



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

TESE DE MESTRADO

**MIGRAÇÃO EM PROFUNDIDADE USANDO A SOLUÇÃO
NUMÉRICA DA EQUAÇÃO DA EICONAL**

SAMUEL LEVI FREITAS DA LUZ



BELÉM
2001

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

**MIGRAÇÃO EM PROFUNDIDADE USANDO A SOLUÇÃO
NUMÉRICA DA EQUAÇÃO DA EICONAL**

**TESE APRESENTADA POR
SAMUEL LEVI FREITAS DA LUZ**

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

Data de Aprovação: 12 / 06 / 2001

Nota: 8.5 (Excelente)

COMITÊ DE TESE:

Dr. João Carlos R. Cruz (Orientador)

Dr. Jessé Carvalho Costa

Dr. Jörg Schleicher

BELÉM

2001

*Em memória de meu pai,
José Maria Laranjeira da Luz.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, ao meu bom Deus, por sempre se fazer presente nas horas mais difíceis, e por me ajudar no desenvolvimento deste trabalho,

Ao CPGF/UFPA e a todo corpo docente, técnico e administrativo por terem propiciado os meios para a realização deste trabalho.

A ANP pelo suporte financeiro enquanto bolsista.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Carlos Ribeiro Cruz, por ter sugerido o tema desta tese e pelo apoio dispensado durante a sua realização.

Aos membros da banca examinadora, Professores Dr. Jesse Carvalho Costa e Dr. Jörg Schleicher pela paciência na correção deste texto e pelas sugestões para o aprimoramento do trabalho.

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo indispensáveis para a conclusão deste trabalho.

Aos meus irmãos e minha cunhada Kátia, por me apoiarem em todos os momentos.

Aos colegas do curso, especialmente Humberto, Michael pelo apoio dispensado nos momentos de dificuldades.

Especialmente à Silvia pelo incentivo e apoio.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	iv
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 - INTRODUÇÃO	3
2 - FUNDAMENTO TEÓRICO DA MIGRAÇÃO DE KIRCHHOFF	5
2.1 INTEGRAL DE EMPILHAMENTO DE DIFRAÇÃO.....	5
3 - EQUAÇÃO DO EICONAL	9
3.1 ALGORITMO DOS TEMPOS DE TRÂNSITO.....	12
3.2 TEMPOS DE TRÂNSITO DE TRANSMISSÃO.....	14
3.3 GERAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE ONDAS REFRAATADAS (head waves).....	16
3.4 FRENTES DE ONDAS DIFRAATADAS (ondas difratadas).....	16
4 - IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO	17
5 - DESCRIÇÃO DOS MODELOS GEOLÓGICOS E APLICAÇÃO DO ALGORITMO	20
5.1 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	21
5.2 PROBLEMA DEVIDO A FORTE VARIAÇÃO LATERAL DE VELOCIDADE.....	39
6 - CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	Curvas de tempos de trânsito de reflexão (τ_R) e de difração (τ_D) Para diferentes escolhas do ponto M em uma configuração de afastamento comum.....	5
Figura 3.1	Grid regular para o mapeamento de força bruta (Schneider et al.,1992).....	13
Figura 3.2	As três primeiras colunas da Fig.3.1 são mostradas em (a) e também em (b). A parte central destas colunas foram cortadas. A posição da fonte é denotada pelo ponto O	14
Figura 3.3	Cela de um grid com vagarosidade constante.....	15
Figura 3.4	(a) Onda cônica (head wave), representada pela linha vermelha, resultante da superposição das frentes de ondas geradas por cada ponto da interface MN quando excitados por uma onda que viaja paralelamente à interface MN. (b) A seta indica a direção de propagação das ondas cônicas(segmentos paralelos) que se transmitem através da interface NP.....	17
Figura 3.5	Zona de sombra local . M atua como uma fonte secundária.....	18
Figura 4.1	Diagrama de blocos. Processo de migração de dados sísmicos em profundidade.....	20
Figura 5.1	(a) Modelo físico utilizado para gerar o dado de entrada. As velocidades nas camadas superior e inferior são 2.5 km/s e 3.0 km/s respectivamente.(b) Sismograma sintético gerado pelo programa Seis88(Cerveny & Psencik, 1988). Foi utilizada como pulso fonte a função Gabor com frequência dominante de 80Hz e o intervalo de amostragem entre os traços é de 2ms.....	24
Figura 5.2	(a) Seção sísmica migrada no domínio da profundidade pela teoria do raio. (b) Seção sísmica migrada pela equação eiconal.....	25
Figura 5.3	Sismograma sintético adicionado de ruído aditivo cuja amplitude máxima é 20% da amplitude máxima do sismograma.....	26
Figura 5.4	(a) Seção sísmica migrada no domínio da profundidade pelo traçamento do raio. (b) Seção sísmica migrada pela equação do eiconal.....	27

Figura 5.5 (a) Modelo complexo utilizado para gerar o sismograma.(b) Sismograma sintético contendo múltiplas. Foi mantido o mesmo pulso fonte, agora com uma frequência dominante de 30Hz, sendo o intervalo de amostragem entre os traços de 2ms.....	28
Figura 5.6 (a),(b) e (c) Traços sísmicos com pulsos representativos dos eventos de reflexões e de múltiplas nas posições $x_1 = 1.2\text{km}$, $x_2 = 1.75\text{km}$ e $x_3 = 2.3\text{km}$ respectivamente.....	30
Figura 5.7 (a) Seção sísmica migrada através da análise cinemática da equação do eiconal. (b) Seção sísmica migrada usando o traçamento do raio. Foi utilizada como velocidade representativa do meio a velocidade $V_{\text{RMS}} = 2.806\text{m/s}$	31
Figura 5.8 Modelo geológico real usado para motivar a simulação de uma situação geológica complexa.....	32
Figura 5.9 (a) Modelo complexo utilizado para gerar o sismograma.(b) Sismograma sintético contendo múltiplas. A velocidade abaixo do domo é 5.0km/s.....	33
Figura 5.10 (a) Seção sísmica migrada pela equação eiconal. (b) Seção sísmica migrada usando o traçamento do raio. Foi utilizada como velocidade representativa do meio a velocidade $V_{\text{RMS}} = 2.9\text{km/s}$	34
Figura 5.11 Seção sísmica migrada pela equação eiconal usando o modelo de velocidade verdadeiro.....	35
Figura 5.12 (a) Modelo complexo contendo um domo salino .(b) Sismograma com ruído aditivo com amplitude máxima de 20% da amplitude máxima do dado sintético.....	36
Figura 5.13 Seção sísmica migrada pela equação eiconal usando o modelo de velocidade verdadeiro.....	37
Figura 5.14 (a) Modelo físico contendo um refletor alvo abaixo do domo. (b) Sismograma sintético.....	38
Figura 5.15 Seção sísmica migrada pela equação eiconal usando o modelo de velocidade verdadeiro.....	39
Figura 5.16 (a) Raios associados aos tempos de primeiras chegadas. (b) Raios associados aos tempos posteriores, (Geoltrain, S., e Brac, J., 1991, modificado).....	40

RESUMO

Nos últimos anos tem-se verificado um interesse crescente no desenvolvimento de algoritmos de imageamento sísmico com a finalidade de obter uma imagem da subsuperfície da terra. A migração pelo método de Kirchhoff, por exemplo, é um método de imageamento muito eficiente empregado na busca da localização de refletores na subsuperfície, quando dispomos do cálculo dos tempos de trânsito necessários para a etapa de empilhamento, sendo estes obtidos neste trabalho através da solução da equação eiconal. Primeiramente, é apresentada a teoria da migração de Kirchhoff em profundidade baseada na teoria do raio, sendo em seguida introduzida a equação eiconal, através da qual são obtidos os tempos de trânsitos empregados no empilhamento das curvas de difrações. Em seguida é desenvolvido um algoritmo de migração em profundidade fazendo uso dos tempos de trânsito obtidos através da equação eiconal. Finalmente, aplicamos este algoritmo a dados sintéticos contendo ruído aditivo e múltiplas e obtemos como resultado uma seção sísmica na profundidade. Através dos experimentos feitos neste trabalho observou-se que o algoritmo de migração desenvolvido mostrou-se bastante eficiente e eficaz na reconstrução da imagem dos refletores.

ABSTRACT

In the last years we have seen an increasing interest in seismic imaging algorithms in order to obtain better informations about the earth interior. The Kirchhoff migration method is very useful for determining the position of seismic reflectors, if is known the seismic wave velocity model and the traveltimes are well determined through the earth model. The traveltimes calculation is a necessary step for stacking the seismic data by means of the Kirchhoff migration operator. In this work the traveltimes are obtained by solving the eiconal equation of the ray theory. At first, the theory of Kirchhoff migration is reviewed, by considering depth migration in heterogeneous media with arbitrary curved reflectors. Secondly, the numerical solution of the eiconal equation is presented for transmitted, diffracted and head waves. There offer , the depth migration algorithm is presented, must makes use of traveltimes obtained by the eiconal equation. Finally, the developed migration algorithm is applied to synthetic models, providing a very good image resolution in comparison with the conventional ray tracing migration methods, even in the presence of random or coherent (multiple reflections) noise.

1. INTRODUÇÃO

Com a finalidade de obter mais informações sobre as propriedades físicas da subsuperfície da terra, vários autores têm desenvolvido algoritmos de modelamento e imageamento sísmicos e aplicado em métodos de migração Kirchhoff em profundidade. Estes métodos requerem o cálculo dos tempos de trânsito entre as posições de registro na superfície e os pontos em profundidade.

Atualmente, há dois métodos para o cálculo dos tempos de trânsito: o primeiro, o mais usual, emprega o traçado de raios (Cerveny et al., 1977) que calcula os tempos de trânsito ao longo dos raios e os interpola em uma rede regular. O segundo, utiliza a solução numérica da equação da eiconal⁽¹⁾, fornecendo apenas os tempos de chegada dos primeiros eventos.

Uma desvantagem do método do traçado de raios ocorre em meios com altos contrastes de velocidade de uma camada para outra, pois nestes casos podem existir divergência de raios, produzindo zonas de sombra artificial (“shadow zones”) e assim o processo de interpolação pode se tornar muito difícil e demorado computacionalmente. A fim de tornar mais rápido o cálculo dos tempos, vários autores têm recentemente introduzido métodos para o cálculo dos tempos de trânsito diretamente sobre uma malha regular, evitando assim o processo de interpolação. Tais técnicas foram desenvolvidas recentemente para o cálculo das frentes de ondas por vários autores (Reshef and Kosloff, 1986; Vidale, 1988; Podvin and Lecomte, 1991; Schneider et al., 1992; Zhao, 1998). Gray e May (1994), compararam três métodos de migração de Kirchhoff utilizando o conjunto de dados Marmousi gerado a partir de um modelo geológico complexo.

Este trabalho se propõem a desenvolver um algoritmo de migração Kirchhoff em profundidade utilizando os tempos de trânsito obtidos pela solução numérica da equação da eiconal. Este esquema calcula somente os eventos das primeiras chegada. Serão analisados os efeitos do ruído na seção sísmica migrada, e da presença de múltiplas reflexões.

Primeiramente, será usado um modelo físico com uma interface suave, e acrescentado ruído aos dados sintéticos, obtidos através de um programa de modelamento sísmico pelo método convencional de traçado de raios (Cerveny & Psencik, 1988). Em seguida, buscando a simulação de uma situação mais real será usado um modelo geológico no qual serão introduzidas múltiplas analisado-se o efeito destas na seção migrada.

¹ Eiconal: função utilizada para calcular, em óptica geométrica, a trajetória de um raio luminoso através de uma lente ou de um sistema (novo dicionário Aurélio da língua portuguesa).

Diante destas situações veremos como se comporta o algoritmo de migração em profundidade desenvolvido neste trabalho, mostrando sua estabilidade e eficiência computacional e comparando os resultados obtidos com aqueles obtidos pela teoria do raio.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO DA MIGRAÇÃO DE KIRCHHOFF

2.1 INTEGRAL DE EMPILHAMENTO DE DIFRAÇÃO

Considera-se que a subsuperfície é descrita por um modelo de camadas isotrópicas estratificadas, e que também existem somente reflexões primárias P-P com pares fonte-receptor (S, G) dados por

$$x_S = x_S(\xi), \quad x_G = x_G(\xi), \quad (2.1)$$

em que ξ é um parâmetro na superfície que identifica a posição de um par fonte-receptor.

Na migração por empilhamento de difração, o valor da amplitude de cada ponto M do traço migrado é obtido pela soma algébrica das amplitudes dos traços de entrada ao longo de uma curva de difração $\tau_D(\xi, M)$ mostrada na Figura 2.1 abaixo.

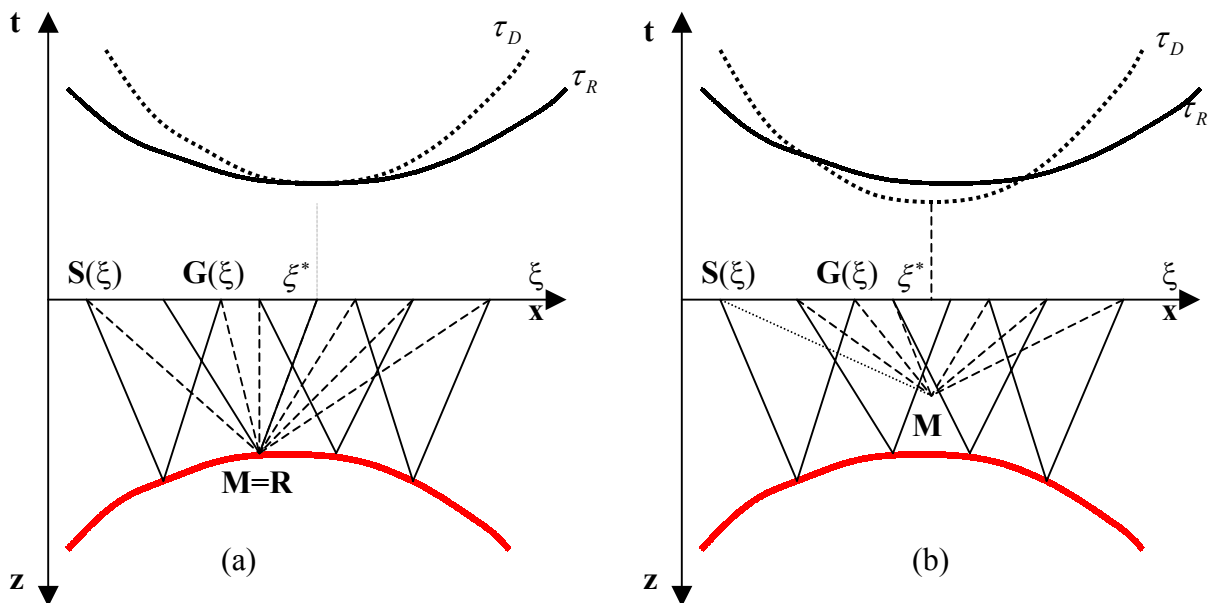


Figura 2.1 – Curvas de tempos de trânsito de reflexão (τ_R) e de difração (τ_D) Para diferentes escolhas do ponto M em uma configuração de afastamento comum.

Assume-se que a linha sísmica na superfície $z = 0$ da Figura 2.1 é densamente coberta por pares fonte-receptor (S,G). As reflexões primárias do refletor desconhecido são descritas para cada par (S,G) pela teoria do raio em sua aproximação de ordem zero, e ocorrem na chamada curva de tempo de trânsito de reflexão τ_R . 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 dependem do par fonte-receptor (S,G) e são, portanto, funções de ξ .

Podem ser visualizadas duas situações, conforme a figura acima: (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 et al.,1993).

Considerando-se o termo de ordem zero da série assintótica do raio (Schleicher et al, 1993), quando a superfície de registro ($z = 0$) não é uma superfície livre, a componente principal do vetor deslocamento da partícula é representada pelo sinal analítico.

$$U(\xi, t) = R_c \frac{A}{L} W(t - \tau_R(\xi)), \quad (2.2)$$

em que:

- $W(t) \rightarrow$ é a função complexa que representa o pulso analítico para uma fonte linha, consistindo do pulso fonte como parte real e sua transformada de Hilbert como parte imaginária;
- $R_c \rightarrow$ coeficiente de reflexão da onda plana no ponto de reflexão R;
- $A \rightarrow$ perda total de energia devido a transmissão do raio através das interfaces;
- $L \rightarrow$ fator de espalhamento geométrico normalizado.

Para cada ponto M no macromodelo de velocidades e para todos os pontos ξ localizados na abertura da migração C(região de integração), a integral de empilhamento de difrações 2-D é expressa matematicamente por (Urban, 1999)

$$V_F(M, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_C d\xi \partial_L^{\frac{1}{2}} U(\xi, t + \tau_D(\xi, M)), \quad (2.3)$$

em que $\partial_L^{\frac{1}{2}}$ é o operador semi-derivada temporal anti-causal e corresponde, no domínio da frequência, ao filtro $F(\omega) = \sqrt{-i\omega}$.

A superfície de Huygens $\tau_D(\xi, M)$ é dada por

$$\tau_D(\xi, M) = \tau(S, M) + \tau(M, G), \quad (2.4)$$

em que $\tau(S, M)$ e $\tau(M, G)$ denotam os tempos de trânsito de $S(\xi)$ a M e de M a $G(\xi)$, respectivamente.

O valor $V(M, t = 0)$ é a saída da migração de empilhamento de difração para o ponto em profundidade escolhido M . $w(\xi, M)$ denota a função peso.

Substituindo a expressão $U(\xi, t)$ da equação (2.2) na equação (2.3) e tomando-se para a função peso o valor $w(\xi, M) = 1$, resultando na saída do algoritmo de migração um sinal sem a correção do fator de espalhamento geométrico, tem-se

$$V(M, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_C d\xi \partial_L^{\frac{1}{2}} \left[\left(R_c \frac{A}{L} \right) W(t + \tau_F(\xi, M)) \right], \quad (2.5)$$

sendo, $\tau_F(\xi, M) = \tau_D(\xi, M) - \tau_R(\xi, M)$ a diferença entre os tempos de difração e de reflexão.

Efetuada-se a transformada de Fourier direta de $V(M, t)$ na variável temporal, chega-se a

$$\hat{V}(M, \omega) = \sqrt{\frac{-i\omega}{2\pi}} \int_C d\xi R_c \frac{A}{L} e^{i\omega\tau_F(\xi, M)}. \quad (2.6)$$

A integral (2.6), que possui um núcleo oscilatório, não pode ser resolvida analiticamente. Pode-se, entretanto, calcular o seu valor aproximado para altas frequências usando o método da fase estacionária (Bleistein, 1984).

Aplicar o método da fase estacionária à integral (2.6) significa expandir a função fase $\tau_F(\xi, M)$ em uma série de Taylor com respeito ao ponto estacionário ξ^* , que truncada no termo de segunda ordem é dada por

$$\tau_F(\xi, M) = \tau_F(\xi^*, M) + \frac{1}{2} H_F (\xi - \xi^*)^2, \quad (2.7)$$

onde $\left. \frac{\partial \tau_F}{\partial \xi} \right|_{\xi=\xi^*} = 0$. Assumindo que $H_F = \left. \frac{\partial^2 \tau_f(\xi, M)}{\partial \xi^2} \right|_{\xi=\xi^*} \neq 0$ e usando o método da fase estacionária tem-se a solução assintótica (Bleistein, 1984)

$$\hat{V}_F(M, \omega) = \hat{V}(M, \omega) F(\omega) \approx \hat{W}(\omega) \frac{R_c A}{L \sqrt{|H_F|}} \exp \left[i \omega \tau_F(\xi^*, M) + \frac{i\pi}{4} (\text{sgn } H_F - 1) \right] \quad (2.8)$$

Na expressão (2.8), verifica-se que o empilhamento de difrações, realizado de acordo com a equação (2.3), introduz no resultado um deslocamento de fase de $\pi/4$ devido ao fator $\frac{1}{\sqrt{-i\omega}}$.

Até o momento foi apresentado um desenvolvimento matemático da teoria da migração em Kirchhoff usando a teoria do traçamento dinâmico do raio. Vemos através da equação integral de empilhamento de difração (2.3), a necessidade do cálculo da função tempo de trânsito de difração. Sendo este trabalho fundamentado na teoria da equação da eiconal, a função $\tau_D(\xi, M)$ será obtida através da solução numérica desta equação que será apresentada no capítulo seguinte.

3. EQUAÇÃO DA EICONAL

Considere a equação da onda elástica num sistema de coordenadas Cartesianas (Aki e Richards, 1980) dada por

$$\sigma_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i, \quad i, j = 1, 2, \quad (3.1)$$

em que u_i são as componentes Cartesianas do vetor deslocamento \mathbf{u} e σ_{ij} denota as componentes Cartesianas do tensor tensão e ρ é a densidade do meio. A equação diferencial parcial homogênea (3.1) descreve a propagação da onda elástica a partir do instante em que a fonte deixa de atuar sobre o sistema. Nas equações (3.1) a (3.4) é utilizada a convenção de Einstein para somatórios, isto é, índices repetidos implicam em somatório sobre os mesmos, a vírgula entre índices indica diferenciação em relação às coordenadas indicadas pelos índices e o ponto indica diferenciação em relação ao tempo. Usando esta notação o tensor tensão pode ser expresso em termos de u_i , num meio isotrópico heterogêneo, por

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} u_{k,k} + \mu (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (3.2)$$

sendo $\lambda = \lambda(\mathbf{x})$ e $\mu = \mu(\mathbf{x})$ os parâmetros de Lamé, δ_{ij} a delta de Kronecker e \mathbf{x} o vetor posição de um ponto em profundidade num sistema de coordenadas Cartesiano.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i=j, \\ 0, & \text{se } i \neq j. \end{cases} \quad (3.3)$$

Inserindo a equação (3.2) na equação (3.1), obtém-se a forma final da equação da onda elástica

$$(\lambda + \mu) u_{j,ij} + \mu u_{i,jj} + \lambda_{,i} u_{j,j} + \mu_{,j} (u_{i,j} + u_{j,i}) = \rho \ddot{u}_i. \quad (3.4)$$

Esta equação também pode ser escrita na forma vetorial como

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu\Delta\mathbf{u} + \nabla\lambda\nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla\mu \times (\nabla \times \mathbf{u}) + 2(\nabla\mu\nabla)\mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}, \quad (3.5)$$

ou no domínio da frequência

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot \hat{\mathbf{u}}) + \mu\Delta\hat{\mathbf{u}} + \nabla\lambda\nabla \cdot \hat{\mathbf{u}} + \nabla\mu \times (\nabla \times \hat{\mathbf{u}}) + 2(\nabla\mu\nabla)\hat{\mathbf{u}} = -\rho\omega^2 \hat{\mathbf{u}}, \quad (3.6)$$

em que

$$\hat{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) e^{-i\omega t} dt. \quad (3.7)$$

De acordo com (Cerveny, 1985), a equação da onda elástica no domínio da frequência (3.6) admite uma solução dada por

$$\hat{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, \omega) = e^{i\omega\tau} \sum_{n=0}^{\infty} \mathbf{U}^{(n)}(\mathbf{x})(-i\omega)^{-n}, \quad (3.8)$$

e conhecida como série do raio. Na equação (3.8) τ é o eiconal ou função fase. Considerando a aproximação de ordem zero da série do raio (3.8) temos, i.e, para altas frequências,

$$\hat{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, \tau) = \mathbf{U}^{(0)}(\mathbf{x})e^{i\omega\tau}, \quad (3.9)$$

sendo $\mathbf{U}^{(0)}$ a amplitude.

Inserindo a equação (3.9) na equação (3.5), a propagação cinemática da onda é descrita pela equação (Cerveny, 1987)

$$\nabla\tau \cdot \nabla\tau = \mathbf{s}^2, \quad (3.10)$$

conhecida como equação eiconal, em que $\mathbf{s}(\mathbf{x})$ é a vagarosidade do meio (inverso da velocidade da onda) e $\tau(\mathbf{x})$ representa o tempo de trânsito de uma frente de onda num ponto \mathbf{x} em profundidade.

Os raios aparecem quando a equação do eiconal é resolvida pelo métodos das características. Assim, tanto os raios quanto as frentes de ondas são inerentes na equação do eiconal. Se trata somente de uma parametrização diferente da cinemática da propagação de ondas.

O fato do traçamento de raios fornecer outros eventos do que a solução de diferenças finitas da equação da eiconal se deve a condições diferentes na escolha de eventos na implementação numérica das correspondentes equações.

O critério das diferenças finitas é escolher em cada ponto da malha o tempo menor, indiferente dos tempos maiores serem físicos ou não. O critério do traçamento de raios dá preferências às soluções que garantam a continuidade da característica da equação do eiconal, i.e, do raio, eliminando singularidades dos mesmos.

O modelo real é substituído por um modelo virtual em que cada espaço é preenchido por materiais com velocidade constante, enquanto que na discretização, cada cela da rede tem uma velocidade. É evidente que a acurácia desta aproximação depende essencialmente do tamanho de cada cela.

A equação (3.10) é uma equação diferencial parcial não linear, não-homogênea, de primeira ordem e de segundo grau. A sua expressão em coordenadas cartesianas bidimensionais é

$$\left(\frac{\partial\tau(x,z)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\tau(x,z)}{\partial z}\right)^2 = S(x,z)^2. \quad (3.11)$$

A seguir será descrito o algoritmo utilizado para o cálculo dos tempos de trânsito.

3.1 ALGORITMO DOS TEMPOS DE TRÂNSITO

Vários autores têm recentemente desenvolvido métodos para calcular os tempos de trânsito diretamente sobre uma malha regular através de um esquema de diferenças finitas usando a equação eiconal. Um trabalho desenvolvido por Pestana e Pimentel (1996), no qual foi feita uma comparação entre quatro algoritmos de diferenças finitas, usando como referencia o método de traçado dos raios para obtenção dos tempos de trânsito, mostrou que o algoritmo desenvolvido por Schneider et al.(1992) pode ser usado em técnicas de migração em profundidade do tipo Kirchhoff em meios complexos, pois mostrou-se estável e eficiente do ponto de vista computacional nos diversos exemplos testados. Desta forma, dispondo de um programa que resolve a equação da eiconal, ZHAO (1998), obteve os tempos de trânsito a partir da solução da equação da eiconal. Este programa se baseia na consideração de frentes de ondas curvas, sendo portanto garantida a acurácia do cálculo dos tempos e tendo como referências principais os trabalhos de Schneider et al. (1992) e Podvin & Lecomte (1991).

De acordo com Schneider et al. (1992), o cálculo do tempo de trânsito avança uniformemente ao longo da malha e em cada estágio do mapeamento, apenas o tempo de trânsito atual é usado no cálculo do tempo de trânsito futuro.

Para uma fonte localizada no lado esquerdo da malha, no ponto **O**, este algoritmo calcula os tempos de trânsito numa coluna mais próxima da fonte.

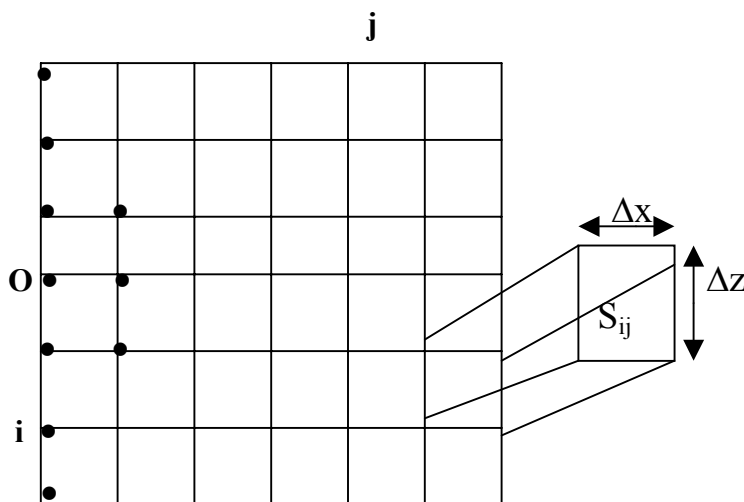


Figura 3.1 – grid regular para o mapeamento de força bruta (Schneider et al.,1992).

A Figura 3.1 mostra a disposição da rede e a geometria de uma cela de vagarosidade S , a qual é constante no interior de cada cela. O ponto O indica a posição da fonte e os pontos em negrito indicam as posições onde os tempos de trânsito são computados analiticamente e usados como condição inicial.

O mapeamento de força bruta (método descrito por Schneider) começa com o cálculo do tempo de trânsito para todos os pontos situados em cada nó da primeira coluna a partir da fonte, e para os três pontos situados nos três nós da segunda coluna mais próximos da fonte, usando apenas a distância e a vagarosidade em cada cela. Estes tempos serão os valores iniciais para a determinação dos demais tempos do grid. O tempo correspondente ao nó do grid no qual está posicionada a fonte é zero, e o tempo correspondente ao nó diretamente acima da fonte é dado por $S \cdot \Delta z$, em que S é a vagarosidade da cela entre estes dois nós. Os tempos de chegada são analogamente computados para o restante dos nós em negrito. A seguir serão apresentadas as etapas de cálculos das ondas transmitidas, refratadas e difratadas.

A Figura 3.2 abaixo mostra quatro tipos de configurações que são usadas para computar os valores dos tempos t em cada ponto C , que representa cada nó na segunda coluna, a partir dos tempos conhecidos t_1 e t_2 nos pontos A e B respectivamente. A configuração aqui descrita é composta pela terna (A, B, C) e dos tempos conhecidos t_1 e t_2 em A e B , respectivamente, calculados analiticamente como descritos acima.

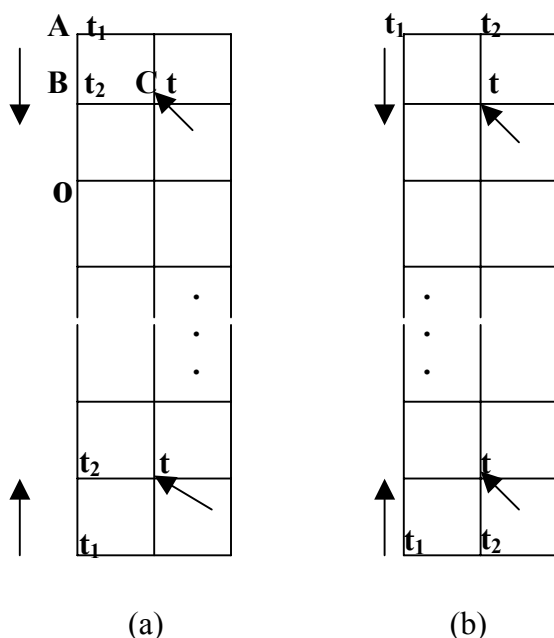


Figura 3.2 – As três primeiras colunas da Fig.3.1 são mostradas em (a) e também em (b). As quatro setas indicam o sentido das quatro configurações e O representa a fonte.

O mapeamento começa na parte superior esquerda da malha. A partir dos tempos t_1 e t_2 calculados analiticamente nos pontos A e B respectivamente, calcula-se o tempo t no ponto C, como mostra a Figura 3.2 acima. Após ser calculado o tempo de trânsito t em C, move-se a configuração, i.e., o par de pontos A e B uma cela para baixo e calcula-se o tempo t no canto inferior direito de cada cela, a partir dos tempos conhecidos em A e B. Este procedimento é adotado nas três configurações seguintes representadas na figura acima para o cálculo dos tempos na segunda coluna, e dos quatro tempos calculados em cada nó, é tomado o de menor valor.

Com estes tempos de trânsito da segunda coluna, obtém-se pelo mesmo procedimento os tempos da terceira coluna e assim por diante, até terminar o cálculo de todos os pontos da malha. As etapas a seguir mostram como são obtidos os tempos de trânsitos referentes às ondas transmitidas, refratadas e difratadas.

3.2 TEMPOS DE TRÂNSITO DE TRANSMISSÃO

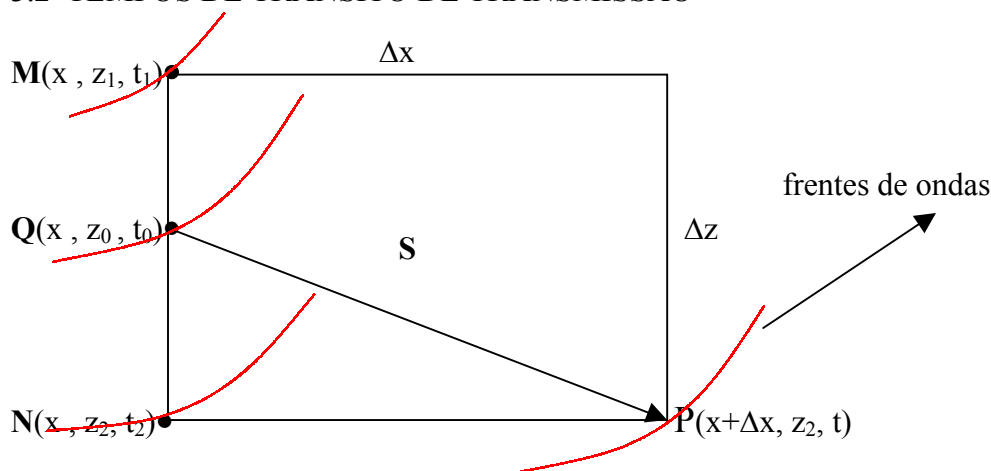


Figura 3.3 - Cella de um grid com vagarosidade constante.

Schneider et al.(1992) propuseram uma interpolação não linear do tempo de trânsito, que modela a frente de onda de forma circular. Através da Figura 3.3 acima vemos como é feito o cálculo em cada cela. Os tempos t_1 e t_2 são conhecidos e estão localizados nas posições $M(x, z_1)$ e $N(x, z_2)$, respectivamente. A frente de onda (curvas vermelhas) se propaga através da interface MN e atinge o ponto $Q(x, z_0)$ no instante t_0 e t é o tempo que se quer calcular na posição $P(x+\Delta x, z_2)$. O tempo de trânsito t em $P(x+\Delta x, z_2)$ é obtido minimizando

$$t = t_0 + S \left[(z_2 - z_0)^2 + \Delta x^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.12)$$

em relação a z_0 .

Considerando-se um meio bidimensional, com velocidade constante, o que implica que a frente de onda gerada por um ponto é circular, então

$$t^2 = S_a^2 (x_a^2 + z^2) , \quad (3.13)$$

em que z é a profundidade e x_a a distância lateral da fonte pontual.

Sejam (x_a, z_1) e (x_a, z_2) os pontos que definem uma linha paralela ao eixo z . A equação (3.13) pode ser reescrita como

$$w = \frac{(t_2^2 - t_1^2)}{(z_2^2 - z_1^2)} = S_a^2 . \quad (3.14)$$

Usando uma simples fórmula de interpolação linear em quantidades quadráticas, o tempo de trânsito t_0 em qualquer ponto (x_a, z_0) ao longo desta linha vertical satisfaz

$$t_0^2 = w(z_0^2 - z_1^2) + t_1^2 . \quad (3.15)$$

Considera-se que na Figura 3.3 x_a, z_1, z_2, t_1 e t_2 são conhecidos e a origem do sistema de coordenadas coincide com a posição real da fonte. Então, com a equação (3.15), que interpola $t_0(z_0)$, minimiza-se a equação (3.12) para obter o tempo mínimo t num meio onde as frentes de ondas são curvas. Derivando (3.12) e igualando-se a zero, obtém-se:

$$\frac{dt}{dz_0} = z_0 \frac{w}{t_0} - S(z_2 - z_0) \left[(z_2 - z_0)^2 + \Delta x^2 \right]^{-\frac{1}{2}} = 0, \quad (3.16)$$

sendo resolvida diretamente para z_0 . Quando t_1 e t_2 são tempos associados a um meio com vagarosidade realmente constante, o problema de minimização se torna exato. A raiz desejada é determinada através do algoritmo de biseção numérica de Burden et al. (1981). Entretanto, outros métodos de determinação de raízes podem ser mais eficientes.

3.3 GERAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE ONDAS REFRATADAS (head waves)

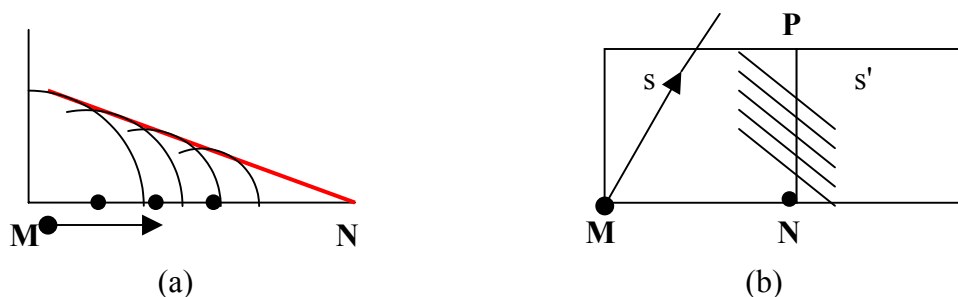


Figura 3.4 - (a) Onda cônica (head wave), representada pela linha vermelha, resultante da superposição das frentes de ondas geradas por cada ponto da interface MN quando excitados por uma onda que viaja paralelamente à interface MN. (b) A seta indica a direção de propagação das ondas cônicas (segmentos paralelos) que se transmitem através da interface NP.

A energia que se propaga paralelamente à interface MN, representada pela seta, na Figura 3.4a, excitam os pontos desta, que de acordo com o princípio de Huygens se comportam como fontes secundárias gerando novas frentes de ondas, cuja superposição resulta na formação de ondas cônicas (linha vermelha). As ondas cônicas são transmitidas através da interface NP, na Figura 3.4b, atingindo o ponto P. De acordo com Podvin e Lecomte (1991), o tempo de chegada no ponto P devido às ondas refratadas é dado por

$$t_P = t_N + \Delta x \cdot \min(s, s'), \quad (3.17)$$

em que s' é a vagarosidade da cela adjacente à cela dada pelos pontos M, N e P da Figura 3.4.

3.4 FRENTES DE ONDAS DIFRATADAS (ondas difratadas)

Na Figura 3.5 abaixo, o ponto M ao ser atingido pela frente de onda atua como um ponto difrator (princípio de Huygens) gerando ondas difratadas (curvas vermelhas), de modo que o ponto P é atingido por essas ondas. A figura também mostra duas ondas transmitidas (a) e (b) que não atingem P. A região compreendida entre estas duas ondas é conhecida como região de sombra e é atingida apenas pelas ondas difratadas. O tempo de chegada registrado em P é dado, segundo Podvin et al., (1991) por

$$t_P = t_M + \Delta x \cdot s \cdot \sqrt{2}. \quad (3.18)$$

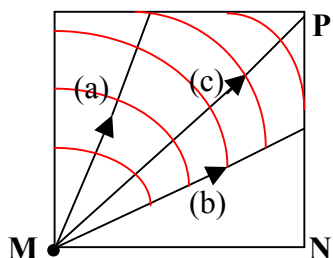


Figura 3.5 – Zona de sombra local . M atua como uma fonte secundária.

4. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

Nesta seção será descrita a implementação do algoritmo de migração em profundidade 2-D pelo método de Kirchhoff utilizando os tempos de trânsito da equação do Eiconal.

O algoritmo de migração em profundidade consiste de três passos básicos:

1. Cálculo da transformada de Hilbert da seção sísmica de entrada (sismograma) e aplicação do filtro *derivada de meio tempo anti-causal* ($\sqrt{-i\omega}$). Para isto basta calcular, no domínio da frequência,

$$\hat{U}_F(\xi, \omega) = \sqrt{-i\omega}(1 + \text{sgn } \omega)\hat{U}(\xi, \omega), \quad (4.1)$$

em que $\hat{U}(\xi, \omega)$ é a transformada de Fourier dos dados de entrada.

2. Cálculo do tempo de trânsito de todas as fontes e receptores para todos os pontos na zona alvo da migração.
3. Somatório das amplitudes dos traços ao longo da curva de difração $\tau_D(\xi, M)$, através da equação (2.9) para cada ponto difrator localizado na zona alvo. Os traços envolvidos no empilhamento encontram-se discretizados. Desta forma, a amplitude correspondente ao tempo $\tau_D(\xi, M)$ é normalmente obtida por interpolação linear.

No item 2 acima, para cada ponto M da malha na zona alvo de migração, foi calculada uma curva de tempos de trânsito pela solução numérica da equação da eiconal, ou seja, o tempo de trânsito correspondente ao raio que liga a fonte ao ponto M mais o tempo de trânsito dos raios ligando o ponto M a cada um dos geofones.

Esta curva de tempo de trânsito foi obtida executando o programa $N_r + 1$ vezes (no caso de configuração fonte comum) ou $2 \times N_r$ (no caso de afastamento comum), em que N_r é o número de geofones. Os tempos de descida para todos os pontos M da zona alvo são calculados posicionando-se a fonte na(s) mesma(s) posição da(s) fonte(s) utilizada(s) pelo programa seis88 para gerar o sismograma e armazenados em uma matriz. Da mesma forma, os tempos de subidas são armazenados em matrizes, sendo agora o programa executado N_r vezes, com a fonte deste assumindo as posições de cada geofone. Este artifício é utilizado considerando que o tempo de descida de cada geofone a um ponto da zona alvo é igual ao tempo de subida deste ponto ao geofone considerado, simplificando assim o cálculo dos tempos de trânsito. Uma outra vantagem deste esquema é o tempo computacional que se reduz bastante, pois se fizéssemos a fonte do programa de diferenças finitas assumir a posição de todos os pontos na zona alvo, o tempo de execução do programa aumentaria bastante.

A seguir, para um melhor entendimento de todo o processo feito neste trabalho, mostramos através do diagrama de bloco da Figura 4.1 os passos desenvolvidos para obtenção da seção sísmica migrada a partir de um dado sísmico (sismograma) obtido em um levantamento.

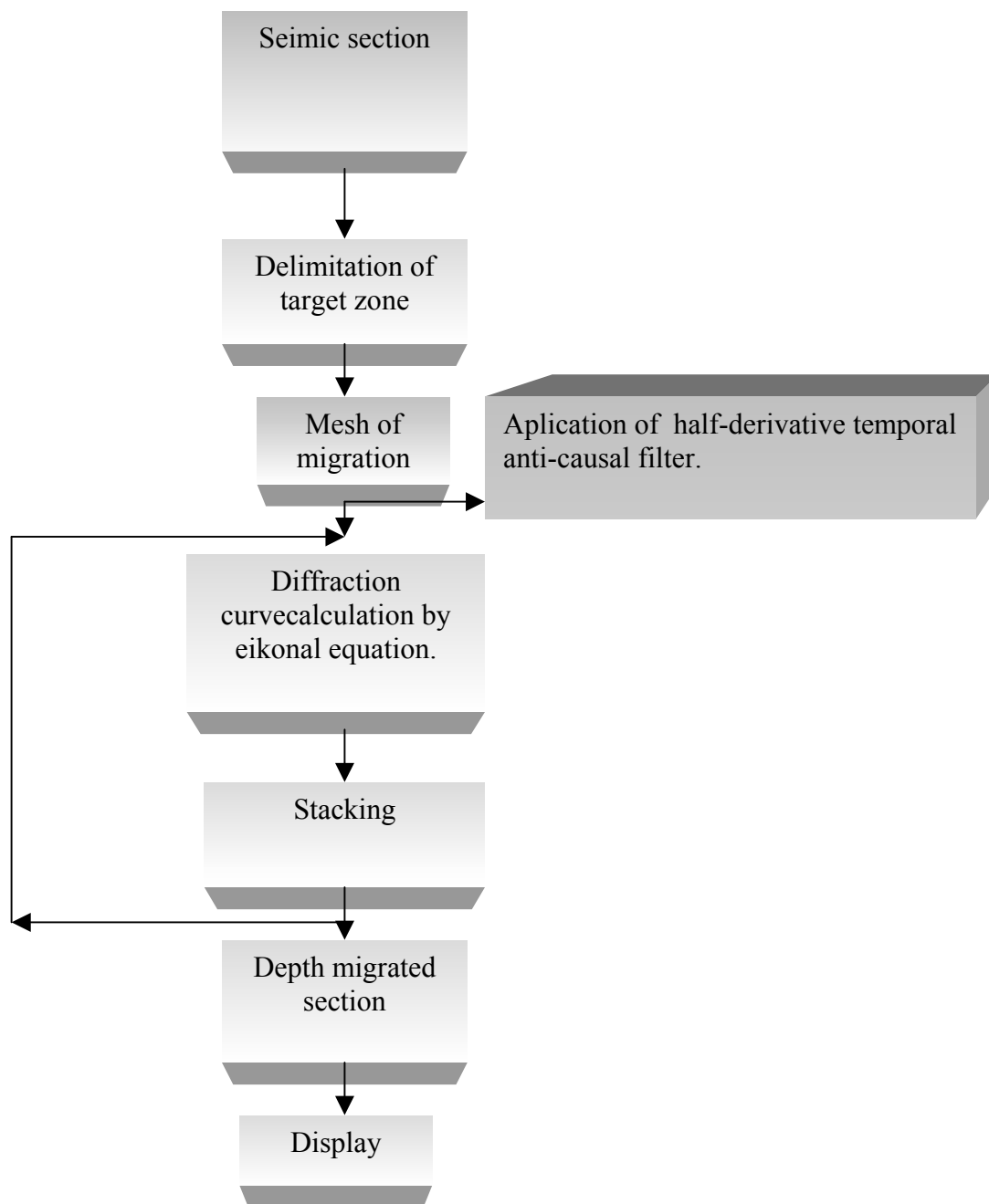


Figura 4.1 – Diagrama de blocos. Processo de migração de dados sísmicos em profundidade.

5. DESCRIÇÃO DOS MODELOS GEOLÓGICOS E APLICAÇÃO DO ALGORITMO

Através da discretização do meio obtém-se uma boa representação física do meio em subsuperfície. O meio é representado por um modelo onde cada célula é preenchida por materiais com velocidade constante. É evidente que a acurácia desta aproximação depende essencialmente do tamanho de cada cela.

Os modelos aqui testados são bidimensionais, com uma rede que apresenta um espaçamento regular $\Delta x = \Delta z = 3\text{m}$ satisfazendo a relação abaixo. Esta relação é importante, pois podemos estimar um valor para o tamanho de cada cela Δz do grid regular que seja menor do que o comprimento de onda λ , obtendo assim uma melhor precisão no cálculo dos tempos de trânsito. Como o algoritmo utilizado neste trabalho para o cálculo dos tempos de trânsito é solução da equação do eiconal, os modelos geológicos apresentados aqui têm como variável apenas a velocidade de propagação das ondas sísmicas. Neste trabalho é considerada apenas a velocidade da onda P, não sendo portanto analisadas ondas S. A quantidade Δz é escolhida de tal forma a satisfazer $\frac{v}{16f} \leq \Delta z \leq \frac{v}{2f}$, em que v é a menor velocidade do meio, f a frequência do pulso fonte e Δz o intervalo de discretização da malha regular. O comprimento de onda λ do pulso fonte está implícito na relação acima, e está relacionado com o intervalo de discretização através da expressão $\lambda = \frac{v}{2f}$.

As curvas de contorno de mesmo tempo representam as frentes de ondas e mostram como se comporta a propagação da energia no modelo. Em todos os modelos físicos essas frentes de ondas são representadas pelas curvas esféricas.

5.1 GERAÇÃO DE DADOS SINTÉTICOS

No desenvolvimento deste trabalho, os dados sintéticos utilizados foram calculados utilizando o programa de modelamento sísmico pelo método convencional de traçado de raios (programa SEIS88, Cervený & Psencik, 1988). Estes dados usados para a migração são sismogramas contendo a componente vertical do vetor deslocamento sísmico, sendo desprezado o efeito da superfície da terra, ou seja, a camada superior do modelo é considerada um semi espaço infinito.

A seguir serão apresentados os modelos geológicos, as seções de dados sísmicos, bem como as seções migradas em profundidade, correspondentes a cada modelo. Devido a indisponibilidade de um programa que calcula os tempos de trânsito pela teoria do raio em um meio heterogêneo, alguns resultados obtidos serão comparados com os obtidos pela teoria do raio, validando assim o programa de migração desenvolvido neste trabalho. Para os modelos heterogêneos em que for utilizada a velocidade verdadeira, a migração será feita apenas pelo método da eiconal. As zonas alvo a serem migradas em todos os modelos são representadas por retângulos indicados por linhas pontilhadas

- **MODELO 01** – Refletor curvo e suave

Para um primeiro teste foi utilizado um modelo constituído por duas camadas homogêneas e isotrópicas. A camada superior tem uma velocidade de propagação das ondas P sísmicas de 2.5 km/s enquanto que a camada inferior de 3.0 km/s. Este modelo tem uma rede de dimensões 2.5 km x 2.5 km, com uma interface curva e suave separando as duas camadas, conforme é mostrado na figura 5.1a., estando a fonte do programa de diferenças finitas localizada na posição (1.250 km, 0 km). Este modelo simples foi escolhido com o intuito de testar o algoritmo de migração em profundidade utilizando os tempos de trânsito da equação do eiconal.

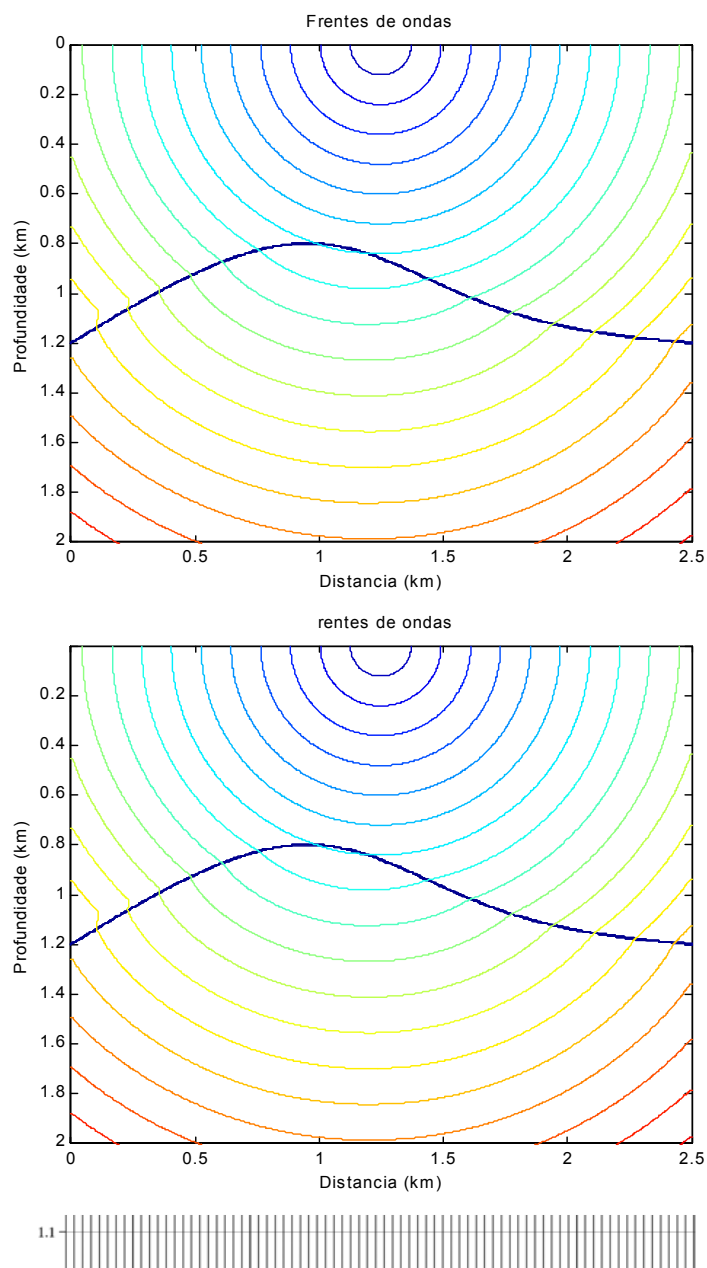
Para a geração do sismograma sintético (Figure 5.1b) foi utilizada a configuração de afastamento comum com um afastamento de 200m. O número de pares de fonte e geofone é 77, e as posições iniciais da primeira fonte e do primeiro geofone são respectivamente 0.2 km e 0.4 km, sendo o espaçamento entre cada fonte ou geofone igual a 25m. A frequência usada neste modelo foi de 30 Hz e o intervalo de amostragem entre cada traço é de 0.002s. O pulso fonte utilizado em todos os modelos é a função Gabor.

A seguir, para a realização da última etapa do processo de migração dos dados sísmicos, foi necessário a utilização de um modelo de velocidade (o macromodelo). A velocidade da camada localizada acima do refletor foi supostamente conhecida, sendo portanto utilizado um modelo com velocidade constante de 2.5 km/s.

A zona alvo a ser migrada tem dimensões $0.6 \leq x \leq 2.0$ km, $0.5 \leq z \leq 1.3$ km, sendo a discretização nas direções x e z dadas por $\Delta x = 0.0186$ km e $\Delta z = 0.0066$ km, como mostra a Figura 5.1a . Δx e Δz representam os intervalos de discretização da zona alvo.

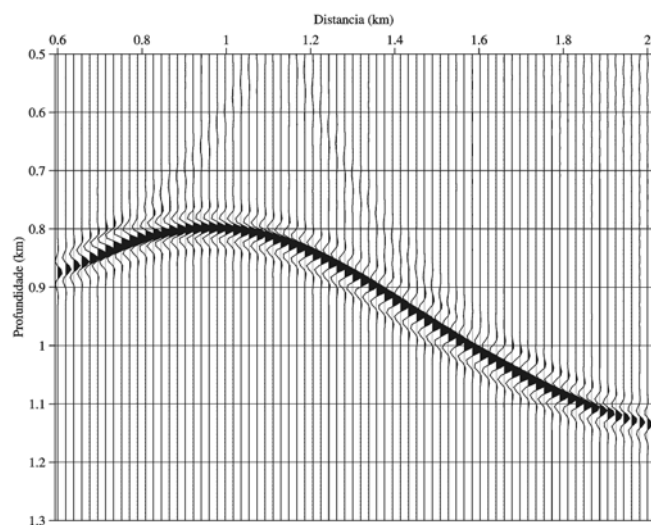
Finalmente, as amplitudes são somadas ao longo da curva de difração. O resultado que se obtém deste procedimento é a seção sísmica migrada no domínio da profundidade, onde é mostrada a parte real deste resultado juntamente com o resultado obtido pela teoria do raio (Figura 5.2 - (a) e (b)).

Neste trabalho, a abertura utilizada para a migração dos dados sísmicos envolveu todos os traços da seção sísmica. Entretanto, a zona de Fresnel pode ser utilizada para estimar uma abertura mínima, conforme Schleicher et al. (1997).

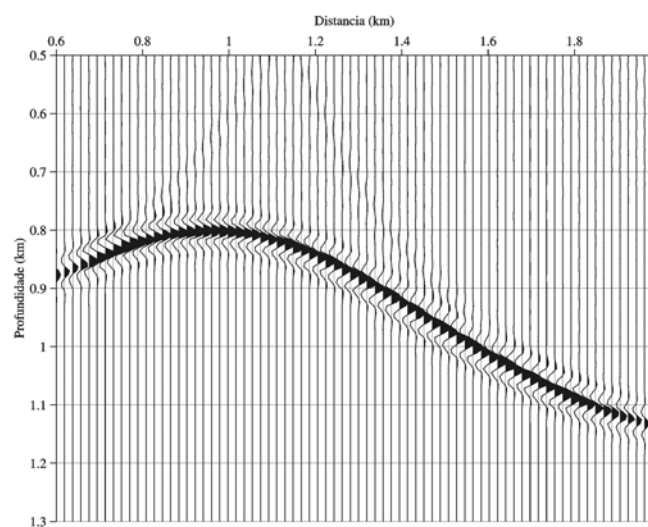


(b)

Figura 5.1 - (a) Modelo físico utilizado para gerar o dado de entrada. As velocidades nas camadas superior e inferior são 2.5 km/s e 3.0 km/s respectivamente. (b) Sismograma sintético gerado pelo programa Seis88 (Cerveny & Psencik, 1988). Foi utilizada como pulso fonte a função Gabor com frequência dominante de 80Hz e o intervalo de amostragem entre os traços é de 2ms.



(a)



(b)

Figura 5.2 - Seções sísmicas migradas no domínio da profundidade usando tempos de trânsito calculados (a) pela teoria do raio e (b) pela equação do eiconal.

Através dos resultados obtidos acima pelos dois métodos, vemos que o método do eiconal é bastante eficiente na precisão do cálculo dos tempos de trânsito, pois recuperou a imagem do refletor. Pode-se notar também na Figura 5.2, a presença de eventos indesejáveis, estes ocorrem devido o truncamento do operador de migração, durante o processo do empilhamento.

- **DADOS COM RUÍDOS**

Considerando o modelo-01 da Figura 5.1a, adicionemos agora ruído aditivo ao dado sintético da Figura 5.1b com uma amplitude máxima de 20% da amplitude máxima do dado sintético e mostramos a seção sísmica migrada através do método do raio e da equação do eiconal. As Figuras 5.3, 5.4a e 5.4b abaixo mostram o sismograma adicionado de ruído bem como as seções migradas no domínio da profundidade pelo método do raio e da equação da eiconal, respectivamente.

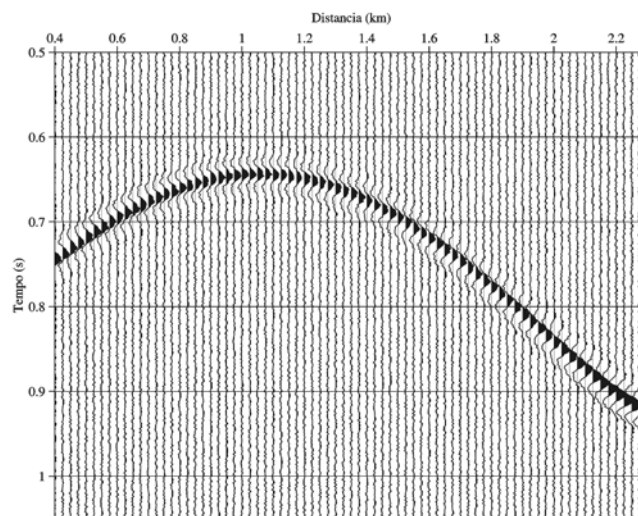
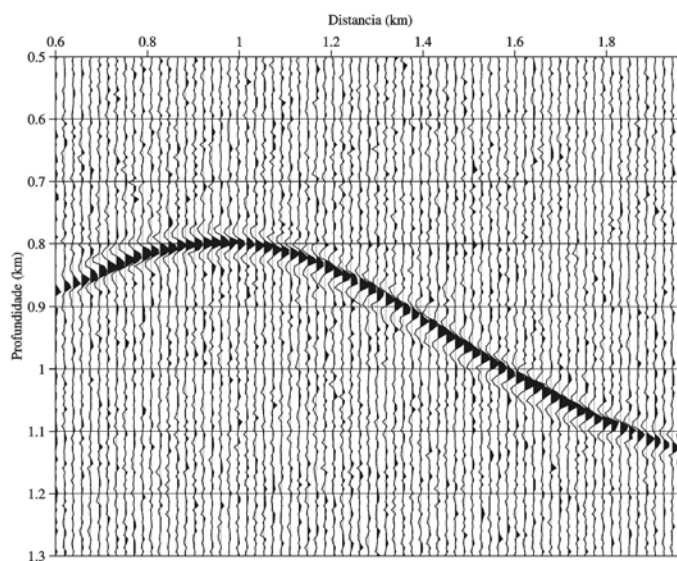
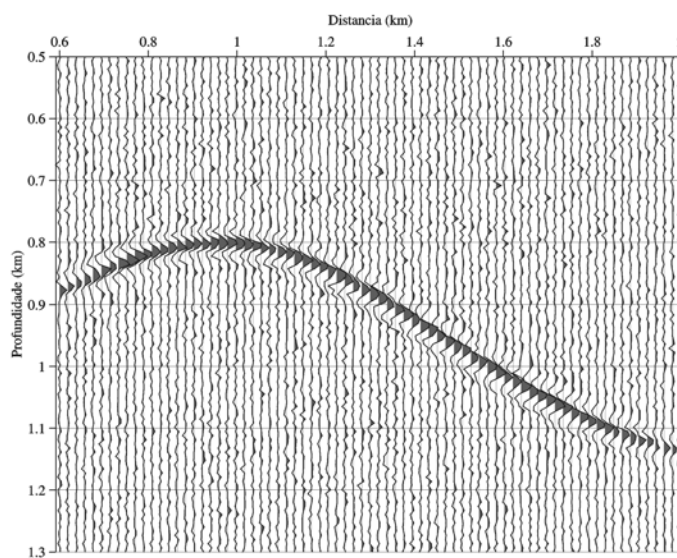


Figura 5.3 – Sismograma sintético adicionado de ruído aditivo cuja amplitude máxima é 20% da amplitude máxima do sismograma.



(a)

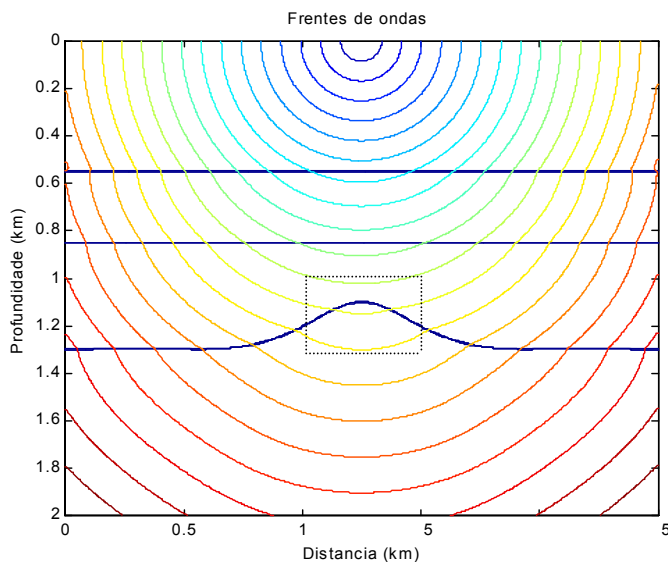


(b)

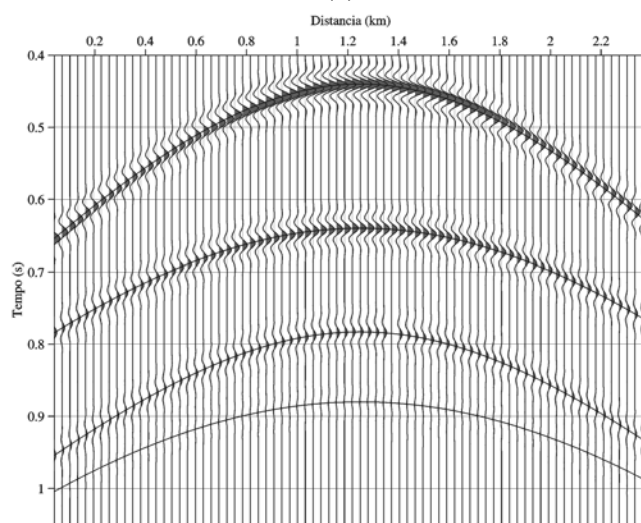
Figura 5.4 - (a) Seção sísmica migrada no domínio da profundidade pelo traçamento do raio. (b) Seção sísmica migrada pela equação do eiconal.

- **MODELO 02** – Modelo complexo (com múltiplas)

Neste modelo complexo foram adicionadas múltiplas com a finalidade de analisar o efeito destas na seção sísmica migrada. As velocidades na primeira, segunda e terceira camadas são 2.5km/s, 3.0km/s e 3.5km/s respectivamente. A zona alvo possui dimensões $1.0 \leq x \leq 1.5$ km, $1.0 \leq z \leq 1.3$ km, e o intervalo de discretização é $\Delta x = 0.0067$ km e $\Delta z = 0.0025$ km



(a)



(b)

Figura 5.5 - (a) Modelo complexo utilizado para gerar o sismograma. (b) Sismograma sintético contendo múltiplas. Foi mantido o mesmo pulso fonte, agora com uma frequência dominante de 30Hz, sendo o intervalo de amostragem entre os traços de 2ms.

A Figura 5.5b acima mostra o sismograma sintético obtido a partir do modelo complexo da Figura 5.5a, no qual foram introduzidas múltiplas na primeira camada através do programa de modelamento sísmico pela teoria do raio (Seis88). Foi usada a configuração de afastamento comum, com 77 traços e a região do refletor atingida pelos raios é $1.15 \leq x \leq 1.35$ km

Através da Figura 5.5b, pode-se ver nitidamente as três curvas de reflexões referentes à primeira, segunda e terceira interfaces, não sendo entretanto, possível, visualizar com nitidez o evento correspondente às múltiplas na primeira camada. Tendo as múltiplas uma amplitude pequena comparada com os eventos de reflexões, e devido a uma limitação de máquina, não foi possível visualizar as múltiplas. No entanto, com o objetivo de mostrar a existência das múltiplas, foram plotadas as curvas de tempos de trânsitos, correspondentes aos eventos de reflexões e das múltiplas (linhas contínuas na Figura 5.5b), superpostas às curvas de reflexões. Agora, vemos a quarta curva representando o tempo referente às múltiplas na primeira camada. Além disso, para validar esta afirmativa, foram plotados três traços individualmente (Fig.5.6), a partir da seção sísmica, mostrando os quatro pulsos relativos aos eventos de reflexões e de múltiplas.

Os pulsos foram obtidos plotando traços sísmicos, i.e., três vetores colunas na matriz do sismograma (Figura 5.5b acima), localizados nas posições $x_1 = 1.2$ km , $x_2 = 1.75$ km e $x_3 = 2.3$ km respectivamente. Neste exemplo, para migrarmos o dado sísmico acima, foi utilizada a velocidade $V_{RMS} = 2.806$ m/s como uma velocidade que melhor representa o meio e foram comparados os resultados obtidos pela equação eiconal e pela teoria do raio, como é mostrada na Figura 5.7(a) e(b). É bom ressaltar que o resultado obtido através da migração é uma imagem aparente, pois não foi utilizada a velocidade verdadeira do meio.

Através dos resultados obtidos (Fig. 5.7a e b) vemos que os dois métodos se comportam bem na migração dos dados utilizando uma velocidade representativa do meio. Se observarmos com atenção os dois resultados veremos que existe uma pequena diferença entre eles. O resultado obtido pelo método do eiconal encontra-se mais próximo da posição real do refletor (linha contínua) do que o resultado obtido pela traçamento do raio.

Na figura abaixo, R_1 , R_2 e R_3 representam os pulsos sísmicos correspondentes aos eventos de reflexões referentes a primeira, segunda e terceira interfaces. M representa um pulso sísmico correspondente ao evento de múltipla que, através da Figura 5.6c, podemos ver sua influência sobre o evento de reflexão referente ao terceiro refletor, superpondo-se a este evento, em pontos extremos deste refletor.

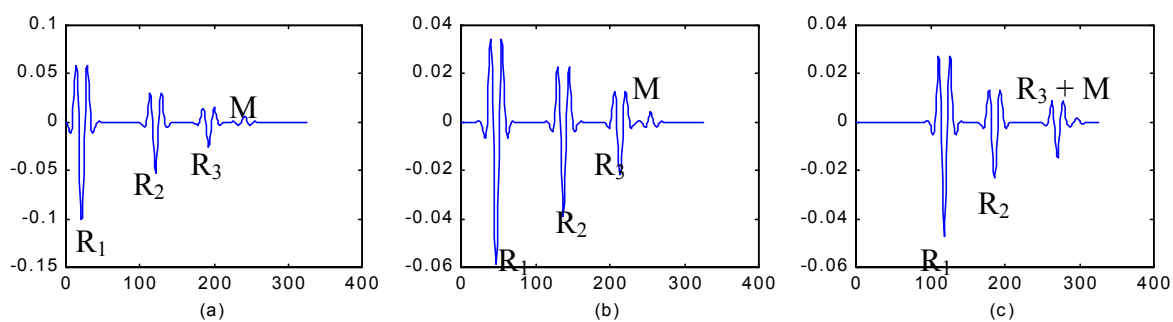
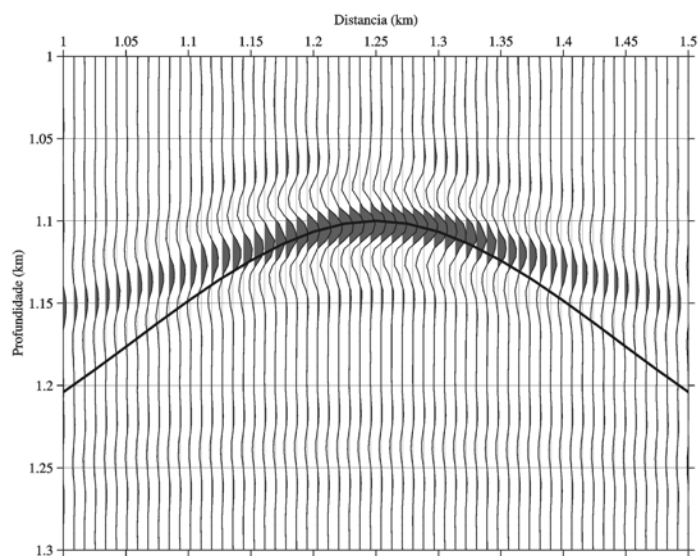
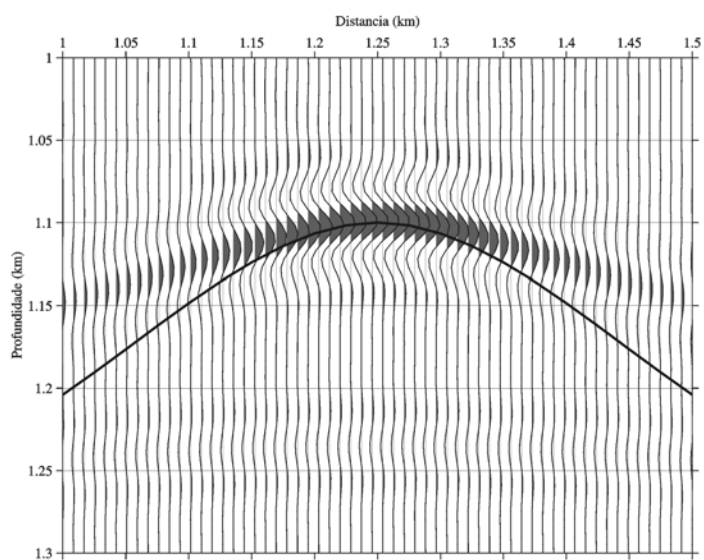


Figura 5.6 –(a),(b) e (c) Traços sísmicos com pulsos representativos dos eventos de reflexões e de múltiplas nas posições $x_1 = 1.2\text{km}$, $x_2 = 1.75\text{km}$ e $x_3 = 2.3\text{km}$ respectivamente.



(a)



(b)

Figura 5.7 - (a) Seção sísmica migrada através da análise cinemática da equação do eiconal. (b) Seção sísmica migrada usando o traçamento do raio. Foi utilizada como velocidade representativa do meio a velocidade $V_{RMS} = 2.806\text{m/s}$.

- MODELO GEOLÓGICO REAL

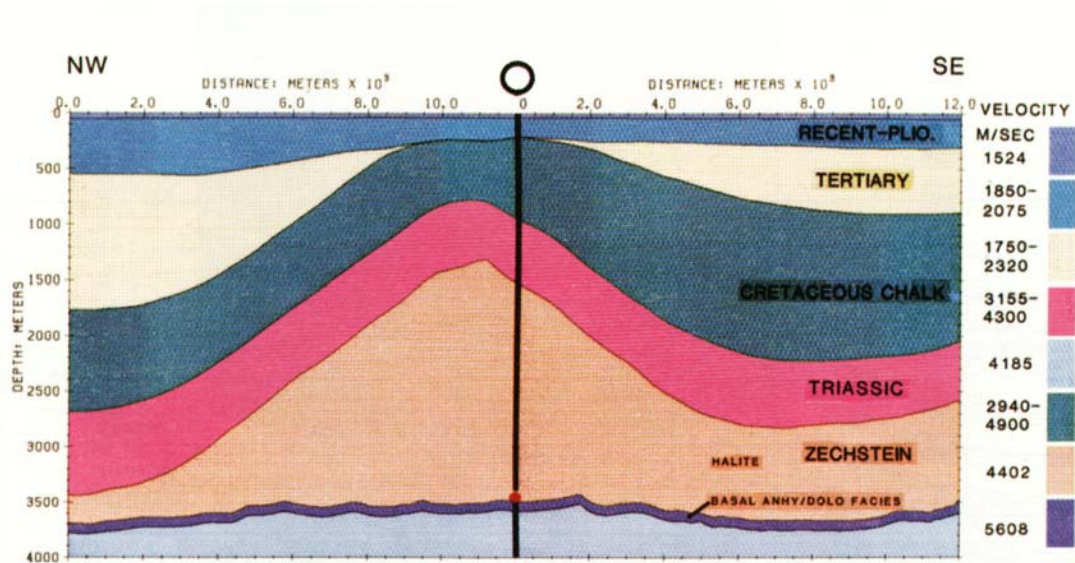
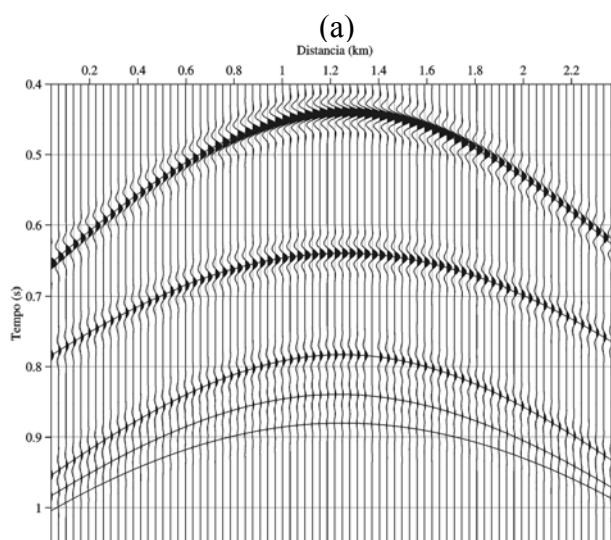
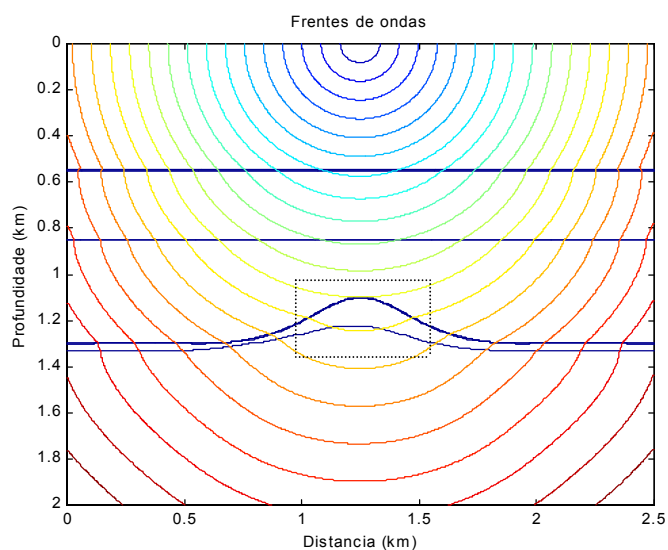


Figura 5.8 – Modelo geológico real usado para motivar a simulação de uma situação geológica complexa (Reilly M. J.1991, modificado).

O modelo acima é usado como motivação para a simulação de modelos geológicos complexos. Pode-se ver uma situação bastante complexa onde é mostrado um domo salino. Nos modelos a seguir, serão simuladas situações semelhantes gerando-se modelos contendo um domo salino e obtendo-se a imagem migrada deste domo através do método de migração desenvolvido neste trabalho. O primeiro modelo é constituído por 4 interfaces, sendo as duas primeiras horizontais e a terceira é um domo salino abaixo do qual encontra-se um refletor suave. Veremos como se comporta o algoritmo de migração na recuperação da imagem deste refletor abaixo do domo, utilizando a velocidade V_{RMS} e a velocidade verdadeira, e comparando-se os dois resultados. A seguir, o segundo modelo é constituído por 4 interfaces, sendo as três primeiras, interfaces suavemente curvas abaixo das quais encontra-se um domo salino. Neste exemplo, será usada a velocidade verdadeira para migrar o dado sísmico contendo ruído aditivo. Finalmente, como último exemplo, adicionaremos ao exemplo anterior um refletor localizado abaixo do domo, como no primeiro exemplo citado acima, e a partir da velocidade verdadeira será migrado o dado sísmico.

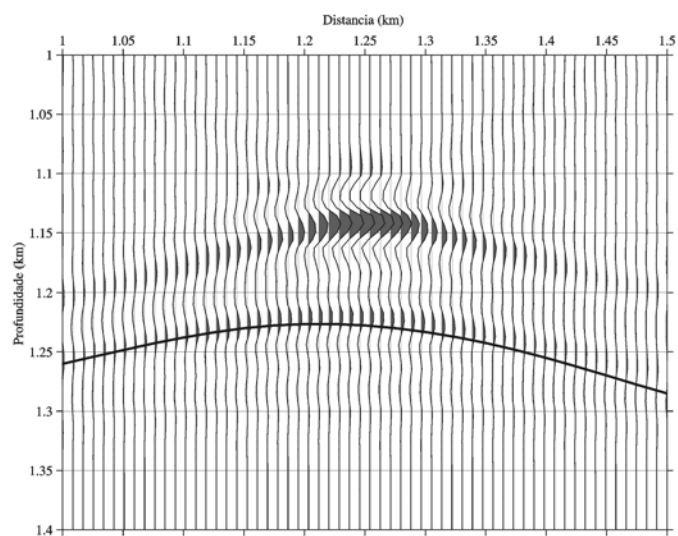
MODELO 03 – Refletor alvo abaixo do domo

Neste exemplo, temos como objetivo investigar um refletor alvo localizado abaixo do domo como é mostrado na Figura 5.9a abaixo. Uma situação que está sendo explorada ultimamente, como por exemplo, na investigação de reservatórios que se encontram abaixo de um domo. Considera-se conhecida a velocidade V_{RMS} cujo valor é 2.9km/s. Foi utilizado o mesmo modelo da Figura 5.5a, sendo a velocidade abaixo do domo igual a 5.0km/s e a zona alvo definida como $1.0 \leq x \leq 1.5$ km, $1.0 \leq z \leq 1.4$ km.

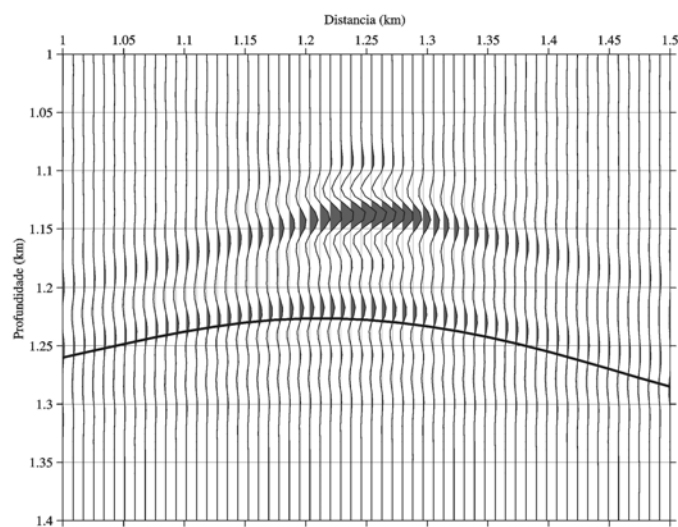


(b)

Figura 5.9 - (a) Modelo complexo utilizado para gerar o sismograma.(b) Sismograma sintético contendo múltiplas. A velocidade abaixo do domo é 5.0km/s.



(a)



(b)

Figura 5.10 - (a) Seção sísmica migrada pela equação eiconal. (b) Seção sísmica migrada usando o traçamento do raio. Foi utilizada como velocidade representativa do meio a velocidade $V_{RMS} = 2.9 \text{ km/s}$.

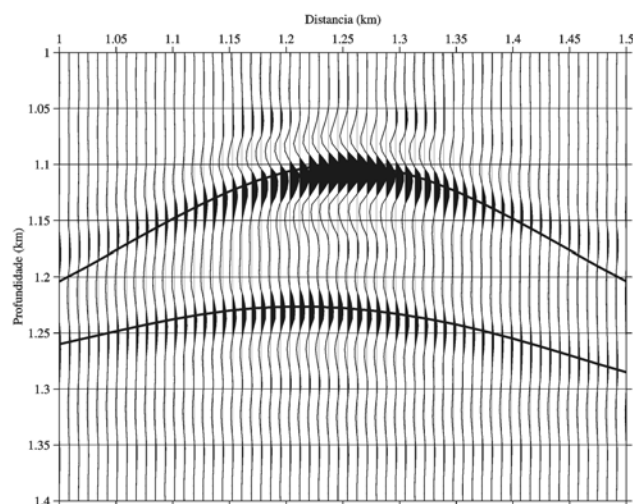
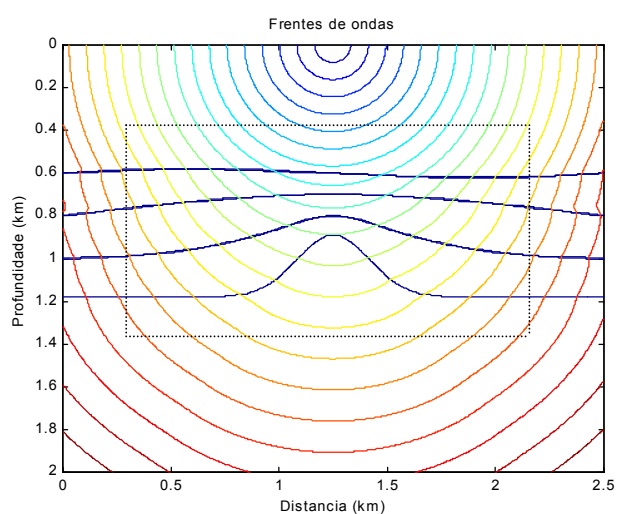


Figura 5.11 - Seção sísmica migrada pela equação eiconal usando o modelo de velocidade verdadeiro.

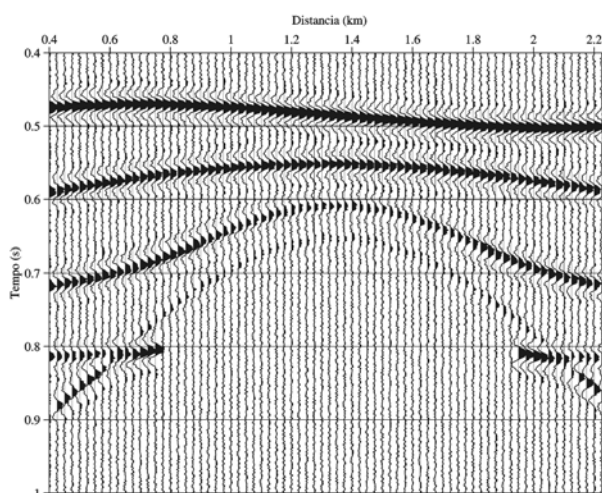
Através da figura acima vemos que o resultado obtido com a migração pelo método do eiconal, utilizando o modelo de velocidade verdadeiro, recupera melhor a forma do refletor quando comparado com este método utilizando a velocidade V_{RMS} (Figura 5.10a). É bom ressaltar que, a migração utilizando a velocidade V_{RMS} fornece uma imagem aparente do refletor. A iluminação do refletor neste exemplo é a mesma do exemplo anterior.

MODELO 04 – Domo salino – Migração com o modelo de velocidade verdadeiro

Neste exemplo, para migrar um domo salino num modelo geológico complexo, foi utilizado o modelo de velocidade verdadeiro. Considera-se conhecida a priori o modelo de velocidade acima do domo. O resultado da migração obtido pelo método do eiconal é mostrado na Figura 5.13. A zona alvo possui dimensões $0.3 \leq x \leq 2.2$ km, $0.4 \leq z \leq 1.4$ km, e o intervalo de discretização é $\Delta x = 0.025$ km e $\Delta z = 0.0083$ km. O sismograma contém ruído com uma amplitude máxima de 20% da amplitude máxima do dado sintético.



(a)



(b)

Figura 5.12 - (a) Modelo complexo contendo um domo salino. (b) Sismograma contendo ruído aditivo com amplitude máxima de 20% da amplitude máxima do dado sintético.

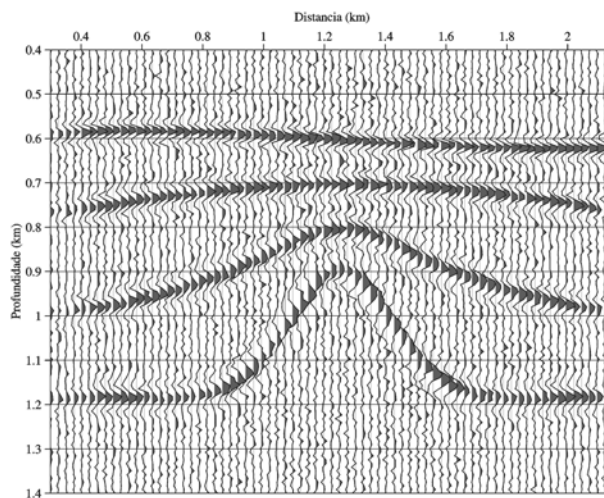
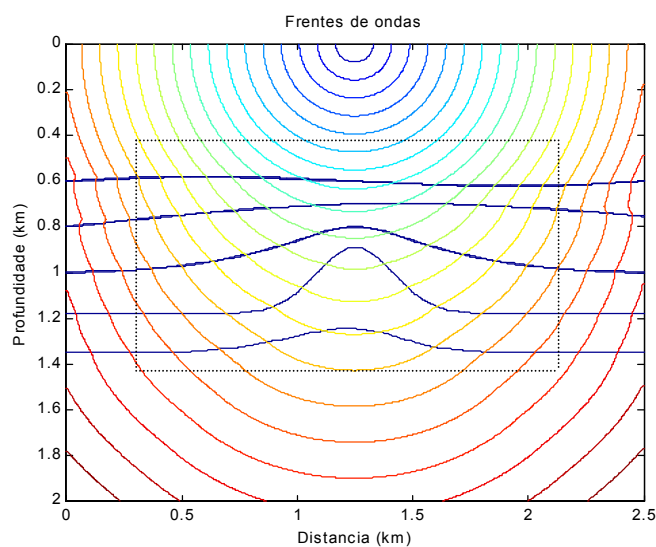


Figura 5.13 - Seção sísmica migrada pela equação eiconal usando o modelo de velocidade verdadeiro.

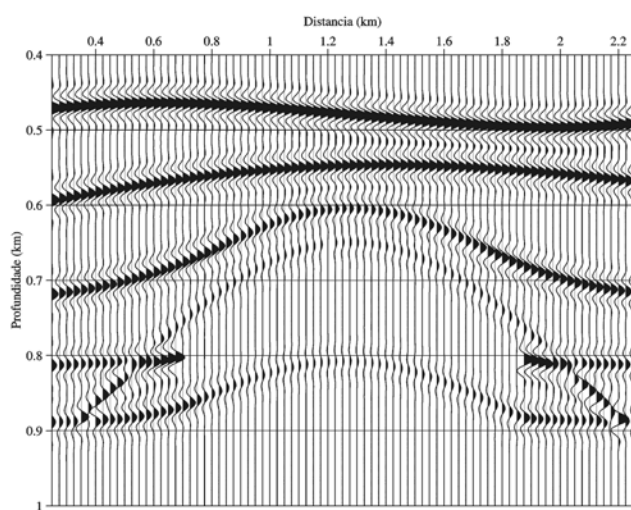
Através da figura acima, podemos ver a eficiência do método de migração desenvolvido neste trabalho, na recuperação da forma do refletor. Vemos que mesmo na presença de ruído aditivo, o algoritmo se mostrou eficiente no seu desempenho. Agora, utilizando o modelo de velocidade verdadeiro obtemos como resultado da migração uma imagem que mais se aproxima da posição exata do refletor alvo.

MODELO 05 – Refletor alvo localizado abaixo de um domo salino

Finalmente, como último exemplo, tendo o mesmo objetivo que no modelo 03, isto é, obter uma imagem de um refletor alvo localizado abaixo de um domo salino, foi migrado o dado sísmico da Figura 5.4b abaixo, utilizando o modelo de velocidade verdadeiro. A zona alvo possui as mesmas dimensões bem como o mesmo intervalo de discretização do modelo anterior.



(a)



(b)

Figura 5.14 – (a) Modelo físico contendo um refletor alvo abaixo do domo. (b) Sismograma sintético.

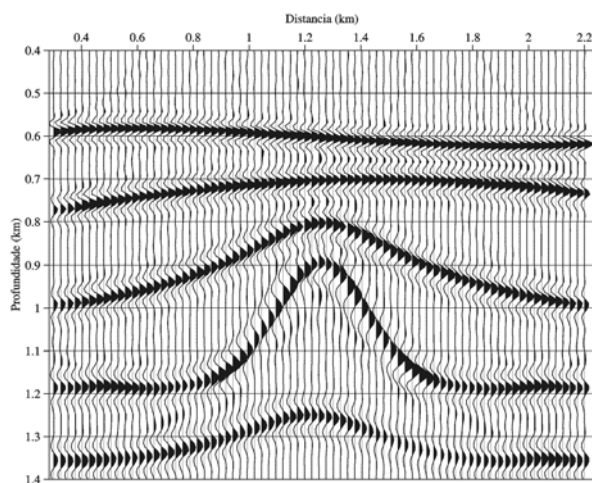


Figura 5.15 - Seção sísmica migrada pela equação eiconal usando o modelo de velocidade verdadeiro.

Finalmente, como último resultado deste trabalho, vemos mais uma vez a eficiência do algoritmo de migração utilizando os tempos de trânsito das primeiras chegadas a partir da equação do eiconal. Da figura acima vemos a imagem reproduzida do refletor alvo localizado abaixo do domo, através do processo de migração. O método recupera a posição do refletor com uma boa acurácia quando é utilizado o modelo de velocidade verdadeiro.

5.2 PROBLEMAS DEVIDO A FORTE VARIAÇÃO LATERAL DE VELOCIDADE

Os modelos físicos utilizados neste trabalho não apresentam fortes variações laterais de velocidade, sendo constituídos por interfaces suaves, fazendo com que a propriedade física do meio (velocidade) não sofra tanta variação ao longo de cada camada. Nestas condições, como foi visto através dos resultados obtidos neste trabalho, a utilização dos tempos de trânsito das primeiras chegadas obtidos através da solução da equação do eiconal por um esquema de diferenças finitas foi suficiente para a reconstrução das imagens dos refletores durante o processo de migração, pois o algoritmo de migração desenvolvido mostrou-se bastante eficiente, fornecendo uma boa imagem do refletor. No entanto, um trabalho desenvolvido por Sebastien Geoltrain e Jean Brac (1991) mostrou que quando o meio físico é constituído por uma estrutura geológica bastante complexa, isto é, apresentando fortes variações laterais de velocidade, a utilização dos tempos de primeiras chegadas apenas não é suficiente para obtermos uma boa imagem do refletor, sendo necessária, portanto a utilização de tempos posteriores.

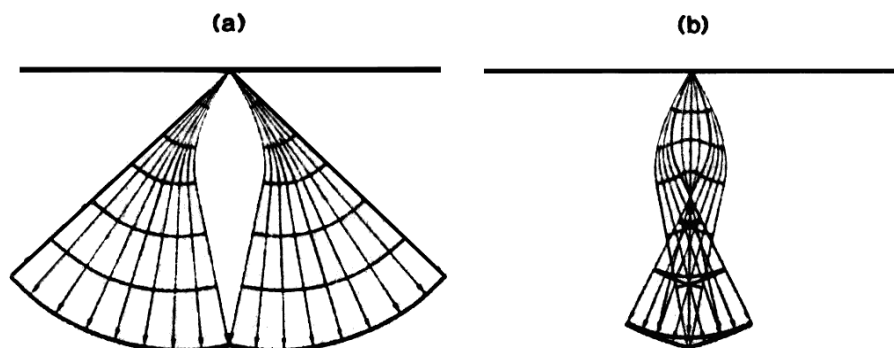


Figura 5.16 - (a) Raios associados aos tempos de primeiras chegadas. (b) Raios associados aos tempos posteriores, (Geoltrain, S., e Brac, J., 1991, modificado).

Considere um meio físico com forte variação lateral de velocidade, e uma fonte localizada na superfície do modelo. A Figura 5.16a representa os tempos de trânsito referentes às primeiras chegadas enquanto que a Figura 5.16b representa os tempos posteriores, trazendo a informação necessária do meio para que se obtenha uma imagem mais completa do refletor. Se no processo de migração utilizarmos apenas os tempos de chegadas dos primeiros eventos em modelos

apresentando fortes variações laterais de velocidade, obteremos como resultado final uma imagem incompleta do refletor. Como os modelos aqui testados não apresentam uma heterogeneidade muito complexa, os resultados obtidos foram satisfatórios.

Uma solução para este problema é encontrada no trabalho de Coman e Gajewski (2000). Neste trabalho é desenvolvido um método Híbrido para a computação dos tempos de trânsito em um modelo complexo 3-D. Este método é baseado no cálculo dos tempos de trânsito das primeiras chegadas através da solução da equação do eiconal juntamente com o cálculo das chegadas posteriores através do método da construção das frentes de ondas.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, inicialmente foi apresentada a teoria da migração de dados sísmicos 2-D obtidos nas configurações de fonte comum e offset comum, sendo em seguida adicionada a teoria da equação eiconal, através da qual foram obtidos os tempos de trânsitos por um esquema de diferenças finitas. Finalmente, foi desenvolvido um algoritmo de migração em profundidade utilizando os tempos de trânsito a partir da equação eiconal, necessários para o cálculo das curvas de difrações, e testado em dados sintéticos, obtendo assim uma seção migrada.

Como primeiro exemplo foi utilizado um modelo físico simples, constituído de uma interface curva e suave e obtida uma seção migrada em profundidade. Este procedimento foi repetido usando o traçamento do raio, ou seja, utilizando os tempos de trânsito a partir das trajetórias de cada raio, com a finalidade de validar o método desenvolvido neste trabalho. O resultado obtido por este último método mostrou-se bastante eficiente na reprodução da imagem do refletor. Em seguida, foi adicionado ruído aditivo ao dado sintético do modelo simples e aplicado o algoritmo de migração pelos dois métodos, obtendo mais uma vez um bom resultado com relação a imagem do refletor.

Num segundo exemplo, com o propósito de verificar o desempenho do algoritmo de migração na obtenção de uma imagem de um refletor sem utilizar a velocidade verdadeira, foi considerada a velocidade V_{RMS} para migrar o dado sísmico contendo múltiplas, e o resultado obtido pelo método do eiconal foi comparado com o obtido pelo método do raio. O primeiro método mostrou-se bastante eficiente na recuperação da imagem do refletor, com dados sintéticos contendo múltiplas. Em seguida, o mesmo dado sintético foi migrado utilizando o modelo de velocidade verdadeiro e comparado com o resultado obtido pelo método do eiconal, mostrando-se superior a este. Finalmente, foram considerados modelos geológicos complexos contendo um domo salino.

No primeiro exemplo, buscou-se imagear um refletor suave localizado abaixo do domo salino utilizando a velocidade V_{RMS} e obtendo os resultados pelos dois métodos. Em seguida, no segundo exemplo, utilizando a velocidade verdadeira foi migrado o dado real contendo ruído e obtendo como resultado a imagem do domo. Finalmente, ainda com a velocidade verdadeira, foi migrado o dado sísmico obtendo a imagem de um refletor localizado abaixo do domo.

Em todos os experimentos feitos aqui, pôde-se notar a eficiência e acurácia do algoritmo de migração desenvolvido aqui utilizando os tempos de trânsito da equação eiconal. Vimos sua eficiência quando empregado a dados sintéticos contendo ruído ou múltiplas. Na migração utilizou-se somente os tempos de trânsito das primeiras chegadas, haja visto que os modelos aqui testados não apresentam forte variação lateral de velocidade. O método de diferenças finitas utilizado para o cálculo dos tempos de trânsito mostrou-se bastante eficiente quando empregado na migração dos dados sísmicos, pois o mesmo discretiza o modelo fornecendo uma medida mais próxima do valor real da grandeza considerada e conseqüentemente o resultado em busca poderá ter uma melhor qualidade comparado com outros métodos.

Os modelos escolhidos não permitem uma avaliação das vantagens ou desvantagens dos dois métodos para calcular os tempos de trânsitos. Em nenhum deles acontecem triplicações (cáusticas) ou fortes inclinações de interfaces (a medida de criar head waves que sejam mais rápidas que as ondas convencionais). Desta forma, a comparação se restringe a uma avaliação da acurácia do cálculo dos tempos de trânsito, deixando de lado uma investigação das verdadeiras diferenças dos dois métodos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKI, K. & RICHARDS, P.G., 1980. *Quantitative Seismology: Theory and Method*, volume 1. W.H. Freeman and Co., San Francisco.

BLEISTEIN, N., 1984. *Mathematics of wave phenomena*. London Academic Press, INC.

BLEISTEIN, N., 1987. On the imaging of reflectors in the earth. *Geophysics*, 52: 931 – 942.

BURDEN, R. L., FAIRES, J. D., REYNOLDS, A. C., 1981. *Numerical analysis*. 2. ed. Prindle, Weber & Schmidt.

CERVENY, V., 1985. The application of ray tracing to the numerical modeling of seismic wavefields in complex structures. In: DOHR, G. P. (ed.). *Seismic shear waves, Pt. A: Theory*. *Geophysical Press, London*, 1-124. (Handbook of Geophysical Exploration).

CERVENY, V., 1987. *Ray methods for three-dimensional seismic modeling*, Petroleum Industry Course, Norwegian Institute for Technology.

CERVENY, V. & PSENCIK, I., 1988. SEIS88, *Ray tracing program package*.

CERVENY, V., MOLOTKOV, I., PSENCIK, I. – 1977. *Ray method in seismology*. Univerzita Praha, Karlova.

COMAN, R. & GAJEWSKY, D., 2000. *Hibrid method for travelttime computation in a complex 3D model*. Wave Inversion Technology, Report No. 4, 227-238.

FAGIN, S. W. - 1991 – *Seismic Modelin of Geilogic Strutures: Applications to Exploretion Problems*.(Geophysical Development, 2.)

GEOLTRAIN, S. & BRAC, J., 1991. Can we image complex structures with finite-difference traveltimes?: In: ANN. INT. MTG., 61. Expanded Abstracts. Soc. Expl. Geoph. P. 1110-1113.

GRAY, S. H & MAY W. P., 1994. Kirchhoff migration using eikonal equation traveltimes. *Geophysics*, 5: 810 – 817.

HAGEDOORN, J.G., 1954. "A process of seismic reflection interpretation ", *Geophys, Prospect.*, 2: 85 - 127

HANITZSCH, C., SCHLEICHER, J., HUBRAL, p., 1994. True amplitude migration of 2-D synthetic data. *Geophysical Prospecting*, 42: 445 – 462.

HUBRAL, P., TYGEL, M., ZIEN , H., 1991. Three-dimensional, true-amplitude zero-offset migration: *Geophysics*, 56: 18 – 26

REILLY, J. M., 1991. Integrate interpretation 3-D map migration and VSP modeling project, northern u.k. southern gas Basin In Seismic Modeling of geologic structures S. W. Fagin, geoph. dev. series. v.2, pag. 249-268.

KEHO, T.H. & BEYDOUN, W.B., 1988. Paraxial ray Kirchhoff migration. *Geophysics*, 53: 1540 – 1546.

PODVIN, P. & LECOMTE, I., 1991. Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools. *Geophys. J. Int.*, 105: 271-284.

PESTANA, P. & PIMENTEL, A., 1996. Cálculo dos tempos de trânsito por diferenças finitas: *uma comparação. Revista Brasileira de Geofísica*, 14: 115-130

RESHEF, M & KOSLOFF, D. – 1986. Migration of Common Shot Gathers. *Geophysics*, 51: 324 –331.

SCHLEICHER, J., HUBRAL, P., TYGEL, M., JAYA, M. S., 1997. Minimum apertures and Fresnel zones in migration and demigration. *Geophysics*, 62: 183-194.

SCHLEICHER, J., TYGEL, M., HUBRAL, P., 1993. 3-D true-amplitude finite-offset migration. *Geophysics*, 58: 1112 - 1126.

SCHNEIDER, W.A.A, RANZINGER, K.A, BALCH, A.H, KRUSE, C.-1992. A dynamic programming approach to first traveltimes computation in media with arbitrarily distributed velocities. *Geophysics*, 57: 39-50.

SHERIF, R. E. , 1975. Factors affecting seismic amplitudes. *Geophysical Prospecting*, 23: 125 – 138

TYGEL, M., SCHLEICHER, J., HANITZSCH, C., 1993. Multiple weights in diffractin stack migration. *Geophysics*, 58: 1820 – 1830.

URBAN, J., 1999. Two-dimensional true-amplitude migration and introduction to 2.5-D case. Master theses. Federal University of Pará, Brasil.

VIDALE, J. E. –1988. Finite-difference calculation of Traveltimes: *Bull. Seis. Soc. Am.*, 78: 2062 – 2076.

ZHAO, P., 1996. An efficient computer program for wavefront calculation: *Computers & Geosciences: Geophysics* 22: 239-251.

