples	85
6.7.5	Migração Reamostrada Marmousi	90
7	CONCLUSÃO	95
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A - MAKEFILE PARA O MODELO SIMPLES	100
	APÊNDICE B - MAKEFILE PARA O MODELO MARMOUSI	105
	APÊNDICE C - CONCATENAÇÃO	110

1 INTRODUÇÃO

Na exploração sísmica, busca-se através dos eventos de reflexão, determinar a geometria das interfaces que limitam as camadas rochosas e localizar novas reservas de petróleo e gás em áreas antes nunca exploradas. Isto requer um alto índice de investimento em novas tecnologias, tendo em vista a alta complexidade geológica que dificultam o imageamento das estruturas em subsuperfície.

O desenvolvimento de novas técnicas computacionais mais robustas e eficientes auxiliam no desafio de contornar dificuldades inerentes a grandes profundidades e à complexidade em subsuperfície, desta forma, é possível imagear de maneira mais confiável, a presença de geometrias cada vez mais irregulares.

Neste contexto, a Modelagem Sísmica é uma linha de pesquisa importante na exploração do Hidrocarboneto (HC). Por meio desta, é possível estimar o comportamento e as características das ondas em subsuperfície, sendo útil tanto para compreensão do fenômeno da propagação da onda como ferramenta fundamental nos processos de imageamento. Existem formulações diversas para realização da modelagem sísmica, sendo importante neste trabalho a Migração Kirchhoff Pré-Empilhamento em Profundidade, fazendo uso do cálculo do tempo de trânsito a partir da Extrapolação Paraxial do Tempo de Trânsito.

Segundo (CERVENY, 2001), os dois conceitos mais importantes relacionados à propagação de ondas sísmicas de altas frequências em diversos tipos de problemas, são os seus tempos de viagem e os seus raios que estão intimamente relacionados. Muitos procedimentos para calcular raios e os seus tempos de trânsito tem sido propostos. A escolha do procedimento adequado para calcular os raios sísmicos e seus tempos de viagem é muito influenciada por diversos fatores, tais como: a dimensão do modelo a ser considerado (1-D, 2-D ou 3-D); a representação computacional e a complexidade do modelo; a configuração fonte-receptor; a precisão dos cálculos; a eficiência necessária dos cálculos numéricos; o tipo de tempo de trânsito calculado (apenas as primeiras chegadas, chegadas posteriores, ondas difratadas e similares); a abrangência necessária dos cálculos (tempos de viagem apenas, raios e tempos de viagem, cálculos da função de Green, sismogramas sintéticos e movimentos das partículas no solo); a finalidade prática do traçamento de raios é o tempo de viagem computacional.

No trabalho de (CUNHA, 2005), foi realizado o cálculo para extrapolação dos tempos

de trânsito em duas etapas: por traçamento cinemático de raios que fornece os tempos de trânsito nos pontos do raio $\tau(x_0)$ pelo método adaptativo desenvolvido por (CUNHA, 1999a) que confere precisão da ordem de 10^{-6} para o erro relativo; cálculo dos tempos de trânsito nos pontos de uma malha retangular $\tau(x)$ pelo emprego das informações fornecidas pelo traçamento paraxial de raios reduzindo o erro relativo para 10^{-3} . Em (CUNHA, 2005) foi mostrado que através de seu método as amplitudes de campos máximos são incorporadas na condição de imagem contribuindo para a melhoria na qualidade do imageamento pelo método de Kirchhoff.

O objetivo deste trabalho é realizar a migração Kirchhoff pré-empilhamento em profundidade fazendo uso das tabelas dos tempos de trânsito calculadas com auxílio da teoria paraxial do raio. Serão feitas comparações dos resultados obtidos e, desta forma, serão discutidos, de maneira teórica, os limites de precisão, robustez e eficiência computacional que o método oferece.

2 MÉTODOS SÍSMICOS

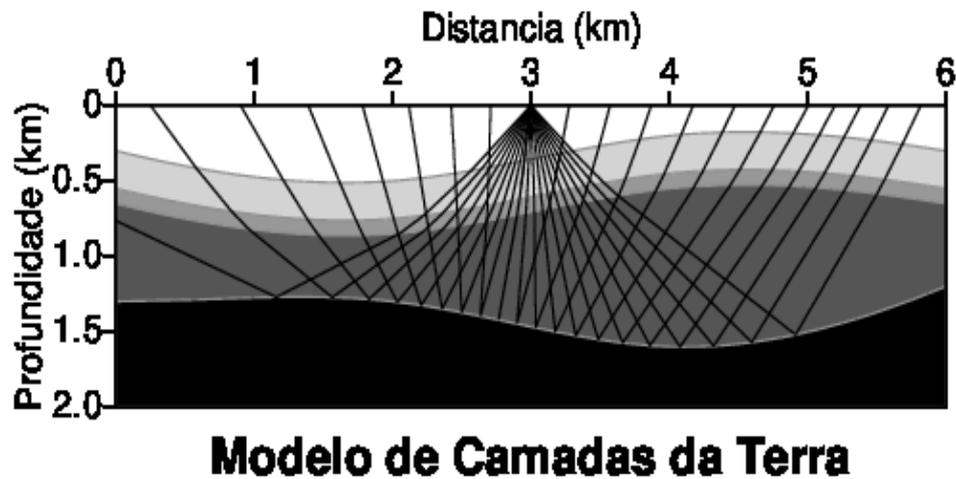
Os métodos sísmicos estudam a propagação e o comportamento de ondas sísmicas. A velocidade de propagação depende das constantes elásticas e da densidade do terreno. O contacto entre diferentes tipos de corpos geológicos com diferentes velocidades de transmissão de ondas sísmicas, definem interfaces de separação em que as ondas sofrem refração, reflexão e difração.

A Sísmica se baseia na medição, em vários pontos, do tempo de percurso de ondas elásticas induzidas, em geral, artificialmente na superfície do terreno. Existem duas técnicas distintas: uma que faz uso das ondas refletidas (sísmica de reflexão) e técnicas que fazem uso de ondas refratadas (sísmica de refração). Este trabalho, detém-se apenas à primeira técnica.

2.1 SÍSMICA DE REFLEXÃO

Este método consiste em medir os tempos de chegada das ondas sísmicas aos geofones após sofrerem reflexão na superfície de contato entre as várias unidades litológicas. A partir dos tempos de chegada e da distribuição de velocidade é possível determinar a trajetória das ondas P e delimitar a disposição dos horizontes sísmicos em subsuperfície. A Figura 2.1 ilustra as reflexões das ondas sísmicas nas interfaces do modelo geológico abaixo:

Figura 2.1: Modelo da Terra com 4 camadas sobre um semi-espço ilustrando as reflexões das ondas sísmicas.



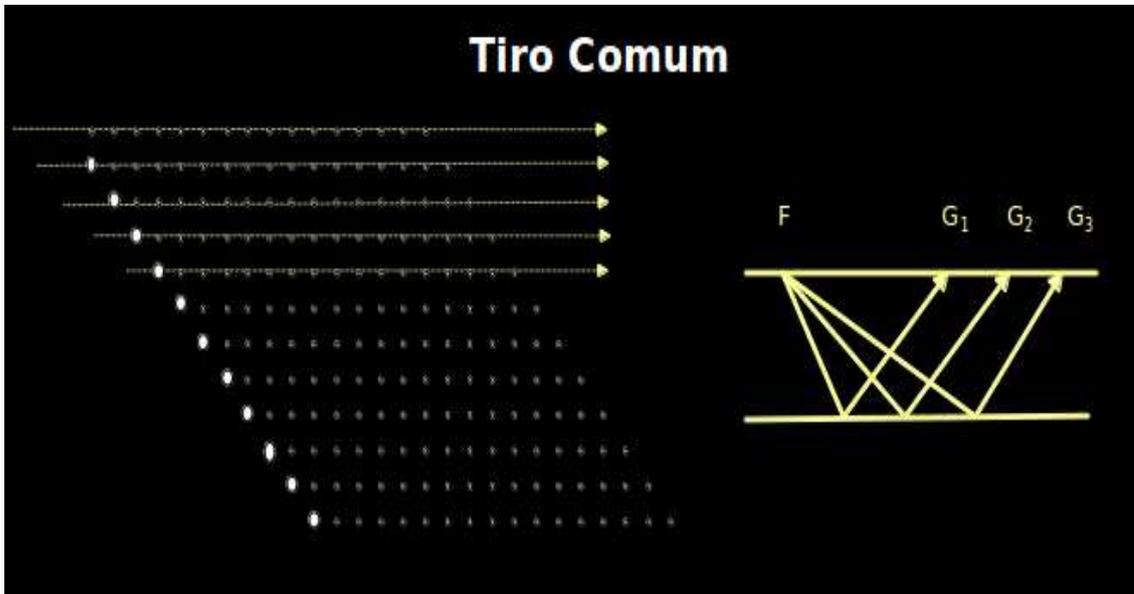
Fonte: Autor.

A clareza com que estes dados de reflexão surgem depende de vários fatores, tais como: coeficiente de reflexão, amplitude da onda incidente e refletida, diferença de densidade entre o material inferior e superior e relação da velocidade de propagação das ondas P entre ambos os materiais, etc. Quanto maior é a diferença entre os materiais que limitam uma superfície, maior será a reflexão.

2.1.1 Geometria de Aquisição

Na obtenção dos dados sísmicos, utiliza-se comumente a configuração de fonte-comum (FC), a partir da qual é determinado um conjunto de dados de multi-cobertura. Estes dados podem ser rearranjados de diversas maneiras, como por exemplo: arranjo em Ponto-Médio-Comum (PMC), Receptor-Comum (RC) e Afastamento-Comum (AC). Nestas novas configurações, as propriedades de discretização mudam com relação às coordenadas espaciais. Ilustra-se de forma didática, na Figura 2.2, como é realizada a aquisição dos dados:

Figura 2.2: Configuração FC de aquisição de dados sísmicos unilateral utilizada na aquisição dos dados com raios que partem da fonte localizada na superfície da Terra, viajam pelo meio, sofrem reflexão na interface e partem até o receptor localizado na superfície do terreno.

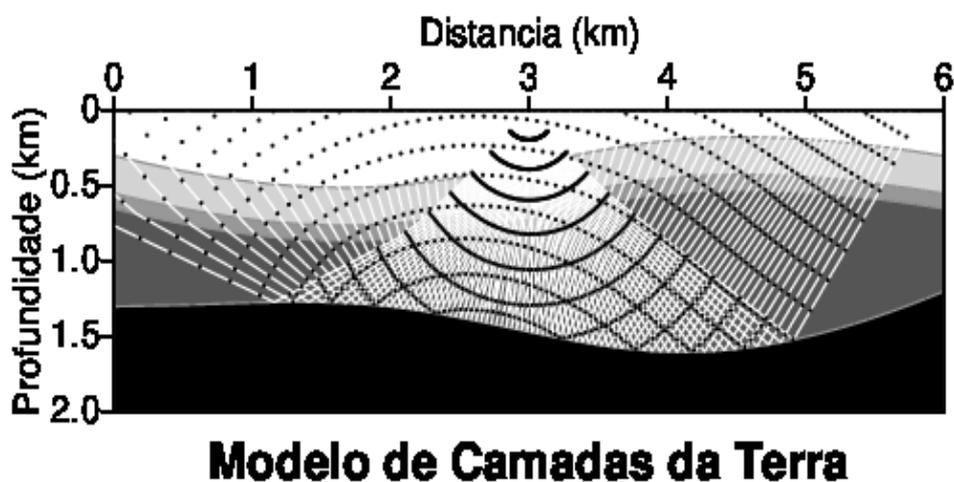


Fonte: Autor.

Um levantamento sísmico se inicia com a determinação de uma linha no mapa geológico de superfície da região, obedecendo a direção de mergulho das camadas, em geral, perpendicular à direção das estruturas. Seguidamente, busca-se indicar o posicionamento das fontes e dos receptores ao longo da linha projetada. Os traços sísmicos são obtidos a partir das estações de geofones para registros terrestres, no caso de levantamento marinho as estações receptoras são denominadas de hidrofones.

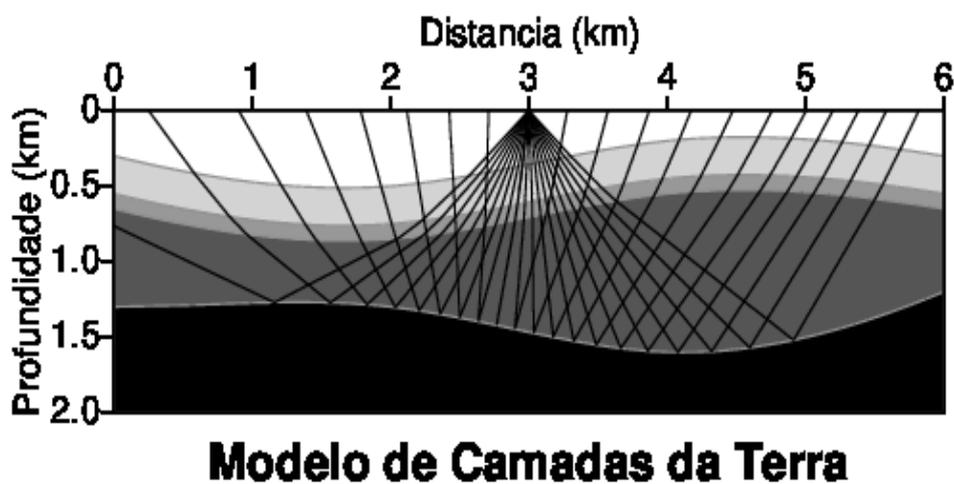
A fonte sísmica é sempre descrita como pontual no espaço (3D) e não pontual no tempo (SHARPE, 1942). Seu posicionamento marca o local de referência para a seção FC e sua detonação é convencionada no tempo igual zero (fonte causal). Os traços sísmicos registrados segundo a configuração FC pertencem a um experimento descrito pela geração e propagação de ondas na subsuperfície conforme mostra a Figura 2.3. A seção de traços sísmicos é organizada de acordo com o afastamento do par fonte-receptor (FR) para direita ou esquerda. Este tipo de levantamento pode ser simétrico, Split-Sprad (Figura 2.4) ou assimétrico, End-on (Figura 2.5).

Figura 2.3: Representação da propagação de ondas no meio geradas artificialmente na superfície da Terra.



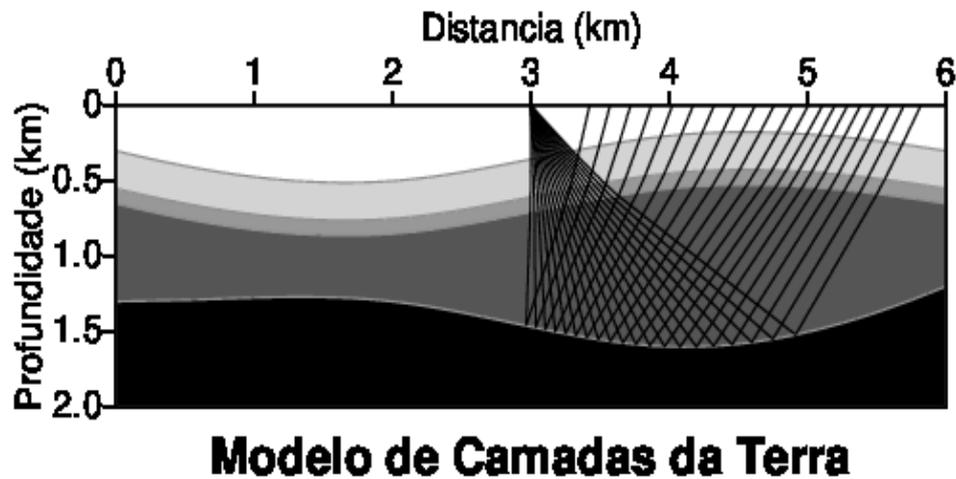
Fonte: Autor.

Figura 2.4: Configuração de levantamento sísmico de FC disposta simetricamente com receptores à esquerda e à direita da fonte. Este tipo de levantamento é denominado de Spred-Sprad.



Fonte: Autor.

Figura 2.5: Configuração de levantamento sísmico de FC com receptores somente à direita da fonte. Este tipo de levantamento é denominado de End-on.

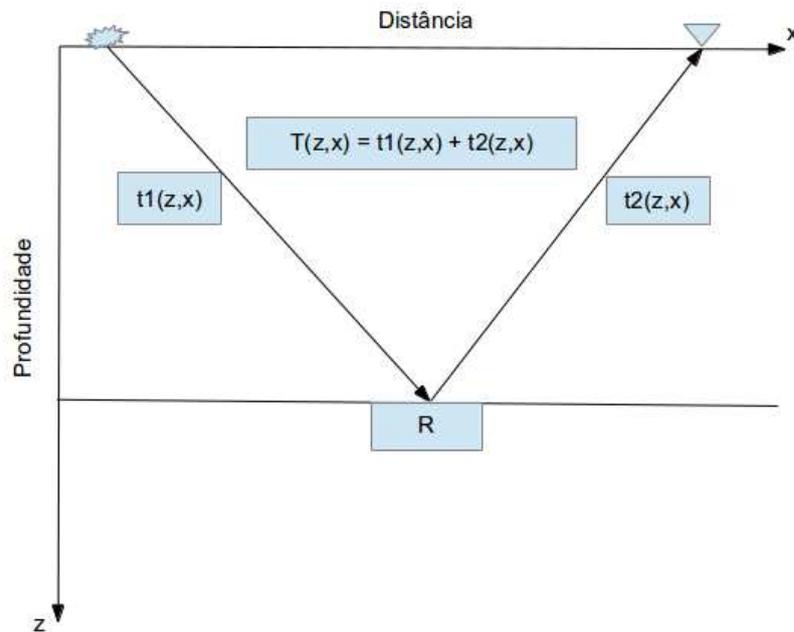


Fonte: Autor.

A fonte sísmica gera no meio geológico uma infinidade de ondas, as quais podem ser classificadas resumidamente como: ondas diretas, ondas de volume, ondas de superfície. Nas aplicações da sísmica de reflexão as ondas de superfície são retiradas dos dados com auxílio de filtros com determinadas frequências de corte. As ondas diretas podem ser utilizadas no controle de qualidade do dado. No presente trabalho, faz-se uso apenas das ondas de volume, em especial as ondas primárias (P), também conhecidas como ondas compressoriais de reflexão, porém, não deixando de lado a existência das ondas secundárias (ondas S: SH e SV) e as conversões P-SV em função do ângulo de incidência.

Na propagação das ondas de volume, procura-se conhecer o efeito da transmissividade e refletividade que ocorrem nas interfaces entre uma camada e outra. As ondas refletidas e refratadas que emergem nos receptores são registradas levando em conta o tempo de trânsito da onda a partir do momento em que a fonte foi acionada até o momento em que os receptores registram a informação, isto é, o tempo de trânsito total. A contagem é iniciada a partir do acionamento da fonte sísmica. As ondas incidentes viajam da fonte ao refletor, $t_1(z, x)$. Quando sofrem reflexão partem do refletor ao receptor, $t_2(z, x)$. A soma destes dois ramos de tempos de trânsito compõem o tempo total de reflexão, $T(z, x)$, conforme ilustra a Figura 2.6.

Figura 2.6: Tempo de trânsito total, $T(z, x)$, de reflexão das ondas.

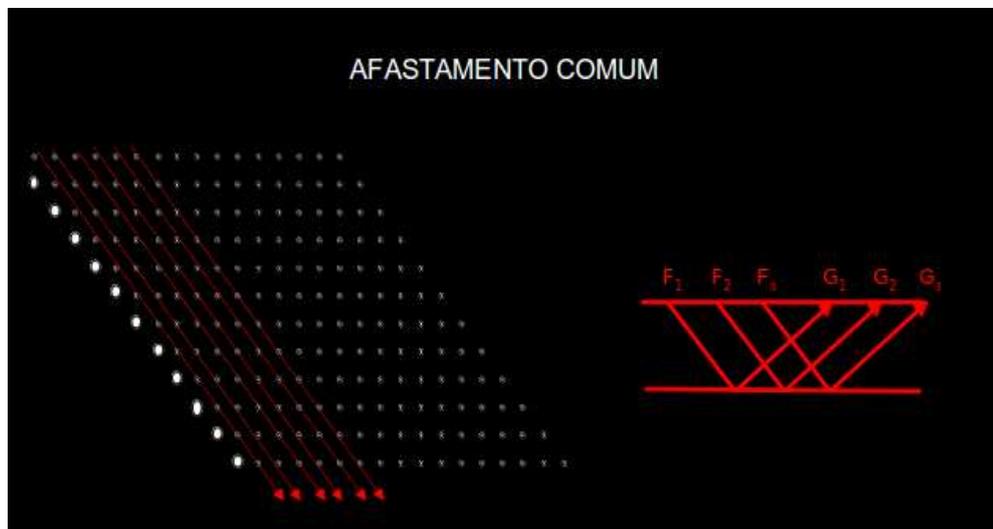


Fonte: Autor.

Na configuração FC, a fonte é deslocada continuamente ao longo da linha sísmica para obter as várias seções FC que contêm eventos da continuidade dos refletores presentes em profundidade. Estes registros formam o conjunto de dados de multi-cobertura que contém as informações dos refletores em profundidade.

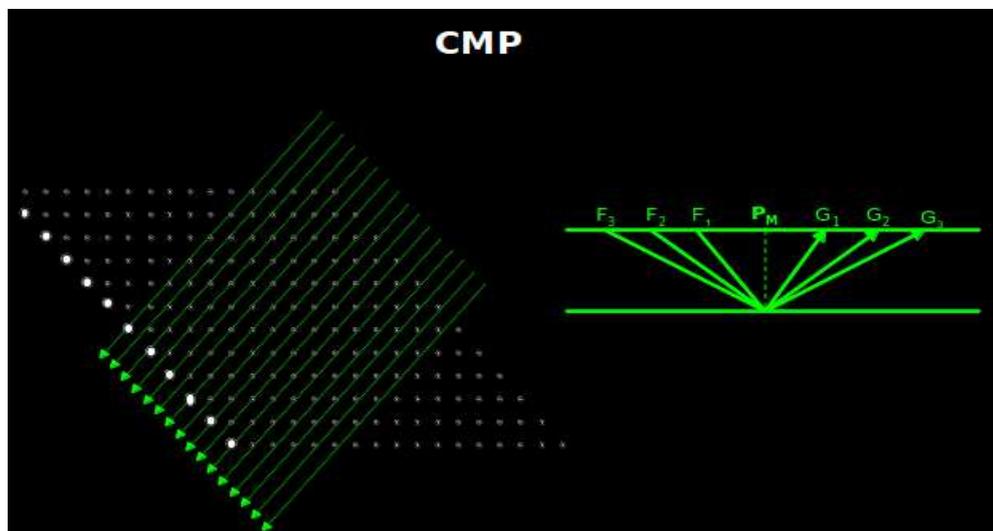
A reorganização dos dados formam outras seções que podem ser mais conveniente ao processamento dos dados conforme a necessidade. Uma das formas é redistribuir os traços em seções de Afastamento Comum (AC) ou em seções de Ponto-Médio-Comum (PMC). A seção AC (Figura 2.7) possui afastamento fixo para todos os traços e são arranjados pelas coordenadas de Ponto-Médio. A seção em PMC (Figura 2.8) é composta por traços laterais à esquerda e à direita do ponto médio entre a fonte e o receptor e os incrementos laterais são de meio-afastamento. Nesta ilustração, a seção PMC coincide com a seção de Ponto-Comum-em-Profundidade (PCP), apenas para os casos em que as camadas são plano-horizontais, uma vez que as coordenadas horizontais de PMC coincidem com as coordenadas de PCP.

Figura 2.7: Representação dos traços sísmicos organizados em Afastamento-Comum (AC). Os traços sísmicos são caracterizados pela distância fonte receptor constante.



Fonte: Autor.

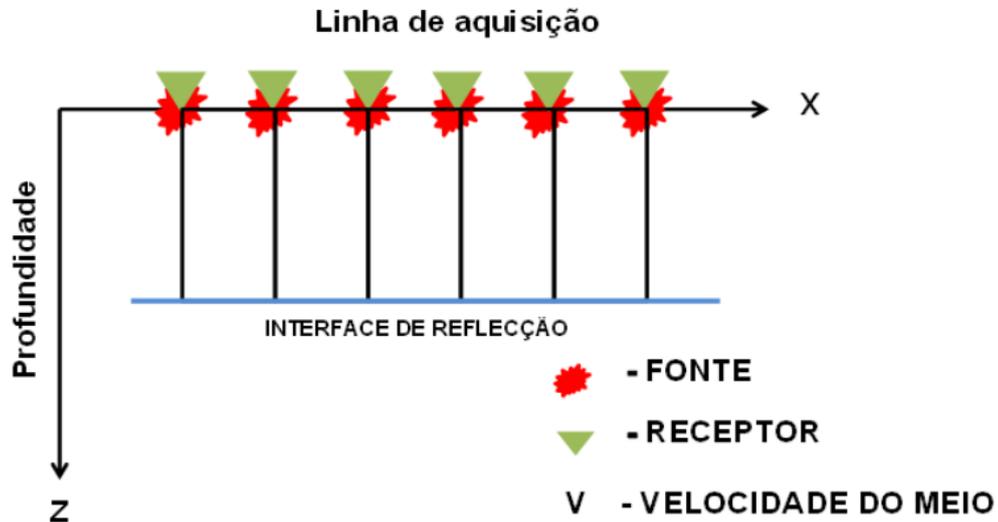
Figura 2.8: Representação dos traços sísmicos organizados em Ponto-Médio-Comum (PMC). Os traços com afastamento fixo são organizados a partir das coordenadas localizadas nos pontos médios.



Fonte: Autor.

As seções sísmicas geralmente usadas em processamento sísmico são as de AC e Afastamento-Nulo (AN). A seção de AN é caracterizada pela distância entre a fonte e o receptor ser nula ou muito pequena. Este tipo de configuração só pode ser obtida matematicamente por métodos de empilhamento, pois não é realizável fisicamente (Figura 2.9):

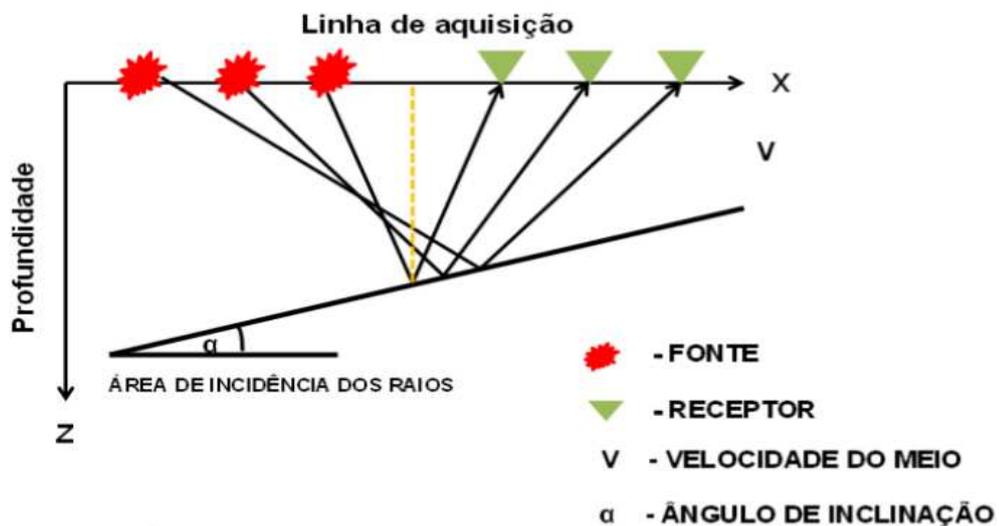
Figura 2.9: Representação dos traços sísmicos organizados em Afastamento-Nulo (AN). A distância entre a fonte e o receptor é nula ou desprezível em relação ao tamanho do modelo.



Fonte: (PINHEIRO, 2012)

No caso de refletores não-horizontais, não existe apenas um ponto de reflexão em comum, porém uma superfície, (no caso 3D) ou um segmento (no caso 2D), em que a onda sísmica sofre espalhamento. Este local geométrico é denominado de Superfície-de-Reflexão-Comum (SRC), como pode ser ilustrado na Figura 2.10:

Figura 2.10: Representação dos traços sísmicos organizados em Superfície-de-Reflexão-Comum (SRC). Quando as camadas estão inclinadas a onda sísmica se espalha em uma determinada região do refletor representada por vários pontos.



Fonte: (PINHEIRO, 2012)

2.1.2 Traço Sísmico

O traço sísmico pode ser composto através do modelo de convolução simples (ROBINSON, 1983). Este modelo pode ser descrito a partir da solução geral da equação da onda, sendo considerado apenas o campo distante. O modelo simples pode ser descrito como a integral de convolução, conforme a equação (2.1):

$$g(t) = [w(t) * \varepsilon(t) + r(t)] * g(t) = [s(t) + r(t)] * g(t). \quad (2.1)$$

onde, $w(t)$ é a parte temporal da fonte denominado de Pulso-Fonte-Relativo. A função $\varepsilon(t)$ representa a refletividade do meio, que compõe o campo ascendente e descendente. A função $s(t)$ representa o sinal medido dado pela convolução de $w(t)$ com $\varepsilon(t)$. A função $r(t)$ é o ruído e $g(t)$ representa a resposta ao impulso.

A componente ruído não é simples de descrever, uma vez que as informações presentes nesta componente são variáveis e diversas (OLHOVICH, 1964). Desta forma, pode-se discriminar alguns tipos de ruídos: aleatório ou não, determinístico ou não, coerente ou não, local, instrumental, geológico, de fonte, industrial, de trânsito, etc. Existem situações onde é considerado o conceito de ruído branco (SCALES; SNIEDER, 1998). Outra dificuldade está na descrição dos ruídos coerentes como, por exemplo, as reflexões múltiplas, as quais geram artefatos nos dados.

A modelagem de propagação de ondas sísmicas pode ser representada, inicialmente, pela equação da elastodinâmica que descreve o movimento das partículas. No presente trabalho, representa-se esta equação em sua forma acústica, considerando-se que as camadas que compõe a Terra são líquidas. Neste caso, a representação matemática da onda elástica é descrita por:

$$\rho \ddot{u}_i = \mu \nabla^2 u_i + (\lambda + \mu) \nabla_i (\nabla \cdot \vec{u}), \quad (2.2)$$

onde, ρ , é a densidade do meio, \ddot{u}_i , é a segunda derivada da função que descreve o movimento da partícula, μ e λ , são os parâmetros elásticos de lamé. A forma da solução de (2.2) depende da geometria do modelo e das condições físicas impostas pelo problema. Por exemplo: um modelo formado por camadas plano-horizontais, método da refletividade, meios complexos, diferenças finitas, aproximações de alta frequência, teoria do raio (AKI; RICHARDS, 1980).

Tendo por base a teoria do raio, a função que rege o deslocamento da partícula pode ser

aproximada por sua representação em altas frequência (CERVENY, 1985). A expressão para o deslocamento $u_i(\vec{x}, t)$ neste caso, assume a forma de (2.3):

$$u_i(\vec{x}, t) = U_i(\vec{x})e^{i\omega\tau(\vec{x})}, \quad (2.3)$$

onde a forma complexa guarda os efeitos provenientes das mudanças de fase da onda. Ainda em 2.3, ω representa a frequência angular, t o tempo de trânsito, \vec{x} a posição e $U(\vec{x})$ representa a amplitude do campo de deslocamento. A quantidade real $\tau(\vec{x})$ é denominada de Iconal ou função fase. A superfície onde $\tau(\vec{x})$ é constante representa a frente de onda para um instante t específico.

A solução obtida a partir da decomposição, com base no princípio de altas frequências, determina as denominadas equação Iconal, que possibilita o cálculo dos tempos de trânsito, e a equação do Transporte, para o cálculo das amplitudes do sinal.

2.1.3 Resolução Plano Horizontal ou Zona de Fresnel

O termo resolução horizontal refere-se à separação mínima necessária em que dois eventos distintos podem ser diferenciados. A ideia da resolução horizontal está centrada no conceito de Zona de Fresnel (ZF), prevista em (GELDART; SHERIFF, 1995), ilustrado na Figura 2.11:

a descrição dependente do tempo duplo de trânsito vertical, t_0 . Para o caso de afastamento qualquer, o tempo duplo de propagação, $t(x)$, é dado em função do parâmetro de afastamento horizontal x . Na prática, deseja-se que a equação temporal seja escrita em função do afastamento em sua forma geral $t = t(x)$, onde os parâmetros velocidade, v , e profundidade, z , das camadas envolvidas participam das operações. Como consequência, a correção para o afastamento nulo utiliza a trajetória expressa pela expressão (2.5) que relaciona diretamente o afastamento fonte-receptor (GELDART; SHERIFF, 1995):

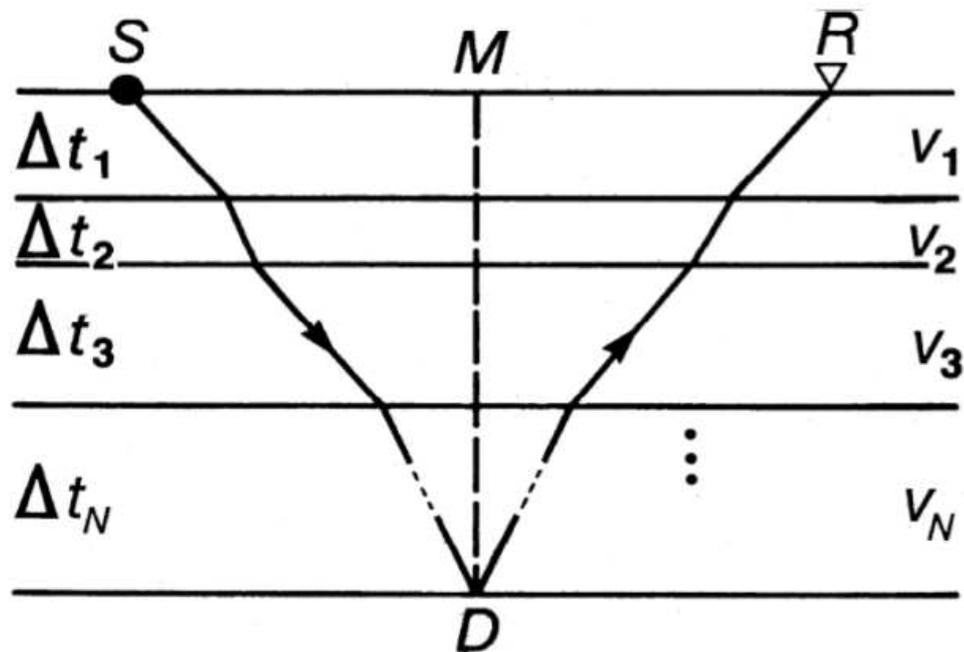
$$t(x) = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v_{RMS}^2}}. \quad (2.5)$$

Em (2.5), t_0 é o tempo duplo vertical para o modelo de camadas plano-horizontais e v_{RMS} é a velocidade média quadrática, representada por:

$$v_{RMS} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i z_i}{\sum_{i=1}^n z_i} \right]^{1/2} \quad e \quad t_0 = 2 \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{v_i}. \quad (2.6)$$

A Figura 2.12 ilustra o caso de camadas planas e os parâmetros envolvidos na equação (2.6):

Figura 2.12: Modelo de camadas plano-horizontais homogêneas e isotrópicas, onde estão representados: a fonte S , o receptor R , a velocidade da N -ésima camada V_N , o tempo de trânsito vertical simples Δt_N e o ponto onde ocorre a reflexão D .



Fonte: (YILMAZ, 1987).

3 REVISÃO DA TEORIA DO RAI0

A teoria do raio resolve a equação da onda elástica em meios suaves a partir de uma série assintótica no limite de altas frequências (CERVENY V.; RAVINDRA, 1971) em que o comprimento de onda seja muito menor do que as dimensões das estruturas do modelo considerado. Este capítulo apresentará, de forma sucinta, os principais aspectos da teoria do raio, em especial seus aspectos cinemáticos (solução da equação do Iconal), bem como os dinâmicos (solução da equação do transporte).

3.1 EQUAÇÃO ICONAL E DO TRANSPORTE

Considere a seguinte equação da onda escalar na forma:

$$\nabla^2 W - \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = 0, \quad (3.1)$$

onde $C = C(x, y, z)$ é função das coordenadas espaciais. Considera-se a seguinte solução para o campo de onda: $W(t, x, y, z)$

$$W(t, x, y, z) = e^{-i\omega t} U(x, y, z), \quad (3.2)$$

onde $U(x, y, z) = e^{i\omega\tau(x,y,z)}$ e a $e^{i\omega\tau(x,y,z)}$ especifica o instante da frente de onda.

Aplicando as derivadas em (3.2) e substituindo na equação (3.1), tem-se:

$$\left(\nabla^2 + \frac{\omega^2}{C^2} \right) U = 0 \quad (3.3)$$

que é um operador diferencial denominado de **Equação de Holmhotz**. Aplica-se este operador na função $U(x, y, z)$, o resultado deve ser nulo, ou seja: $\mathcal{L}[U] = 0$ e $\mathcal{L}[\cdot] = \left(\nabla^2 + \frac{\omega^2}{C^2} \right)$.

Agora, substituindo $U(x, y, z)$ em (3.3) e aplicando as seguintes operações de derivadas exigidas:

Primeira derivada:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = e^{i\omega\tau} \left(i\omega \frac{\partial\tau}{\partial x} A + \frac{\partial A}{\partial x} \right)$$

Segunda derivada:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = e^{i\omega\tau} \left[\left(i\omega \frac{\partial\tau}{\partial x} A + \frac{\partial A}{\partial x} \right) + i\omega \frac{\partial^2\tau}{\partial x^2} A + i\omega \frac{\partial\tau}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} \right].$$

Reorganizando os termos do resultado acima, obtém-se:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \left[-\omega^2 \left(\frac{\partial\tau}{\partial x} \right)^2 A + i\omega \left(2 \frac{\partial\tau}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial^2\tau}{\partial x^2} A \right) + \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} \right]$$

Em seguida, introduz-se algumas notações adicionais para que o cálculo se torne mais transparente:

$$\begin{aligned} \text{grad}\tau &= \nabla\tau = \frac{\partial\tau}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\tau}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\tau}{\partial z}\vec{k}, \\ (\text{grad}\tau, \text{grad}\tau) &= (\nabla\tau)^2 = \left(\frac{\partial\tau}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\tau}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial\tau}{\partial z} \right)^2, \\ (\text{grad}\tau, \text{grad}A) &= (\nabla\tau, \nabla A) = \frac{\partial\tau}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial\tau}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial y} + \frac{\partial\tau}{\partial z} \frac{\partial A}{\partial z}. \end{aligned}$$

Inserindo $U = e^{i\omega\tau} A$ na equação (3.3) e, tomando por base o resultado anterior, determina-se:

$$\left(\nabla^2 + \frac{\omega^2}{C^2} \right) U = e^{i\omega\tau} \left[\omega^2 \left(\frac{1}{C^2} - (\nabla\tau)^2 \right) A + i\omega(2(\nabla\tau, \nabla A) + \Delta\tau A) + \nabla^2 A \right]. \quad (3.4)$$

A equação (3.4) implica nas seguintes particularidades:

1º Condição:

Como

$$A \neq 0$$

e

$$\omega \neq 0$$

chega-se ao seguinte resultado

$$(\nabla\tau)^2 = \frac{1}{C^2} \quad (3.5)$$

O resultado obtido na equação (3.5) é conhecido como **Equação Iconal**. Esta equação mostra que para cada tempo de transito calculado existe uma frente de onda denominada isócrona, as quais são compostas por tempos, τ , constantes. O conhecimento da velocidade do meio em questão permite determinar o tempo de trânsito em qualquer ponto do espaço e descrever a trajetória do raio através de uma curva, porém, só existe solução numérica. Sobre a frente de onda, a partícula está sendo perturbada de alguma forma e, na medida em que o tempo passa, a frente de onda avança.

2º Condição:

Para

$$\omega \neq 0$$

encontramos a seguinte relação:

$$2(\nabla\tau \cdot \nabla A) + (\nabla^2\tau)A = 0 \quad (3.6)$$

A equação (3.6) é denominada de Equação do Transporte, a qual permite determinar o comportamento da energia do sinal ao longo de um raio de referência e isto pode ser descrito pelo traçamento dinâmico de raios. Este trabalho, restringiu-se em calcular apenas a parte cinemática do traçamento de raios, ou seja, somente os tempos de trânsito.

3.2 SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO ICONAL

A equação do Iconal representa uma equação diferencial parcial não-linear de primeira ordem para o tempo de trânsito $\tau(\vec{x})$. Esta equação é definida pela relação $t = \tau(\vec{x})$ e têm como curvas características os raios e a frente de onda em um instante t e, pode ser resolvida numericamente através do método das características (BRONSTEIN I. N.; SEMENDJAJEW, 1991) que transforma uma equação diferencial parcial em um sistema de equações ordinárias (traçamento cinemático de raios), as quais descrevem a trajetória dos raios. Esta conversão é determinada a partir de grandezas auxiliares não pertencentes ao problema inicial.

O sistema de traçamento de raios em coordenadas cartesianas é formado pelas equações (CERVENY, 2001):

$$\begin{aligned}\frac{dx_i}{d\sigma} &= p_i \\ \frac{dp_i}{d\sigma} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{1}{c^2} \\ p_i &= \frac{\partial \tau}{\partial x_i}\end{aligned}$$

onde $c = c(\vec{x})$ é a velocidade da onda, p_i são as componentes do vetor vagarosidade $\vec{p} = \nabla \tau$ definidas em coordenadas cartesianas e, σ é um parâmetro monotônico ao longo de toda a trajetória, calculado por:

$$\sigma = \sigma_0 + \int_{s_0}^s c(s) ds \quad (3.7)$$

com s representando o comprimento do raio e σ_0 é um parâmetro inicial do raio em questão.

3.3 SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DO TRANSPORTE

A equação do transporte é uma equação diferencial linear de primeira ordem em relação a amplitude $A(\vec{x})$ da onda, cuja solução permite avaliar o deslocamento da partícula. Sua equação pode ser reescrita na forma de uma equação diferencial ordinária ao longo da trajetória do raio utilizando suas coordenadas \vec{x} (CERVENY, 2001):

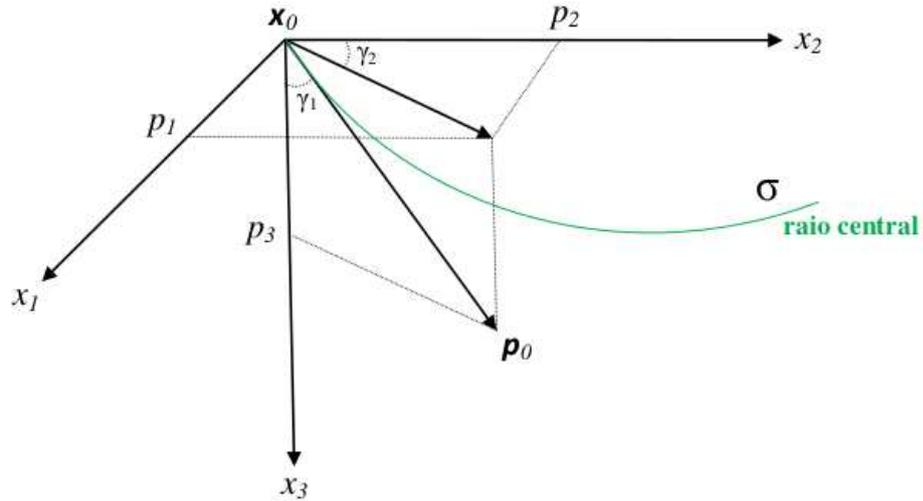
$$\frac{2}{c^2} \frac{\partial A}{\partial \sigma} + \frac{A}{cJ} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{J}{c} \right) = 0, \quad (3.8)$$

onde J representa o Jacobiano do raio e sua função é realizar a transformação das coordenadas cartesianas x_1, x_2 para as coordenadas do raio σ, γ_1 . É importante frisar que o Jacobiano do raio tende para zero nos chamados pontos de cáusticas ou singularidades, os quais introduzem problemas numéricos no que diz respeito às propriedades dinâmicas da onda. Neste caso, J pode ser interpretado como a densidade do campo de raios, e pode ser expresso por:

$$J = \frac{1}{c} \left| \frac{\partial(x_1, x_2)}{\partial(\sigma, \gamma_1)} \right|, \quad (3.9)$$

onde σ é um parâmetro monotônico ao longo do raio.

Figura 3.1: Sistema de coordenadas do raio σ, γ_1 , representado o vetor vagarosidade \vec{p}_0 com suas componentes e o parâmetro σ monotônico ao longo de todo o raio central (em verde).



Fonte: Modificado de (COSTA, 2012).

A equação (3.9) pode ser resolvida por separação de variáveis implicando na obtenção da seguinte expressão para a amplitude (COSTA, 2012):

$$A = \frac{C_i(\gamma_1)}{\sqrt{\frac{J}{c}}}, \quad (3.10)$$

onde, C_i é a constante de integração dependente apenas do ângulo de partida, γ_1 .

Com base na equação (3.10), pode-se ver que a equação do transporte foi reduzida apenas a determinação do Jacobiano do raio relacionando-o a constante de integração. Desta forma, uma vez conhecida as frentes de ondas, J pode ser resolvido numericamente (POPOV, 2002). Por outro lado, desprezando-se os termos dependentes da velocidade em (3.10) e utilizando a relação $\frac{dx_i}{d\sigma} = p_i$, a equação diferencial (3.10) pode ser reescrita em como:

$$\ln(A^2) = \frac{\partial}{\partial \sigma} \ln\left(\frac{c}{J}\right). \quad (3.11)$$

Integrando ambos os membros de (3.11) em relação a σ , a solução da equação do transporte fica (COSTA, 2012):

$$A(\sigma) = A(\sigma_0) \sqrt{\frac{c(\sigma)J(\sigma_0)}{c(\sigma_0)J(\sigma)}}. \quad (3.12)$$

4 TRAÇAMENTO PARAXIAL DE RAIOS

4.1 INTRODUÇÃO

A solução para o sistema de equações diferenciais para o traçado de raios, mostrada neste capítulo, está baseada no tratamento de Hamilton visto em (POPOV, 1977), (POPOV; PSENCIK, 1978a) e (POPOV; PSENCIK, 1978b), no entanto, a abordagem principal está direcionada para o incremento da precisão e redução do esforço computacional.

4.2 TRAÇADO CINEMÁTICO E DINÂMICO

O algoritmo usado nestes trabalho é baseado na solução do sistema de equações diferenciais cinemáticas (CERVENY, 1987):

$$\frac{d}{d\sigma} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(\sigma) \\ \mathbf{p}(\sigma) \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} -\nabla_x \left(\frac{1}{2v^2(x(\sigma))} \right) \\ \mathbf{p} \end{bmatrix}, \quad \frac{d\sigma}{d\tau} = v^2(\sigma) = v(\sigma) \frac{d\sigma}{ds}, \quad (4.1)$$

A forma dinâmica é representada por:

$$\frac{d}{d\sigma} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \gamma}(\sigma) \\ \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \gamma}(\sigma) \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} -\nabla_x \nabla_x \left(\frac{1}{2v^2(x(\sigma))} \right) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \gamma}(\sigma) \\ \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \gamma}(\sigma) \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

O primeiro sistema de equações (4.1) fornece a trajetória $x(\sigma)$ e a vagarosidade $p(x(\sigma))$ dos raios, onde σ é um parâmetro definido pela equação (3.7), $d\tau$ é o intervalo de tempo, ds é o intervalo do comprimento do arco, $c(x(\sigma))$ é o campo de velocidade e $\gamma = \sigma, \alpha$ são as coordenadas globais dos raios e α é o ângulo de partida. O fator J é representado por:

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Defini-se como: $\mathbf{x}_0 \equiv \mathbf{x}(\sigma_0, \gamma_0)$, $\mathbf{x} \equiv \mathbf{x}(\sigma, \gamma)$, $\mathbf{p}_0 \equiv \mathbf{p}(\sigma_0, \gamma_0)$ e $\mathbf{p} \equiv \mathbf{p}(\sigma, \gamma)$ os vetores definidos em coordenadas retangulares do raio e a malha de pontos, a malha de vagarosidade,

respectivamente. Desta forma:

$$\delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0, \quad \delta \mathbf{p} = \mathbf{p} - \mathbf{p}_0 \quad (4.4)$$

$$\delta \mathbf{x} = \frac{\partial \mathbf{x}(\sigma)}{\partial \gamma} \delta \gamma, \quad \delta \mathbf{p} = \frac{\partial \mathbf{p}(\sigma)}{\partial \gamma} \delta \gamma \quad (4.5)$$

são, respectivamente, as variações dos vetores posição e vagarosidade com respeito ao raio central de referência.

4.3 EXTRAPOLAÇÃO DOS TEMPOS DE TRÂNSITO

A extrapolação dos tempos de trânsito $\tau_0 \equiv \tau(\mathbf{x}_0)$ dos pontos do raio para os tempos de trânsito $\tau \equiv \tau(\mathbf{x})$ nos pontos da malha é realizado através da expansão em série de Taylor para os tempos de trânsito de campo máximo até os termos de segunda ordem, dado por:

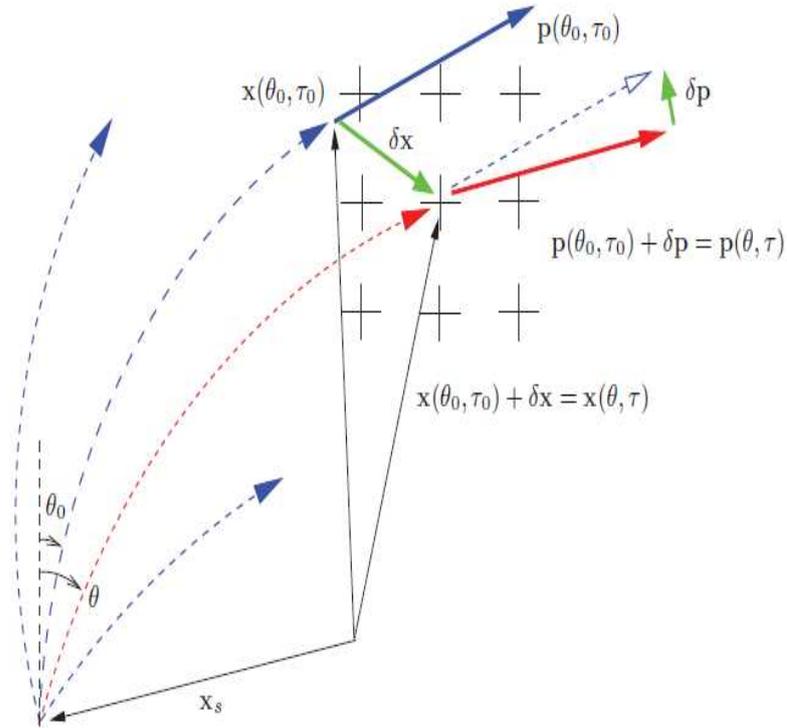
$$\tau(\mathbf{x}) = \tau(\mathbf{x}_0) + \mathbf{p}(\mathbf{x}_0) \cdot \delta \mathbf{x} + \frac{1}{2} \langle \langle M_0, \delta \mathbf{x} \rangle, \delta \mathbf{x} \rangle + \mathcal{O}(|\delta \mathbf{x}|^3), \quad (4.6)$$

onde \langle, \rangle é o produto interno e M_0 é a matriz de curvatura de segunda ordem calculada pelo traçamento dinâmico de raios e expressa por:

$$M_0 = \left[\frac{d\mathbf{p}}{d\gamma} \right] \left[\frac{d\mathbf{x}}{d\gamma} \right]^{-1} \Bigg|_{x_0}, \quad {}^\sigma \mathcal{J} = \det \left[\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \gamma} \right] \Bigg|_{x_0} > \epsilon. \quad (4.7)$$

A Figura 4.1 ilustra o raio central, em azul, representado pela vagarosidade inicial $\mathbf{p}(\theta_0, \tau_0)$ e pela posição inicial $\mathbf{x}(\theta_0, \tau_0)$, onde, θ_0 e τ_0 , são, respectivamente o ângulo de abertura inicial e o tempo de trânsito percorrido pelo raio central. As quantidades $\mathbf{p}(\theta, \tau)$ e $\mathbf{x}(\theta, \tau)$ representam os parâmetros do raios paraxial (em vermelho) e, são, respectivamente, a vagarosidade e a posição final calculadas por extrapolação após sofrerem suas respectivas perturbações $\delta \mathbf{p}$ e $\delta \mathbf{x}$. A partir das propriedades vagarosidade inicial $p(\theta_0, \tau_0)$, da posição inicial $x(\theta_0, \tau_0)$ que fazem parte de um raio central (em azul) e de uma perturbação na posição δx é possível determinar as propriedades contidas em um raio vizinho.

Figura 4.1: Interpretação geométrica da extrapolação dos tempos de trânsito a partir do Traçamento paraxial de raios.



Fonte: (CUNHA, 2005).

A expansão em série de Taylor só será realizada somente quando não houver cáusticas. Neste caso, a segunda equação de (4.7) será satisfeita. A vagarosidade $\mathbf{p}(\mathbf{x}_0)$ e as coordenadas do raio \mathbf{x}_0 são fornecidas pelo sistema cinemático (4.1). As segundas derivadas de M_0 são obtidas através do sistema dinâmico (4.2). Os sistemas (4.1) e (4.2) podem ser representados por:

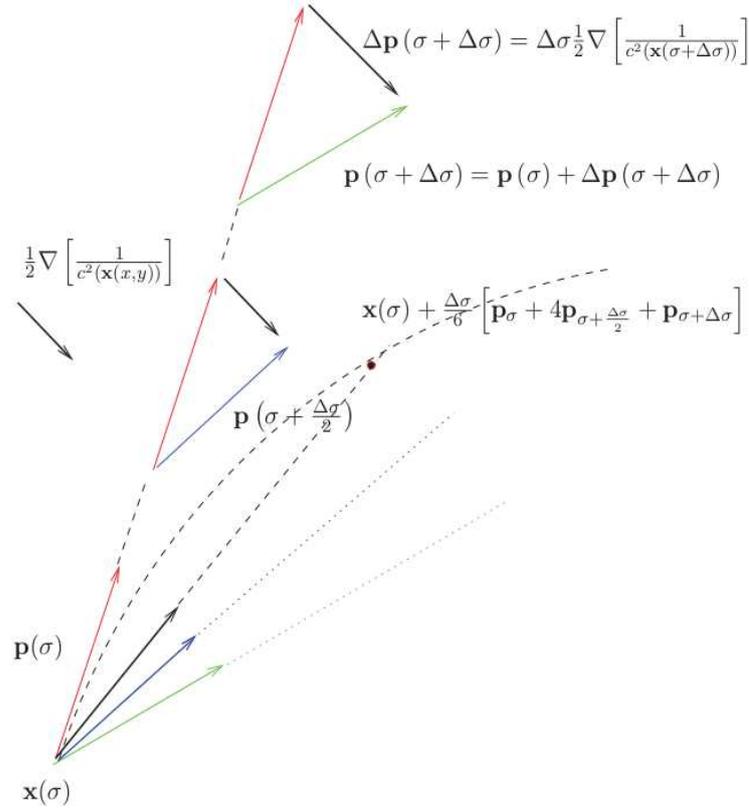
$$\frac{d\mathbf{X}}{d\sigma}(\sigma) = \mathbf{F}(\sigma), \quad \mathbf{X}(\sigma_0) = \mathbf{X}_0, \quad \mathbf{F}(\sigma_0) = \mathbf{F}_0 \quad (4.8)$$

onde \mathbf{F} propaga ambos os sistemas cinemático e dinâmico e \mathbf{X}_0 guarda os valores iniciais. A solução numérica deste sistema (4.8) é feita por meio do método Runge-Kutta de quarta ordem (RK4), dado por:

$$\mathbf{X}(\sigma + \Delta\sigma) = \mathbf{X}(\sigma) + \frac{\Delta\sigma}{6} \left[\mathbf{H}(\sigma) + 4\mathbf{H}\left(\sigma + \frac{\Delta\sigma}{2}\right) + \mathbf{H}(\sigma + \Delta\sigma) \right] \quad (4.9)$$

Se conhecemos $\mathbf{X}(\sigma)$ poderemos avaliar o próximo ponto $\mathbf{X}(\sigma + \Delta\sigma)$ empregando a equação (4.9). A Figura 4.2 nos dar uma interessante interpretação geométrica do método Runge-Kutta de Quarta Ordem:

Figura 4.2: Interpretação geométrica da propagação do campo pelo método Runge-Kutta de quarta ordem.



Fonte: (CUNHA, 2005).

No trabalho de (CUNHA, 2009), mostrou-se que o traçamento de raios cinemático fornece as coordenadas \mathbf{x}_0 dos pontos do raio pelo passo adaptativo do tempo de trânsito com o método Rk4 que controla o passo do tempo ($\Delta\tau, \Delta s, \Delta\sigma$) através do critério de curvatura alcançando a taxa de magnitude de 10^{-6} para o erro relativo assintótico quando comparado com a solução analítica assintótica mantendo constante o parâmetro Δs_p nas equações de (4.10),

$$\Delta s_p = \frac{\|\Delta \mathbf{p}\|}{\|\mathbf{p}\|} = \frac{\Delta s}{c^2} \left| \frac{\Delta(1/c)}{(1/c)} \right| = \frac{\Delta s}{\rho_c} = \Delta\theta = \text{constante}, \quad (4.10)$$

onde ρ é a curvatura do raio e $\Delta\theta$ é o intervalo do ângulo entre dois vetores de vagariedade

consecutivos. O controle do intervalo temporal controla Δs no intervalo:

$$\Delta s_{min} \leq \Delta s \leq \Delta s_{max} \quad (4.11)$$

A expansão em série de Taylor diminui a taxa de magnitude do erro relativo por um fator de 10^{-3} .

O trabalho de (CUNHA, 2005) descreve um algoritmo de determinação do tempo do campo máximo da seguinte forma:

- 1) Para cada ponto \mathbf{x}_0 do raio tome a vagarosidade \mathbf{p}_0 de (4.1) determine $M(\mathbf{x}_0)$ para a primeira das equações de (4.7) para alimentar a equação (4.2) e construa os coeficientes da série de Taylor;
- 2) determine o quadrado da janela $\Delta l \times \Delta l$ em torno do ponto \mathbf{x}_0 do raio com Δl dado pela equação

$$\Delta l = \sigma \mathcal{J}(\mathbf{x}_0) / c \Delta \alpha, \quad (4.12)$$

isto garante que todos os pontos \mathbf{x} da malha recebam as contribuições de vários pontos \mathbf{x}_0 do raio;

- 3) para cada ponto \mathbf{x} da malha dentro da janela, calcule:

$$\omega_t(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) = \frac{\sigma \mathcal{J}(\mathbf{x}_0)}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|^2 + \epsilon}, \quad \tilde{\tau}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) = \omega_t(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) \tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0), \quad (4.13)$$

o parâmetro ϵ evita que ω seja dividido por zero e, faz com que o tempo de trânsito $\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0)$ seja avaliado pela equação (4.6) no ponto \mathbf{x} da malha para o ponto \mathbf{x}_0 do raio;

- 4) guarde o fator peso $\omega_t(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0)$ na matriz $W_t(\mathbf{x})$ os valores dos tempos $\tilde{\tau}(\mathbf{x})$ na matriz $T(\mathbf{x})$, onde

$$W_t(\mathbf{x}) = W_t(\mathbf{x}) + \omega_t(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0), \quad T(\mathbf{x}) = T(\mathbf{x}) + \tilde{\tau}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) \quad (4.14)$$

- 5) repita esta tarefa para todos os pontos do raio e, no final, descartar todos os arquivos temporários do raio em questão e, em seguida, seguir para o próximo;

6) realizado o processo para todos os raios, divida todos os elementos ponderados acumulados na matriz $T(\mathbf{x})$ por todos os elementos do peso total acumulados na matriz $W_t(\mathbf{x})$, ou seja,

$$\tau(\mathbf{x}) = \Delta\tau_m + \frac{T(\mathbf{x})}{W_t(\mathbf{x})} \equiv \frac{1}{W_t(\mathbf{x})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0)} \omega_t(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) \tilde{\tau}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0), \quad (4.15)$$

onde, $N(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0)$ é o número total de pontos \mathbf{x}_0 do raio que fornecem as contribuições para os pontos \mathbf{x} da malha e $\Delta\tau_m$ são os tempos posteriores as primeiras chegadas dos tempos de trânsito correspondentes às amplitudes máximas da onda propagada no raio central.

Uma outra possibilidade está em repetir os passos de 1 a 3, e:

- 4) Para cada ponto \mathbf{x} tome a decisão de: se, $\omega_t(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) > T(\mathbf{x}) = \tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0)$, então, fim se;
- 5) repetir o último passo (5) até finalizar todos os raios;
- 6) no final, $T(\mathbf{x})$ terá unicamente as contribuições onde $\omega_t(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0)$ é máximo.

5 MIGRAÇÃO KIRCHHOFF

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos da migração Kirchhoff em profundidade, revendo os principais conceitos relacionados ao processo de empilhamento de difrações. Inicialmente, são mostrados os princípios básicos da migração Kirchhoff, descrevendo, em seguida, o processo de empilhamento de difrações, onde é apresentada a curva de Huygens, necessária ao empilhamento do dado sísmico, realizado segundo a integral de empilhamento de difrações.

5.1 INTRODUÇÃO

A migração em profundidade pode ser bem entendida baseando-se na migração Kirchhoff bidimensional. Assim, dado um modelo de velocidade e um ponto, ambos em profundidade, a migração Kirchhoff consiste basicamente em calcular a curva de tempo de difração correspondente ao ponto considerado e aplicar uma soma ponderada de todas as amostras da seção empilhada que correspondam aos tempos da curva de difração e, então, posicionar o resultado na seção migrada nas coordenadas dos seus respectivos pontos em profundidade. Para maior entendimento do método de migração mencionado, recomenda-se como referência os livros de (YILMAZ, 1987) e (CLAERBOUT, 1993), os quais possuem um grande número de exemplos e aplicações práticas.

Semelhante a teoria do raio, a migração Kirchhoff admite dois aspectos: o cinemático e o dinâmico. O primeiro, conhecido como migração cinemática que fornece apenas as imagens dos refletores em profundidade e, o segundo, como migração em verdadeira amplitude que apresenta uma estimativa dos coeficientes de reflexão das reflexões primárias. Para mais detalhes, recomenda-se os artigos de (HUBRAL P.; SCHKEICHER, 1992a), (HUBRAL P.; SCHKEICHER, 1992b), (SCHLEICHER J.; TYGEL, 1993) e (SCHLEICHER J.; TYGEL, 2001).

5.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA MIGRAÇÃO KIRCHHOFF

Considera-se inicialmente que a superfície da Terra seja plana e que a subsuperfície seja descrita por um modelo de camadas isotrópicas estratificadas, e que também existam somente

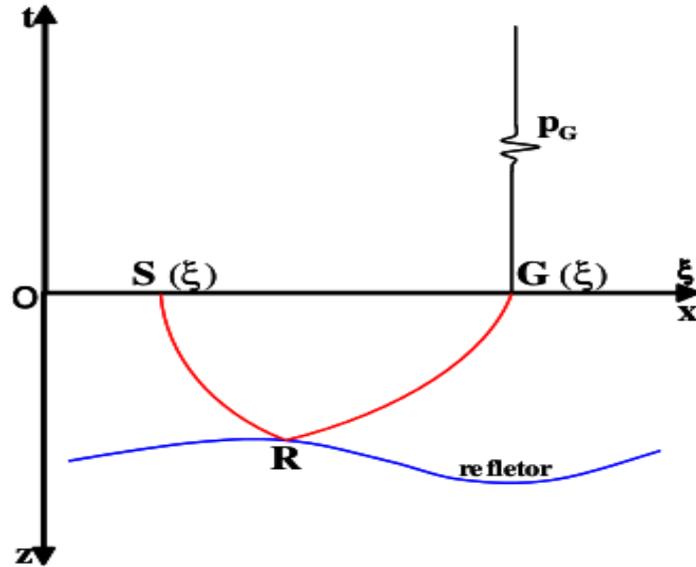
reflexões primárias P-P com pares fonte-receptor (S, G) distribuídos uniformemente sobre a superfície em $(z=0)$, cujas posições sejam funções do parâmetro ξ , ou seja

$$\mathbf{X}_S = X_S(\xi), \quad \mathbf{X}_G = X_G(\xi) \quad (5.1)$$

com ξ representando a variável de posição na abertura A .

Considere ainda que em A , cada traço sísmico seja resultado de uma superposição apenas de reflexões de ondas-P primárias de componente principal denotada por $u(\xi, t)$. A Figura 5.1 representa uma reflexão primária P_G correspondendo ao raio SRG (curva vermelha) a partir de um refletor desconhecido (curva azul), definida para os pares de fonte-receptor, designados por $S(\xi)$ e $G(\xi)$, respectivamente. Entende-se esta reflexão como a resposta cinemática de um ponto de reflexão em profundidade.

Figura 5.1: Representação de uma reflexão primária P_G , correspondente ao raio SRG (curva vermelha) a partir de um refletor desconhecido (curva azul), definida para o par fonte-receptor.



Fonte: (LUIZ, 2007).

Durante a propagação da energia no meio considerado elástico, o deslocamento de uma partícula ao longo do raio emergido em $G(\xi)$, é descrito pelo reflexão primária $u(\xi, t)$. Considerando-se o termo de ordem zero da série assintótica do raio (SCHLEICHER J.; TYGEL, 1993) e que a superfície de registro não é uma superfície livre, o deslocamento analítico da partícula por:

$$\mathbf{U}(\xi, \mathbf{t}) = R_c \frac{\mathcal{A}}{\mathcal{L}} \mathbf{F}(\mathbf{t} - \tau_{\mathbf{R}(\xi)}) \quad (5.2)$$

Nesta equação, $\mathbf{F}(\mathbf{t} - \tau_{\mathbf{R}(\xi)})$ representa o sinal analítico da fonte, que consiste do sinal da fonte (parte real) e de sua transformada de Hilbert (parte imaginária), $\tau_{\mathbf{R}(\xi)}$ e a função que fornece o tempo de trânsito da reflexão primária ao longo do raio SRG , R_c é o coeficiente de reflexão medido no ponto de reflexão R , \mathcal{A} a perda total de amplitude devido à transmissão da onda através de todas as interfaces, medida ao longo do raio e \mathcal{L} é o fator de espalhamento geométrico. Porém, a não-homogeneidade do meio ou uma determinada geometria do refletor provoca uma convergência ou divergência de raios, como consequência, a amplitude do dado sísmico de uma reflexão primária será afetada pelo fator de espalhamento geométrico.

5.3 EMPILHAMENTO DE DIFRAÇÕES

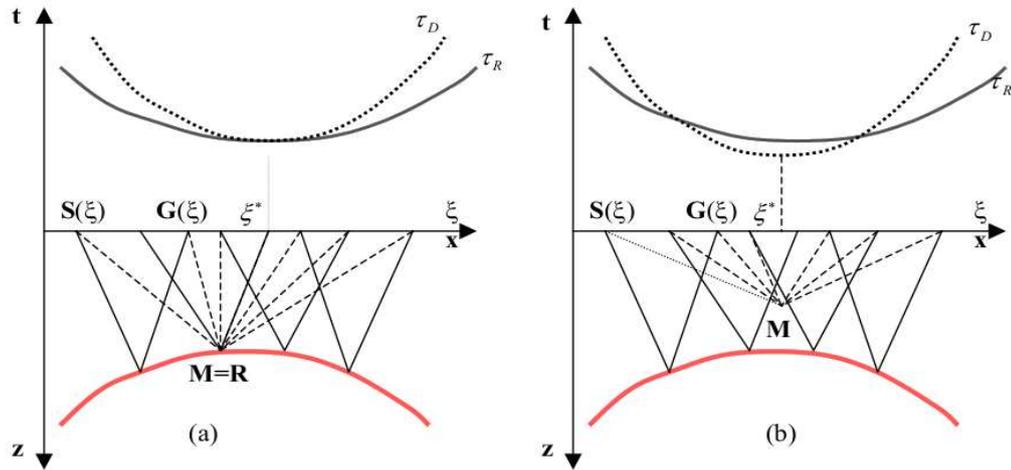
Baseado na premissa de que a seção empilhada seja muito aproximadamente idêntica à seção de afastamento nulo, a curva de difração associada a um ponto em subsuperfície é dada pelo dobro dos tempos de trânsito ao longo dos segmentos de reta que unem o ponto em questão e o ponto na superfície de registro correspondente ao par fonte-receptor com afastamento nulo. A operação de soma ao longo da curva de difração é aproximadamente tangente ao horizonte correspondente a um evento de reflexão na seção empilhada. Assim, a soma Kirchhoff produz valores significativos nos pontos que estão exatamente e/ou próximos ao refletor e valores desprezíveis para pontos distantes do refletor. A seção migrada é finalmente formada pela aplicação da soma Kirchhoff a todos os pontos referentes a uma malha pré-definida no domínio da migração. Desta forma, para um ponto M em profundidade, defini-se a curva de difração como:

$$\tau_D(\xi, M) = \tau(S, M) + \tau(M, G) \quad (5.3)$$

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

Conectando cada ponto S e G com um ponto M arbitrário em profundidade e usando-se um modelo de velocidade a priori conhecido, calcula-se a chamada curva de tempo de trânsito de difração ou curva de Huygens τ_D para esse ponto. Ambas as curvas de tempo de trânsito

Figura 5.2: Curvas de tempos de trânsito de reflexões (τ_R) e de difrações (τ_D) para diferentes escolhas do ponto M em uma configuração de AC.



Fonte: (LUIZ, 2007).

dependem do par fonte-receptor (S, G) e são, portanto, funções de ξ .

Conforme a Figura 5.2, podem ser visualizadas duas situações: (a) o ponto difrator, M , coincide com um ponto de reflexão R . Neste caso a curva de difração será tangente à curva de reflexão e o resultado do empilhamento das amplitudes é diferente de zero; (b) o ponto difrator, M , não coincide com um ponto do refletor, neste caso o resultado do empilhamento das amplitudes é desprezível (SCHLEICHER J.; TYGEL, 1993).

5.4 INTEGRAL DE EMPILHAMENTO DE DIFRAÇÕES

Para que o processo de empilhamento de difrações seja possível é necessário um macro modelo de velocidade juntamente com um algoritmo eficiente de determinação dos tempos de trânsito para a construção das curvas de difrações, ao longo das quais as amplitudes do dado sísmico serão somadas. Este somatório pode ser matematicamente representado por:

$$V(M, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_A d\xi W(\xi, M) U(\xi, t + \tau_D(\xi, M)) \quad (5.4)$$

onde $U(\xi, t + \tau_{D(\xi, M)})$ é o dado sísmico e $W(\xi, M)$ o fator de ponderação da integral, representando a função peso. Substituindo na equação acima a representação do dado sísmico representado pela equação (5.2), tem-se:

$$V(M, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_A d\xi W(\xi, M) R_c \frac{\mathcal{A}}{\mathcal{L}} F(t + \tau_F(\xi, M)) \quad (5.5)$$

sendo $\tau_F(\xi, M) = \tau_D - \tau_R(\xi)$, a diferença entre os tempos de difração e de reflexão. A equação (5.5) representada no domínio da frequência assume a forma:

$$\hat{V}(M, t) = \frac{\hat{F}(\omega)}{\sqrt{2\pi}} \int_A d\xi W(\xi, M) R_c \frac{\mathcal{A}}{\mathcal{L}} e^{i\omega\tau_f(\xi, M)} \quad (5.6)$$

sendo $\hat{V}(M, \omega)$ e $\hat{F}(\omega)$ as transformadas de Fourier de $V(M, t)$ e $F(t + \tau_F(\xi, M))$ em t , respectivamente.

A integral (5.6), não pode ser resolvida analiticamente, pois pertence ao grupo de integrais que possuem o núcleo oscilatório, que depende de um parâmetro, em geral a frequência. Neste caso, esta equação é aproximada para altas frequência, usando-se o método da fase estacionária de (BLEISTEIN, 1984).

5.5 AVALIAÇÃO ASSINTÓTICA DA INTEGRAL DE EMPILHAMENTO

Aplicar o método da fase estacionária na equação (5.6), significa expandir a função fase $\tau_F(\xi, M)$ em série de Taylor em relação ao ponto estacionário ξ^* , até os termos de segunda ordem:

$$\tau_F(\xi, M) = \tau_F(\xi^*, M) + \frac{1}{2} H_F (\xi - \xi^*)^2 \quad (5.7)$$

em que H_F é a matriz Hessiana de segunda ordem, dada pelas segundas derivadas de τ_F avaliada em $\xi = \xi^*$.

Sendo $\frac{\partial \tau_F}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\xi^*} = 0$ e considerando $H_F = \frac{\partial^2 \tau_F(\xi, M)}{\partial \xi^2} \Big|_{\xi=\xi^*} \neq 0$, usando o método da fase estacionária, tem-se a solução assintótica (BLEISTEIN, 1984):

$$\hat{V}(M, \omega) \approx \frac{1}{\sqrt{-i\omega}} \hat{F}(\omega) W(\xi^*, M) \frac{R_c \mathcal{A}}{\mathcal{L} \sqrt{H_F}} \exp \left[i\omega \tau_F(\xi^*, M) + \frac{i\pi}{4} (\text{sgn} H_F - 1) \right]. \quad (5.8)$$

A expressão acima revela que o empilhamento realizado de acordo com a equação (5.4), in-

trodeuz no resultado um deslocamento de fase de $\frac{\pi}{4}$ devido ao fator $\frac{1}{\sqrt{-i\omega}}$, que possui, tamb em, a propriedade de atenuar as altas frequ encia. Neste caso, a equa ao (5.4) deve ser definida de tal forma que o efeito do deslocamento de fase seja retirado e que a forma do sinal da fonte seja preservada. Sendo assim, a integral de migra ao se torna:

$$V(M, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_A d\xi W(\xi, M) \hat{U}_F(\xi, t + \tau_{D(\xi, M)}) \quad (5.9)$$

onde \hat{U}_F   o dado s smico filtrado que pode ser representado no dom nio da frequ encia representada abaixo:

$$\hat{U}_F(\xi, \omega) = \sqrt{i\omega} (1 + \operatorname{sgn}\omega) \hat{U}(\xi, \omega) \quad (5.10)$$

em que \hat{U}_F   a transformada de Fourier do tra o s smico anal tico filtrado e \hat{U}   a transformada de Fourier da parte real do tra o s smico de entrada.

Os resultados apresentados neste trabalho levam em considera ao apenas os aspectos cinem ticos da migra ao do tipo Kirchhoff. Neste caso, a fun ao peso $W(\xi, M)$ ser  igual a 1.

Por meio da equa ao integral de empilhamento de difra ao (5.4), observa-se a necessidade do c culo da fun ao tempo de tr nsito de difra ao. Sendo este trabalho fundamentado na teoria paraxial do raio, a fun ao $\tau_D(\xi, M)$ ser  obtida atrav s da solu ao num rica da aproxima ao paraxial do tempo de tr nsito realizada a partir do m todo de Runge Kutta de quarta ordem.

6 RESULTADOS

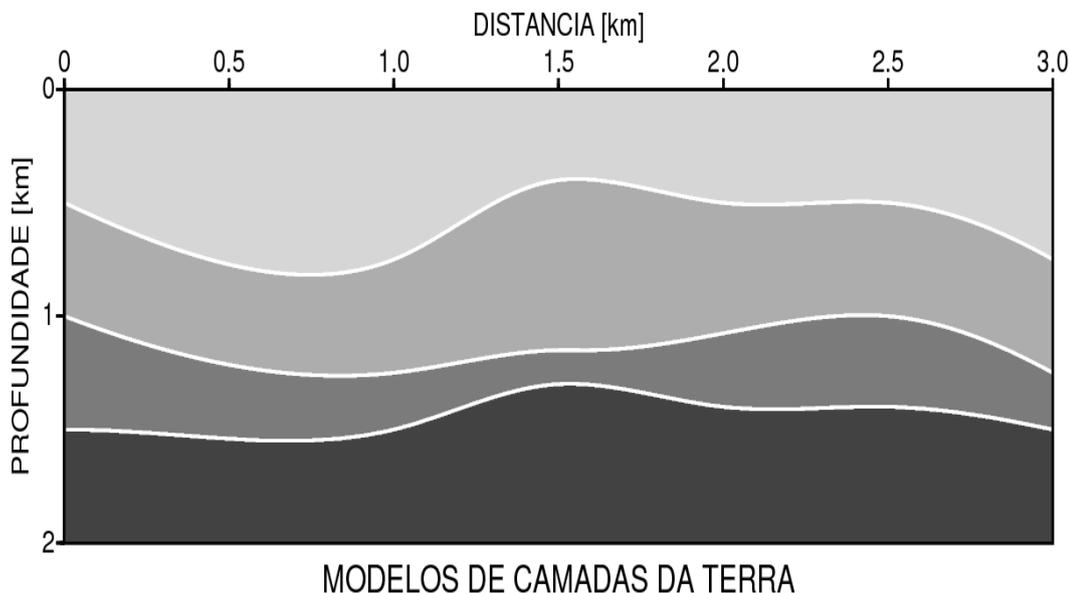
Neste capítulo será apresentado a aplicação da extrapolação paraxial dos tempos de trânsito pelo método Runge-Kutta de quarta ordem, a partir do qual foram obtidos os tempos de trânsito de um modelo qualquer. São considerados dois modelos sintéticos para os testes: um modelo simples gerado por meio da rotina Trimodel do pacote SEISMIC UNIX (SU) e o modelo Marmousi que apresenta um alto grau de complexidade geológica. Para efeitos de comparações os tempos de trânsito foram calculados de duas maneiras: por meio da rotina RAYT2D do pacote SU que é considerada uma forma robusta de avaliação e através do método Paraxial05. Para que a migração Kirchhoff fosse realizada foram necessários dois dados de entrada: os dados sísmicos e os tempos de trânsito.

Os dados sísmicos do modelo simples foram obtidos por meios de um script escrito em shell e o modelo exato de velocidade foi determinado e calculado a partir de uma rotina escrita em MATLAB.

6.1 MODELO SIMPLES

O modelo simples bidimensional (2D) foi criado a partir da rotina TRIMODEL do pacote SU. A Figura 6.1 representa o modelo de vagarosidade, o qual é convertido no campo de velocidade que é o dado de entrada ao cálculo dos tempos de trânsito.

Figura 6.1: Modelo simples com 3 camadas sobre um semi-espaço obtido a partir da rotina TRI-MODEL do pacote Seismic Unix (SU). Este modelo é composto pelas vagarosidades diferentes embutidas no limite de cada camada. A diferença na tonalidade entre estas informa isto.



Fonte: Autor.

Trata-se de um modelo geológico simples de 3 camadas sobre um semi-espaço, a partir do qual deseja-se simular situações frequentes na natureza como camadas dobradas, evidenciando a presença de geometrias anticlinais, sinclinais, armadilhas estratigráficas, bem como, a variação vertical no modelo de velocidade. As velocidades variam de 1500 m/s, na primeira camada na superfície, até 2580 m/s na última camada. A tabela 6.11 contém os parâmetros que descrevem o modelo da Figura 6.1:

Tabela 6.1: Tabela dos parâmetros usados no modelo de 3 camadas sobre um semi-espaço. Este modelo foi gerado a partir da função TRIMODEL do pacote SU. Esta função compõe o modelo a partir da interpolação por triangularização.

Parâmetros usados no modelo da Figura 6.1.	
Distância Horizontal	3000 m
Distância Vertical	2000 m
Vagarosidade da camada 1	44×10^{-9} s/m
Vagarosidade da camada 2	35×10^{-9} s/m
Vagarosidade da camada 3	25×10^{-9} s/m
Vagarosidade da camada 4	15×10^{-9} s/m

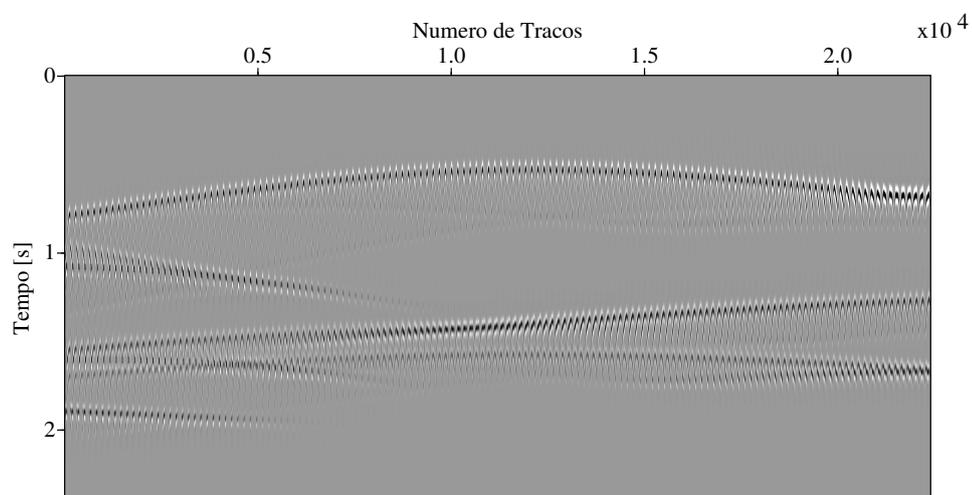
Fonte: Autor.

Para que fosse possível os testes finais de migração foram necessários determinar os traços sísmicos do modelo da Figura 6.1 e, também, os tempos de trânsito de reflexão das ondas gerados a partir do modelo de velocidade. Nas próximas seções serão descritos os processo de aquisição do dado sísmico do modelo e as etapas de geração do modelo exato de velocidade.

6.2 AQUISIÇÃO DO DADO SÍSMICO DO MODELO

Os traços sísmicos do modelo são gerados a partir de um algoritmo escrito em SHELL SCRIPT baseado em rotinas retiradas do pacote SU. O dado de entrada para o cálculo do dado sísmico é o modelo de vagarosidade da Figura 6.1.

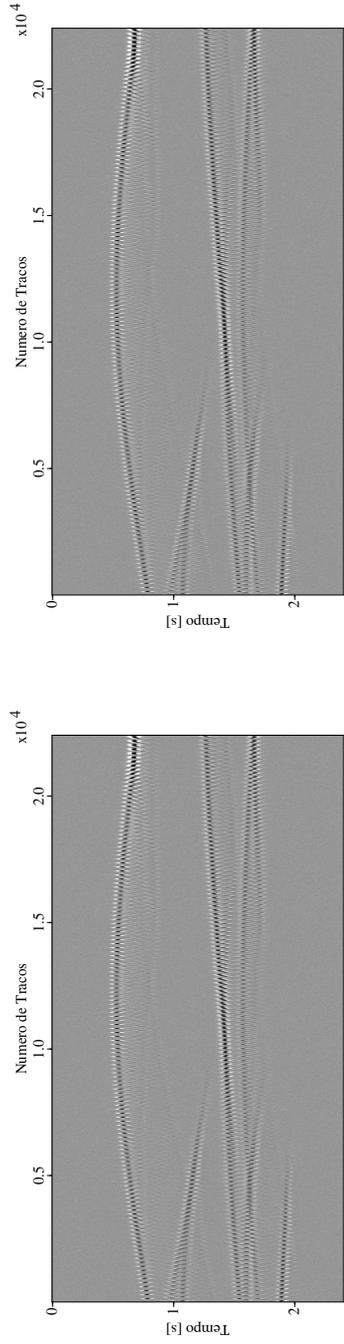
Figura 6.2: Dado sísmico do modelo da Figura 6.1 gerado a partir de um algoritmo escrito em SHELL SCRIPT.



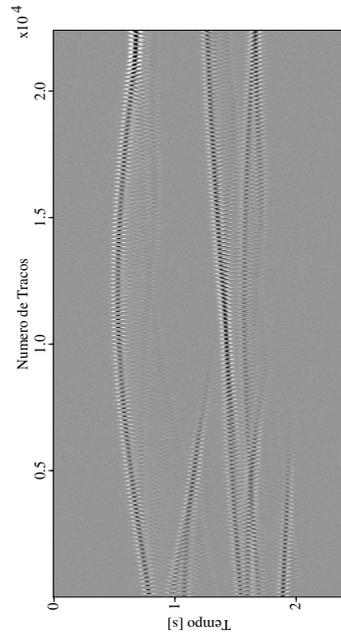
Fonte: Autor.

A Figura 6.2 corresponde ao dado sísmico do modelo sem ruído. Objetivando aumentar o grau de complexidade do meio e, com isso testarmos a sensibilidade do algoritmo de migração, introduziu-se 15% em 6.4(a), 30% em 6.4(b), 45% em 6.4(c) e 60% em 6.4(d) de ruído no dado sísmico de entrada.

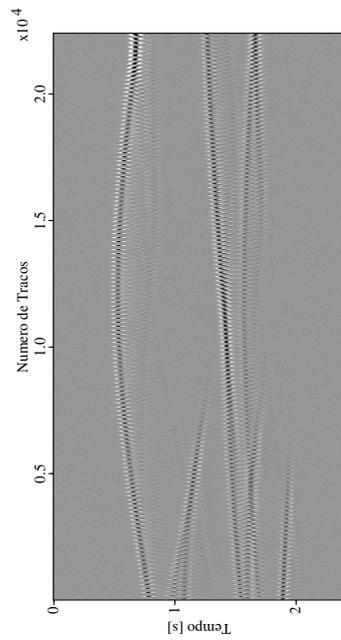
Figura 6.3: Inclusão de ruído aleatório no dado sísmico de entrada.



(a) Dado sísmico com 15% de ruído.



(b) Dado sísmico com 30% de ruído.



(c) Dado sísmico com 45% de ruído.

(d) Dado sísmico com 60% de ruído.

Os parâmetros usados na obtenção do dado sísmico estão descritos na tabela abaixo:

Tabela 6.2: Tabela dos parâmetros usados na obtenção do dado sísmico por meio de um algoritmo escrito em SHELL SCRIPT baseado em rotinas do pacote SU.

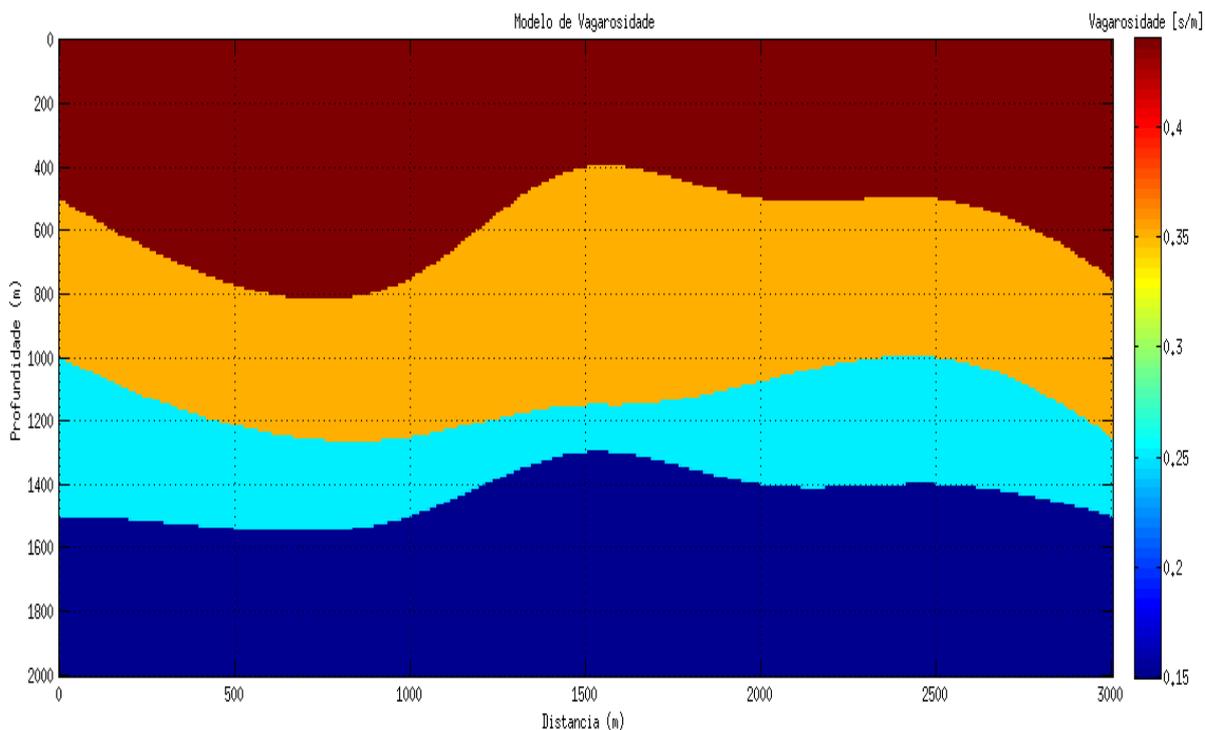
Parâmetro	Valor
Frequência Máxima	62,5 Hz
Intervalo de Amostragem	$dt = 0,008$ s
Número de Amostra de Tempo 1	301
Tempo máximo de registro	3 s
Número Total de Traços	22400
i_{max}	201
j_{max}	301
Número de pontos da malha	$201 \times 301 = 60501$
Distância Horizontal	3000 m
Distância Vertical	2000 m
Velocidade mínima	1507 m/s
Velocidade máxima	2581 m/s

Fonte: Autor.

6.3 OBTENÇÃO DO MODELO DE VELOCIDADE

O cálculo dos tempos de trânsito de reflexão da onda necessitam de um macro modelo de velocidade de entrada. Em vista disso, foi necessário obter uma malha uniformizada que representasse este modelo. A partir do modelo de vagarosidade triangularizado foi possível determinar um modelo de vagarosidade uniformizado usando rotinas inclusas no pacote SU. Em primeiro lugar, tivemos escolhido-se o intervalo de discretização apropriado do modelo e, com isto, determinou-se a dimensão da malha. De início, escolheu-se o intervalo de discretização de 10 metros para geração do modelo de vagarosidade uniformizado (Figura 6.4).

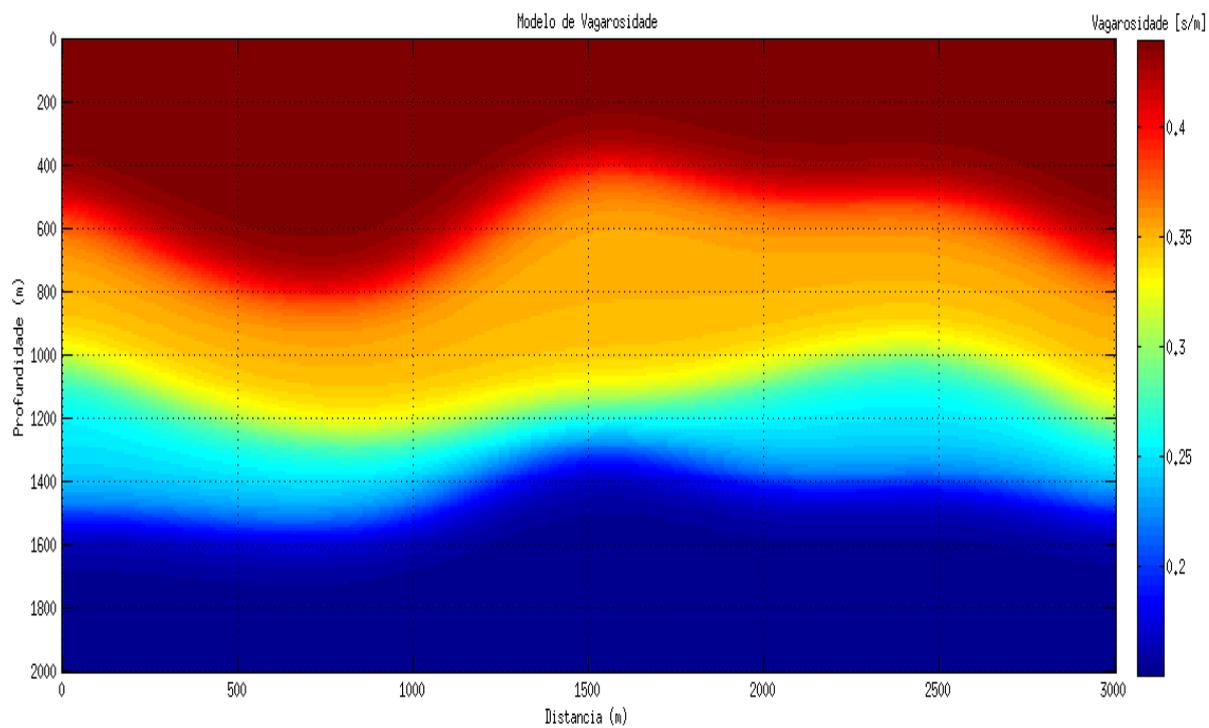
Figura 6.4: Modelo de vagarosidade Uniformizado. Primeiro passo necessário à obtenção do modelo exato de velocidade.



Fonte: Autor.

Na Figura 6.4 ocorre uma mudança abrupta de propriedade física entre uma camada e outra. Para teoria do raio, este fato é causador de problemas numéricos para os resultados obtidos pelo traçamento de raios. Por isso, deve-se ter em mãos modelos, nos quais a passagem de propriedade física entre uma camada e outra seja suave. Desta forma, tem-se a necessidade de suavizar o modelo de 6.4, como pode ser visto em 6.5:

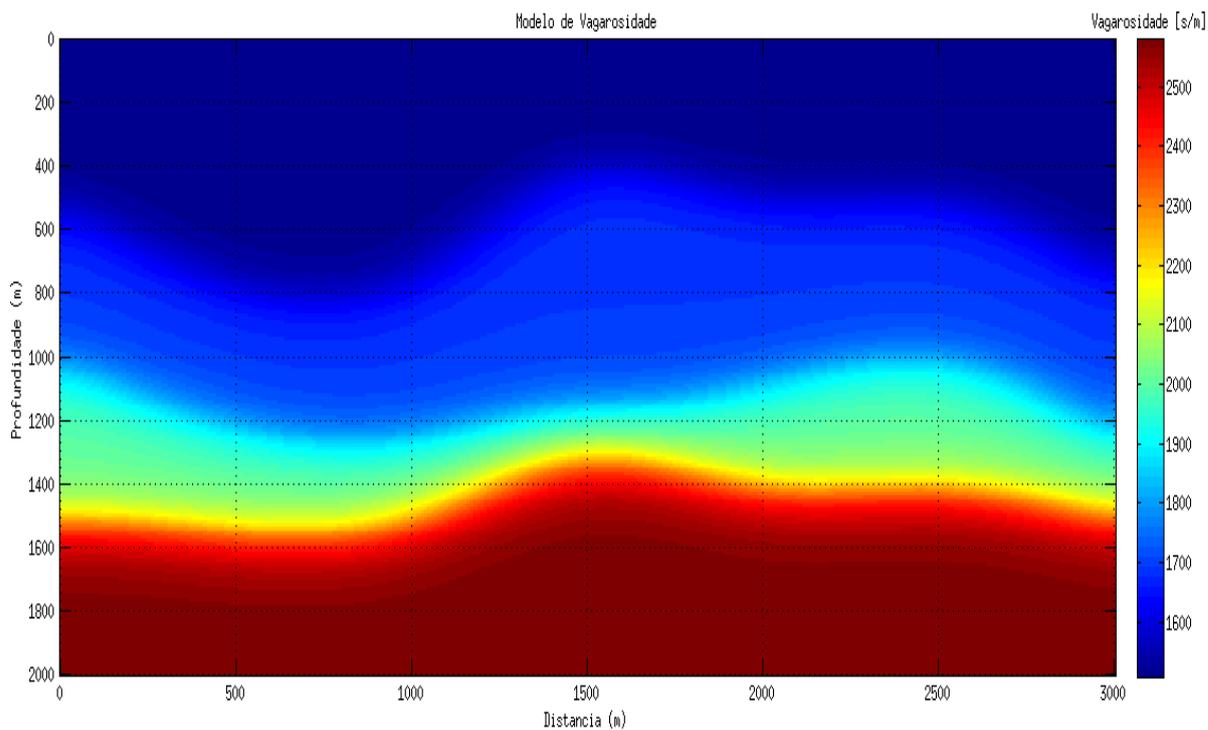
Figura 6.5: Modelo de vagarosidade suavizado. Este modelo deve ser usado no processo de obtenção do modelo de velocidade final suavizado.



Fonte: Autor.

A matriz vagarosidade representada pela Figura 6.5 é usada como dado de entrada para obtenção do modelo de velocidade final suavizado da Figura 6.6. Tais procedimentos foram realizados a partir de uma rotina escrita em MATLAB.

Figura 6.6: Modelo de velocidade suavizado. Este modelo deve ser usado no processo de obtenção das tabelas dos tempos de trânsito calculados de duas formas: Rotina do SU e método Paraxial05.



Fonte: Autor.

A tabela 6.3 discrimina os parâmetros necessários à obtenção do modelo de velocidade final da Figura 6.6:

Tabela 6.3: Tabela dos parâmetros usados na obtenção do modelo exato de velocidade necessário à obtenção das tabelas dos tempos de trânsito de reflexão da onda sísmica.

Parâmetro	Valor
Intervalo de amostragem vertical	$dz = 0,01 \times 10^2$ m
Intervalo de amostragem horizontal	$dx = 0,01 \times 10^2$ m
i_{max}	201
j_{max}	301
Número de pontos da malha	$201 \times 301 = 60501$
Fator de suavização vertical	15
Fator de suavização horizontal	15
Velocidade mínima	1508 m/s
Velocidade máxima	2582 m/s

Fonte: Autor.

6.4 CÁLCULO DOS TEMPOS DE TRÂNSITO PELO MÉTODO PROPOSTO

A determinação dos tempos de trânsito foi realizada através de um algoritmo escrito em SHELL SCRIPT que foi baseada na rotina RAYT2D pertencente ao pacote SU. A outra maneira de determinação dos tempos de trânsito foi realizada por meio do método Paraxial05.

6.4.1 Tempos-SU

O algoritmo que realiza o cálculo dos tempos de trânsito gera arquivos de saída que guardam as posições das estações de tiros e seus respectivos tempos de trânsito. Trata-se de uma matriz cúbica cuja primeira coordenada são as posições das fontes x_s e, seguidamente, os tempos de trânsito verticais-horizontais ocupando as segundos e terceiros posicionamento da matriz, ou seja, $T(x_s, t_z, t_x)$. Os parâmetros utilizados na obtenção dos tempos de trânsito estão discriminados na tabela 6.4:

Tabela 6.4: Tabela dos parâmetros usados na obtenção dos tempos de trânsito a partir da extrapolação paraxial.

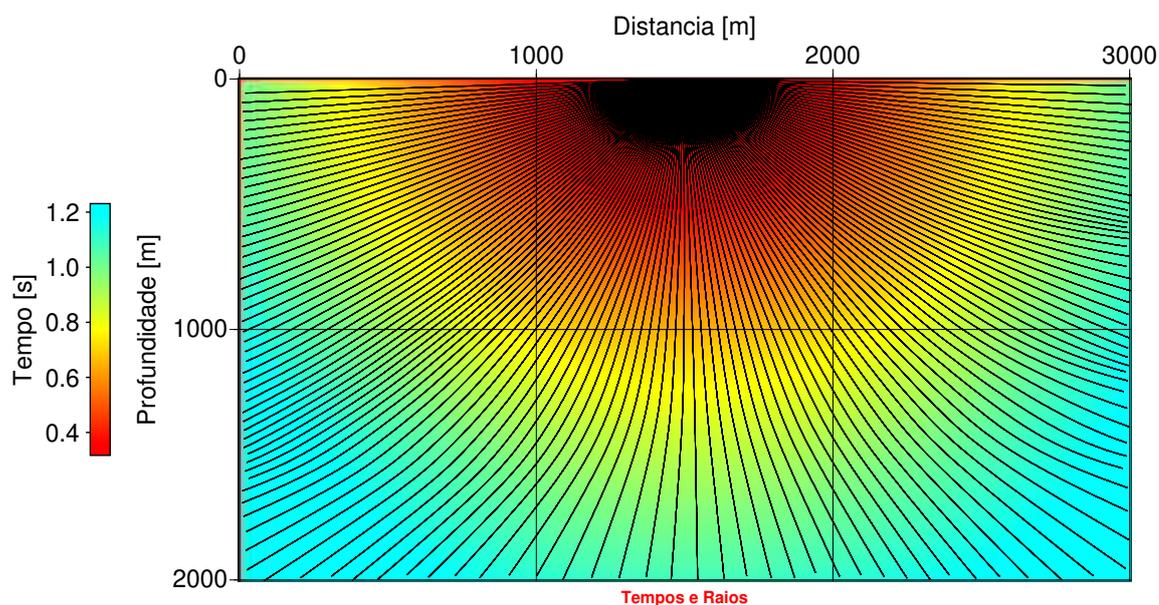
Parâmetro	Valor
Intervalo de amostragem temporal no traçamento de raios	$dt = 0,008$ s
Números de amostras verticais de tempos	$ntz = 201$
Intervalo de amostragem vertical da malha de velocidade	$dz = 10$ m
Intervalo de amostragem horizontal da malha de velocidade	$dx = 10$ m
Primeira amostra vertical de tempo	$tz_0 = 0$ s
Primeira amostra horizontal de tempo	$tx_0 = 0$ s
Coordenada horizontal da primeira fonte	$fx_s = 0$ m
Coordenada vertical da primeira fonte	$fz_s = 0$ m
Número de fontes	$nx_s = 301$
Incremento entre as fontes	$dx_s = 10$ m
Abertura horizontal do traçamento de raio	$aperx = 1000$
Primeiro ângulo de partida dos raios	$fa = -65$
Incremento do ângulo de partida	$da = 1$
Ângulo mínimo de emergência	$a_{min} = 0$
Ângulo máximo de emergência	$a_{max} = 90$
Fator que determina o raio de extrapolação	$fac = 0.001$ m

Fonte: Autor.

6.4.2 Tempos - Paraxial05

Fazendo uso de um algoritmo fornecido pelo Paraxial05, foi possível determinar o arquivo dos tempos de trânsito para um modelo de velocidade de entrada. O cartão de parâmetros do programa requer quantidades, tais como, as posições (z_0, x_0) das fontes sísmicas disparadas na superfície de aquisição. O programa exige que o arquivo das fontes possua número de linhas igual ao número de colunas da matriz de velocidade. A segunda informação de entrada é o macro modelo de velocidade, bem como suas especificações de dimensionamento i_{max}, j_{max} e discretização dz, dx . Com isto, é realizada a determinação dos arquivos dos tempos de trânsito para cada disparo na superfície da aquisição. A Figura 6.7 ilustra os tempos de trânsito para um disparo realizado no centro do modelo de velocidade, bem como os raios paraxiais:

Figura 6.7: Tempos de trânsito para um disparo localizado no centro de modelo de velocidade. São mostrados os raios paraxiais disparados a partir da fonte localizada na coordenada horizontal $x = 1500$ m.



Fonte: Autor.

Para que fosse efetuada a migração em profundidade, tem-se que determinar uma malha cúbica de tempos de trânsito, $t[nxs][nzo][nxo]$, onde nxs é a localização horizontal do disparo, nzo é o número de amostras verticais de tempos e, nxo é o número de amostras horizontais de tempos. A matriz cúbica necessária ao processo de migração foi determinada a partir de um processo de concatenação dos arquivos dos tempos de trânsito na ordem crescente dos disparos. O algoritmo de concatenação está descrito nos apêndices deste trabalho.

Os parâmetros de entrada exigidos na determinação dos tempos de trânsito estão discriminados na tabela 6.5:

Tabela 6.5: Tabela dos parâmetros usados na obtenção dos tempos de trânsito a partir da extração Paraxial05.

Parâmetro	Valor
Coordenadas das fontes	<i>coordendon.dat</i>
Intervalo temporal	$dt = 0,008$ s
Números de amostras verticais de tempos	$ntz = 201$
Número de amostras horizontais de tempos	$ntx = 301$
Coordenada inicial horizontal do campo de velocidade	$x_0 = 0$ m
Coordenada inicial vertical do campo de velocidade	$z_0 = 0$ m
Número de pontos do raio	$np = 50000$
Número de amostras verticais do campo de velocidade	$i_{max} = 201$
Número de amostras horizontais do campo de velocidade	$j_{max} = 301$
Intervalo de amostragem vertical da malha de velocidade	$dz = 10$ m
Intervalo de amostragem horizontal da malha de velocidade	$dx = 10$ m
Coordenadas horizontais da fonte	$x = 1$ a 301
Coordenada vertical da fonte	$z = 0$
Incremento entre as fontes	$dx_s = 10$ m
Ângulo inicial da fonte	$ang_{ini} = 0$
Ângulo final da fonte	$ang_{end} = 6.283185307179586$
Amostragem angular	$delt_{ang} = 0.0785398163397448$
Ângulo mínimo de emergência	$a_{min} = 0$

Fonte: Autor.

6.5 MODELO MARMOUSI

O dado Marmousi é um modelo geológico sintético, no qual está inserido um auto grau de complexidade geológica. Este modelo é largamente usado pela comunidade geofísica objetivando validar os algoritmos desenvolvidos, visto que, às dificuldades impostas por sua geometria complexa exigem cálculos precisos e algoritmos robustos na obtenção de um bom resultado. A tabela 6.6 informa os principais parâmetros que descrevem o dado Marmousi:

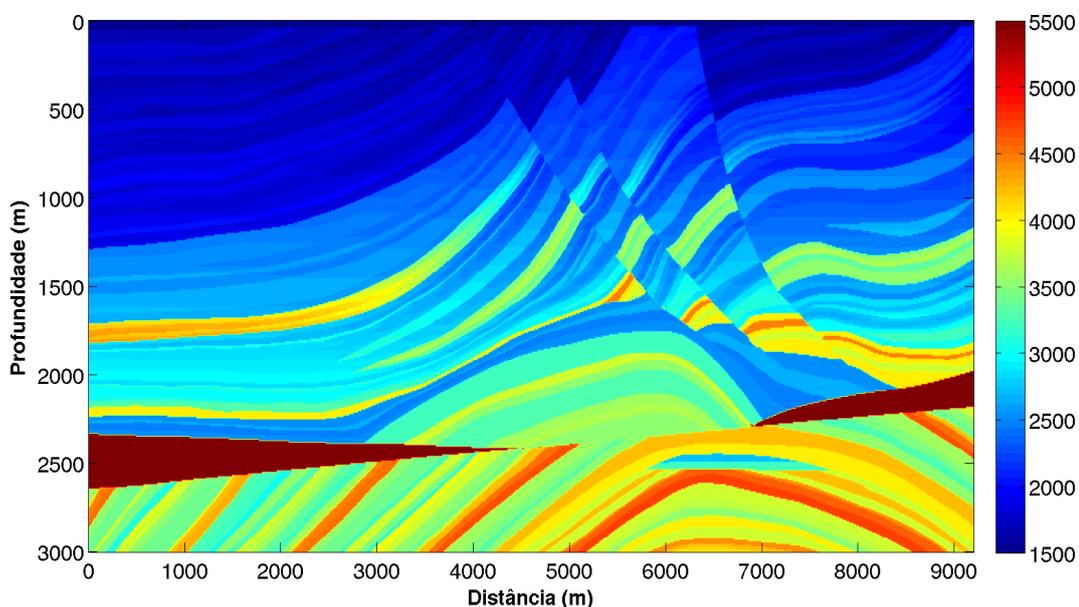
Tabela 6.6: Tabela de discriminação do Modelo exato de velocidade Marmousi.

Parâmetro	Valor
Número de traços sísmicos	$ntr = 25056$
Intervalo de amostragem temporal	$dt = 0,004$ s
Número de amostras de tempo	$nt = 900$
Tempo máximo	$t_{max} = 3,6$ s
i_{max}	900
j_{max}	25056
Número de pontos da malha	$900 \times 25056 = 22550400$

Fonte: Autor.

Através do modelo de velocidade do modelo Marmousi, pode-se ter uma ideia do seu grau de complexidade geológica, conforme ilustra a Figura 6.8:

Figura 6.8: Velocidade do modelo geológico Marmousi. Este é um modelo sintético apresentando um auto grau de complexidade geológica.



Fonte: (VERTEEG, 1994).

Na tabela 6.7 abaixo estão representados os parâmetros que caracterizam o modelo de velocidade acima:

Tabela 6.7: Tabela de discriminação do Modelo exato de velocidade Marmousi.

Parâmetro	Valor
Intervalo de amostragem vertical	$dz = 12$ m
Intervalo de amostragem horizontal	$dx = 12$ m
i_{max}	243
j_{max}	767
Número de pontos da malha	$243 \times 767 = 186381$
Velocidade mínima	1500 m/s
Velocidade máxima	5083 m/s

Fonte: Autor.

6.6 RESULTADOS DA MIGRAÇÃO

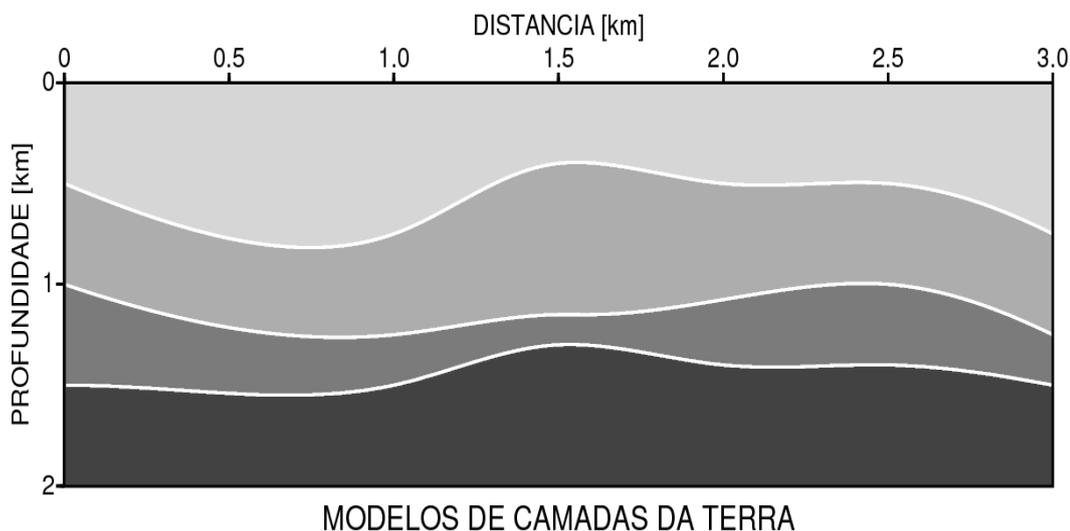
A migração em profundidade consiste em colapsar a energia espalhada e alocar os refletores em seus respectivos pontos em profundidade (YILMAZ, 1987). Quando este processo é realizado para toda continuidade dos refletores, o resultado final é uma imagem aproximada da subsuperfície. A partir destes resultados é possível ter uma ideia da distribuição geologia da região, bem como, estimar o posicionamento correto em profundidade das estruturas. Para que o resultado final tenha um auto grau de confiabilidade, deve-se realizar testes numéricos partindo de modelos inicialmente conhecidos. Caso o resultado final da migração guarde alguma semelhança na geometria dos refletores, bem como em suas posições em profundidade, o algoritmo é considerado robusto e a imagem confiável.

Os processos de migração foram realizados em duas etapas: Na primeira, fez-se uso das tabelas dos tempos de trânsito provenientes dos cálculos realizados com as rotinas SU, e na segunda etapa usamos os tempos de trânsito determinados com o método Paraxial05.

6.6.1 Migração com Aproximação Paraxial - SU.

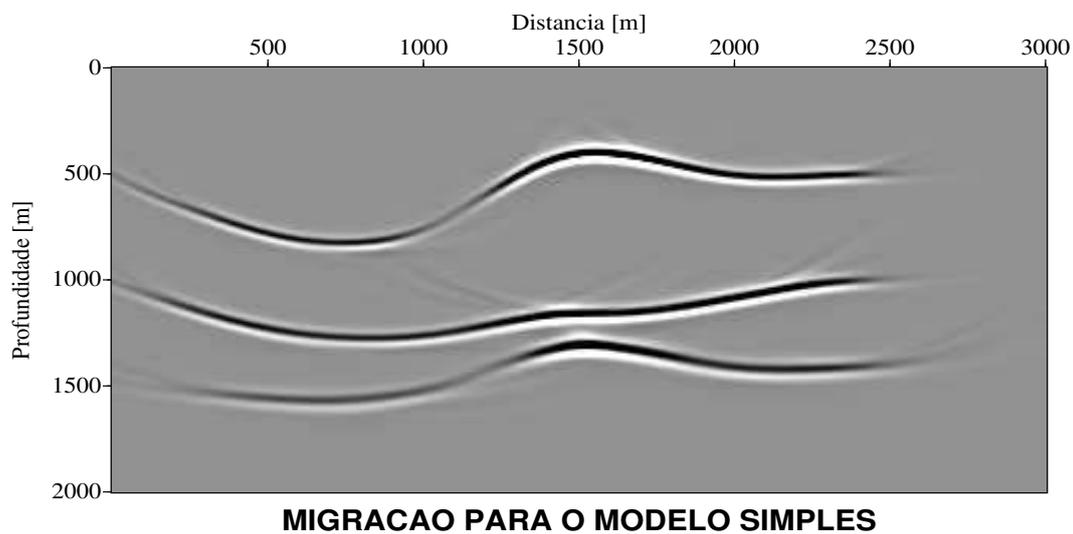
Nos processos de migração com os tempos de trânsito SU, consideramos duas situações: Na primeira consideramos livres de ruídos os dados sísmicos do modelo. Na segunda situação, introduzimos 15%, 30%, 45% e 60% de ruídos nos dados sísmicos. A Figura 6.10 é o resultado da migração para o dado sísmico do modelo livre de ruído:

Figura 6.9: Modelo simples com 3 camadas obtido a partir da rotina TRIMODEL do pacote Seismic Unix (SU). Este modelo é composto pelas vagarosidades diferentes embutidas no limite de cada camada. A diferença na tonalidade entre estas informa isto.



Fonte: Autor.

Figura 6.10: Resultado da migração em profundidade para o modelo simples livre de ruídos. Os tempos de trânsito usados neste resultado são provenientes da extrapolação paraxial feita com o auxílio do SU.



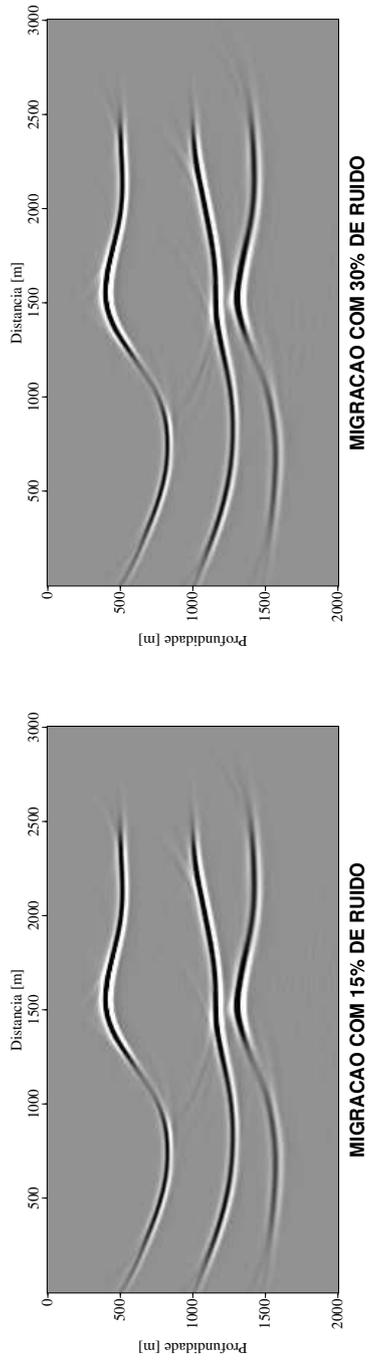
Fonte: Autor.

De maneira geral, pode-se observar que a imagem acima descreve de forma similar o

modelo geológico inicial da Figura 6.9, pois a geometria dos refletores imageados são similares a do modelo inicial e a suas profundidades estão localizadas aproximadamente nas mesmas coordenadas (z, x) das estruturas do modelo inicial. Existem alguns problemas numéricos neste resultado, tais como: devido à falta de cobertura adequada, as bordas da imagem migrada de 6.10, apresentam-se com baixa iluminação; em algumas regiões dos refletores, observa-se zonas de sobras com baixas amplitudes devido a baixa densidade de raios nestas coordenadas.

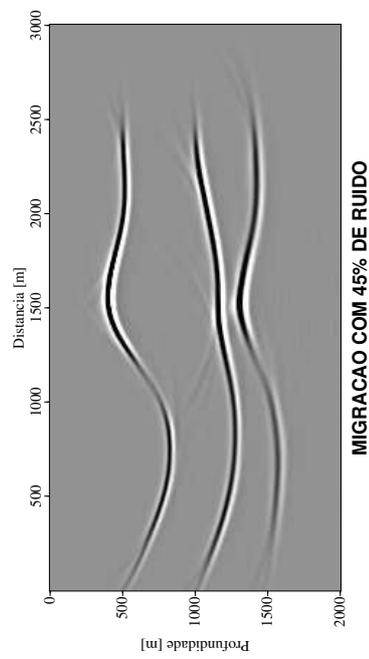
No resultado da Figura 6.11 foi adicionado 15% de ruído em 6.12(a), 30% ruído em 6.12(b), 45% de ruído em 6.12(c) e 60% de ruído em 6.12(d) objetivando aumentar o grau de dificuldades do processo de migração e, com isso, analisar os limites de robustez do algoritmo. Na Figura 6.12, representou-se os resultados para migração com ruído na forma de traço sísmico:

Figura 6.11: Migração com ruído adicionado ao dado.



(a) Migração para 15% de ruído ao dado.

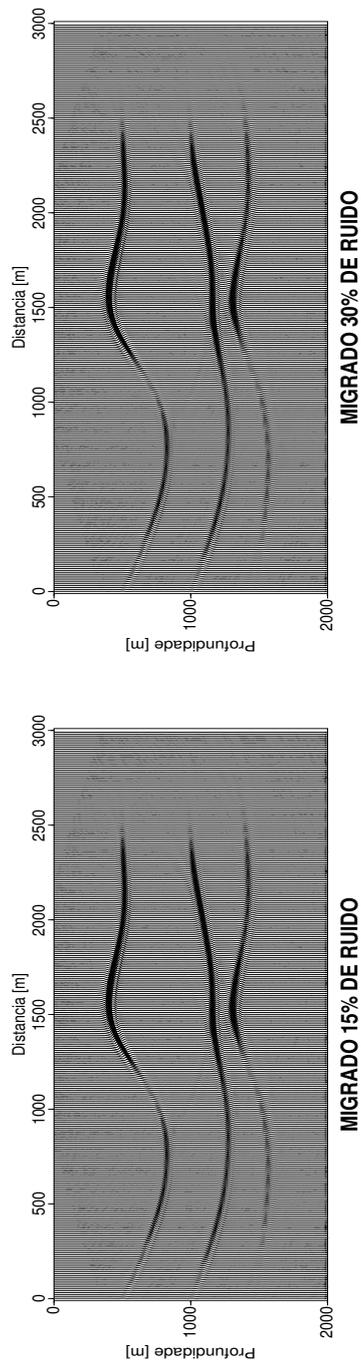
(b) Migração para 30% de ruído ao dado.



(c) Migração para 45% de ruído ao dado.

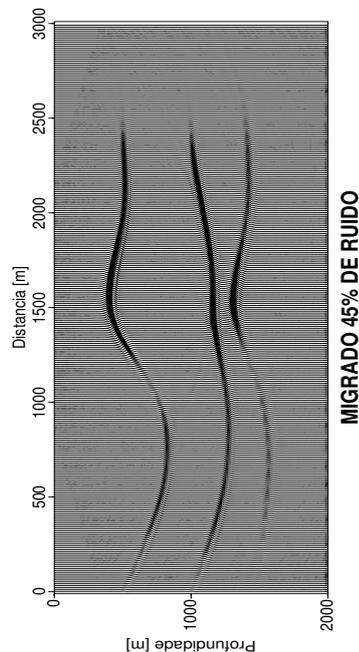
(d) Migração para 60% de ruído ao dado.

Figura 6.12: Representação do resultado da migração no formato do traço sísmico.



(a) Migração para 15% de ruído ao dado.

(b) Migração para 30% de ruído ao dado.



(c) Migração para 45% de ruído ao dado.

(d) Migração para 60% de ruído ao dado.

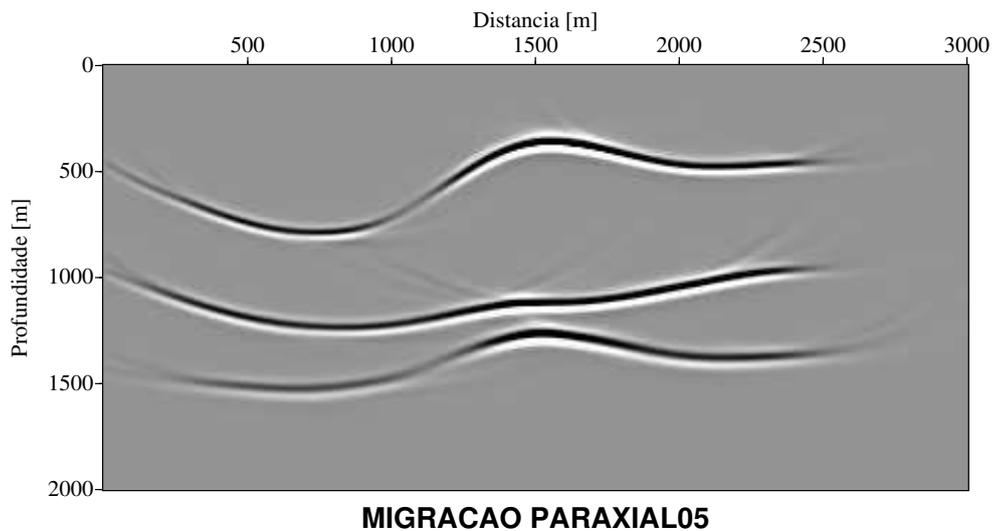
No geral, não existem grandes diferenças entre os resultados apresentados nas Figuras 6.10, 6.11 e 6.12, a relação sinal/ruído é praticamente a mesma. Isto se deve ao fato de, no processo de migração, os ruídos adicionados ao dado serem atenuados.

Os resultados obtidos através do pacote SU são considerados confiáveis pela comunidade geofísica. Devido a isto, escolheu-se usar algumas de suas rotinas na geração das respostas finais, pois isto nos permitirá comparar os resultados calculados pelo método Paraxial05.

6.6.2 Migração com Aproximação Paraxial - Paraxial05.

O resultado da Figura 6.13 foi obtido para os tempos de trânsitos calculados com os algoritmos de extrapolação Paraxial05.

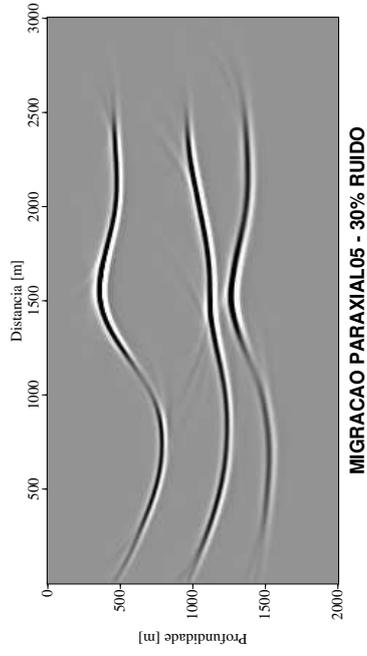
Figura 6.13: Resultado da migração em profundidade para o modelo simples livre de ruídos. Os tempos de trânsito usados neste resultado são provenientes da extrapolação Paraxial05.



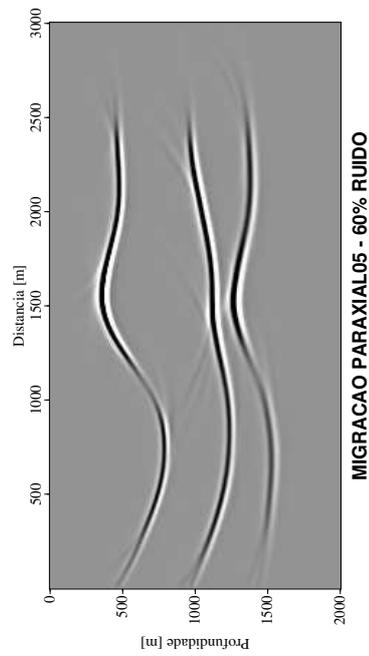
Fonte: Autor.

Este resultado é geometricamente similar ao modelo inicial, além disso, localiza os refletores do modelo aproximadamente em suas respectivas posições em profundidade. A Figura 6.14 representa a imagem migrada com 15% por cento de ruído incorporado:

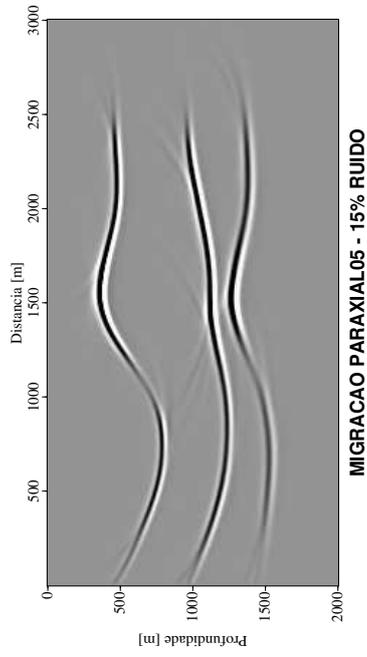
Figura 6.14: Migração para os tempos Paraxial05.



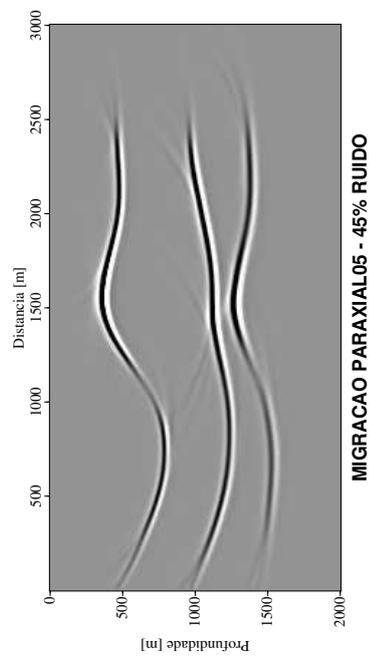
(b) Migração para 30% de ruído ao dado.



(d) Migração para 60% de ruído ao dado.



(a) Migração para 15% de ruído ao dado.



(c) Migração para 45% de ruído ao dado.

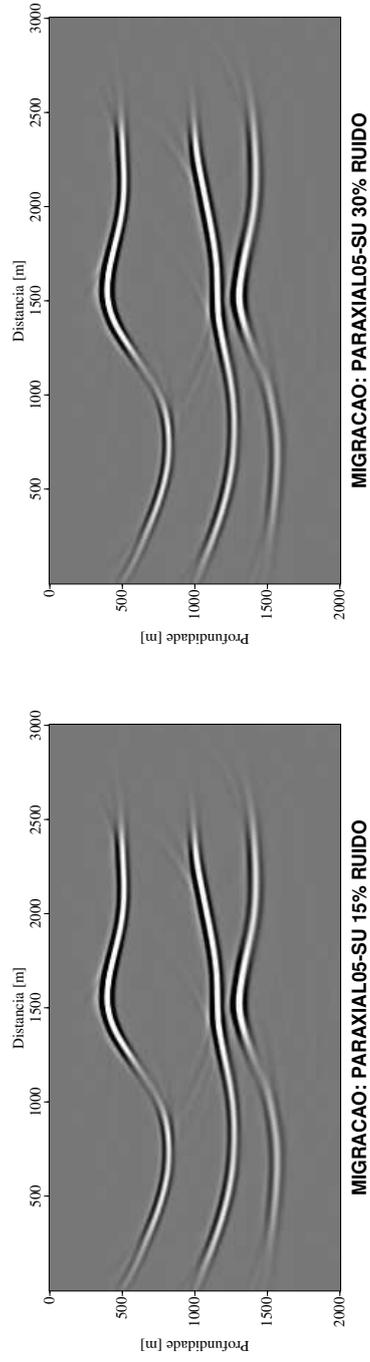
Os resultados da Figura 6.14, nos confirma mais uma vez que o processo de migração Kirchhoff atenua os ruídos adicionados ao dado, pois somente sinais provenientes das reflexões primárias contribuem construtivamente para os resultados, enquanto os demais sinais possuem coerência desprezível.

De forma geral, podemos perceber visualmente que os resultados SU e Paraxial05 são praticamente iguais. Para que estas diferenças possam ser percebidas mais adequadamente, realizamos a subtração entre os arquivos migrados com os tempos Paraxial05 e SU, exatamente nessa ordem.

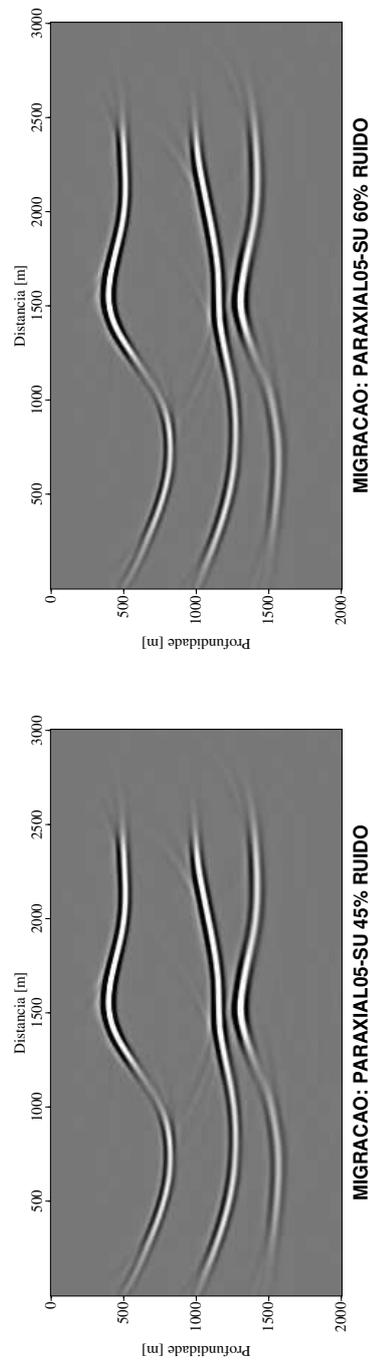
6.6.3 Diferença entre as Seções Migradas: Paraxial05 - SU.

Devido às dificuldades em predizer visualmente algo sobre as diferenças entre as imagem migradas com SU e Paraxial05, procedemos com a subtração entre estes resultados. As imagem da Figura 6.15 representa os resultados das diferenças entre as seções migradas Paraxial05 - SU:

Figura 6.15: Diferença entre as seções migradas: Paraxial05 - SU.

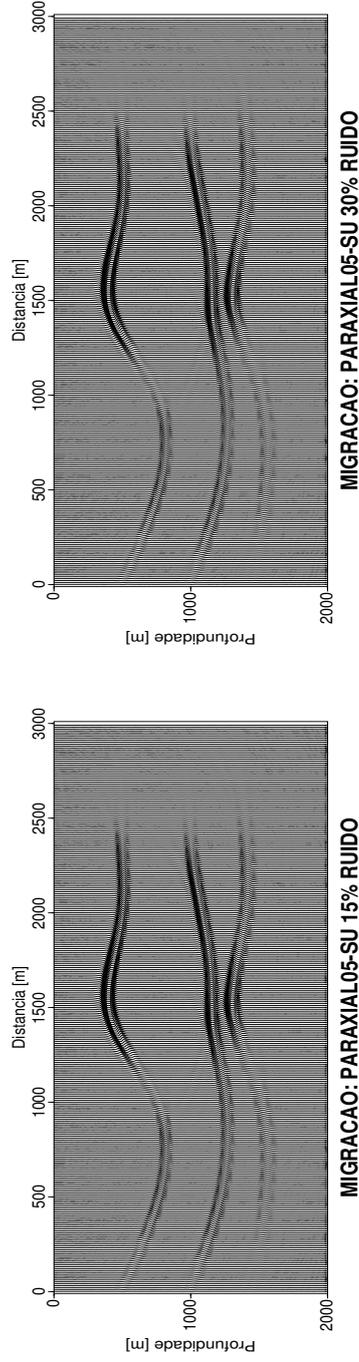


(b) Diferença com 30% de ruído ao dado.

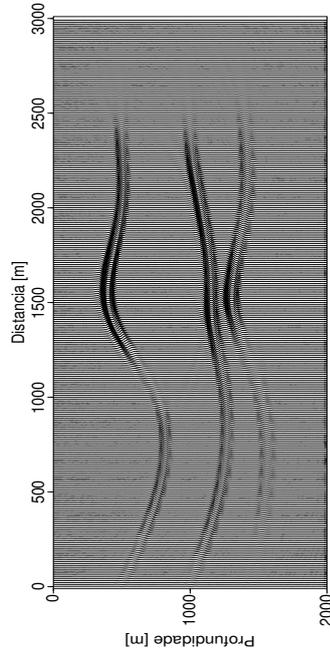


(d) Diferença com 60% de ruído ao dado.

Figura 6.16: Representação das diferenças como traço sísmico: Paraxial05 - SU.

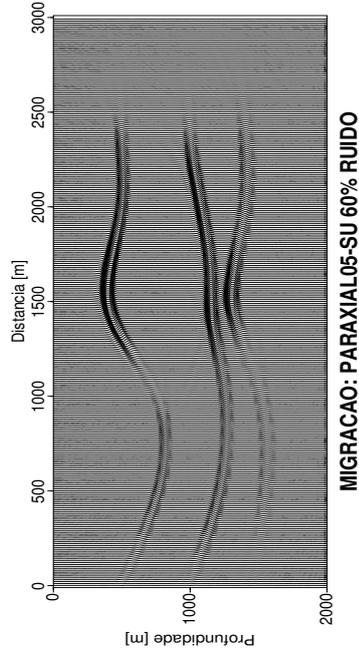


(a) Diferença com 15% de ruído ao dado.



(c) Diferença com 45% de ruído ao dado.

(b) Diferença com 30% de ruído ao dado.



(d) Diferença com 60% de ruído ao dado.

Comparando os resultados ilustrados nas Figuras 6.15, 6.11 e 6.14, observa-se que ocorre uma mudança na polaridade do sinal provenientes dos refletores, pois o centro dos refletores muda de preto e concentrado para branco e disperso. Isto pode ser visto, também, entre as Figuras 6.12 e 6.16 ao observar-se a mudança da direção da amplitude do sinal sísmico. A Figura 6.15 guarda características de ruídos das Figuras 6.14, provenientes da migração usando os tempos SU, o que indica que os processos Paraxial05 para calcular os tempos de trânsito são mais precisos.

Os valores usados como parâmetros nos processos de migração mostrados acima estão descritos na tabela 6.8:

Tabela 6.8: Tabela de parâmetros usados na rotina de migração.

Parâmetro	Valor
Primeira amostra de tempo vertical	$fzt = 0$ m
Número de amostras verticais de tempo	$nzt = 201$ m
Intervalo vertical de tempo	$dzt = 10$ m
Primeira amostra de tempo horizontal	$fx_t = 0$
Número de amostras horizontais de tempo	$nxt = 301$
Intervalo lateral de tempo	$dxt = 10$ m
Primeira coordenada da fonte	$fs = 0$ m
Número de fontes	$ns = 301$
Incremento entre as fontes	$ds = 10$ m
Intervalo temporal do dado de entrada	$dt = 0,008$ s
Primeira amostra de tempo do dado de entrada	$ft = 0,008$ s
Intervalo entre os pontos médios	$dxm = 10$ m
Primeira coordenada vertical do traço de saída	$fz_0 = 0$ m
Incremento vertical do traço de saída	$dz_0 = 10$ m
Número de pontos verticais do traço de saída	$nz_0 = 201$
Primeira coordenada lateral do traço de saída	$fx_0 = 0$ m
Incremento lateral dos traços de saída	$dx_0 = 10$ m
Números de pontos laterais dos traços de saída	$nx_0 = 301$
Frequência máxima	$f_{max} = 62,5$ Hz
Distância fonte-receptor máxima	$off_{max} = 800$ m
Abertura máxima do operador de migração	$aper_{max} = 1500$ m
Ângulo de abertura máxima	$ang_{max} = 90$ graus
Velocidade inicial do modelo de entrada	$v_0 = 1508$ m/s
Gradiente de referência da velocidade vertical	$dvz = 0$

Fonte: Autor.

6.7 MIGRAÇÃO PARA O DADO MARMOUSI

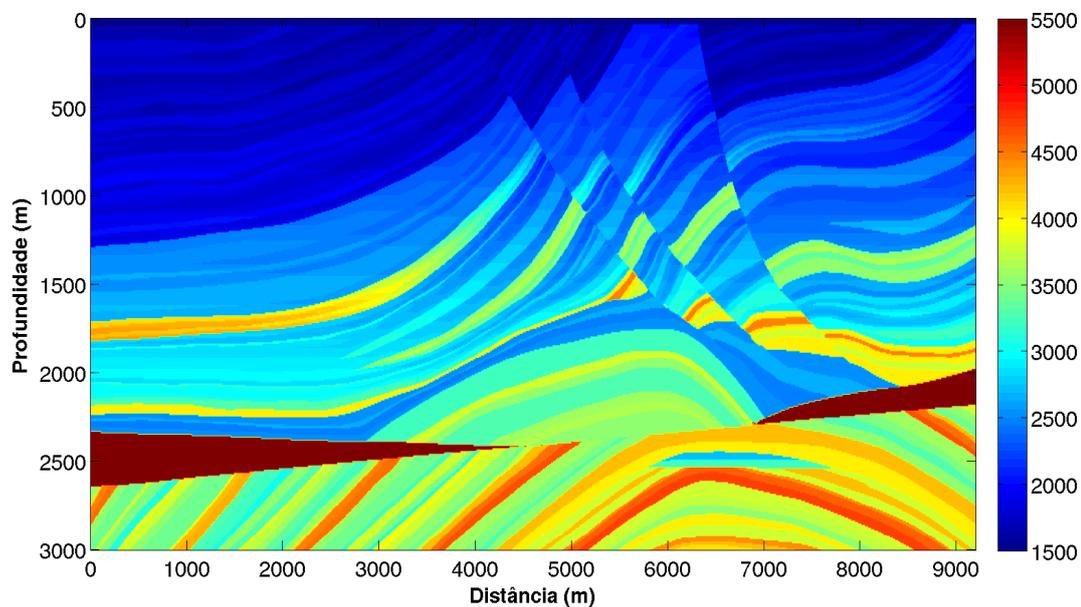
O dado Marmousi 2D é um modelo que representa uma geologia complexa de estruturas falladas. Tenta simular situações em que as estruturas sofrem deformações devidos aos esforços tectônicos em que as estruturas presentes nas bacias sedimentares estão submeti-

das. Este dado é considerado um desafio para os geofísicos, pois exige que os algoritmos de imageamento sejam capazes de resolver as dificuldades inerentes nestas situações.

6.7.1 Migração SU.

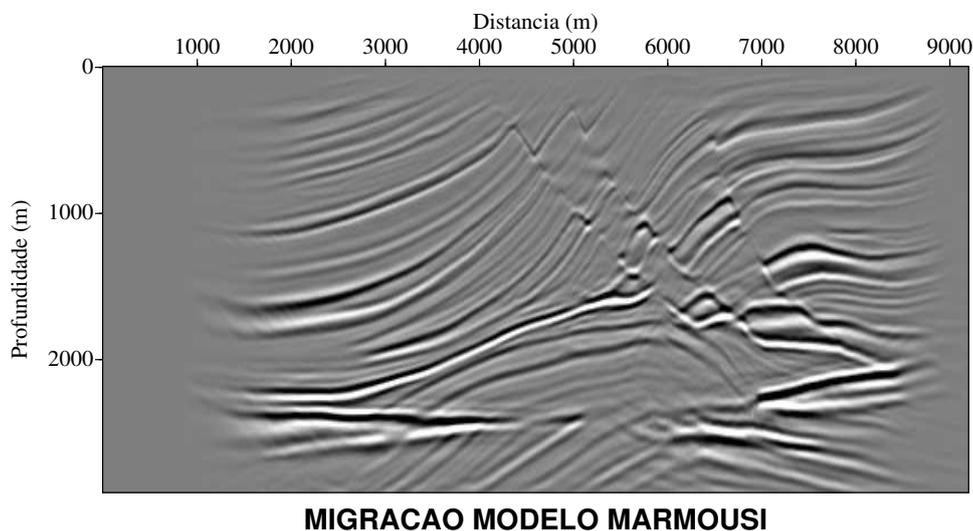
Espera-se que o resultado da migração em profundidade descreva de maneira coerente as estruturas representadas no modelo de velocidade da Figura 6.17. A Figura 6.18 representa o resultado da migração para os tempos SU:

Figura 6.17: Modelo de velocidade Marmousi.



Fonte: (VERTEEG, 1994).

Figura 6.18: Resultado da migração em profundidade para o modelo Marmousi 2D usando as tabelas de trânsito provenientes dos algoritmos em das rotinas do pacote SU.



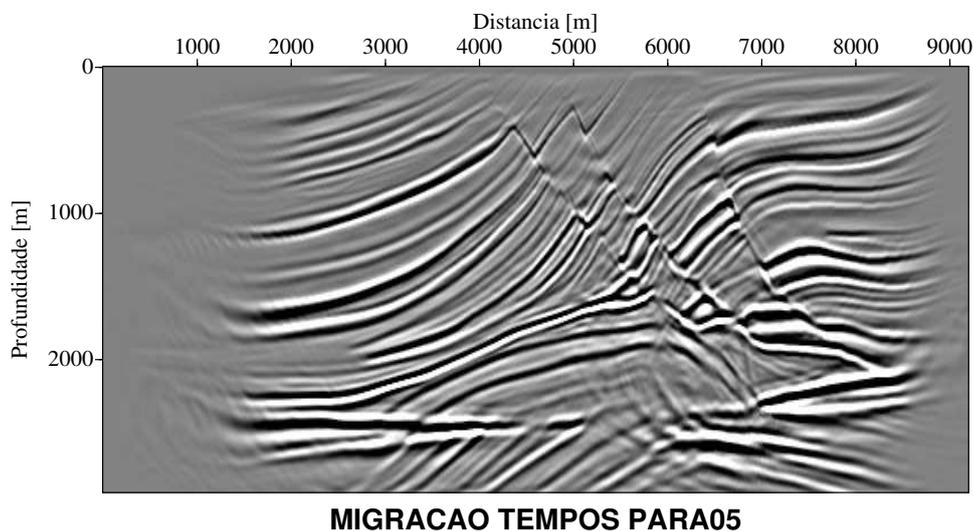
Fonte: Autor.

A partir do resultado acima, pode-se observar que as estruturas presentes no modelo de velocidade do dado Marmousi foram descritas de maneira aceitável pela migração em profundidade, pois suas principais estruturas foram reveladas coerentemente.

6.7.2 Migração Para os Tempos Paraxial05.

A migração em profundidade baseada na extrapolação dos tempos de trânsito através dos algoritmos Paraxial05 teve como resultado 6.19:

Figura 6.19: Resultado da migração em profundidade para o modelo Marmousi 2D usando as tabelas de trânsito provenientes do método Paraxial05.



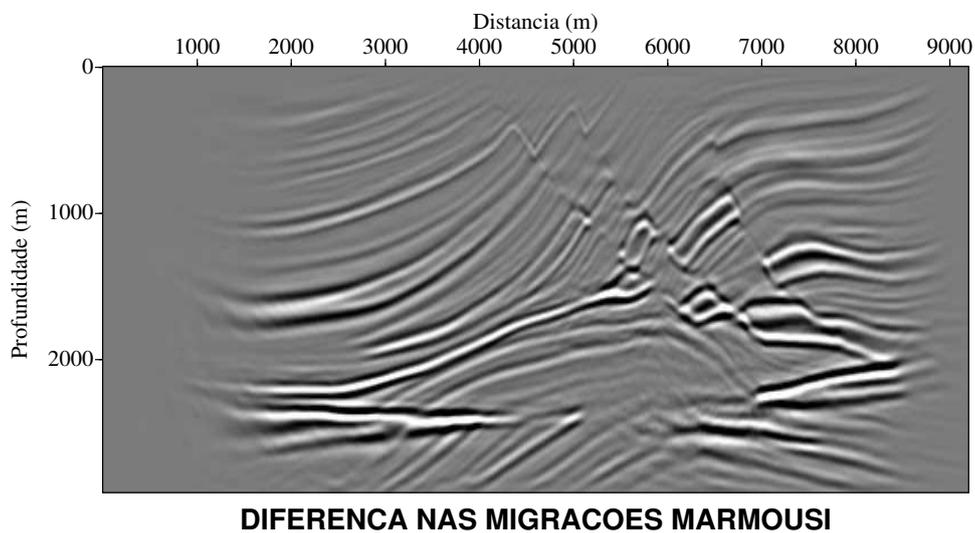
Fonte: Autor.

O resultado da Figura 6.19, mostrou-se coerente com o modelo de velocidade inicial do dado Marmousi 2D. Além disso, pode-se ver que o resultado obtido com os tempos SU são visualmente similares ao resultado baseado na extrapolação dos tempos Paraxial05. Porém, para termos uma ideia melhor sobre as diferenças procedemos com a operação de subtração entre os resultados das Figuras 6.18 e 6.19.

6.7.3 Diferença Entre as Seções Migradas.

A partir da operação de subtração, obtém-se o resultado da migração em profundidade a partir da diferença entre as seções migradas:

Figura 6.20: Diferença entre as migrações Marmousi 2D usando os tempos Paraxial05 e os tempos SU, exatamente nesta ordem.



Fonte: Autor.

As estruturas reveladas pelo processo de migração contidas na imagem da Figura 6.20 descreve coerentemente a geologia apresentada pelo modelo da Figura 6.17. A tabela 6.9 guarda os parâmetros usados no processo de migração para este modelo:

Tabela 6.9: Tabela de parâmetros usados na rotina de migração para o dado Marmousi 2D.

Parâmetro	Valor
Primeira amostra de tempo vertical	$fzt = 0$ m
Número de amostras verticais de tempo	$nzt = 243$ m
Intervalo vertical de tempo	$dzt = 12$ m
Primeira amostra de tempo horizontal	$fx_t = 0$
Número de amostras horizontais de tempo	$nxt = 767$
Intervalo lateral de tempo	$dxt = 12$ m
Primeira coordenada da fonte	$fs = 0$ m
Número de fontes	$ns = 767$
Incremento entre as fontes	$ds = 12$ m
Intervalo temporal do dado de entrada	$dt = 0,008$ s
Primeira amostra de tempo do dado de entrada	$ft = 0,004$ s
Intervalo entre os pontos médios	$dxm = 12$ m
Primeira coordenada vertical do traço de saída	$fz_0 = 0$ m
Incremento vertical do traço de saída	$dz_0 = 12$ m
Número de pontos verticais do traço de saída	$nz_0 = 243$
Primeira coordenada lateral do traço de saída	$fx_0 = 0$ m
Incremento lateral dos traços de saída	$dx_0 = 12$ m
Números de pontos laterais dos traços de saída	$n_x_0 = 767$
Frequência máxima	$f_{max} = 250$ Hz
Distância fonte-receptor máxima	$off_{max} = 3000$ m
Abertura máxima do operador de migração	$aper_{max} = 1500$ m
Ângulo de abertura máxima	$ang_{max} = 60$ graus
Velocidade inicial do modelo de entrada	$v_0 = 1500$ m/s
Gradiente de referência da velocidade vertical	$dvz = 0$

Fonte: Autor.

6.7.4 Migração Reamostrada Modelo Simples

Para testarmos a sensibilidade do algoritmo de migração, reamostramos o modelo de velocidade de referência da Figura 6.6 usando quatro discretizações distintas: 10, 25, 50 e 100 metros. A Figura 6.21 contém os modelos reamostrados que foram usados para as migrações das Figuras 6.22 6.23, SU e Paraxial05, respectivamente. A tabela 6.10 guarda

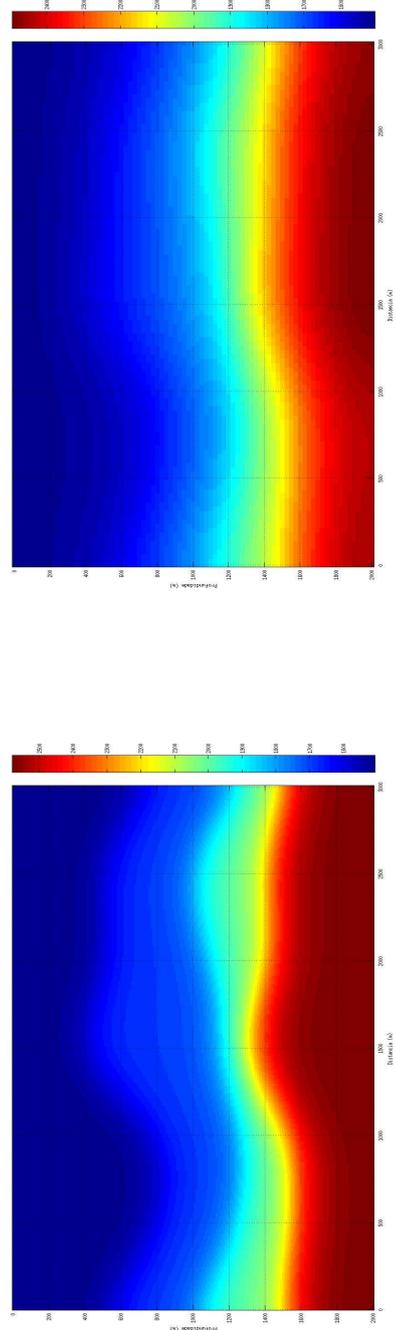
os parâmetros que descrevem o modelo de velocidade de referência, bem como os modelos reamostrados:

Tabela 6.10: Valores das discretizações para reamostragem do modelo de referência.

discretização	n_z	n_x	Δz	Δx
modelo de referência	201	301	10 <i>m</i>	10 <i>m</i>
10 <i>m</i>	201	301	10 <i>m</i>	10 <i>m</i>
25 <i>m</i>	81	121	25 <i>m</i>	25 <i>m</i>
50 <i>m</i>	41	61	50 <i>m</i>	50 <i>m</i>
100 <i>m</i>	21	31	100 <i>m</i>	100 <i>m</i>

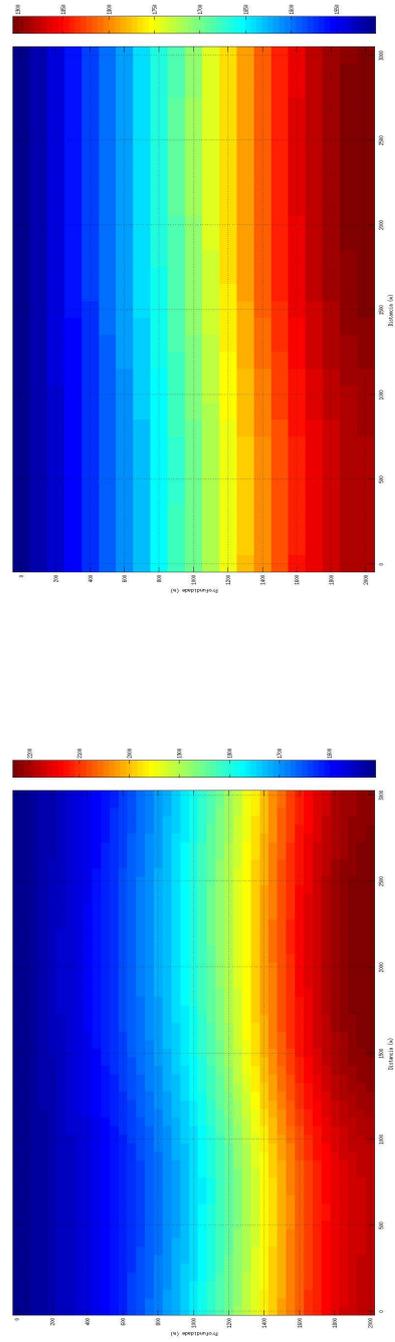
Fonte: Autor.

Figura 6.21: Modelos de velocidades reamostrados.

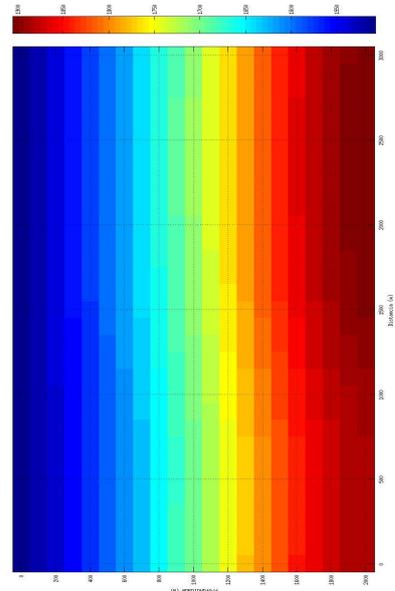


(a) Modelo discretizado de 10 metros.

(b) Modelo discretizado de 25 metros.

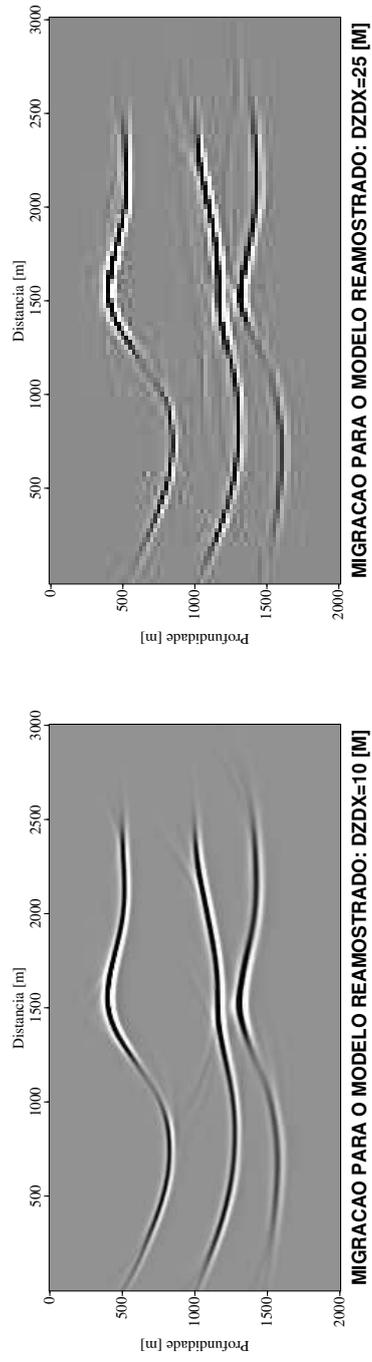


(c) Modelo discretizado de 50 metros.

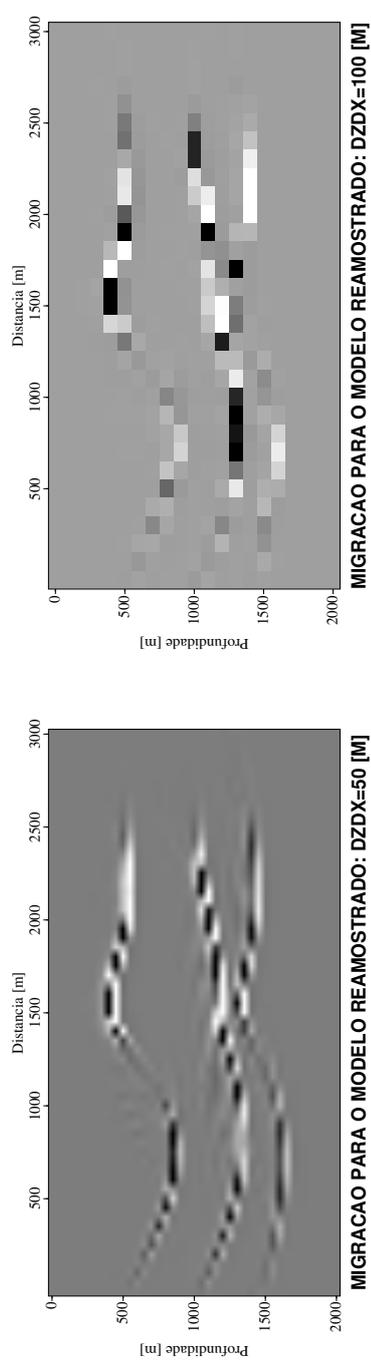


(d) Modelo discretizado de 100 metros.

Figura 6.22: Resultado das migrações SU para os modelos reamostrados.



(a) Migração para o modelo discretizado de 10 metros.

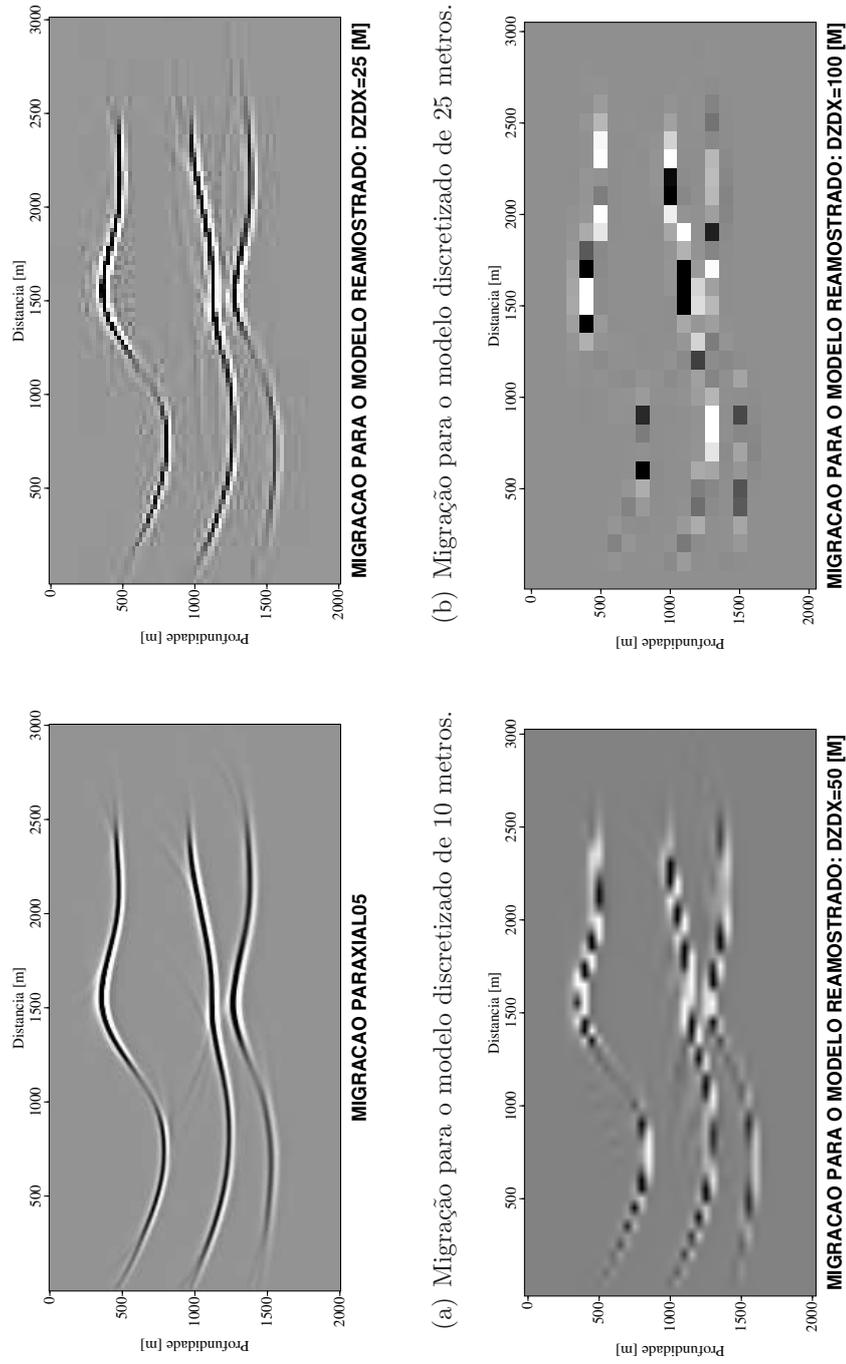


(b) Migração para o modelo discretizado de 25 metros.

(c) Migração para o modelo discretizado de 50 metros.

(d) Migração para o modelo discretizado de 100 metros.

Figura 6.23: Resultado das migrações Paraxial05 para os modelos reamostrados.



(b) Migração para o modelo discretizado de 25 metros.

(a) Migração para o modelo discretizado de 10 metros.

(d) Migração para o modelo discretizado de 100 metros.

(c) Migração para o modelo discretizado de 50 metros.

Analisando os resultados das Figuras 6.22 e 6.23, conclui-se que os refletores possuem boa continuidade lateral, no entanto, o aumento da discretização do modelo de velocidade tem como consequência a diminuição da nitidez da imagem migrada. Este fato é visível para ambas as migrações para os tempos SU e Paraxial05.

6.7.5 Migração Reamostrada Marmousi

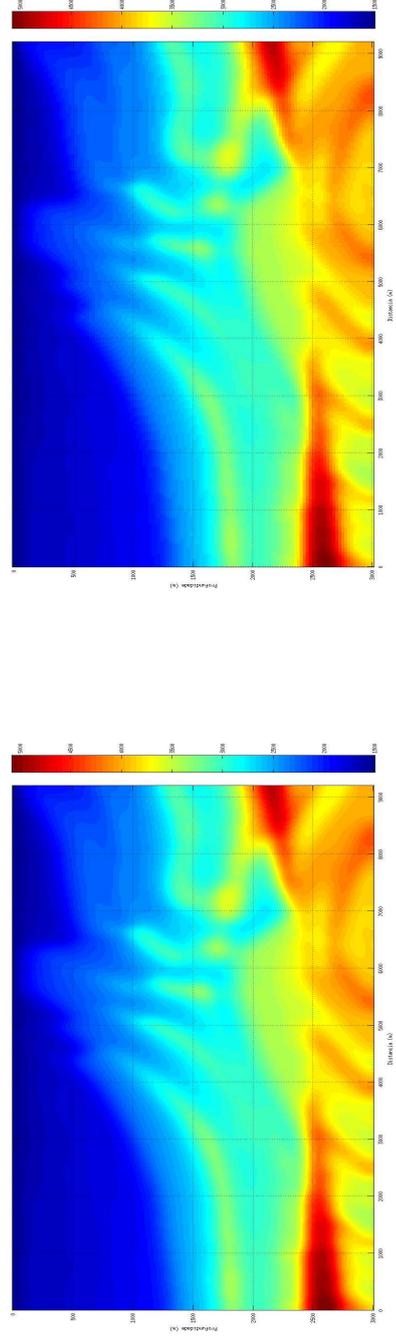
Para testar a sensibilidade do algoritmo de migração, reamostrou-se o modelo de velocidade de referência da Figura 6.17 usando quatro discretizações distintas: 12, 24, 36 e 48 metros. A Figura 6.24 contém os modelos reamostrados que foram usados para as migrações das Figuras 6.25 e 6.26, SU e Paraxial05, respectivamente. Os valores usados na reamostragem do modelo de velocidade de referência estão descritos na tabela 6.11:

Tabela 6.11: Valores das discretizações para reamostragem do modelo de referência.

discretização	n_z	n_x	Δz	Δx
modelo de referência	243	767	12 m	12 m
12 m	243	767	12 m	12 m
24 m	122	384	24 m	24 m
36 m	81	256	36 m	36 m
48 m	61	192	61 m	61 m

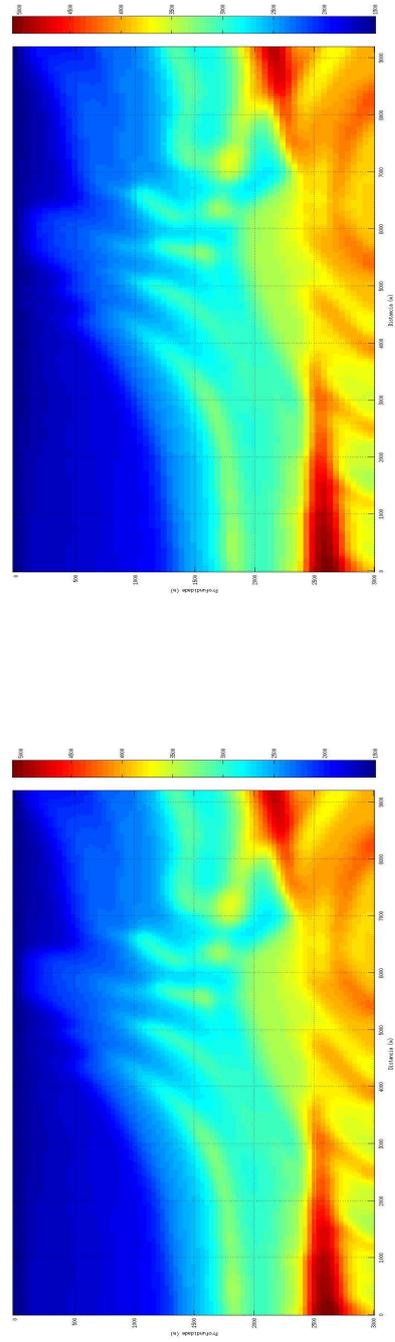
Fonte: Autor.

Figura 6.24: Modelos de velocidades reamostrados.



(a) Modelo discretizado de 12 metros.

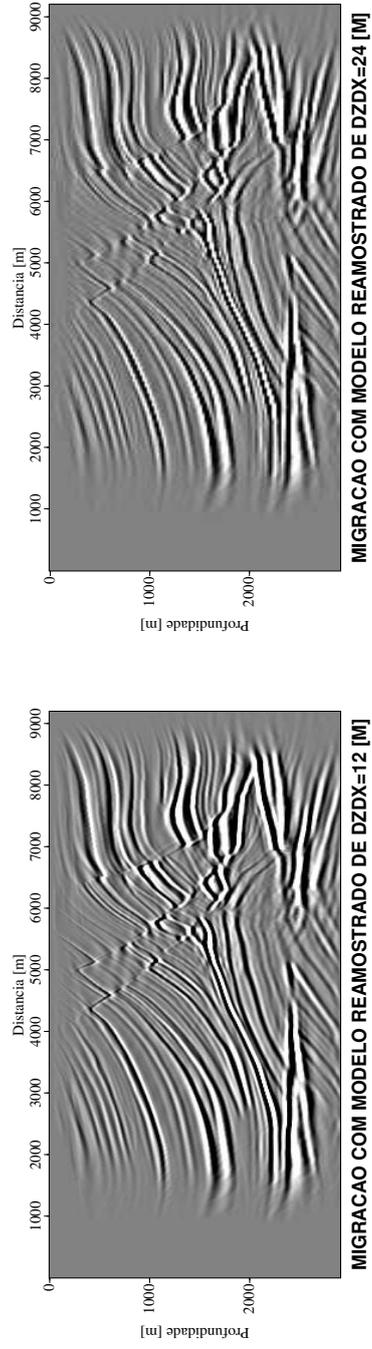
(b) Modelo discretizado de 24 metros.



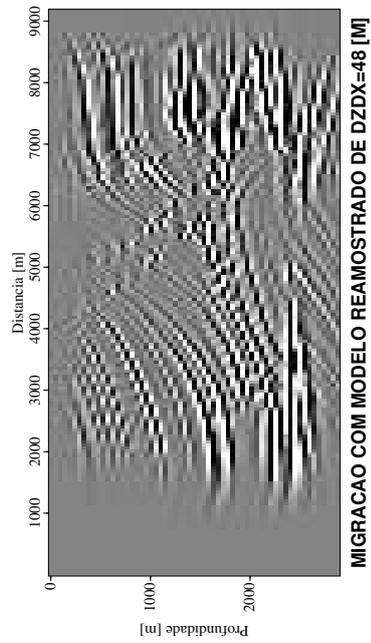
(c) Modelo discretizado de 36 metros.

(d) Modelo discretizado de 48 metros.

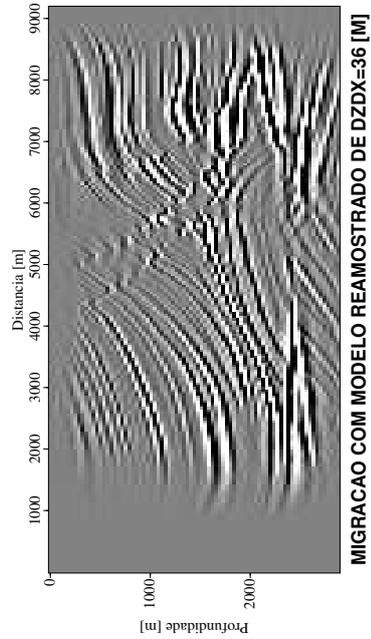
Figura 6.25: Resultado das migrações SU para os modelos reamostrados.



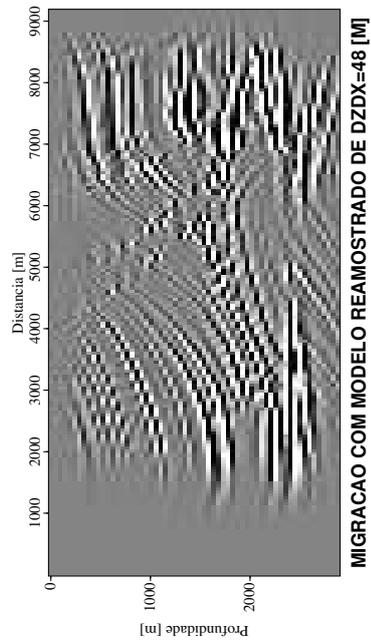
(a) Migração para o modelo discretizado de 12 metros.



(b) Migração para o modelo discretizado de 24 metros.

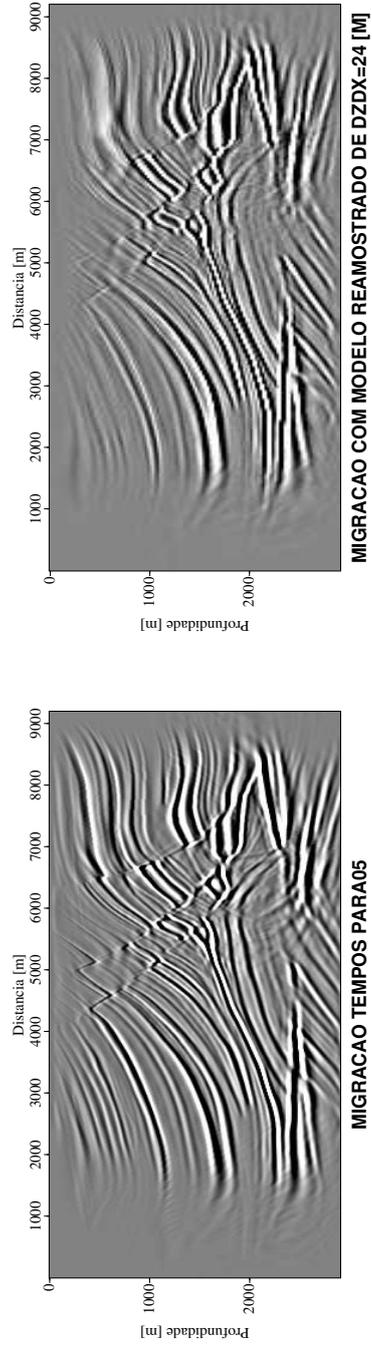


(c) Migração para o modelo discretizado de 36 metros.

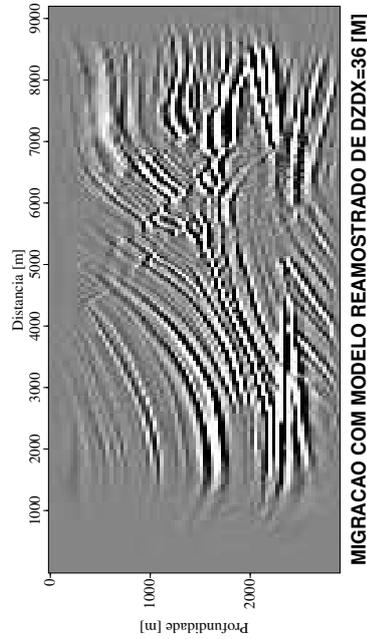


(d) Migração para o modelo discretizado de 48 metros.

Figura 6.26: Resultado das migrações Paraxial05 para os modelos reamostrados.

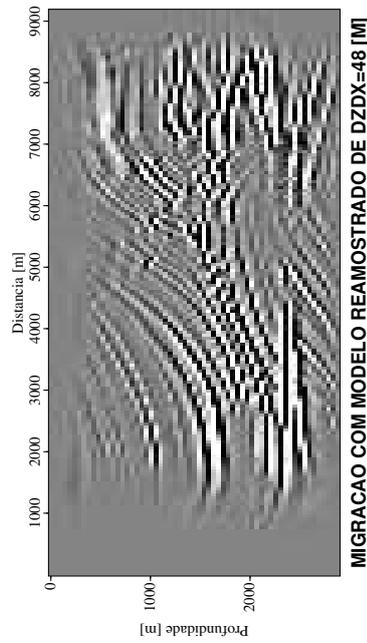


(a) Migração para o modelo discretizado de 12 metros.



(c) Migração para o modelo discretizado de 36 metros.

(b) Migração para o modelo discretizado de 24 metros.



(d) Migração para o modelo discretizado de 48 metros.

Analisando as imagens das Figuras de 6.21 a 6.26, tanto para o modelo simples como para o marmousi, pode-se ver que o aumento da discretização da malha de velocidade prejudica a nitidez da imagem migrada desfocando o sinal. Quanto maior for a distância entre os pontos da malha menor será a nitidez do resultado final.

7 CONCLUSÃO

Aplicou-se a migração Kirchhoff pré-empilhamento em profundidade usando as tabelas dos tempos de trânsito calculadas pelo traçamento paraxial com rotinas pertencentes ao pacote SU e um segundo resultado, proposta deste trabalho, foi obtido através do método Paraxial05. Os resultados da migração para o modelo simples e marmousi, mostraram-se eficazes, pois descreveram coerentemente a geometria das estruturas geológicas, bem como suas coordenadas em profundidade quando comparadas aos modelos de referências.

Analisando-se ambos os resultados da migração SU e Paraxial05 para o modelo simples, observa-se nas Figuras 6.11 e 6.14, a existência de regiões com problemas de iluminação em alguns refletores. Isto se deve à baixa densidade de raios incidindo sobre a superfície refletora, tendo como consequência o fornecimento de pouca informação nestas áreas.

Além disso, observou-se por meio das Figuras 6.11, 6.12 e 6.14 que o processo de migração atenuou os ruídos adicionados aos dados de entrada, pois a contribuição destes sinais é destrutiva, ao passo que somente os sinais correspondentes aos pontos difratores pertencentes à superfície refletora contribuíram construtivamente ao empilhamento das amplitudes dispostas sobre a curva de Huygens.

Comparando-se os resultados da migração SU e Paraxial05 para o modelo simples nas Figuras 6.11 e 6.14, pode-se perceber que o segundo mostrou-se superior ao primeiro, pois apresenta menos artefatos numéricos nos resultados finais. Isto se deve à forma pela qual as tabelas dos tempos de trânsito foram calculadas e, evidentemente, à precisão numérica entre ambos os processos. Os resultados alcançados para o modelo marmousi, por ambos os métodos, representados pelas Figuras 6.25 e 6.26, mostraram-se equivalentes, pois, notou-se, visualmente, uma grande similaridade entre os resultados finais.

Determinamos a subtração entre as seção migradas com tempos SU e Paraxial05. Comparando-se os resultados das Figuras 6.11 e 6.15, observa-se que ocorreu uma inversão na polaridade do sinal indicado pela mudança de cor do espectro de escuro para branco. Este processo nos proporcionou uma maior certeza a cerca da acurácia numérica entre os procedimentos pelos quais realizou-se a extrapolação paraxial dos tempos de trânsito com o método Paraxial05 para o mesmo modelo. O resultado da subtração entre os sinais migrados guardou ruídos existentes nas migrações para os tempos SU, confirmando maior exatidão nos processos re-

lacionados a obtenção dos tempos de trânsito Paraxial05.

Afim de testarmos a sensibilidade do algoritmo de migração, reamostrou-se as malhas de velocidades para ambos os modelos das Figuras 6.21 e 6.24. A partir dos resultados das Figuras 6.22, 6.23, 6.25 e 6.26, notou-se que quanto maior a distância entre os pontos das malhas, mais desfocado é o resultado final da migração.

REFERÊNCIAS

- AKI, K.; RICHARDS, P. *Quantitative seismology*. New York: W. H. Freeman and Company, 1980.
- BLEISTEIN, N. *Mathematical methods for wave phenomena*. [S.l.]: Academic Press, 1984. p. 14-30 p.
- BRONSTEIN I. N.; SEMENDJAJEW, K. A. *Taschenbuch der mathematic. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft*. [S.l.: s.n.], 1991. p. 3-8254-2000-8 p.
- CERVENY, V. *The application of ray tracing to the numerical modeling of seismic wavefields in complex structures*. [S.l.]: Geophysical Press, Seismic Exploration edition, 1985.
- CERVENY, V. *Ray Methods for Three-Dimensional Seismic Modelling*. The Norwegian Institute of Technology, Trondheim.: Petroleum Industry Course, 1987.
- CERVENY, V. *Seismic ray theory*. [S.l.]: Cambridge University Press, New york, 2001.
- CERVENY V.; RAVINDRA, R. *Theory of seismic head waves*. [S.l.]: University of Toronto Press., 1971.
- CLAERBOUT, j. F. *Basic earth imaging*. [S.l.]: Stanford: Exploration Project, United States of America., 1993.
- COSTA, M. J. S. *Migração Pré-Empilhamento Kirchhoff Feixes Gaussianos 2,5D nos Domínios Afastamento Comum e Ângulo-Comum*. Belém-Pa: Programa de Pós Graduação em Geofísica, 2012.
- CUNHA, P. E. M. *High precision/fast adaptive step size ray-tracing by curvature criteria*. Brazilian Geophysical Society, Soc. Expl. Geophys: In Resumos Expandidos, 6o. Congr. Intern. da SBGf, 1999a.
- CUNHA, P. E. M. *Imageamento Sísmico por Propagação de Ondas no Limite de Altas e Baixas Frequências*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. 139 p.
- CUNHA, P. E. M. A 2d ray-based maximum field green's function simulator. *Sociedade Brasileira de Geofísica*, p. 2-3, Agosto 2009.
- GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. *Exploration seismology*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1995.
- HUBRAL P.; SCHKEICHER, J. T. M. *Three-dimensional paraxial ray properties. Parte I*. [S.l.]: Basic relations: J. Seis Expl., 1992a. 265-279 p.

HUBRAL P.; SCHKEICHER, J. T. M. *Three-dimensional paraxial ray properties. Parte II.* [S.l.]: Basic relations: J. Seis Expl., 1992b. 347-362 p.

LUIZ, S. L. F. *Migração em Profundidade Pré-Empilhamento Utilizando os Atributos do Empilhamento por Superfície de Reflexão Comum.* Belém - Pará: Tese de Doutorado em Geofísica., 2007.

OLHOVICH, V. A. The causes of noise in seismic reflection and refraction work. *Geophysics*, v. 29, p. 1015–1030, 1964.

PINHEIRO, W. S. S. Estudo da abertura do operador de migração kirchhoff pós-empilhamento no domínio do tempo. *Trabalho de Conclusão de Curso*, 2012.

POPOV, M. M. *On a method of computation of geometrical spreading in an inhomogeneous medium with interfaces.* [S.l.]: Doklady Akdemii Nauk, 1977. 237 p.

POPOV, M. M. *Ray theory and Gaussian beam method for geophysicists.* [S.l.]: PPPG/UFBA, 2002. 172p p.

POPOV, M. M.; PSENCIK, I. *Computation of ray amplitudes in inhomogeneous media with curved interfaces.* [S.l.]: Studia geophysica et geodetica, 1978a. 248-258 p.

POPOV, M. M.; PSENCIK, I. *Ray amplitudes in inhomogeneous media with curved interfaces.* [S.l.]: Geofizikalni Sbornic, 1978b. 111-129 p.

ROBINSON, E. A. *Multichannel Time Series Analysis with Digital Computer Programs.* 2. ed. [S.l.]: Holden Day, 1983.

SCALES, A. J.; SNIEDER, R. What is noise? *Geophysics*, v. 63, n. 4, p. 1122–1124, July-August 1998.

SCHLEICHER J.; TYGEL, M. H. P. *3D true-amplitude finite-offset migration.* [S.l.]: Geophysics, 1993. 1112-1126 p.

SCHLEICHER J.; TYGEL, M. H. P. *Seismic true amplitude imaging.* [S.l.]: SEG Monograph, 2001. 1112-1126 p.

SHARPE, J. A. The production of elastic waves by explosion pressures: Theory and empirical field observation. I, 1942.

SHERIFF, R. E. Factors affecting seismic amplitudes. *Geophysics Prospecting*, v. 23, p. 125–138, 1975.

VERTEEG, R. The marmousi experience: Velocity model determination on a synthetic complex data set. *The Leading Edge*, p. 927–936, 1994.

YILMAZ, O. *Seismic data processing.* Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1987.

APÊNDICE

APÊNDICE A – MAKEFILE PARA O MODELO SIMPLES

A determinação dos tempos de trânsito pelo método proposto foi realizada por meio do método Paraxial05. Os parâmetros do programa foram inseridos em cartões de entradas, a partir dos quais pode-se classificar os dados de entradas e saídas.

O programa foi capaz de gerar as tabelas dos tempos de trânsito para cada tiro a partir de uma adaptação em um Makefile, o qual invoca o programa principal quantas vezes forem necessárias (dependendo do número de fontes). Os arquivos.par gerados guardam as coordenadas dos tiros. Para cada tiro, é calculado uma tabela de tempos de trânsito correspondente. No final do processo, concatenou-se todos os arquivos de tempos de trânsito em um único arquivo, o qual é necessário ao processo de migração. Abaixo estão documentados os arquivos Makefile que possibilitaram a realização deste trabalho:

A partir deste arquivo podemos gerar os cartões.par para todos os tiros. Cada arquivo.par gerado determina uma tabela de tempos de trânsito na coordenada da fonte em questão.

```
#!/bin/bash
set -x

shot_i=1
shot_f=301

delt_angle=0.0785398163397448

dir=./marmousi
n1=201
model=marmousi

# Generates par cards

./para2d_gre_${model}.sh $shot_i $shot_f $delt_angle

for ((i=$shot_i; i<=$shot_f; i++)) ; do
```

```

./para2d_gre < $dir/para2d_gre_${model}_${i}.par
rm -r $dir/para2d_gre_${model}_${i}.par
done

exit 0

```

Este segundo arquivo é entrada para o primeiro. Nele estão dispostos os parâmetros necessários à geração das tabelas dos tempos de trânsito.

```

#! /bin/bash
set -x

shot_i=1
shot_f=301

ang_ini=0.0
ang_end=6.283185307179586
delt_ang=0.0785398163397448

inPATH=./marmousi
outPATH=./marmousi

for ((i=$shot_i; i<=$shot_f; i++)) ; do
    cat <<EOF>$inPATH/para2d_gre_marmousi_${i}.par
        ' Arquivo entrada: coordenadas sas fontes.....= '
coord_endon.dat
        ' Arquivo entrada: campo de velocidades.....= '
$inPATH/vs_marmousi.ad
        ' Arquivo saida: tempos de transito calculados.= '
$outPATH/t_ray_marmousi_${i}.ad
        ' Arquivo saida: amplitudes calculados..... = '
$outPATH/a_ray_marmousi_${i}.ad
        ' Arquivo saida: coordenadas.dat do raio..... = '
$outPATH/raios_marmousi_${i}.dat
        ' Arquivo saida: coordenadas.bin do raio..... = '
$outPATH/raios_marmousi_${i}.bin

```

```

' Arquivo saida: peso      tempos calculados... = '
$outPATH/dis_ray_marmousi_${i}.ad
' Arquivo saida: peso amplitudes calculadas... = '
$outPATH/pes_ray_marmousi_${i}.ad
' Flag: flagdat.....= '
F
' Flag: flagbin..... = '
F
' Flag: flagrem.....= '
T
' Flag: flagc.....= '
T
' Flag: flagtem.....= '
T
' Flag: flagtemad.....= '
T
' Flag: flagdis.....= '
F
' Flag: flagamp.....= '
F
' Flag: flagampad.....= '
F
' Flag: flagpes.....= '
F
' Flag: flagmult.....= '
F
' dsp.....= '
0.025
' dst.....= '
0.025
' Intervalo dt.....= '
0.010
' Intervalo dtwrite.....= '
0.008
' Flag: passo.....= '
T

```

```

' Valor Jacobiano minimo.....= '
0.000100
' Valor Jacobiano maximo.....= '
10000.
' Coordenada inicial x do campo de velocidade....= '
0.
' Coordenada inicial z do campo de velocidades...= '
0.
' Numero de pontos do raio: np.....= '
50000
' No. tracos : campo velocidades (imax,:).....= '
301
' No. amostras: campo velocidades (:,jmax).....= '
201
' Intervalo dx(M) malha de velocidades.....= '
10.
' Intervalo dz(M) malha de velocidades.....= '
10.
' Coordenada do grid x inicial fonte.....= '
$i
' Coordenada do grid z inicial fonte.....= '
0
' Intervalo coordenada fonte: dx0.....= '
10.0
' Angulo inicial fonte.....= '
$ang_ini
' Angulo final fonte.....= '
$ang_end
' Intervalo angular fonte.....= '
$delt_ang
' iix0.....= '
150
' iix1.....= '
152
' iidx.....= '
1

```

```
        ' f0.....= '  
60.  
        ' fc0.....= '  
120.  
        ' Tmax.....= '  
3.0  
        ' A_Tmax.....= '  
0.0135924704  
        ' Aini.....= '  
0.0135924676  
        ' Tau0.....= '  
0.022998333  
  
EOF  
  
done  
  
exit 0
```

APÊNDICE B – MAKEFILE PARA O MODELO MARMOUSI

A partir deste arquivo podemos gerar os cartões.par para todos os tiros. Cada tiro gera uma tabela de tempos de trânsito.

```
#!/bin/bash
set -x

shot_i=1
shot_f=767

delt_angle=0.025

dir=./marmousi
n1=243
model=marmousi

./para2d_gre_${model}.sh $shot_i $shot_f $delt_angle

for ((i=$shot_i; i<=$shot_f; i++)) ; do
    ./para2d_gre < $dir/para2d_gre_${model}_${i}.par
    rm -r $dir/para2d_gre_${model}_${i}.par
done

exit 0
```

Este segundo arquivo é entrada para o primeiro. Nele estão dispostos os parâmetros necessários ao cálculo das tabelas de tempos de trânsito.

```

#!/bin/bash
set -x

shot_i=1
shot_f=767

ang_ini=0.0
ang_end=6.283185307179586
delt_ang=0.025

inPATH=./marmousi
outPATH=./marmousi

for ((i=$shot_i; i<=$shot_f; i++)) ; do
    cat <<EOF>$inPATH/para2d_gre_marmousi_${i}.par
        ' Arquivo entrada: coordenadas sas fontes.....= '
coord_endon.dat
        ' Arquivo entrada: campo de velocidades.....= '
$inPATH/marm_12msm.bin
        ' Arquivo saida: tempos de transito calculados.= '
$outPATH/t_ray_marmousi_${i}.ad
        ' Arquivo saida: amplitudes calculados..... = '
$outPATH/a_ray_marmousi_${i}.ad
        ' Arquivo saida: coordenadas.dat do raio..... = '
$outPATH/raios_marmousi_${i}.dat
        ' Arquivo saida: coordenadas.bin do raio..... = '
$outPATH/raios_marmousi_${i}.bin
        ' Arquivo saida: peso      tempos calculados... = '
$outPATH/dis_ray_marmousi_${i}.ad
        ' Arquivo saida: peso amplitudes calculadas... = '
$outPATH/pes_ray_marmousi_${i}.ad
        ' Flag: flagdat.....= '
F

        ' Flag: flagbin..... = '
F

```

```

' Flag: flagrem.....= '
T
' Flag: flagc.....= '
T
' Flag: flagtem.....= '
T
' Flag: flagtemad.....= '
T
' Flag: flagdis.....= '
F
' Flag: flagamp.....= '
F
' Flag: flagampad.....= '
F
' Flag: flagpes.....= '
F
' Flag: flagmult.....= '
F
' dsp.....= '
0.025
' dst.....= '
0.025
' Intervalo dt.....= '
0.010
' Intervalo dtwrite.....= '
0.0125
' Flag: passo.....= '
T
' Valor Jacobiano minimo.....= '
0.000100
' Valor Jacobiano maximo.....= '
10000.
' Coordenada inicial x do campo de velocidade....= '
0.
' Coordenada inicial z do campo de velocidades...= '
0.

```

```

' Numero de pontos do raio: np.....= '
50000
' No. tracos : campo velocidades (imax,:).....= '
767
' No. amostras: campo velocidades (:,jmax).....= '
243
' Intervalo dx(M) malha de velocidades.....= '
12.
' Intervalo dz(M) malha de velocidades.....= '
12.
' Coordenada do grid x inicial fonte.....= '
$i
' Coordenada do grid z inicial fonte.....= '
1
' Intervalo coordenada fonte: dx0.....= '
12.0
' Angulo inicial fonte.....= '
$ang_ini
' Angulo final fonte.....= '
$ang_end
' Intervalo angular fonte.....= '
$delt_ang
' iix0.....= '
330
' iix1.....= '
332
' iidx.....= '
1
' f0.....= '
60.
' fc0.....= '
120.
' Tmax.....= '
3.0
' A_Tmax.....= '
0.0135924704

```

' Aini.....= '
0.0135924676

' Tau0.....= '
0.022998333

EOF

done

exit 0

APÊNDICE C – CONCATENAÇÃO

É necessário que os arquivos dos tempos de trânsito gerados sejam concatenados em um único arquivo, fundamental ao processo de migração. O script abaixo ilustra como isto foi feito:

```
#!/bin/bash

i=1
nz=243
nshot=767
outfile=times_marmousi.ad

while [ $i -le $nshot ]

do

cat t_ray_marmousi_${i}.ad >> $outfile

rm -r t_ray_marmousi_${i}.ad

i=`expr $i + 1`

done

xmovie < $outfile n1=$nz n2=$nshot loop=1 perc=99

exit 0
```