MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO 3-D ORIENTADA AO ALVO POR SÍNTESE DE FRENTES DE ONDA

João Batista Teixeira Boechat

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

_____

Prof. Webe João Mansur, Ph.D.

_____

Dr. Djalma Manoel Soares Filho, D.Sc

_____

Prof. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.

_____

Prof. Marcelo Sousa de Assumpção, Ph.D.

_____

Prof. Luiz Alkimin de Lacerda, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
ABRIL DE 2007

BOECHAT, JOÃO BATISTA TEIXEIRA

Migração Reversa no Tempo 3-D orientada ao alvo por síntese de frentes de onda. [Rio de Janeiro] 2007.

VIII, 104 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, 2007)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Migração Reversa no Tempo
2. Modelagem Sísmica
3. Equação Acústica da Onda
4. Método das diferenças Finitas
5. Síntese de Frentes de Onda

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Dedico esta Tese ao meu filho

Gabriel e a minha esposa Mara.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Webe pela sua segurança, tranqüilidade e maturidade na orientação deste trabalho. Agradeço também imensamente ao amigo e orientador Djalma pela sugestão do tema de tese e acompanhamento durante a execução da mesma.

Agradeço a Petrobras por me liberar meio expediente para a realização do Doutorado e horário integral nos últimos seis meses para a finalização completa do trabalho.

Agradeço ao Carlinhos, ao Filpo, ao Faria e ao Gallotti por terem participado da banca do meu exame de qualificação e as sugestões para continuação do trabalho de tese.

Agradeço ao meu ex-gerente Siston e ao meu gerente atual Ricardo Rosa por todo apoio e incentivo recebido.

Agradeço a todos os amigos do meu setor especialmente os do grupo de Santos pelo apoio recebido: Paulinho, Lograd, Alberto, Luciano, Marcelo, Guilherme e Pedro Paulo.

Agradeço aos colegas do CENPES Túlio e André Bulcão pela gentileza com que sempre me atenderam.

Agradeço ao meu grande amigo Ronaldo Pollak pela boa vontade com que sempre me ajudou nas soluções de problemas com o sistema.

Agradeço ao amigo Cleberson pelas discussões que tivemos oportunidade de compartilhar com o Prof. Webe.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO 3-D ORIENTADA AO ALVO POR SÍNTESE DE FRENTES DE ONDA

João Batista Teixeira Boechat

Abril/2007

Orientadores: Webe João Mansur

Djalma Manoel Soares Filho

Programa: Engenharia Civil

Nesta tese foi realizada uma nova formulação da migração reversa no tempo (RTM-*Reverse Time Migration*) 3-D orientada ao alvo para meios acústicos. O algoritmo de migração proposto utiliza o conceito de operador de síntese, através do qual frentes de ondas pré-definidas são geradas nas proximidades das áreas de interesse, otimizando a iluminação das mesmas. Este operador aplicado aos sismogramas de campo dá origem à família de múltiplos tiros. As extrapolações dos campos de onda acústico envolvido na geração do operador de síntese, na obtenção da tabela de tempo de trânsito e na propagação reversa no tempo da família de múltiplos tiros, são realizadas por meio de soluções da equação acústica da onda completa, sem aproximação de Born. É empregada a técnica das diferenças finitas, com aproximações de quarta ordem nas três derivadas com relação às coordenadas espaciais e de segunda ordem na derivada em relação ao tempo. Foram realizadas aplicações com dados sintéticos nos modelos *Marmousi, Salt Dome* (SEG/EAGE) e *Overthrust* (SEG/EAGE). As áreas de interesse foram satisfatoriamente imageadas empregando apenas algumas famílias de múltiplos tiros. Quando comparados com os resultados obtidos usando a migração reversa no tempo convencional, observa-se grande semelhança entre as imagens em profundidade. No entanto, a demanda computacional do método proposto é consideravelmente inferior (cerca de 400 vezes ao caso do modelo *Overthrust*, onde foi considerada geometria de aquisição marítima com seis cabos de receptores). Este fato pode tornar a migração reversa no tempo 3-D um processo rotineiro na indústria.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requierements for the degree of Doctor of Science (D.Sc)

3-D REVERSE TIME MIGRATION TARGET ORIENTED BY WAVE FRONT SYNTHESIS

João Batista Teixeira Boechat

April/2007

Advisors: Webe João Mansur

Djalma Manoel Soares Filho

Department: Civil Engineering

In this thesis it is proposed a new formulation of Reverse Time Migration (RTM) which is oriented to exploration targets for 3-D inhomogeneous acoustic media. The method proposed uses the concept of synthesis operator, through which pre-defined wave fronts are generated on the neighborhood of the target zones, optimizing the seismic illumination in those areas. This operator applied to the field seismograms gives rise to a family of multiple shots. All wave filed extrapolations are accomplished solving the two-way acoustic wave equation, i.e., synthesis operators, time tables and families of multiple shots reverse time propagations are performed without any Born approximation. To solve the acoustic wave equation, it was used finite differences techniques considering fourth order approximations on spatial derivatives and second order approximations on time derivatives. Applications to synthetics data obtained on *Marmousi*, *Salt Dome* (SEG/EAGE) and *Overthrust* (SEG/EAGE) seismic models were performed. The regions of interest were satisfactory imaged employing only a few multiples shots families. When compared to results obtained using the conventional reverse time migration, one can observe great similarities between the depth images, with some advantages of the proposed method. However, in terms of computational time demanding, the difference is huge. The proposed method is substantially faster (about 400 times in the case of *Overthrust* model, for instance), where a maritime acquisition geometry with six receiving cables were considered. This fact can make 3-D reverse time migration a routinely process to industry

Índice

1 – INTRODUÇÃO

1.1 - Metodologias e Objetivos 2

1.2 - Estrutura da Tese 4

2 – MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO 3-D CONVENCIONAL

2.1 – Introdução 6

2.2 – Formulação 6

2.3 - Suavização do campo de vagarosidade 12

2.4 – Aplicações 13

2.4.1 - Modelo de duas camadas planas 13

2.4.2 - Modelo *Marmousi* 16

2.5 – Sumário 20

3 – SÍNTESE DE FRENTES DE ONDA

3.1 – Introdução 21

3.2 – Formulação 21

3.3 – Sumário 26

4 – APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE SÍNTESE DE FRENTES DE ONDA:

1ª PARTE: Caso 2-D – Modelo *Salt Dome* (SEG/EAGE)

4.1 – Introdução 28

4.2 - A modelagem dos dados 28

4.3 - A Síntese de Frentes de Onda 29

4.4 - Influência da geometria de aquisição na família de múltiplos tiros 34

4.5 - Influência da ausência dos afastamentos próximos na família de múltiplos Tiros 37

4.6 – Sumário 40

5 – APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE SÍNTESE DE FRENTES DE ONDA:

2ª PARTE: Caso 3-D – Modelo *Overthrust* (SEG/EAGE)

5.1 – Introdução 41

5.2 - A modelagem dos dados 41

5.3 - A Síntese de Frentes de Onda 42

5.4 – Sumário 46

6 – MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO ORIENTADA AO ALVO POR SÍNTESE DE FRENTES DE ONDA

6.1 – Introdução 47

6.2 – Formulação 47

6.3 – Sumário 52

7 – APLICAÇÕES DA MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO ORIENTADA AO ALVO: 1ª PARTE CASOS 2-D

7.1 – Introdução 54

7.2 - Modelo *Marmousi* 54

7.3 - Modelo *Salt Dome* (SEG/EAGE) 65

7.4 – Sumário 66

8 – APLICAÇÕES DA MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO ORIENTADA AO ALVO: 2ª PARTE CASOS 3-D

8.1 – Introdução 70

8.2 - Aplicação 1 - Aquisição com azimute em todas as direções 70

8.3 - Aplicação 2 - Aquisição marítima 3-D com s*treamer* 74

8.4 – Sumário 85

9 – CONCLUSÕES 86

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 91

APÊNDICE A – MODELAGEM SÍSMICA 3-D 95

APÊNDICE B - EXPRESSÕES MATEMÁTICAS PARA A FAMÍLIA DE MÚLTIPLAS FONTES E A FAMÍLIA DE MÚLTIPLOS TIROS 102

1 - INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios exploratórios atuais diz respeito à melhoria de interpretação em alvos profundos localizados abaixo de camadas intensamente deformadas. As zonas de interesse sob espessas camadas de sal são exemplos de alvos exploratórios que requerem algoritmos de imageamento sísmico sofisticados. Nestes casos, os métodos de migração pré-empilhamento em profundidade baseados na equação da onda sem aproximação de Born são os mais indicados, por não exigirem variações suaves no campo de velocidade. Contudo, a demanda de recursos computacionais para a realização desse tipo de migração nem sempre é compatível com o processo exploratório.

A migração pré-empilhamento Kirchhoff por afastamento comum em profundidade tem sido o algoritmo mais rotineiramente utilizado na indústria em virtude da rapidez de execução do algoritmo e o baixo custo em relação aos demais existentes (NOLAN e SYMES, 1996, ZHU e LINES, 1998). No entanto, este algoritmo não apresenta resultados satisfatórios em áreas que envolvem grandes variações laterais de velocidade, uma vez que usa a aproximação assintótica da teoria do raio (CLAPP, 2005).

Nas áreas onde a Migração Kirchhoff em profundidade não tem apresentado resultados satisfatórios, uma alternativa tem sido usar algoritmos de migração de tiro comum que são baseados na equação unidirecional da onda. Estes algoritmos têm a desvantagem de considerar somente a propagação dos campos de ondas descendente ou ascendente, além de ter a dificuldade de imagear áreas com mergulhos muito acentuados (MULDER, 2004, BEDNAR, 2006). A migração pré-empilhamento em profundidade é realizada migrando-se cada tiro comum individualmente e a imagem final é obtida pelo empilhamento de todos os tiros migrados. No entanto, a demanda computacional é grande, principalmente para dados sísmicos de aquisição 3-D.

A migração reversa no tempo (RTM-*Reverse Time Migration*) é um algoritmo que usa a equação completa da onda sem a aproximação de Born, não apresenta limitação quanto à variação lateral de velocidade e não impõe limitação quanto aos mergulhos das camadas. O algoritmo foi inicialmente implementado para dados empilhados (WHITMORE, 1983, McMECHAN, 1983, BAYSAL *et al.*, 1983, LOEWHENTHAL e MUFTI, 1983, LEVIN, 1984) e posteriormente para dados pré-empilhados (FARIA, 1986, CHANG e McMECHAN, 1986, LOEWENTHAL e HU,

1991). A migração reversa no tempo de tiro comum exige um enorme esforço computacional e por este motivo, o algoritmo não é ainda utilizado rotineiramente na indústria, apesar de todas as suas vantagens.

Visando a redução do tempo de execução dos algoritmos de migração com a equação unidirecional da onda, vários métodos foram propostos: BERKHOUT (1992) propôs a tecnologia de *areal shot records* na migração pré-empilhamento em profundidade; RIETVELD e BERKHOUT (1992) e RIETVELD (1995) propuseram um método de migração pré-empilhamento em profundidade que usa o conceito de iluminação controlada, no qual uma frente de onda de forma pré-definida pode ser gerada em subsuperfície; DUQUET *et al*. (2001) formulou um método de migração 3-D de ondas planas para aquisição com um *streamer*; WANG *et al*. (2003) introduziram o conceito de multi-iluminação controlada; JI (1995) apresentou um método de migração que utiliza a síntese de frentes de onda; ROMERO *et al*. (2003) introduziram o método *phase encoding* de registros de tiro na migração pré-empilhamento em profundidade; ZANG *et al*. (2003, 2006) apresentaram uma formulação para a migração 3-D em profundidade com *delayed shots records*; LIU *et al*. (2006) mostraram teoricamente a equivalência entre a migração de ondas planas e a migração de tiro comum e aplicaram o algoritmo em dados sintéticos. CUNHA e PALERMO (2003) implementaram a versão *multi-source* da migração reversa no tempo que aplica atrasos nas detonações para a formação da frente de onda plana.

1.1 – Metodologias e Objetivos

Com o objetivo de reduzir o custo e o tempo computacional da migração reversa no tempo de tiro comum em relação aos demais algoritmos, foi apresentada nesta tese uma nova formulação da migração reversa no tempo 3-D orientada ao alvo que é baseada na equação acústica completa da onda. A migração reversa no tempo orientada ao alvo utiliza um novo algoritmo de síntese de frentes de onda que também foi desenvolvido nesta tese.

Nos trabalhos anteriores, a síntese de frentes de onda foi realizada no domínio da freqüência, com extrapolações dos campos de ondas no domínio da profundidade e utilizaram a equação unidirecional da onda. O novo algoritmo de síntese de frentes de onda 3-D proposto é implementado no domínio do tempo e utiliza a equação completa da onda sem a aproximação de Born. No processo de síntese, uma família de múltiplas

fontes é sintetizada na superfície de modo que, quando propagada para o interior do modelo gere em uma região de interesse de imageamento, uma frente de onda de forma pré-definida. Uma família de múltiplos tiros é também obtida na superfície de observação através de um operador de síntese apropriado.

No algoritmo de migração reversa no tempo orientada ao alvo a área de imageamento é identificada e famílias de múltiplas fontes são sintetizadas na superfície de observação para incidirem em determinados ângulos na profundidade de interesse. Para cada família de múltiplas fontes sintetizada é gerada também na superfície de observação uma família de múltiplos tiros que é migrada em profundidade. A imagem final é obtida pelo empilhamento de todos os volumes migrados individualmente.

Nesta nova formulação da migração reversa no tempo cada família de múltiplas fontes é propagada diretamente para o interior do modelo para obter a matriz de tempo de trânsito da frente de onda a cada ponto da malha, baseado no critério de amplitude máxima do campo incidente. A família de múltiplos tiros correspondente é propagada de forma reversa no tempo, também para o interior do modelo e aplicada a condição de imagem para gerar a imagem migrada em profundidade. A escolha do critério de máxima amplitude do campo incidente para o cálculo da matriz de tempo de trânsito vem do fato da família de múltiplas fontes possuir uma forma pré-definida na região de interesse de imageamento.

Na aquisição marítima 3-D com *streamer*, para cada linha de levantamento (*sail line*), o navio arrasta entre 6 a 10 cabos separados por uma distância que varia de 100 a 150m. Para este tipo de aquisição marítima foi introduzida uma nova estratégia de migração reversa no tempo 3-D na qual uma família de múltiplas fontes e uma família de múltiplos tiros são obtidas para cada linha de levantamento. Para uma determinada forma pré-definida da frente de onda em subsuperfície, a família de múltiplos tiros de cada linha de levantamento é migrada com o algoritmo de migração reversa no tempo 3-D. Uma imagem em profundidade é obtida após o empilhamento de todas as linhas de levantamento migradas. No algoritmo não é necessário assumir que o navio e os cabos sempre se movimentam em linha reta.

O algoritmo de migração reversa no tempo orientada ao alvo foi aplicado em dados sintéticos nos modelos *Marmousi*(VERSTEEG, 1991), *Salt Dome* (SEG/EAGE), *Overthrust* (SEG/EAGE). As imagens em profundidade quando comparadas com as obtidas usando a migração reversa no tempo convencional mostraram uma grande semelhança. Comparando os tempos de execução dos dois algoritmos na aplicação 2-D

foi observada uma redução de cerca de 400 vezes no tempo de execução do algoritmo proposto em relação a migração reversa no tempo convencional de tiro comum. Na aplicação 3-D, utilizando a nova estratégia de migração reversa no tempo de dados marítimos com *streamer*, houve também uma redução de cerca de 400 vezes no tempo de execução do algoritmo proposto em relação a migração reversa no tempo 3-D convencional. Em BOECHAT *et al*. (2005a, 2005b) foi também aplicado o algoritmo de migração proposto em dados sintéticos 2-D com grande complexidade geológica.

1.2 – Estrutura da Tese

A seguir, será exposto um resumo do conteúdo de cada um dos capítulos apresentados neste trabalho, bem como os algoritmos implementados e as aplicações:

No Capítulo 2 é apresentado o algoritmo de migração reversa no tempo (RTM-*Reverse Time Migration*) convencional 3-D de tiro comum. No algoritmo a equação da onda homogênea é também discretizada pelo método das diferenças finitas com aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para a derivada temporal. O algoritmo é aplicado nos seguintes dados 2-D: modelo de duas camadas planas com uma interface plana e Modelo *Marmousi*.

No Capítulo 3 é apresentado o novo algoritmo de síntese de frentes de onda 3-D. Nas extrapolações realizadas no algoritmo para obter o operador de síntese, a equação da onda é discretizada pelo método das diferenças finitas com aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para a derivada temporal.

No Capítulo 4 é aplicado o algoritmo de síntese de frentes de onda em uma linha de velocidade 2-D do modelo *Salt Dome*-SEG/EAGE (AMINZADEH e BRAC, 1997), onde são ilustrados todos os passos do algoritmo. Na segunda parte deste capítulo é analisada a influência dos diversos tipos de aquisição sísmica 2-D na obtenção da família de múltiplos tiros.

No Capítulo 5 é aplicado o algoritmo de síntese de frentes de ondas no dado sintético 3-D *Overthrust*-SEG/EAGE (AMINZADEH e BRAC, 1997). Na aplicação é usada a metade do modelo original.

No Capítulo 6 é apresentado o novo algoritmo de Migração Reversa no Tempo 3-D orientada ao alvo. O algoritmo utiliza a condição de imagem de tempo de excitação baseada no critério de amplitude máxima. A equação da onda é discretizada pelo

método das diferenças finitas com aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para a derivada temporal.

No Capítulo 7 é aplicado o algoritmo de migração reversa no tempo orientada ao alvo aos dados 2-D: Modelo *Salt Dome* (SEG/EAGE); Modelo *Marmousi* (VERSTEEG e GRAU, 1991). Os modelos sintéticos são muito complexos, uma vez que apresentam uma grande variação lateral de velocidade.

No Capítulo 8 é aplicado o algoritmo de migração reversa no tempo orientada ao alvo ao dado sintético 3-D *Overthrust* (SEG/EAGE). Na aplicação, as famílias de múltiplos tiros são obtidas para dois tipos de geometria de aquisição: a primeira é uma aquisição onde todos os azimutes estão presentes; a segunda aquisição é típica de um levantamento marítimo 3-D com *streamer*. As imagens em profundidade são geradas através do algoritmo proposto e da migração reversa no tempo 3-D convencional.

No Apêndice A é apresentado o algoritmo de modelagem sísmica 3-D com a equação da onda discretizada pelo método das diferenças finitas com aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para a derivada temporal. O algoritmo de modelagem foi implementado com o objetivo de gerar os sismogramas que foram utilizados nas aplicações da tese.

No Apêndice B é mostrado como são obtidas as expressões que definem as famílias de múltiplas fontes e as famílias de múltiplos tiros no algoritmo de síntese de frentes de onda proposto.

2 - MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO 3-D CONVENCIONAL

2.1 – Introdução

O objetivo principal da migração de dados sísmicos é localizar os pontos em subsuperficie, que iluminados pelo sinal gerado por uma fonte sísmica, produziram as reflexões registradas na superfície da terra e obter uma estimativa dos coeficientes de reflexão associados a estes pontos.

Em áreas geologicamente muito complexas que envolvem grandes variações laterais de velocidade e mergulhos muito acentuados, a migração reversa no tempo (RTM-*Reverse Time Migration*) é o algoritmo mais indicado. A migração reversa no tempo foi inicialmente formulada para dados empilhados (WHITMORE, 1983, McMECHAN, 1983, BAYSAL *et al.*, 1983, LOEWENTHAL e MUFTI, 1983, LEVIN, 1984) e posteriormente formulada para dados pré-empilhados como pode ser encontrado em FARIA (1986), CHANG e McMECHAN (1986), LOEWENTHAL e Hu (1991).

Neste capítulo vai ser apresentado o algoritmo de migração reversa no tempo 3-D convencional de tiro comum com a equação da onda discretizada pelo método das diferenças finitas com aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para a derivada temporal. No algoritmo vai ser usada a condição de imagem de tempo de excitação baseada no critério de amplitude máxima (BOTELHO e STOFFA, 1988, LOEWENTHAL e HU, 1991), embora a condição com correlação cruzada seja a mais utilizada (FARIA, 1986, CLAERBOUT, 1971,1985).

2.2 – Formulação

A migração reversa no tempo de tiro comum envolve a propagação direta em tempo do campo de onda da fonte (p_{inc} **)**, propagação reversa no tempo do sismograma (p_{ref}) e aplicação de uma condição de imagem. A imagem migrada em profundidade pode ser obtida através das seguintes definições (CLAERBOUT, 1971, 1985):

$$M_l(i,\, j,k) = p_{ref}(i,\, j,k,t = TD(i,\, j,k))\,, \tag{2.1}$$

$$M_l(i,\, j,k) = \frac{p_{ref}(i,\, j,k,t = TD(i,\, j,k))}{p_{inc}(i,\, j,k,t = TD(i,\, j,k))}, \tag{2.2}$$

$$M_l(i,\, j,k) = \sum_{t=0}^{T_{Final}} p_{ref}(i,\, j,k,t)\, p_{inc}(i,\, j,k,t)\,, \tag{2.3}$$

$$M_l(i,\, j,k) = \frac{\sum_{t=0}^{T_{Final}} p_{ref}(i,\, j,k,t)\, p_{inc}(i,\, j,k,t)}{\sum_{t=0}^{T_{Final}} p_{inc}(i,\, j,k,t)\, p_{inc}(i,\, j,k,t)}, \tag{2.4}$$

onde $TD(i,\, j,k)$ representa a matriz de tempo de trânsito do campo incidente (p_{inc} **)** a cada ponto da malha e T_{Final} é o tempo final do sismograma.

Na migração em profundidade utilizando as equações (2.1) e (2.2) é aplicada a condição de imagem de tempo de excitação. A imagem é formada nos pontos em subsuperfície onde o tempo de trânsito do campo de onda incidente (p_{inc} **)** da fonte e o do sismograma propagado de forma reversa no tempo (p_{ref}) é igual.

Na migração em profundidade utilizando as equações (2.3) e (2.4) é usada a condição de imagem com correlação cruzada entre o campo de onda incidente (p_{inc} **)** e o campo de onda do sismograma propagado de forma reversa no tempo (p_{ref}) avaliada no *lag* zero. A migração reversa no tempo com esta condição de imagem fornece uma seção em profundidade com maior razão sinal/ruído do que a obtida com a condição de imagem de tempo de excitação. Por este motivo a condição de imagem com correlação cruzada é a mais utilizada na migração de tiro comum.

Nesta tese foi implementado o algoritmo de migração reversa no tempo utilizando a equação (2.2). A matriz de tempo de trânsito é obtida considerando a amplitude máxima do campo de onda incidente.

2.2.1 – A propagação direta do campo de onda da fonte (p_{inc})

A propagação direta do campo de onda da fonte para o interior do modelo é realizada através da equação da onda não-homogênea:

$$\frac{\partial^2 p(x,y,z,t)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 p(x,y,z,t)}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 p(x,y,z,t)}{\partial z^2}$$
$$-\frac{1}{c^2(x,y,z)}\frac{\partial^2 p(x,y,z,t)}{\partial t^2}=f(t)\delta(x-x_s)\delta(y-y_s)\delta(z-z_s), \tag{2.5}$$

onde:

- $f(t)$ é a assinatura da fonte que foi utilizada na aquisição dos sismogramas;

- $(x_s, y_s, z_s = z_{obs})$ representa a coordenada da fonte na superfície de observação;

- $p(x,y,z,t)$ é o campo de pressão acústica no ponto (x,y,z) e no tempo t.

Na solução da equação (2.5) são consideradas as seguintes condições iniciais:

$$p(x,y,z,t)=0 \qquad \text{para } t\le 0, \tag{2.6}$$

$$\dot{p}(x,y,z,t)=0 \qquad \text{para } t\le 0, \tag{2.7}$$

onde $\dot{p}(x,y,z,t)$ significa a derivada temporal do campo de pressão.

Na equação (2.5) é ainda aplicada a condição de contorno de Dirichlet que considera o campo de pressão nulo na superfície $z = 0$, ou seja:

$$p(x, y, z = 0, t) = 0 . \tag{2.8}$$

A equação (2.5) discretizada pelo método das diferenças finitas com aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para a derivada temporal, é apresentada na equação (A.10) no Apêndice A, cuja expressão matemática é:

$$p_{i,j,k}^{n+1} = -\frac{1}{12} a_{i,j,k} \left\{ \left(p_{i-2,j,k}^{n} + p_{i+2,j,k}^{n} + p_{i,j-2.k}^{n} + p_{i,j+2,k}^{n} + p_{i,j,k-2}^{n} + p_{i,j,k+2}^{n} \right) \right.$$

$$\left. -16\left(p_{i-1,j,k}^{n} + p_{i+1,j,k}^{n} + p_{i,j-1,k}^{n} + p_{i,j+1,k}^{n} + p_{i,j,k-1}^{n} + p_{i,j,k+1}^{n} \right) + 90\, p_{i,j,k}^{n} \right\}$$

$$+ 2\, p_{i,j,k}^{n} - p_{i,j,k}^{n-1} + f^{n} \delta(i - i_s)\delta(j - j_s)\delta(k - k_{obs}) , \tag{2.9}$$

onde $a_{i,j,k} = \left(\frac{c_{i,j,k} \Delta t}{h} \right)^2$.

Durante a propagação direta do campo de onda da fonte (p_{inc} **)**, o tempo de trânsito a cada ponto da malha é calculado considerando a amplitude máxima da frente de onda. Neste processo, as matrizes de tempo de trânsito $TD(i, j, k)$ e de amplitude máxima $A(i, j, k)$ são geradas. O pseudocódigo para o cálculo da matriz de tempo de trânsito e de amplitude máxima pode ser apresentado na forma:

Para todo tempo n
Para todos os pontos (i, j, k) *da malha*
$TD(i, j, k)$ e $A(i, j, k)$ não alteram
Se $\left| p_{inc}(i, j, k) \right| \leq A(i, j, k)$,
$TD(i, j, k) = n$ e $A(i, j, k) = \left| p_{inc}(i, j, k) \right|$,
Se $\left| p_{inc}(i, j, k) \right| > A(i, j, k)$,
Fim todos os pontos
Fim tempo n

2.2.2 – A propagação reversa no tempo do sismograma (p_{ref})

A propagação reversa no tempo do sismograma é realizada através da equação da onda homogênea:

$$\frac{\partial^2 p(x,y,z,t)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 p(x,y,z,t)}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 p(x,y,z,t)}{\partial z^2}-\frac{1}{c^2(x,y,z)}\frac{\partial^2 p(x,y,z,t)}{\partial t^2}=0 \qquad (2.10)$$

com a seguinte condição de contorno na superfície de observação:

$$p(x_i.y_i, z=z_{obs}, t)=sis(x_i, y_i, z=z_{obs}, t) \qquad (2.11)$$

Na equação (2.11) $sis(x_i, y_i, z=z_{obs}, t)$ representa o sismograma registrado na superfície de observação e $(x_i, y_i, z=z_{obs})$ são as coordenadas dos receptores $i=1,\cdots,N_{receptores}$. A propagação reversa no tempo é realizada desde o tempo final de registro do sismograma (T_{Final}) até o instante zero.

A equação (2.10), discretizada pelo método das diferenças finitas com aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda na derivada temporal, pode ser obtida a partir da equação (2.9) desconsiderando o termo fonte, ou seja:

$$p_{i,j,k}^{n-1}=-\frac{1}{12}a_{i,j,k}\left\{\left(p_{i-2,j,k}^{n}+p_{i+2,j,k}^{n}+p_{i,j-2.k}^{n}+p_{i,j+2,k}^{n}+p_{i,j,k-2}^{n}+p_{i,j,k+2}^{n}\right)\right.$$

$$\left.-16\left(p_{i-1,j,k}^{n}+p_{i+1,j,k}^{n}+p_{i,j-1,k}^{n}+p_{i,j+1,k}^{n}+p_{i,j,k-1}^{n}+p_{i,j,k+1}^{n}\right)+90\,p_{i,j,k}^{n}\right\}$$

$$+2\,p_{i,j,k}^{n}-p_{i,j,k}^{n+1}\ . \qquad (2.12)$$

Para um levantamento sísmico composto de N_{sis} sismogramas a imagem final é dada pela equação:

$$M(i,j,k)=\sum_{l=1}^{N_{sis}}M_l(i,j,k)\,, \qquad (2.13)$$

onde $M_I(i, j, k)$ é a migração de um sismograma como definido pela equação (2.2).

Como na modelagem sísmica implementada no Apêndice A, no algoritmo de migração reversa no tempo são usadas condições de contorno não-reflexivas (REYNOLDS, 1978) nas faces laterais do modelo e camadas de amortecimento nas bordas (CERJAN *et al*., 1985). No algoritmo são respeitadas as equações (A.14) e (A.15) para evitar dispersão numérica e garantir a estabilidade, respectivamente.

A Figura (2.1) mostra o fluxograma para a migração reversa no tempo de um sismograma utilizando a condição de imagem do tempo de excitação com o critério de amplitude máxima.

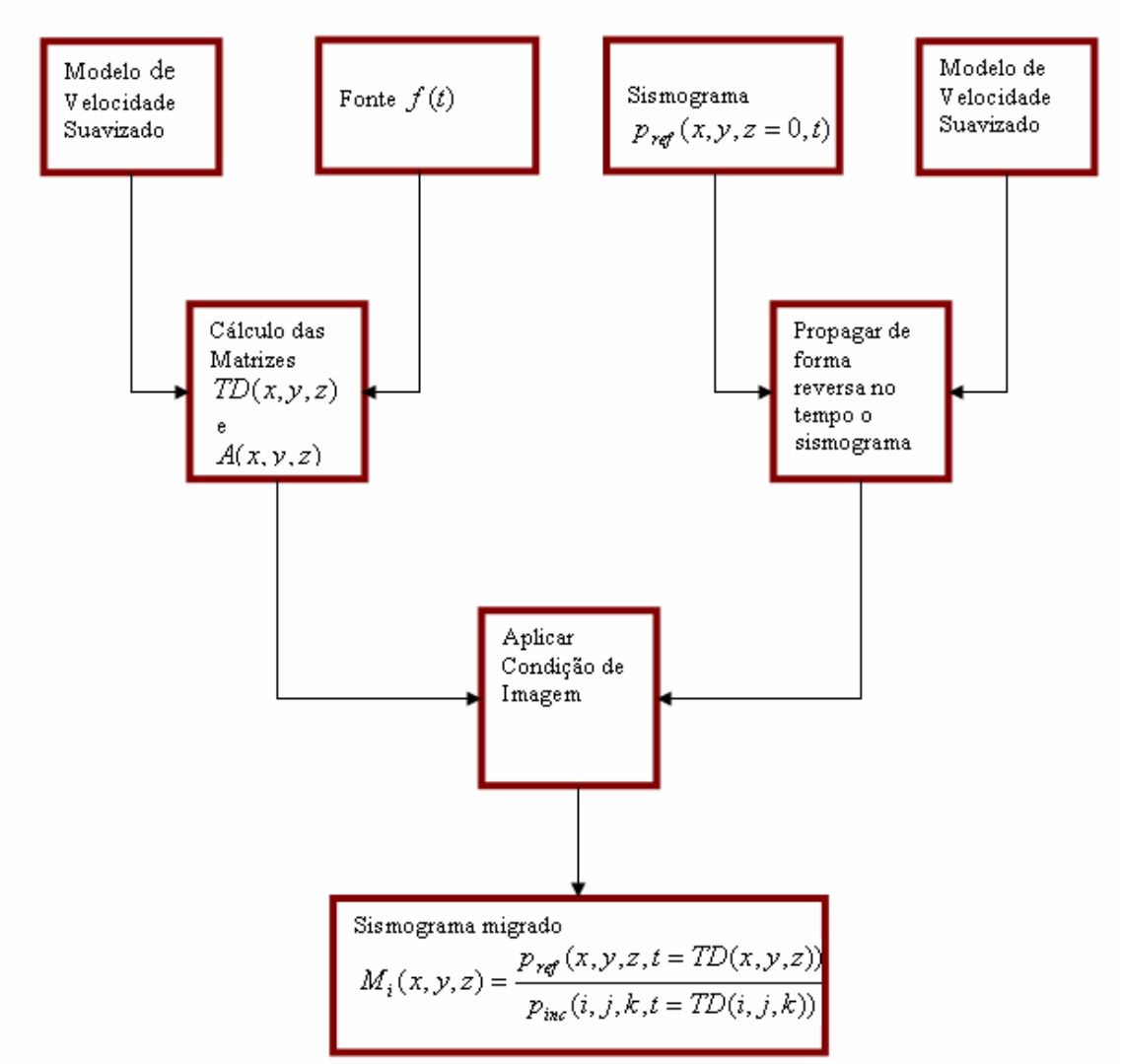


Figura 2.1 – Fluxograma para a migração reversa no tempo 3-D convencional.

2.3– Suavização do Campo de Vagarosidade

Durante a propagação do campo de onda da fonte e da propagação reversa no tempo do sismograma, um problema observado é a geração de reflexões internas provenientes dos contrastes de impedância entre as camadas do modelo geológico que geram artefatos na imagem final. BAYSAL *et al*. (1984) propôs um método para reduzir as reflexões internas por considerar a propagação dos campos em um meio em que a densidade em cada ponto é o inverso da velocidade, com o intuito de eliminar o contraste de impedância entre as camadas. Esse método se aplica para a migração de seções empilhadas (zero *offset*), mas não é efetivo na migração pré-empilhamento (BIONDI, 2006).

Outro método para eliminar as reflexões internas foi apresentado por LOEWENTHAL *et al*. (1987), onde é adotada uma suavização do campo de vagarosidade. A justificativa para suavizar o campo de vagarosidade, ao invés do campo de velocidade, é que o tempo de trânsito necessário para se atingir um determinado ponto não é alterado quando o modelo de vagarosidade é suavizado.

Para a suavização do modelo de vagarosidade foi aplicada uma média aritmética móvel ao longo das direções coordenadas. A expressão matemática que representa a média aritmética móvel é dada por:

$$\overline{S}(i) = \sum_{-n}^{n} \frac{S(i)}{2n+1}, \tag{2.14}$$

onde:

- i índice que representa a variação ao longo da direção coordenada considerada;

- n parâmetro que expressa o número de amostras adotado para a média aritmética móvel.

2.4 – Aplicações

O algoritmo de migração reversa no tempo convencional será aplicado nos seguintes modelos sintéticos: modelo de duas camadas separadas por uma interface plana e modelo *Marmousi* (VERSTEEG e GRAU, 1991).

2.4.1 – Modelo de duas camadas planas

Para ilustrar o esquema de migração reversa no tempo convencional será considerado um modelo geológico 2-D (Figura (2.2a)) com duas camadas planas e horizontais separadas por uma interface na profundidade 1250m. A camada superior tem velocidade 3000m/s e a inferior 4000m/s. Os parâmetros usados na modelagem foram os seguintes: espaçamento da malha de 5m nas duas direções; intervalo de amostragem 0.4ms; freqüência de corte 60Hz e tempo de registro 1500ms. O sismograma para uma fonte situada no centro do modelo é mostrado na Figura (2.2b).

A Figura (2.3) mostra o instantâneo da onda direta da fonte com a vagarosidade sem suavização e com suavização. Nota-se que a onda refletida foi atenuada após a suavização.

A matriz de tempo de trânsito calculada durante a propagação da onda direta da fonte com a vagarosidade sem suavização e com suavização é mostrada na Figura (2.4). Pode ser observado que o efeito da suavização foi apenas na atenuação da descontinuidade da interface do modelo.

Os instantâneos do sismograma propagado de forma reversa no tempo são mostrados na Figura (2.5). Pode ser notado que após a suavização da vagarosidade a reflexão interna na interface foi atenuada.

Na Figura (2.6a) é mostrada a seção migrada em profundidade onde pode ser notado o artefato na imagem. Com a suavização da vagarosidade o artefato da seção migrada em profundidade foi bastante atenuado, como pode ser observado na Figura (2.6b).

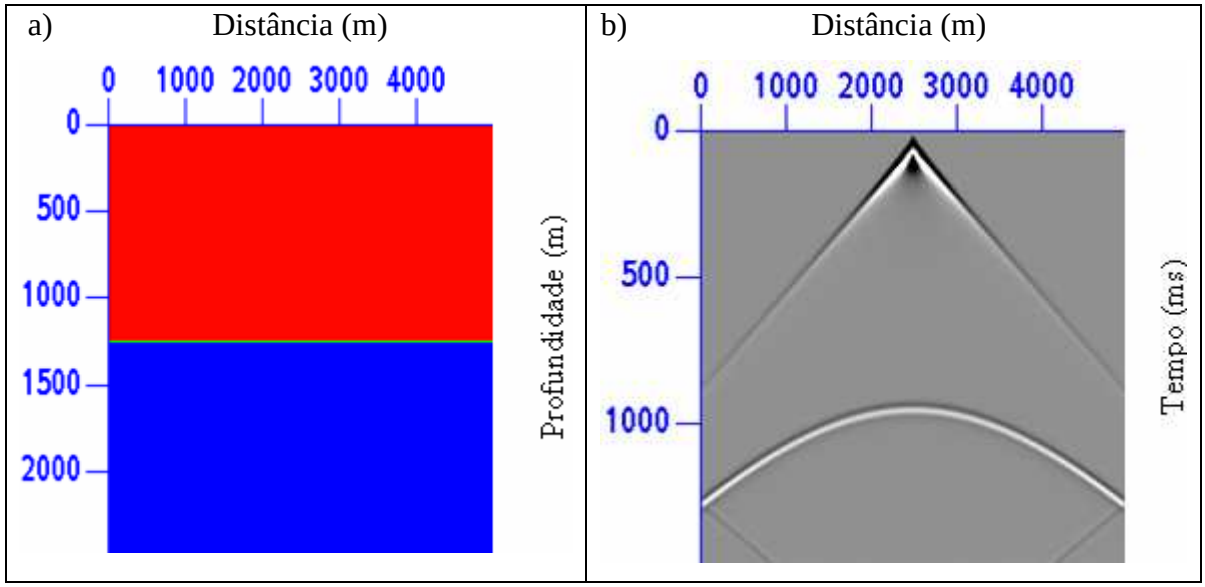


Figura 2.2 - a) Modelo de velocidade (primeira camada 3000m/ms e segunda camada 4000m/s ; b) sismograma modelado.

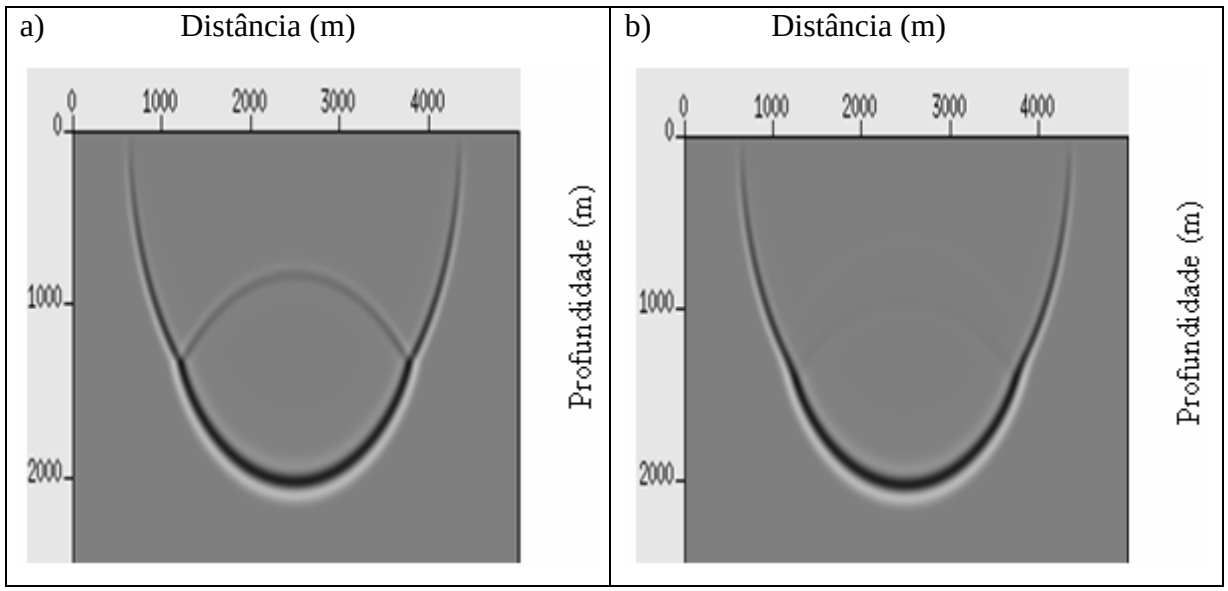


Figura 2.3 - a) Instantâneo da onda direta da fonte em 1400 ms sem suavização do modelo de vagarosidade; b) Instantâneo da onda direta da fonte em 1400ms com suavização do modelo vagarosidade.

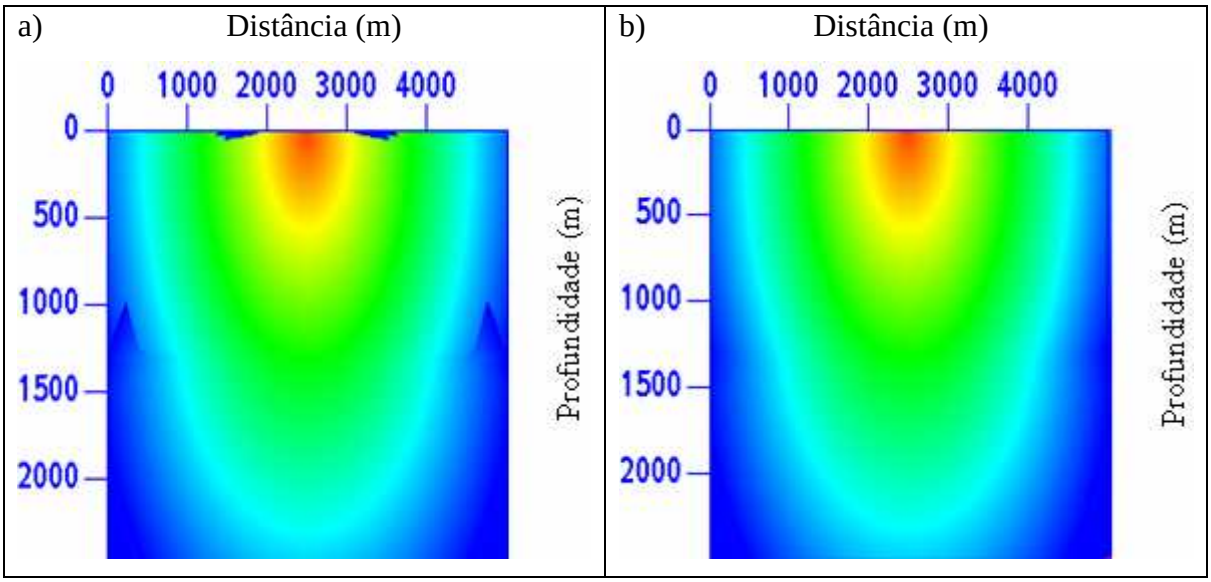


Figura 2.4 – a) Matriz de tempo de trânsito com o modelo de vagarosidade sem suavização; b) Matriz de tempo de trânsito com suavização do modelo de vagorisidade

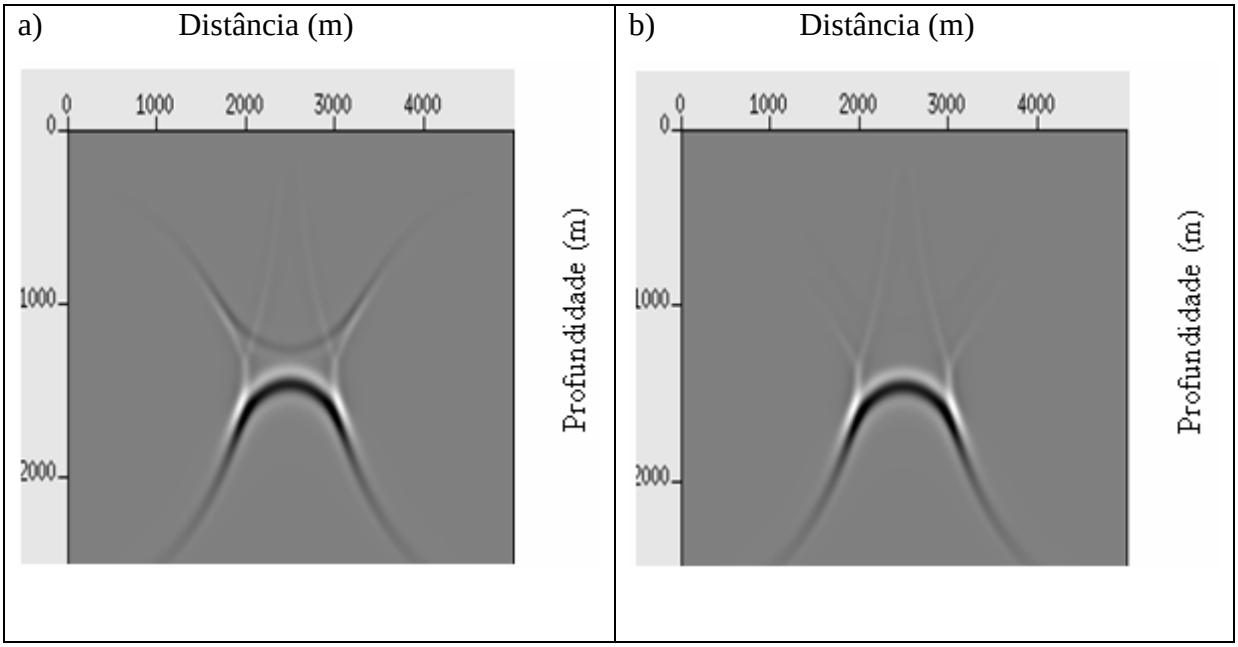


Figura 2.5 – a) Instantâneo do sismograma propagado de forma reversa no tempo com o modelo de vagarosidade sem suavização; b) Instantâneo do sismograma propagado de forma reversa no tempo com o modelo de vagarosidade suavizado.

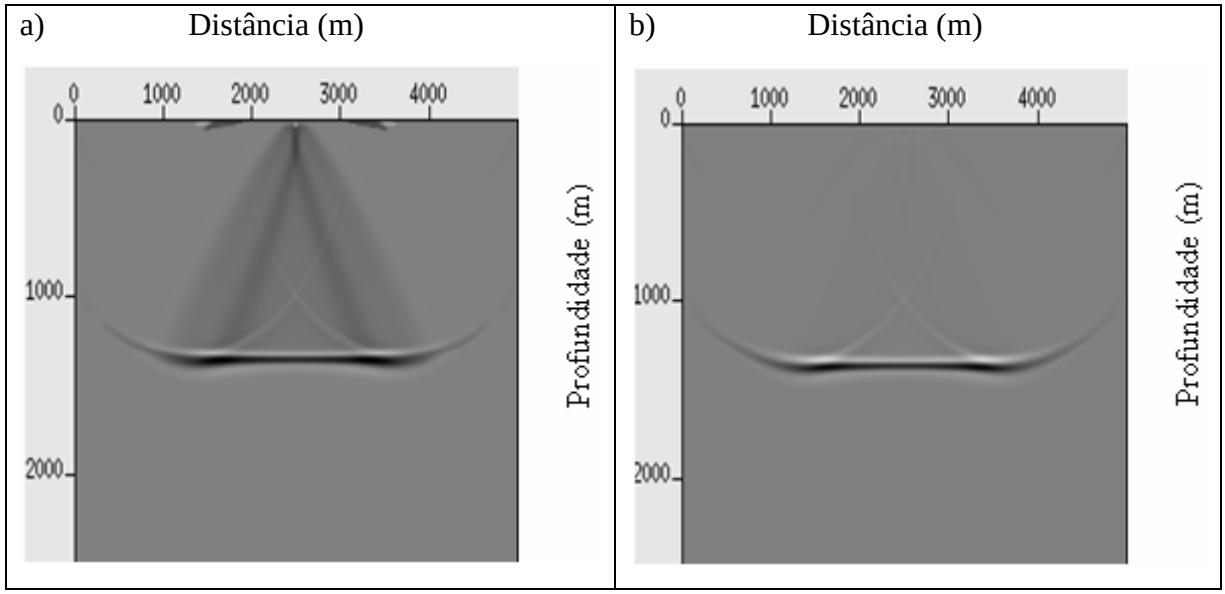


Figura 2.6 – a) Seção migrada em profundidade com o modelo de vagarosidade sem suavização; b) Seção migrada em profundidade com o modelo de vagarosidade suavizado.

2.4.2 – Modelo *Marmousi*

O modelo *Marmousi* é um modelo típico da Bacia Cuanza (Angola). É um modelo que apresenta uma grande variação lateral de velocidade e uma grande complexidade estrutural. O reservatório se localiza abaixo de camadas fortemente estruturadas como mostrado na Figura (2.7).

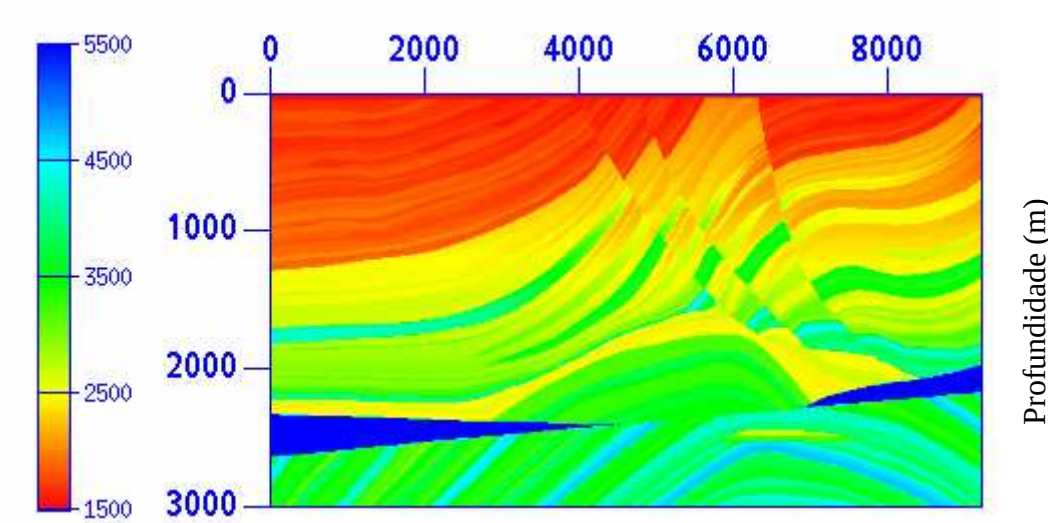


Figura 2.7 – Modelo de velocidade *Marmousi*

A Figura (2.8) mostra um sismograma que foi gerado para a fonte situada na posição (x=6000m) em que a subsuperfície apresenta uma grande complexidade geológica. Os parâmetros para a modelagem dos sismogramas foram os seguintes: intervalo entre os pontos da malha 4m; freqüência de corte 60Hz; intervalo de amostragem 0.4ms; número de pontos na direção *x* igual a 2301; número de pontos na direção *z* igual a 751; intervalo entre receptores 5m e intervalo entre pontos de tiro 5m.

A Figura (2.9) mostra os instantâneos da propagação do campo incidente da fonte, onde podem ser observadas na frente de onda as múltiplas chegadas.

O sismograma da Figura (2.8) migrado com o algoritmo de migração reversa no tempo convencional é mostrado na Figura (2.10), onde foram utilizados os mesmos parâmetros da modelagem. Ao todo foram gerados 2301 sismogramas e migrados. A imagem final, mostrada na Figura (2.11), foi obtida pelo empilhamento de todos os sismogramas migrados.

A Figura (2.12b) mostra um *zoom* da imagem em profundidade. Pode ser notado que o topo e a base do reservatório foram muito bem imageados, fato que também pode ser confirmado observando a Figura (2.12a) que exibe um *zoom* do modelo de velocidade.

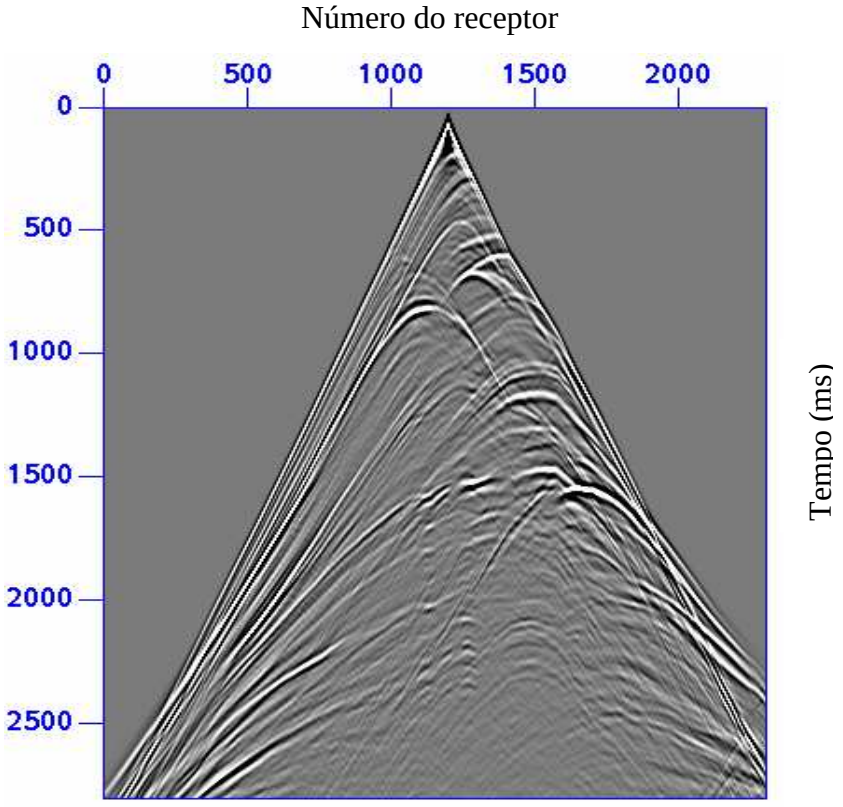


Figura 2.8– Sismograma correspondente ao modelo *Marmousi* para a fonte sísmica situada na posição x=6000m.

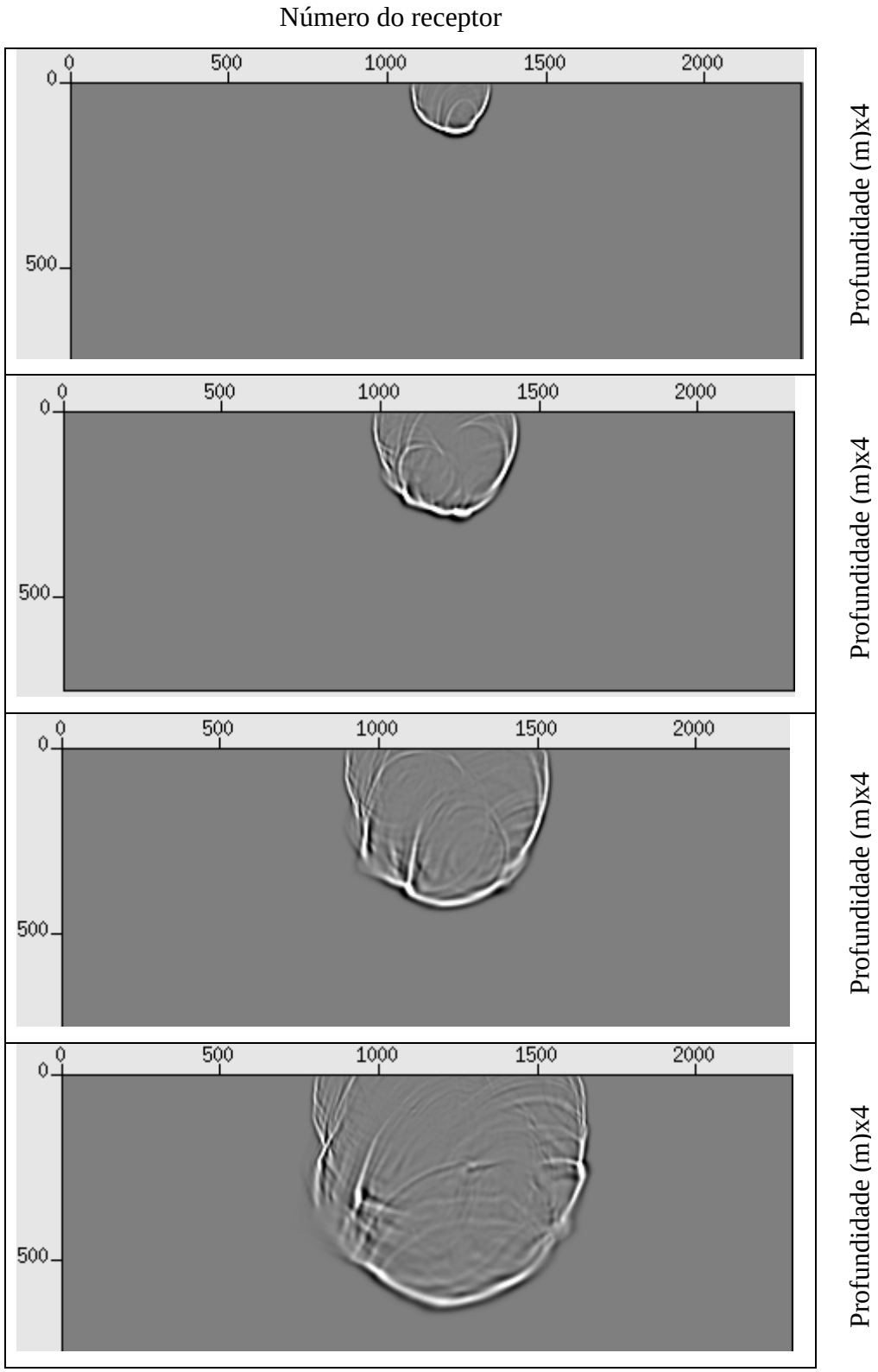


Figura 2.9 – Instantâneos da propagação do campo incidente da fonte.

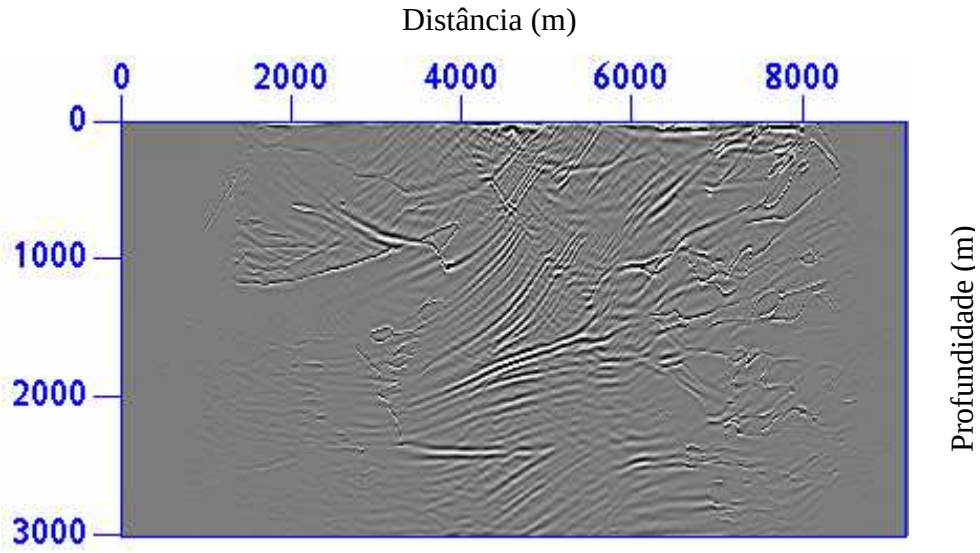


Figura 2.10– Migração do sismograma mostrado na Figura 2.8.

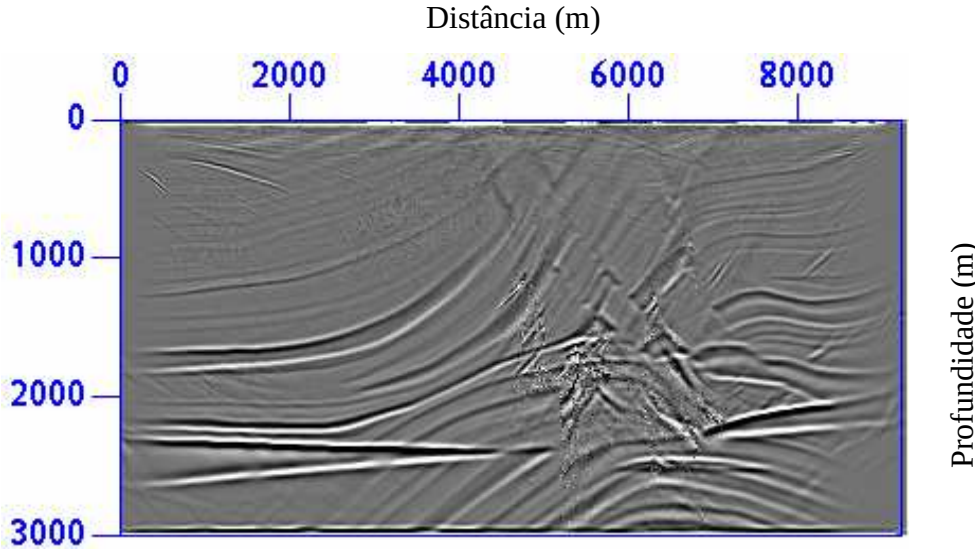


Figura 2.11 – Imagem final: empilhamento de 2301 sismogramas migrados

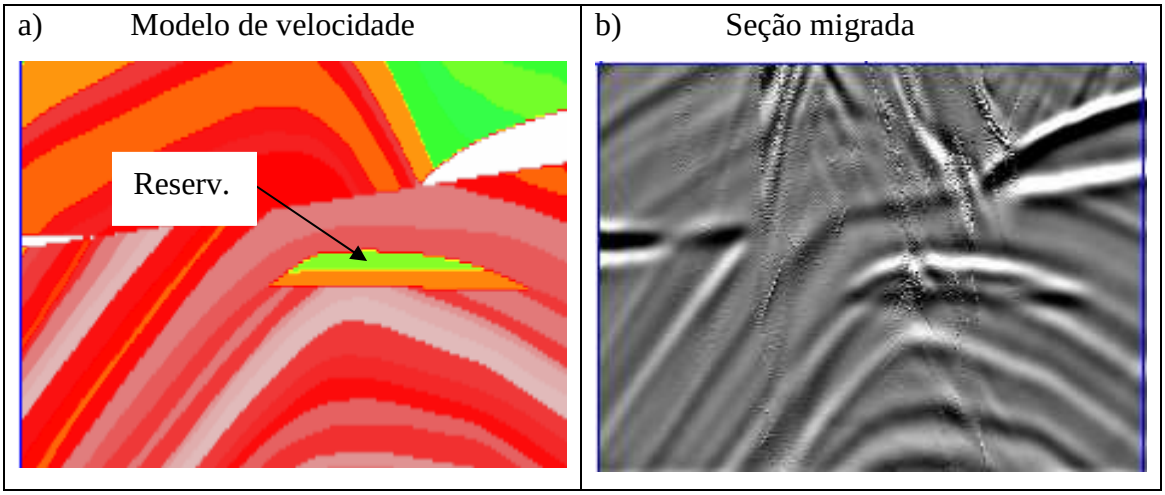


Figura 2.12 – Imagem final destacando a área do reservatório. a) Modelo de velocidade; b) Imagem final em profundidade

2.5 - Sumário

Neste Capítulo foi apresentado o algoritmo de migração reversa no tempo 3-D convencional. No algoritmo foi usada a condição de imagem de tempo de excitação baseada no critério de amplitude máxima, como proposto por LOEWENTHAL e HU (1991). O algoritmo foi aplicado no modelo 2-D de duas camadas separadas por uma interface plana e horizontal e ao modelo *Marmousi*.

No modelo de duas camadas foi mostrado como aparecem as reflexões internas durante a propagação do campo de onda incidente da fonte e na propagação reversa no tempo do sismograma, fato que é proveniente do contraste de impedância entre as camadas. Quando foi adotada a suavização do campo de vagarosidade as reflexões internas foram atenuadas diminuindo os artefatos na seção migrada.

A aplicação da migração reversa no tempo ao modelo *Marmousi* imageou de forma satisfatória o topo e a base do reservatório. Algumas partes da seção em profundidade aparentam bastante ruidosa, o que é proveniente da condição de imagem utilizada não ser a mais adequada para a migração de tiro comum. Neste caso o mais indicado é a condição de imagem com correlação cruzada.

3 - SÍNTESE DE FRENTES DE ONDA 3-D

3.1 - Introdução

A migração pré-empilhamento em profundidade de tiro comum de uma linha sísmica é realizada migrando-se cada tiro individualmente e a imagem final é obtida pelo empilhamento de todos os tiros migrados. No entanto, para uma aquisição 3-D, a migração de tiro comum exige um grande esforço computacional, principalmente quando o algoritmo de migração utilizado é a migração reversa no tempo.

Visando a redução do tempo de execução do algoritmo de migração BERKHOUT (1992) propôs a tecnologia *areal shot records* que permite a síntese de frentes de onda, não necessariamente planas, em todas as partes do modelo. RIETVELD *et al*. (1992), RIETVELD (1995), JI (1995) introduziram o conceito de iluminação controlada no qual uma frente de onda de forma pré-definida pode ser gerada em qualquer parte do modelo. ROMERO *et al*. (2000) e LIU *et al*. (2006) abordaram o método *phase encoding* de registros com o objetivo de reduzir a quantidade de tiros a serem migrados. ZHANG *et al*. (2003,2006) propuseram um método de síntese de frentes de ondas planas 3-D para dados marítimos. Em todos os métodos de síntese de frentes de onda mencionados acima, o processo de síntese foi realizado no domínio da freqüência utilizando a equação unidirecional da onda.

Neste capítulo é apresentado um novo algoritmo de síntese de frentes de onda que é implementado no domínio do tempo. O algoritmo utiliza a equação completa da onda sem aproximação de Born.

3.2 – Formulação

No algoritmo de síntese de frentes de onda uma família de múltiplas fontes é obtida na superfície de observação de tal modo que, quando propagada para o interior do modelo, gere em uma região de interesse de imageamento, uma frente de onda de forma pré-definida. Uma família de múltiplos tiros é também obtida através de um operador de síntese apropriado. O operador de síntese é encontrado por extrapolações ascendentes desde o horizonte previamente definido até a superfície de observação.

a) Obtenção do operador de síntese

Para realizar a síntese de frentes de onda, no esquema apresentado nesta tese, primeiramente identifica-se em profundidade, a área de interesse de imageamento (alvo). Identificada a área, é gerado o horizonte $z = f(x, y)$ para a definição da frente de onda. Em todos os pontos do horizonte $z = f(x, y)$ são colocadas fontes pontuais $f(t)$ que são detonadas simultaneamente, gerando uma frente de onda que se propagará até a superfície de observação. O algoritmo usa a função $f(t)$ definida pela equação (A.5) do Apêndice A, embora qualquer outra função fonte pode ser usada, como por exemplo um pulso de Ricker (DUARTE, 2003).

Para a propagação da frente de onda desde o horizonte $z = f(x, y)$ até a superfície de observação, será usada a equação acústica da onda não-homogênea:

$$\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2(x,y,z)} \frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial t^2} = \sum_{s=1}^{N_s} f(t)\delta(x - x_s)\delta(y - y_s)\delta(z - z_s), \tag{3.1}$$

onde:

- N_s é o número de fontes pontuais sobre o horizonte $z = f(x,\text{y})$ e (x_x, y_s, z_s) é a posição de cada fonte pontual;

- $f(t)$ é a função fonte utilizada sobre os pontos do horizonte.

Na solução da equação (3.1) são consideradas as seguintes condições iniciais:

$$u(x, y, z, t) = 0 \qquad \text{para } t \le 0, \tag{3.2}$$

$$\dot{u}(x, y, z, t) = 0 \qquad \text{para } t \le 0, \tag{3.3}$$

onde $\dot{u}(x, y, z, t)$ significa a derivada temporal do campo de pressão.

Na equação (3.1) é também aplicada a condição de contorno de Dirichlet que considera o campo de pressão nulo na superfície $z = 0$, ou seja:

$$u(x, y, z = 0, t) = 0 \tag{3-4}$$

A equação (3.1), discretizada pelo método das diferenças finitas com aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para a derivada temporal, pode ser obtida de forma análoga como foi deduzida a equação (A.10), ou seja:

$$\begin{aligned} u_{i,j,k}^{n+1} = & -\frac{1}{12} a_{i,j,k} \left\{ \left(u_{i-2,j,k}^{n} + u_{i+2,j,k}^{n} + u_{i,j-2.k}^{n} + u_{i,j+2,k}^{n} + u_{i,j,k-2}^{n} + u_{i,j,k+2}^{n} \right) \right. \\ & \left. -16\left(u_{i-1,j,k}^{n} + u_{i+1,j,k}^{n} + u_{i,j-1,k}^{n} + u_{i,j+1,k}^{n} + u_{i,j,k-1}^{n} + u_{i,j,k+1}^{n} \right) + 90 u_{i,j,k}^{n} \right\} \\ & + 2u_{i,j,k}^{n} - u_{i,j,k}^{n-1} + \sum_{s=1}^{N_s} f^{n} \delta(i - i_s) \delta(j - j_s) \delta(k - k_s), \end{aligned} \tag{3.5}$$

onde $a_{i,j,k} = \left(\frac{c_{i,j,k} \Delta t}{h} \right)^2$.

Os índices i, j e k representam as variáveis x, y e z discretizadas, h é o espaçamento entre pontos da malha, $c_{i,j,k}$ a velocidade no ponto (i, j, k) e Δt é o intervalo de tempo da variável temporal discretizada.

O campo propagado pela equação (3.5) será registrado na superfície de observação através de receptores distribuídos uniformemente. O registro será armazenado de forma que a última amostra de tempo corresponda ao tempo zero, ou seja, o registro será armazenado de forma reversa no tempo. O campo registrado será denotado por $d(x, y, z = z_{obs}, t)$.

A propagação do campo $d(x, y, z = z_{obs}, t)$ para o interior do modelo obedece a equação da onda não-homogênea:

$$\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial z^2}$$
$$-\frac{1}{c^2(x,y,z)}\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial t^2}=d(x,y,z=z_{obs},t) \qquad (3.6)$$

submetida as mesmas condições iniciais e de contorno aplicadas na equação (3.1).

A equação (3.6) discretizada pelo método das diferenças finitas com aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para a derivada temporal é:

$$u_{i,j,k}^{n+1}=-\frac{1}{12}a_{i,j,k}\left\{\left(u_{i-2,j,k}^{n}+u_{i+2,j,k}^{n}+u_{i,j-2.k}^{n}+u_{i,j+2,k}^{n}+u_{i,j,k-2}^{n}+u_{i,j,k+2}^{n}\right)\right.$$

$$\left.-16\left(u_{i-1,j,k}^{n}+u_{i+1,j,k}^{n}+u_{i,j-1,k}^{n}+u_{i,j+1,k}^{n}+u_{i,j,k-1}^{n}+u_{i,j,k+1}^{n}\right)+90u_{i,j,k}^{n}\right\}$$

$$+2u_{i,j,k}^{n}-u_{i,j,k}^{n-1}+d^{n}(x_i,y_j,z=z_{obs}) \qquad (3.7)$$

O campo $d(x,y,z=z_{obs},t)$ quando propagado pela equação (3.7), irá gerar na profundidade de interesse sobre o horizonte $z=f(x,\text{y})$, aproximadamente a frente de onda pré-definida.

A convolução do campo registrado $d(x_i,y_j,z=z_{obs},t)$ com o filtro inverso da assinatura da fonte $f(t)$ dá origem ao que será denominado de operador de síntese, ou seja:

$$\gamma(x_i,y_j,z=z_{obs},t)=d(x_i,y_j,z=z_{obs},t)*f^{-1}(t) \qquad (3.8)$$

onde $f^{-1}(t)$ é o filtro inverso (YILMAZ, 2001) da assinatura da fonte.

Uma família de múltiplas fontes será definida pela convolução do operador de síntese com a fonte pontal $s(t)$ através da equação (B.4) deduzida no Apêndice B:

$$\tilde{d}(x, y, z = z_{obs}, t) = \sum_{sy=1}^{N_{s_y}} \sum_{sx=1}^{N_{s_x}} s(t)\delta(x - x_{sx})\delta(y - y_{sy})\delta(z - z_{obs}) * \gamma(x_{sx}, y_{sy}, z = z_{obs}, t), \tag{3.9}$$

onde:

- $s(t)$ é a fonte pontual utilizada na aquisição dos sismogramas de campo;

- $(x_{sx}, y_{sy}, z = z_{obs})$ são as coordenadas dos pontos de detonação;

- N_s é número de detonações na aquisição.

b) Obtenção da família de múltiplos tiros

Em analogia com a equação (3.9), uma família de múltiplos tiros (super-sismograma) pode também ser definida pela convolução entre o operador de síntese e os sismogramas de campo através da equação equação (B.5) deduzida no Apêndice B:

$$\tilde{u}(x, y, z = z_{obs}, t) = \sum_{sy=1}^{N_{s_y}} \sum_{sx=1}^{N_{s_x}} \gamma(x_{sx}, y_{sy}, z = z_{obs}, t) * sis(x, y, z = z_{obs}, t; x_{sx}, y_{sy}), \tag{3.10}$$

onde:

- $\tilde{u}(x, y, z = z_{obs}, t)$ representa a família de múltiplos tiros;

- $sis(x, y, z = z_{obs}, t; x_{sx}, y_{sy})$ representa o sismograma relativo à estação de tiro localizada em $(x_{sx}, y_{sy}, z = z_{obs})$.

Na equação (3.10) deve ser observado que cada traço do operador de síntese está posicionado na mesma coordenada da fonte sísmica que gerou o sismograma, ou seja, na posição $(x_{sx}, y_{sy}, z = z_{obs})$. Esta equação representa o empilhamento dos traços

no domínio do receptor comum na direção coordenada x seguida de outro empilhamento na direção y.

Para gerar o operador de síntese é usado o macro-modelo de velocidade que é obtido combinando técnicas de migração e tomografia sísmica (FARRA e MADARIAGA, 1988, SOARES FILHO, 1994). O macro-modelo de velocidade é dado pelas principais feições, ou seja, pelos horizontes mais significativos e as velocidades médias (suaves) entre os mesmos.

O fluxograma do algoritmo de síntese de frentes de onda é mostrado na Figura (3.1).

3.3 - Sumário

Foi apresentado um novo algoritmo de síntese de frentes de onda 3-D. Uma família de múltiplas fontes foi sintetizada na superfície de observação de tal modo que, quando propagada para o interior do modelo, tenha uma frente de onda com forma pré-definida em uma região de interesse. Além de gerar frentes de onda com forma pré-definida em subsuperfície, o processo de síntese tem a grande vantagem de reduzir a quantidade de traços sísmicos da aquisição para as dimensões de um cubo sísmico empilhado (seção zero *offset*). No algoritmo proposto o operador de síntese é obtido utilizando a equação completa da onda sem aproximação de Born através de extrapolações ascendentes desde horizontes previamente definidos até a superfície de observação. Nas demais formulações encontradas na literatura, a síntese de frentes de onda é realizada no domínio da freqüência e utilizam a equação unidirecional da onda, que implicitamente assume a aproximação de Born.

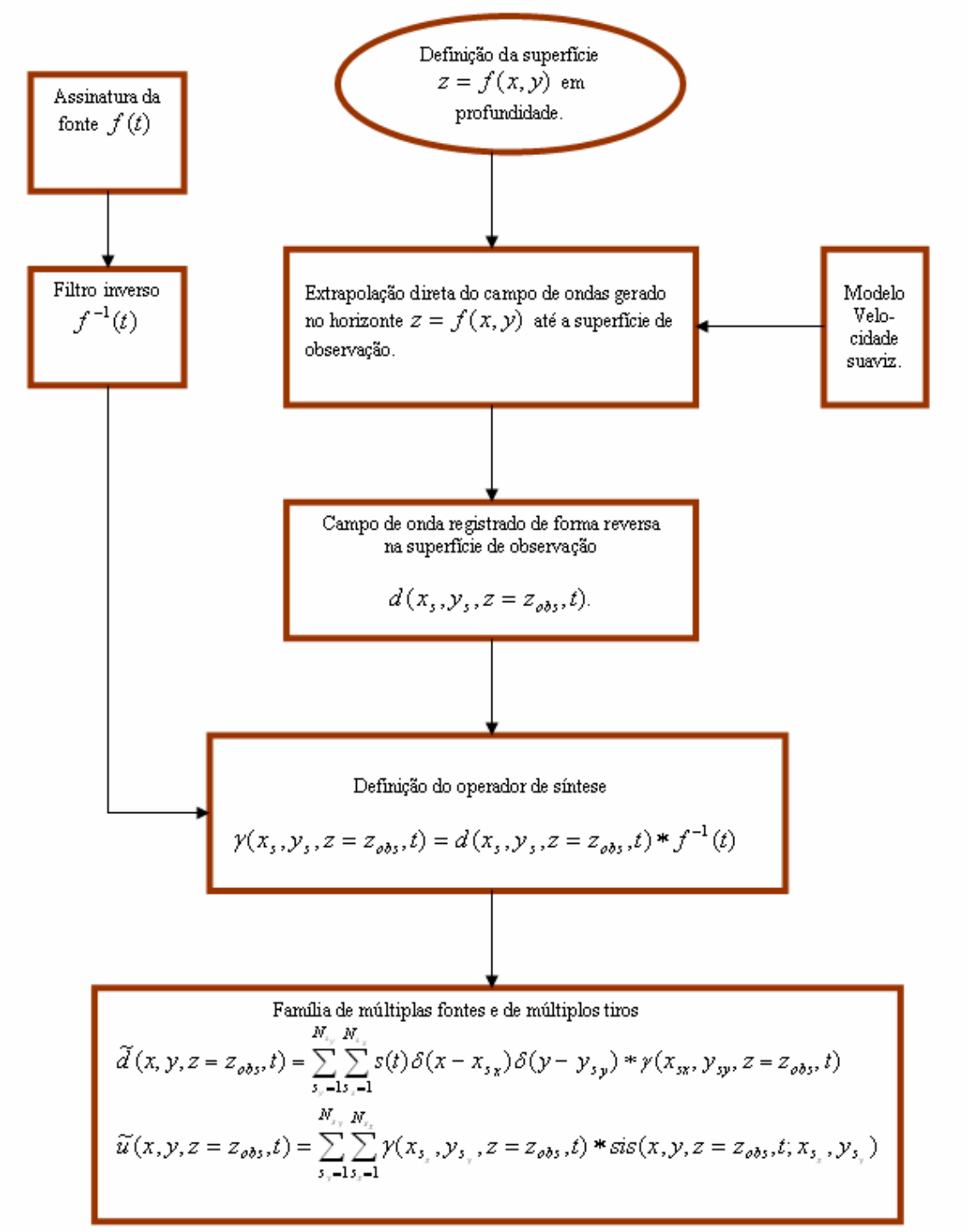


Figura 3.1 - Fluxograma para a geração da família de múltiplas fontes e a família de múltiplos tiros 3-D

4 - APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE SÍNTESE DE FRENTES DE ONDA - 1ª PARTE: CASO 2-D – Modelo *Salt Dome* (SEG/EAGE)

4.1 - Introdução

Neste Capítulo será aplicado o algoritmo de síntese de frentes de onda proposto em dado sintético complexo. Também neste capítulo será analisada a influência do tipo de aquisição e a ausência de afastamentos próximos na síntese de frentes de onda 2-D. A aplicação será realizada em uma linha de velocidade extraída do modelo *Salt Dome*-SEG/EAGE (AMINZADEH *et al*., 1996).

4.2 - A modelagem dos dados

Foi simulado um levantamento sísmico no modelo 2-D mostrado na Figura. (4.1). Foram gerados 1558 sismogramas para uma geometria de *spread fixo*, com receptores distribuídos na superfície. Os sismogramas foram gerados com os seguintes parâmetros: intervalo entre pontos da malha 5m; intervalo entre receptores 5m; intervalo entre tiros 5m; razão de amostragem 0.4ms; freqüência de corte 60Hz e tempo total de registro 2800ms.

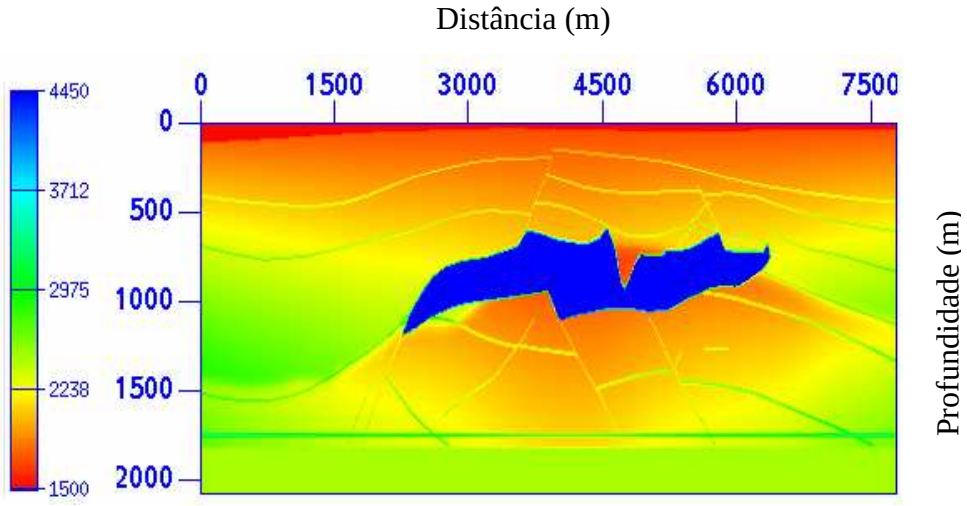


Figura 4.1 – Modelo de velocidade *Salt Dome*.

4.3 - A síntese de frentes de onda

a) Obtenção da família de múltiplas fontes

A família de múltiplas fontes foi obtida na superfície de observação de tal modo a gerar uma onda plana e horizontal na profundidade $z = 1750m$, quando propagada para o interior do modelo. A Figura (4.2) mostra a curva representativa da função $z = f(x)$ e a Figura (4.3) mostra a família de múltiplas fontes que foi encontrada.

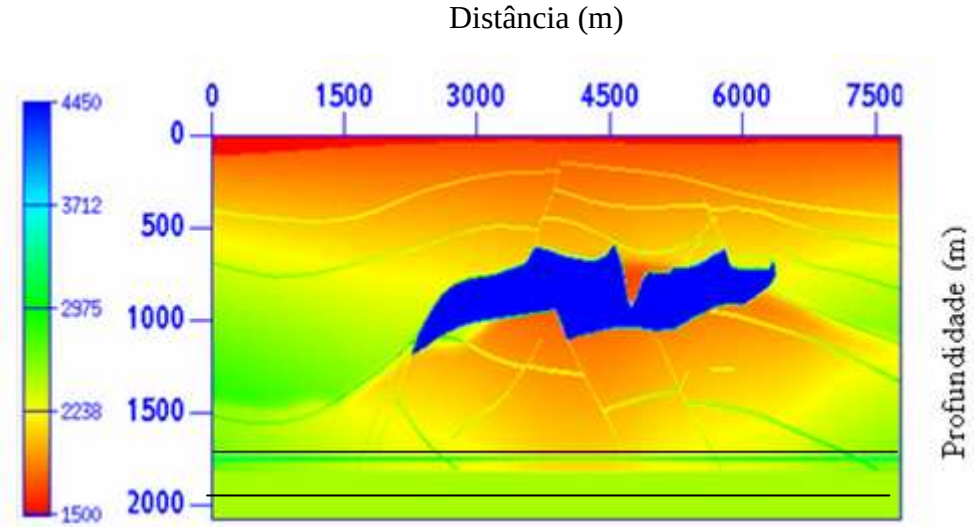


Figura 4.2. O modelo de velocidade com a curva da função $z = f(x)$ para definição da frente de onda.

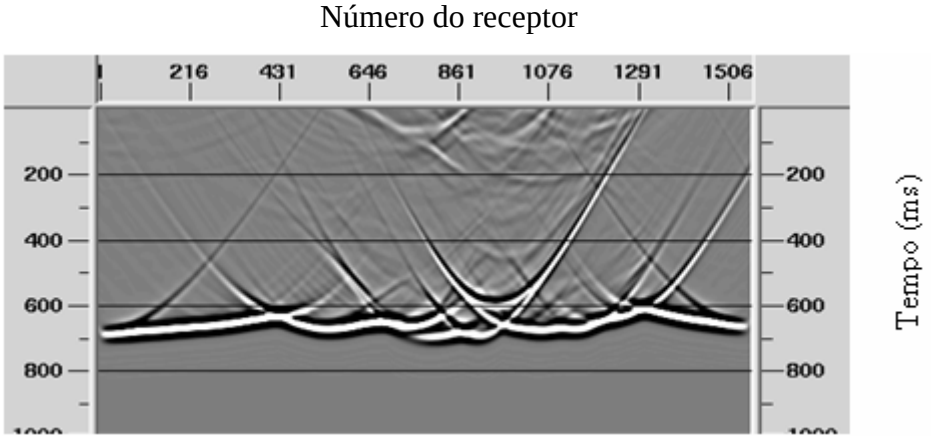


Figura 4.3 – Família de múltiplas fontes resultante da detonação das fontes pontuais na curva $z = f(x)$.

A família de múltiplas fontes quando propagada para o interior do modelo, gera na profundidade de interesse, aproximadamente a frente de onda pré-definida, como pode ser observado no instantâneo da Figura (4.4).

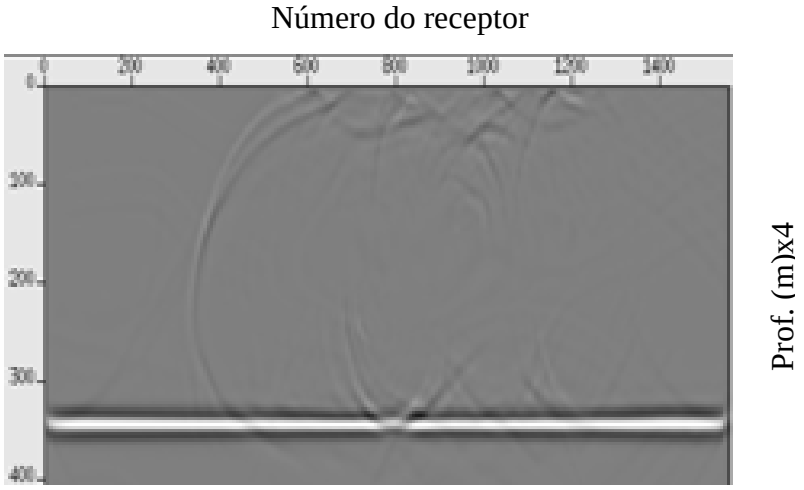


Figura 4.4 – Instantâneo resultante da propagação da família de múltiplas fontes para o interior do modelo.

b) Obtenção do Operador de Síntese

O operador de síntese é mostrado na Figura (4.5) e foi obtido pela convolução da família de múltiplas fontes com o filtro inverso da assinatura da fonte, como definido pela equação (3.8). Pode ser observado que o operador de síntese tem uma versão *spike* da família das múltiplas fontes.

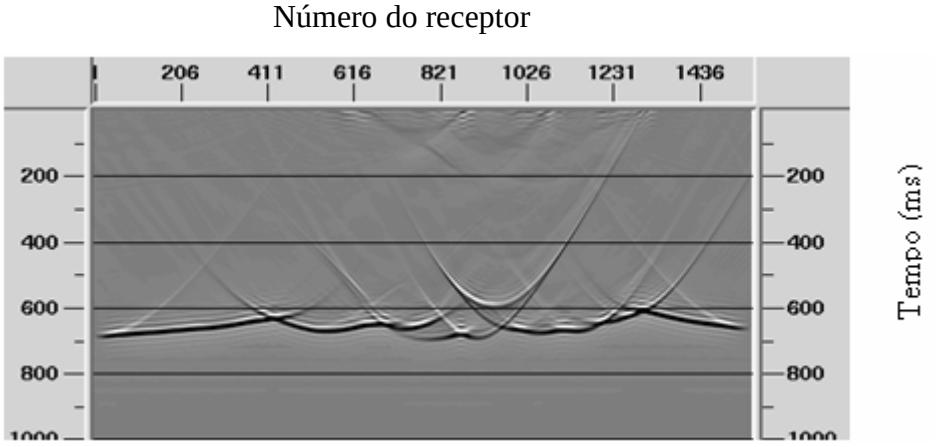


Figura 4.5 - Operador de Síntese.

c) Obtenção da família de múltiplos tiros

A Figura (4.6) mostra o resultado da convolução do traço 100 do operador de síntese com o sismograma número 100, ambos na mesma coordenada na superfície. Pode-se observar que esta operação atua como um deslocamento em tempo (*shift*) e um escalonamento da amplitude do sismograma.

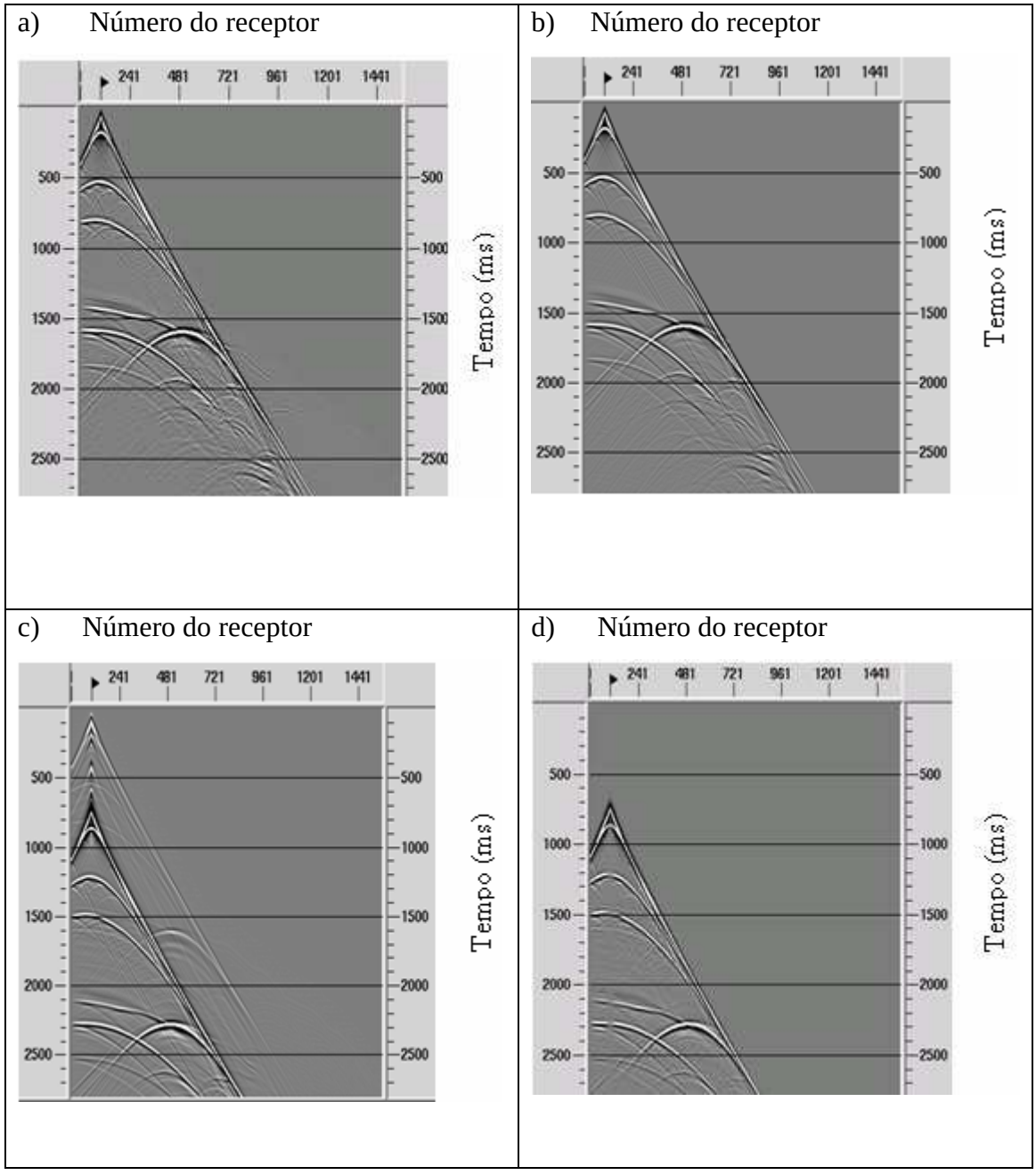


Figura 4.6 – a) sismograma número 100 sem *mute*; b) sismograma 100 com *mute*; c) sismograma 100 sem *mute* convolvido com o traço 100 do operador de síntese; d) sismograma 100 *mutado* convolvido com o traço 100 do operador de síntese.

A família de múltiplos tiros, mostrada na Figura (4.7a), foi obtida pela soma das convoluções de cada traço do operador de síntese com cada sismograma. A Figura (4.7b) mostra família de múltiplos tiros modelada, considerando a família de múltiplas fontes como termo de fonte. Comparando estas duas figuras observa-se uma semelhança muito grande entre as famílias de múltiplos tiros.

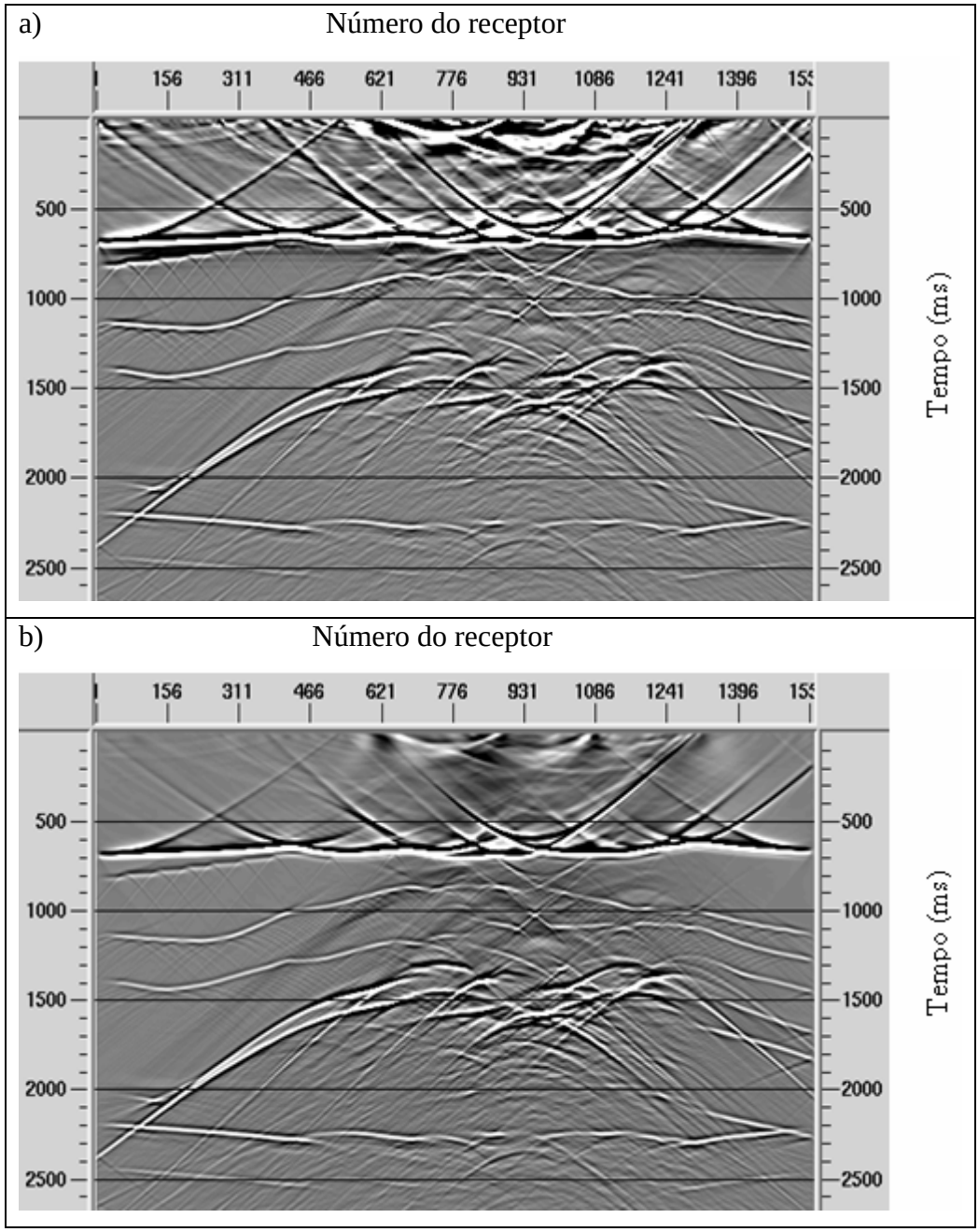


Figura 4.7 - a) Família de múltiplos tiros obtida pela soma das convoluções de cada traço do operador de síntese com cada sismograma; b) Família de múltiplos tiros obtida da modelagem tendo a família de múltiplas fontes como o termo fonte.

Em áreas muito complexas como as do modelo *Salt Dome* (Figura (4.1)), a frente de onda plana gerada na superfície, à medida que se propaga para o interior do modelo, acaba se deteriorando. A Figura (4.8) mostra os instantâneos de uma onda plana horizontal gerada na superfície se propagando no modelo. Pode ser notado que a frente de onda adquire forma muito complexa abaixo do domo de sal.

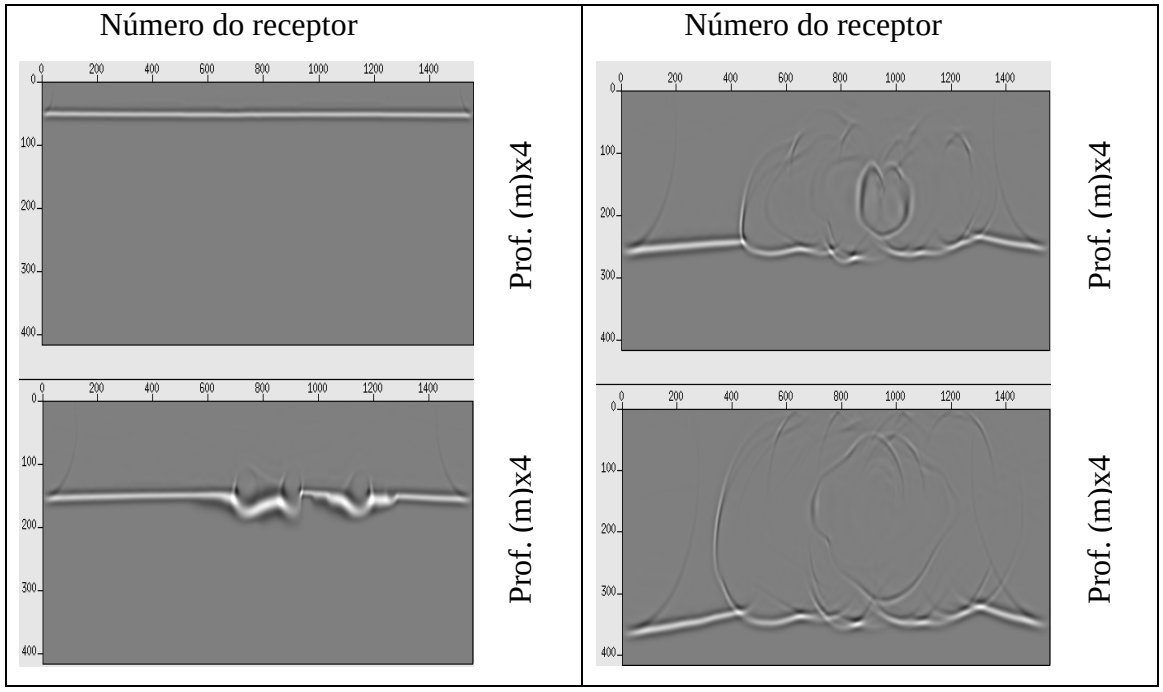


Figura 4.8 – Instantâneos de uma onda plana horizontal gerada na superfície do modelo *Salt Dome*.

Quando a síntese é realizada em subsuperfície, a frente de onda na superfície tem uma forma bastante complexa, mas na região de interesse tem a forma pré-definida. A Figura (4.9) mostra os instantâneos da propagação de uma frente de onda sintetizada na superfície de observação para gerar uma frente de onda plana e horizontal na profundidade $z = 1750m.$

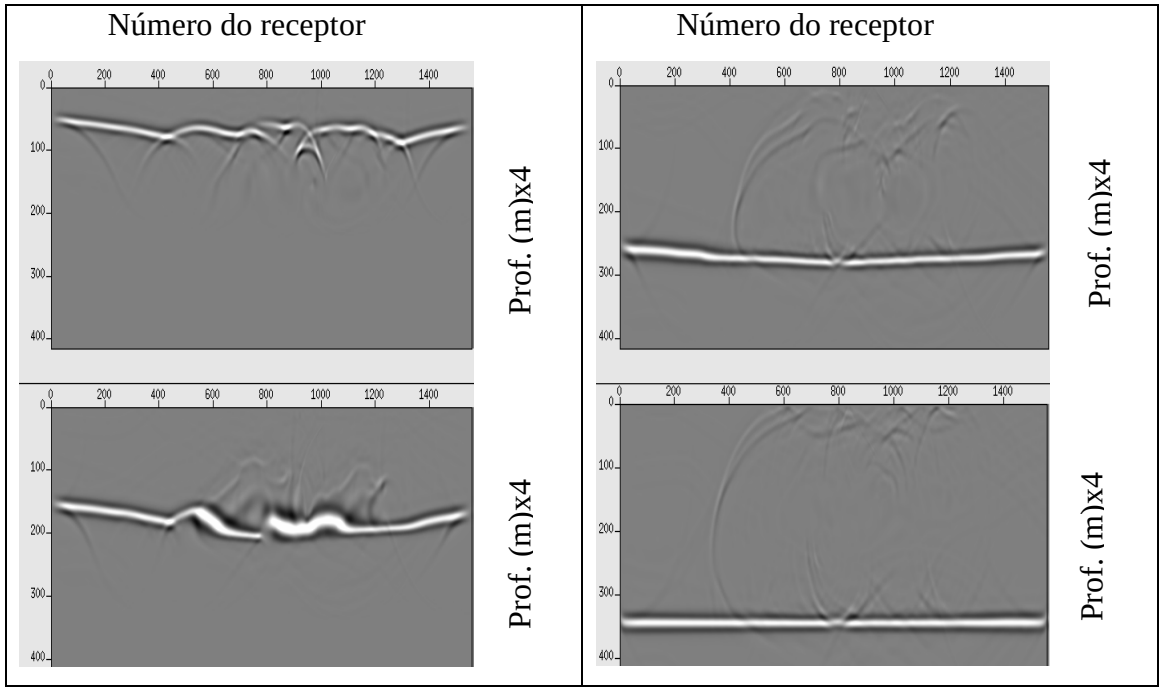


Figura 4.9 – Instantâneos de uma família de múltiplas fontes que foi sintetizada na superfície de observação com o objetivo de gerar uma frente de onda plana horizontal e horizontal na profundidade $z = 1750m$.

4.4 – Influência do tipo da geometria de aquisição na família de múltiplos tiros

Na seção anterior, as famílias de múltiplos tiros foram obtidas considerando uma geometria tipo *split spread* com os receptores fixos na superfície e a fonte se movimentando. Nos levantamentos sísmicos de dados reais marítimos, os dados são adquiridos com ausência de afastamentos próximos e uma geometria de aquisição na qual os receptores são arrastados com o movimento da fonte (navio). Nesta seção será analisado o efeito da ausência de afastamentos próximos e também a influência do tipo de aquisição nas famílias de múltiplos tiros levando em consideração o modelo *Salt Dome.*

4.4.1 – Tipos de geometria de aquisição

Os três tipos de aquisições que serão analisadas são:

a) Geometria 1 - *split spread*

Como mostrado na Figura (4.10), neste tipo de aquisição, o número de receptores à direita e a esquerda da fonte são iguais. Quando a fonte se movimenta todo o sistema de receptores também se move da mesma distância.

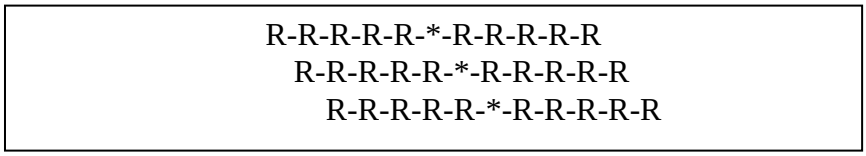


Figura 4.10 - geometria tipo *split spread.*

b) Geometria 2 – *End-on spread*

Neste tipo de aquisição a fonte (navio) se movimenta arrastando o cabo de receptores (levantamento típico marítimo).

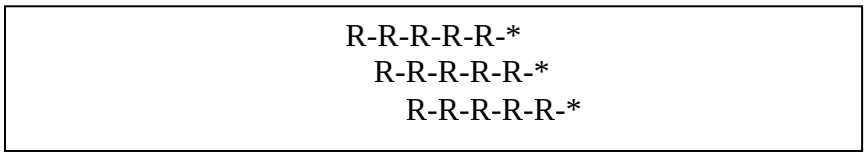


Figura 4.11 – geometria tipo *End-on spread*

c) Geometria 3 – *split spread* com receptores fixos

Neste tipo de geometria de aquisição os receptores permanecem fixos na superfície com a fonte se movimentando.

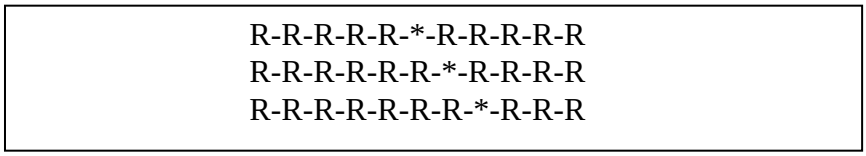


Figura 4.12 - geometria tipo *split* spread com receptores fixos.

A Figura (4.13) mostra os três sismogramas representativos das aquisições. As famílias de múltiplos tiros correspondentes a cada tipo de aquisição são mostradas na Figura (4.14). Na análise foi utilizada somente uma parte do modelo e o afastamento máximo considerado foi de 2960m.

As famílias de múltiplos tiros obtidas para os dois tipos de aquisição *split* s*pread* são bastante semelhantes. A família de múltiplos tiros para a aquisição tipo *end-on spread* apresentou ausência de certas reflexões que estão presentes nas demais.

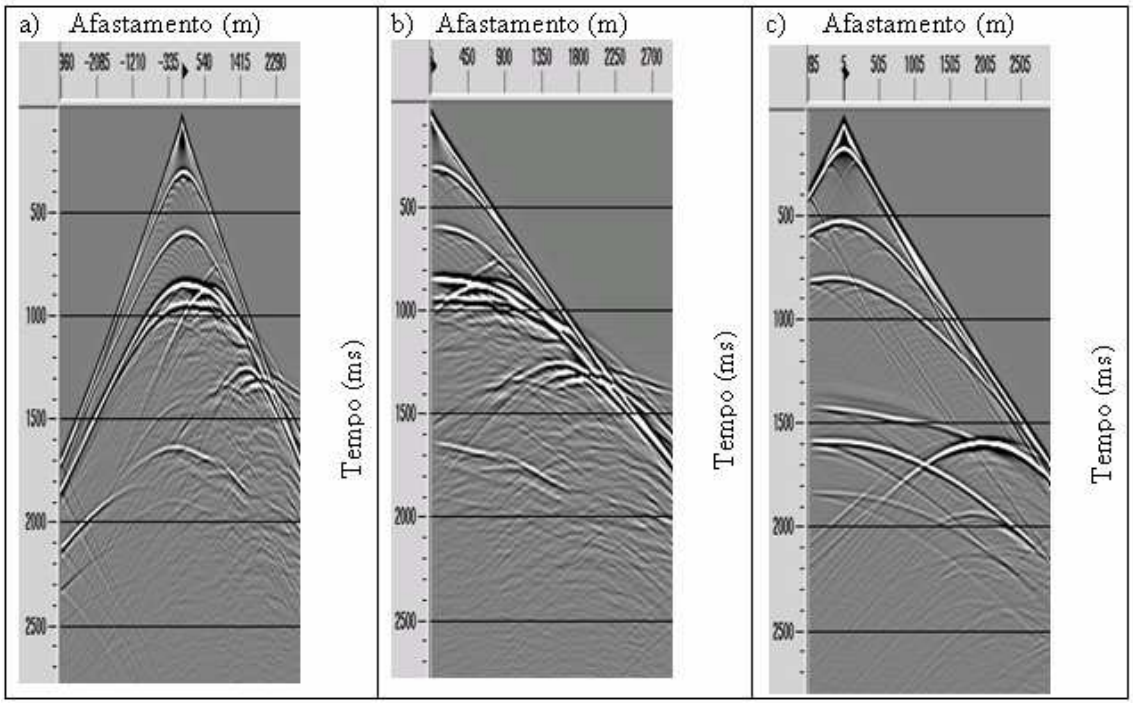


Figura 4.13 – a) sismograma tipo *split spread*; b) sismograma tipo *end-on spread*; c) sismograma tipo *split spread* com receptores fixos na superfície.

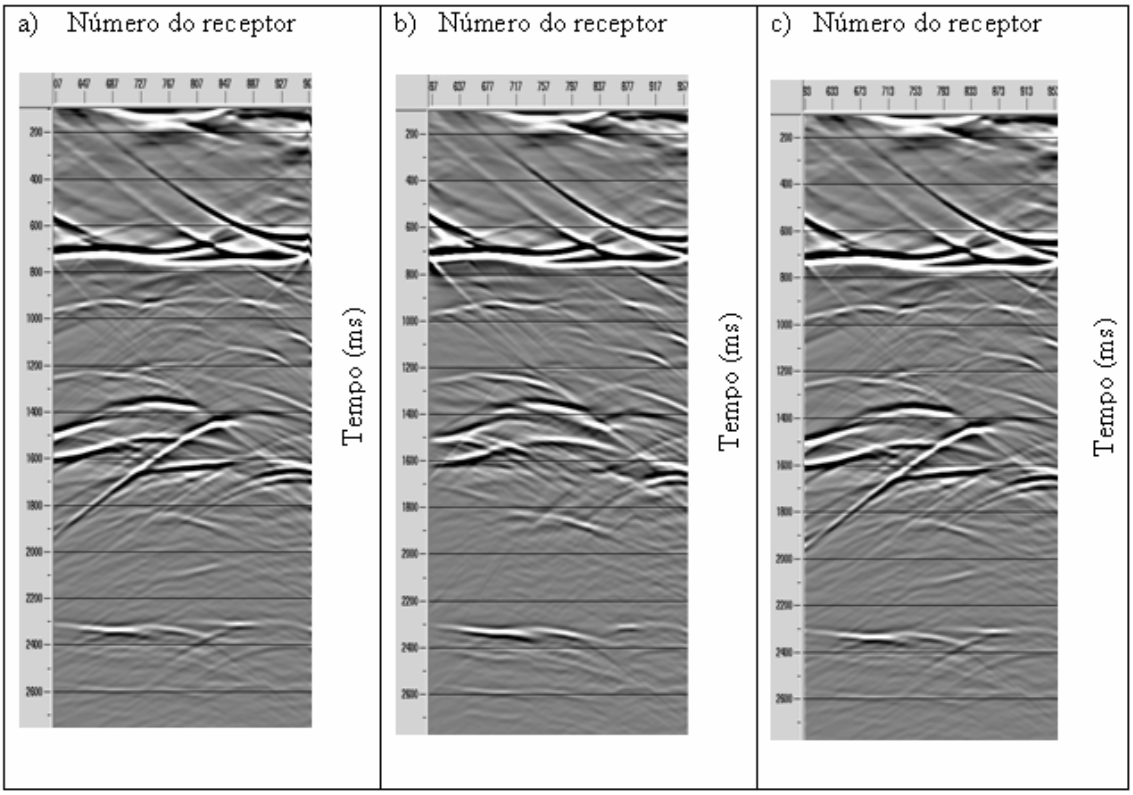


Figura 4.14 – Família de múltiplos tiros: a) geometria tipo *split spread*; b) geometria tipo *end-on spread*; c) geometria tipo *split spread* com receptores fixos na superfície

4.4.2 - Influência da ausência dos afastamentos próximos

Para esta análise foi suposto que o afastamento mínimo é de 150m. Na Figura (4.15) é mostrado o sismograma que contém todos os afastamentos e o mesmo sismograma sem os afastamentos próximos, para uma geometria *split spread*.

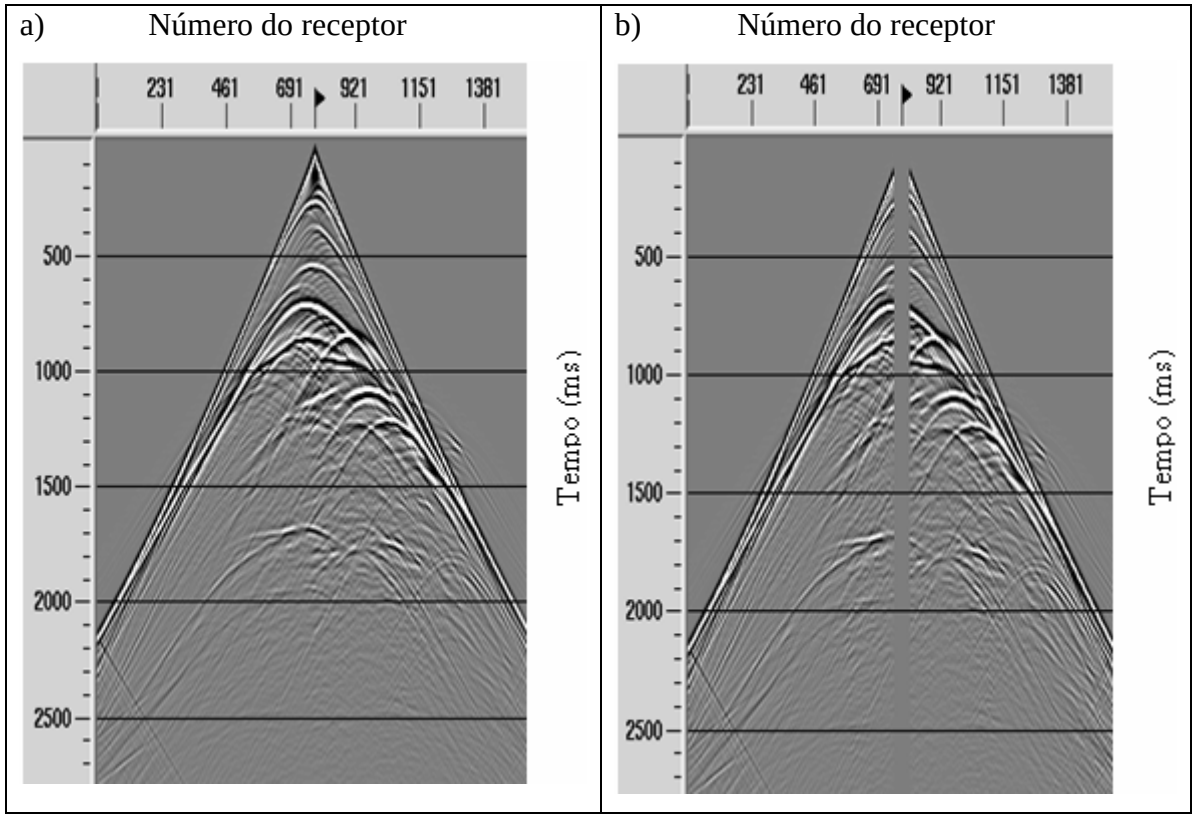


Figura 4.15 – a) sismograma com todos os afastamentos; b) sismograma faltando os afastamentos próximos.

As famílias de múltiplos tiros considerando todos os afastamentos e com a ausência dos afastamentos próximos são mostradas na Figura (4.16) e na Figura (4.17), respectivamente. Comparando as duas figuras pode ser observado que a ausência dos afastamentos próximos de –150m a 150m, considerando a geometria *split spread*, apresentou uma falta de reflexões na parte rasa da família de múltiplos tiros. Este fato mostra que na aquisição de dados reais será necessário interpolar os traços próximos.

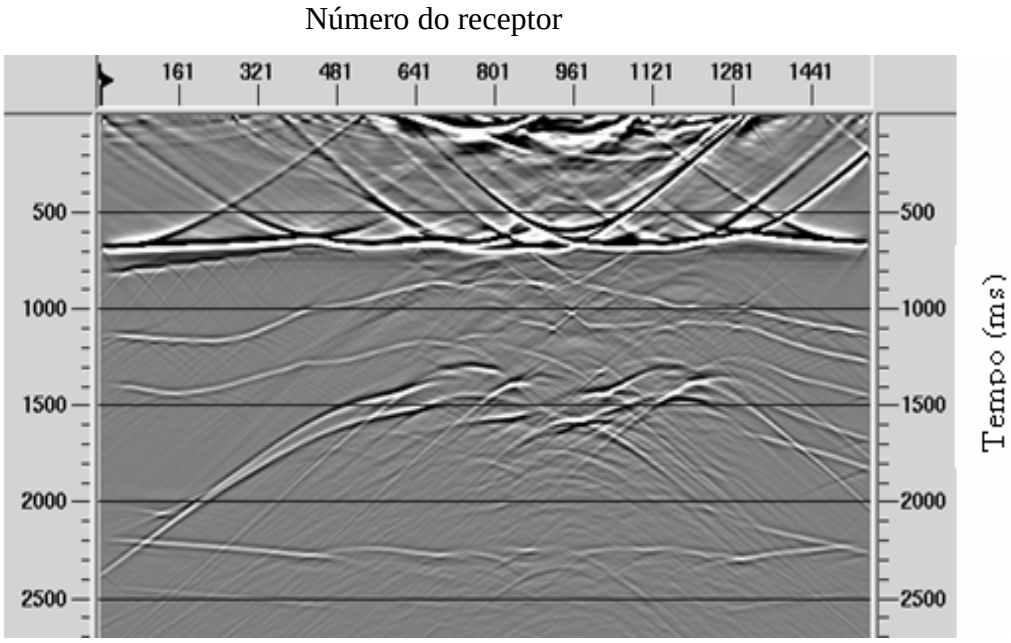


Figura 4.16 – Família de múltiplos tiros para os sismogramas contendo todos os afastamentos.

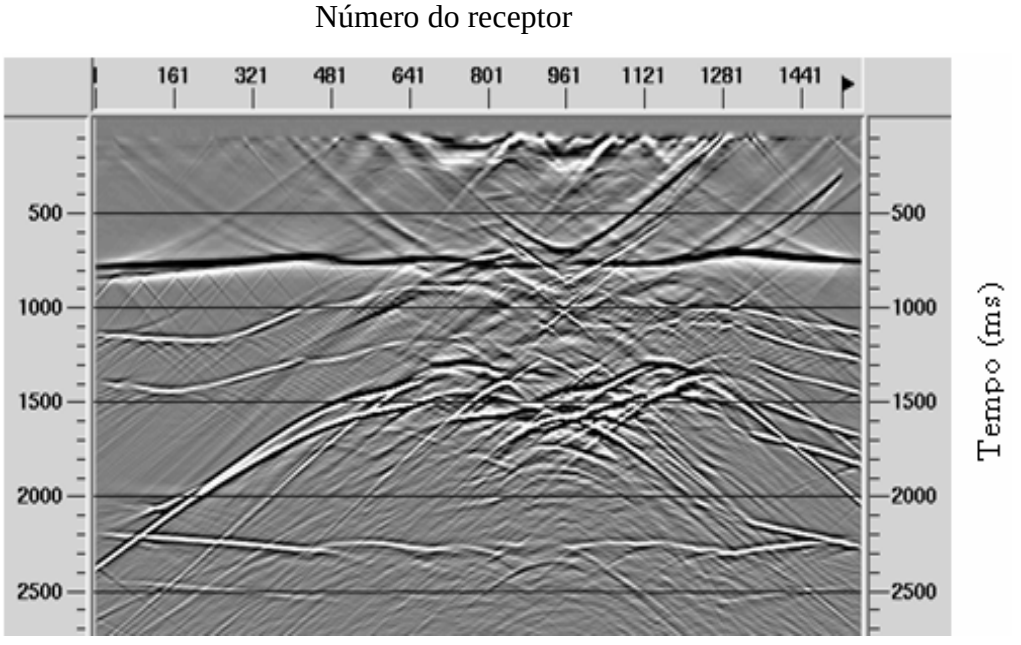


Figura 4.17 – Família de múltiplos tiros para os sismogramas com ausência de afastamentos próximos.

4.5 – Sumário

Foi aplicado o algoritmo de síntese de frentes de onda na linha de velocidade 2-D extraída do modelo *Salt Dome*. O modelo de velocidade escolhido apresenta uma grande complexidade geológica, uma vez que a região de interesse se localiza abaixo de um grande domo de sal. A aplicação do algoritmo mostrou que é possível gerar em uma profundidade de interesse, uma frente de onda com forma pré-definida, livre dos efeitos indesejáveis das camadas superiores na propagação da onda.

Pelos resultados mostrados pode-se concluir que a família de múltiplos tiros contendo a geometria *split spread* foi a que apresentou o melhor resultado. A ausência de afastamentos próximos também resultou em uma família de múltiplos tiros com ausência de reflexões na parte rasa. Portanto, para uma aquisição marítima (*end-on spread*) será necessário interpolar os afastamentos próximos e também usar o principio da reciprocidade para simular uma aquisição tipo *split spread* (LIU *et al*., 2004).

5 – APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE SÍNTESE DE FRENTES DE ONDA: 2ª PARTE CASO 3-D – Modelo *Overthrust* (SEG/EAGE)

5.1 – Introdução

Neste capítulo será aplicado o algoritmo de síntese de frentes de onda proposto em dado sintético 3-D. A aplicação será feita no modelo *Overthrust* (SEG/EAGE) com o tamanho do volume original modificado. Trata-se de um modelo típico de regime tectônico compressional como mostrado na Figura (5.1).

5.2 – A modelagem dos dados 3-D

A modelagem dos dados foi realizada utilizando os seguintes parâmetros: intervalo entre pontos da malha 25m nas direções x, y e z; intervalo de amostragem temporal de 2ms; número de pontos da malha nas direções x e y igual a 400; número de pontos da malha na direção z igual a 187; intervalo de pontos de tiro 25m; intervalo de receptores na superfície igual a 25m; freqüência de corte igual a 35 Hz. Um tipo de geometria de aquisição especial foi construído com os receptores colocados fixos em todos os pontos da malha. As detonações foram realizadas em cada ponto da malha.

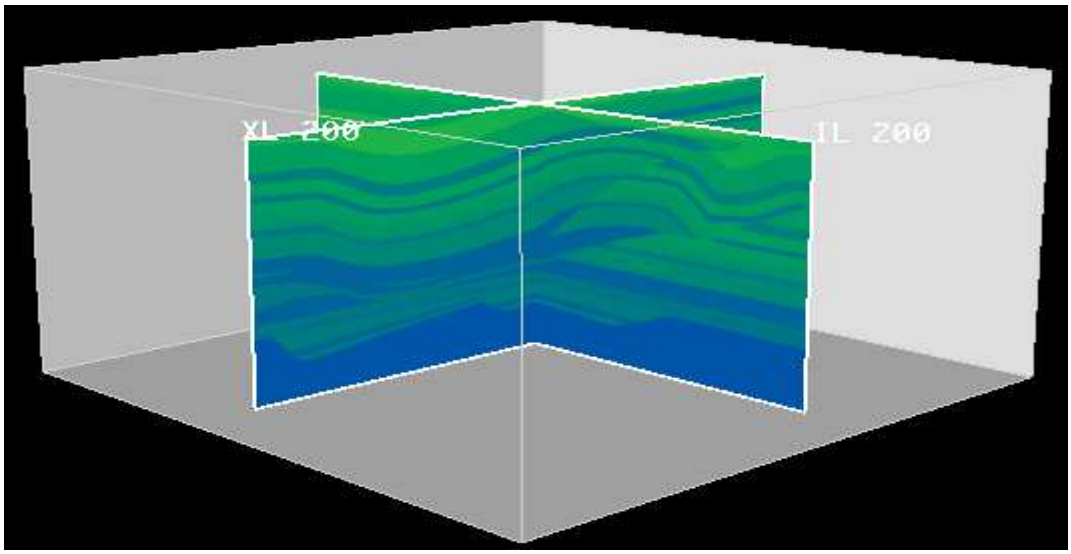


Figura 5.1 – Modelo de velocidade *Overthrust* (SEG/EAGE) reduzido. Duas linhas de velocidade que se cruzam no meio do modelo. Escala vertical profundidade. Profundidade máxima 4650m

5.3 – A Síntese de frentes de onda

a) Obtenção da família de múltiplas fontes

Uma família de múltiplas fontes foi sintetizada na superfície de observação de tal modo a gerar uma frente de onda 3-D plana e horizontal na profundidade $z = 2500m$, quando propagada para o interior do modelo. A Figura (5.2a) e a Figura (5.2b) mostram cortes verticais do modelo de velocidade, juntamente com o horizonte representativo da função $z = f(x, y)$ e a Figura (5.3) mostra a família de múltiplas fontes que foi obtida. A Figura (5.4a) e a Figura (5.4b) mostram cortes verticais da família de múltiplas fontes que se cruzam no centro do modelo.

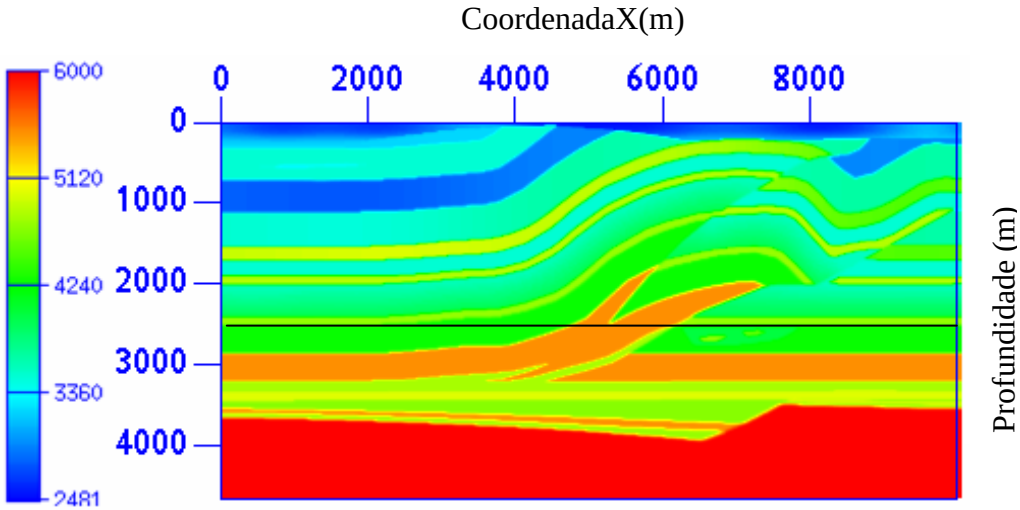


Figura 5.2a – Corte vertical do modelo de velocidade na posição y=5000m.

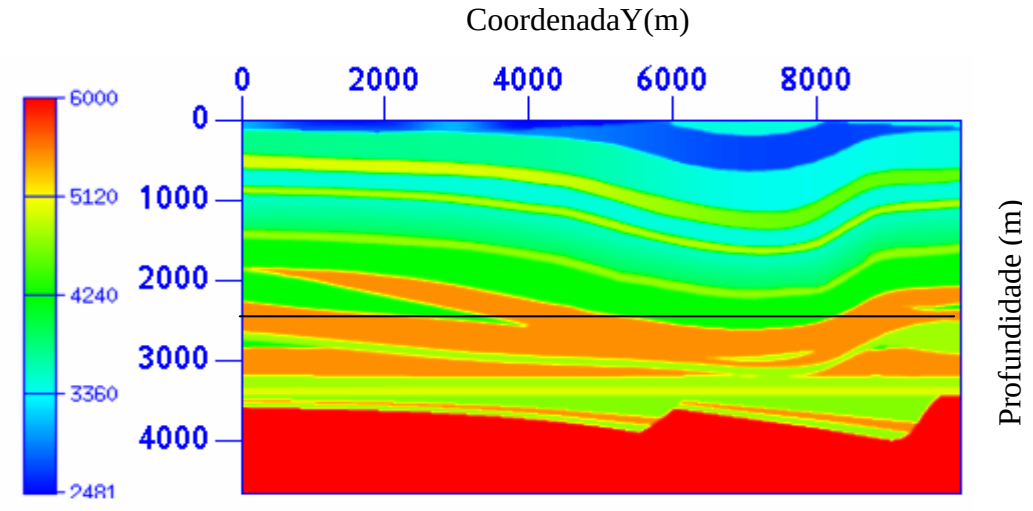


Figura 5.2b – Corte vertical do modelo de velocidade na posição x=5000m.

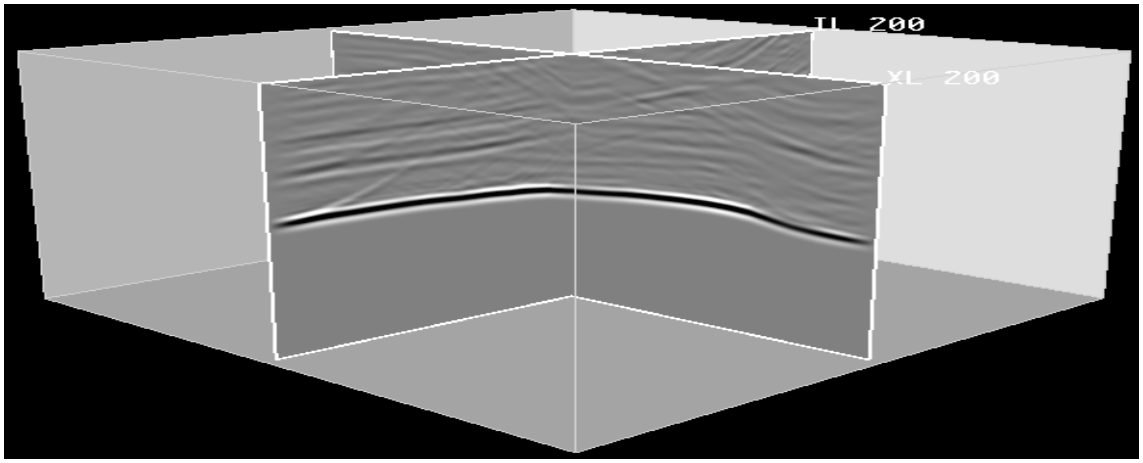


Figura 5.3 – Família de múltiplas fontes sintetizada na superfície de observação para gerar uma frente de onda 3-D plana e horizontal na profundidade $z = 2500m$. A escala vertical é tempo. Tempo máximo 1600ms.

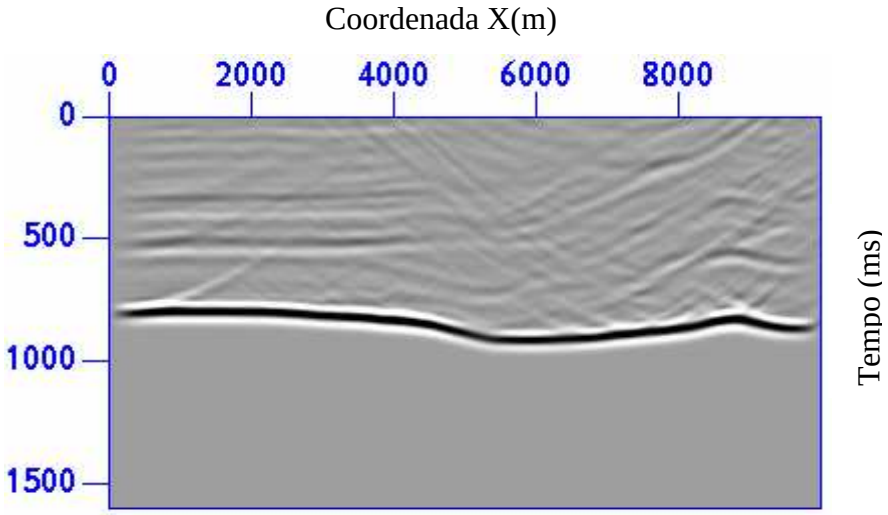


Figura 5.4a – Corte vertical da família de múltiplas fontes na posição y=5000m

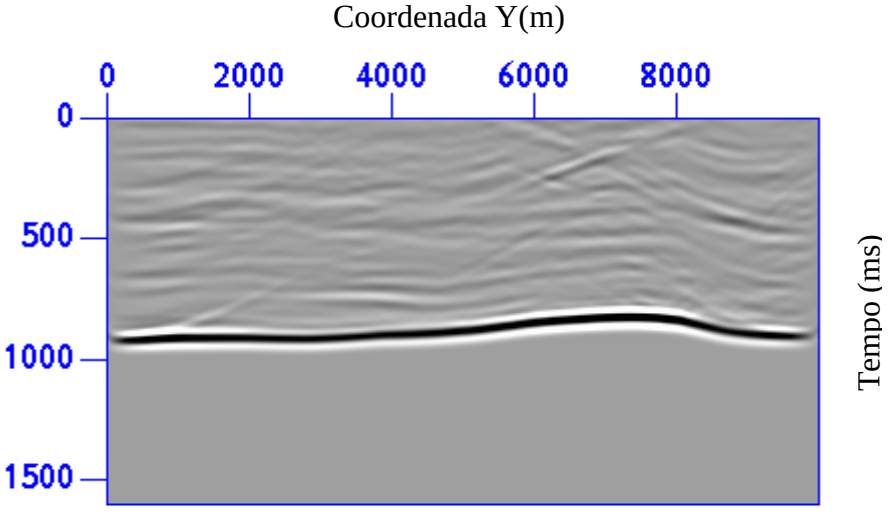


Figura 5.4b - Corte vertical da família de múltiplas fontes na posição x=5000m

c) Obtenção da família de múltiplos tiros

A família de múltiplos tiros foi obtida realizando a convoluçao entre cada traço do operador de síntese com cada sismograma 3-D, seguida do empilhamento no domínio do receptor comum. A Figura (5.5) mostra o cubo correspondente a família de múltiplos tiros. A Figura (5.6a) e a Figura (5.6b) mostram cortes verticais da família de múltiplos tiros que se cruzam no centro do modelo.

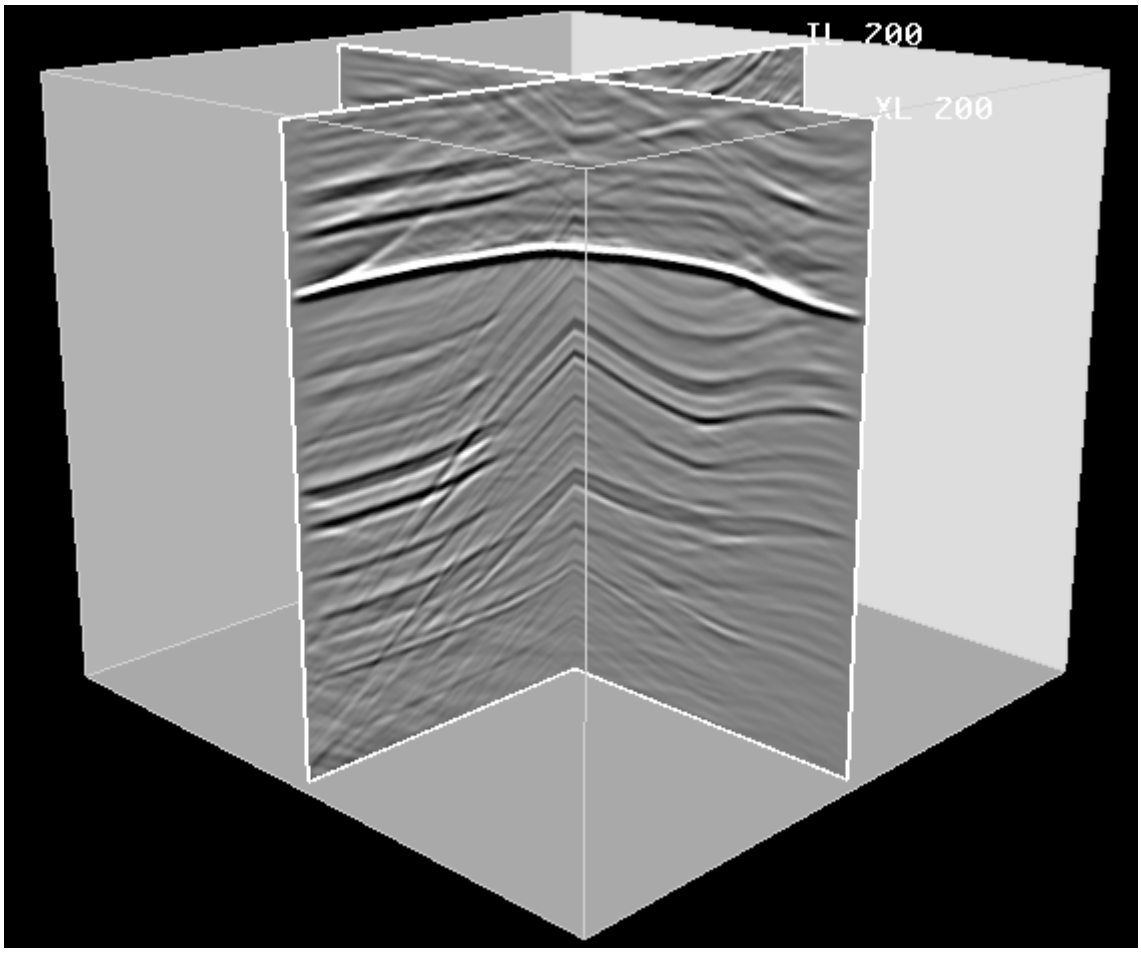


Figura 5.5 – Família de múltiplos tiros. Escala vertical tempo. Tempo máximo 3200ms.

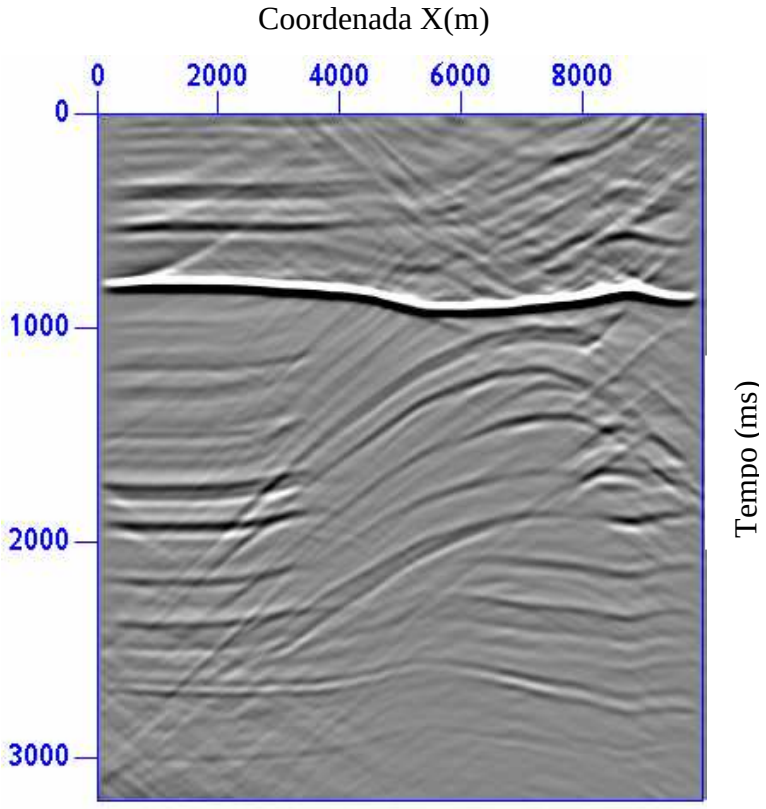


Figura 5.6a – Corte vertical da família de múltiplos tiros na posição y=5000m.

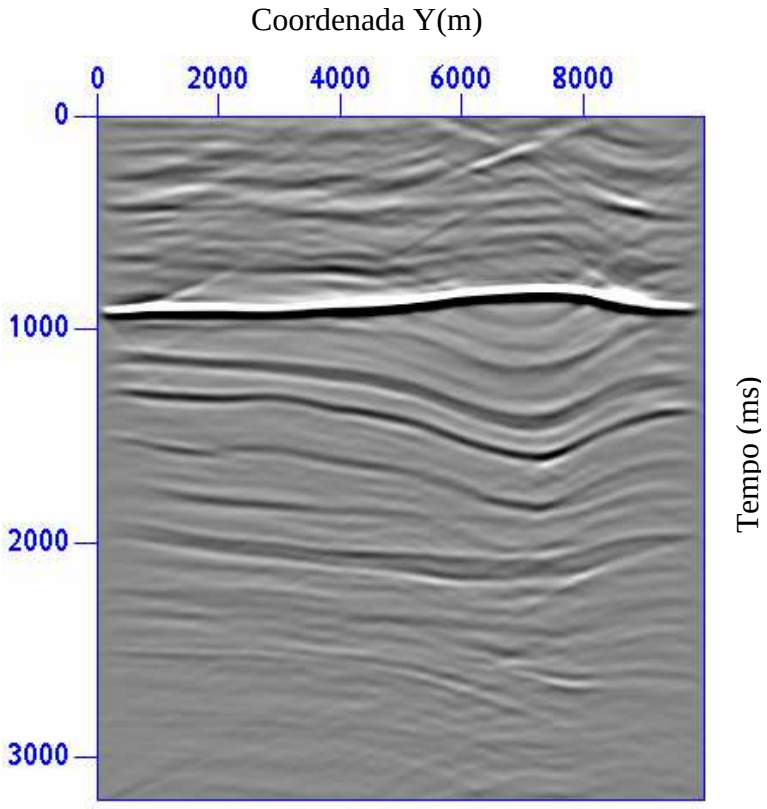


Figura 5.6b – Corte vertical da família de múltiplos tiros na posição x=5000m.

5.4 – Sumário

Foi aplicado o algoritmo de síntese de frentes de onda no modelo 3-D *Overthrust* (SEG/EAGE). Uma família de múltiplas fontes foi sintetizada na superfície de observação para gerar uma frente de onda plana e horizontal na profundidade $z = 2500m$, quando propagada para o interior do modelo. Pode ser observado que a síntese de frente de onda reduz a quantidade de traços do levantamento a de um volume empilhado.

Para o tipo de geometria de aquisição que foi construída, a família de múltiplos tiros foi obtida através do empilhamento no domínio do receptor comum considerando todos os azimutes presentes nos dados, não privilegiando nenhuma direção. A família de múltiplos tiros obtida não apresentou nenhum problema de *alias*.

As fontes na superfície de observação podem também ser sintetizadas para gerar frentes de onda em subsuperfície no ângulo de incidência de interesse. Para cada família de múltiplas fontes obtida deve ser gerada a respectiva família de múltiplos tiros.

6 – MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO 3-D ORIENTADA AO ALVO

6.1 - Introdução

A migração reversa no tempo convencional é um algoritmo que é baseado na equação completa da onda sem aproximação de Born. O algoritmo aceita qualquer variação lateral de velocidade e não impõe limitação quanto aos mergulhos das camadas. Neste algoritmo cada sismograma é migrado individualmente e a seção final é obtida pelo empilhamento de todos os sismogramas migrados.

A migração reversa no tempo convencional de um sismograma consiste na propagação direta do campo de onda da fonte, propagação reversa no tempo do sismograma e aplicação de uma condição de imagem. Em comparação com os demais algoritmos existentes, a migração reversa no tempo exige um enorme esforço computacional, principalmente para dados sísmicos 3-D, onde o número de tiros a serem migrados é muito grande.

Visando a redução do custo e tempo computacional da migração reversa no tempo convencional foi apresentada nesta tese uma nova formulação da migração reversa no tempo 3-D orientada ao alvo que é baseada na equação acústica completa da onda. O algoritmo proposto será implementado com a condição de imagem de tempo de excitação baseada no critério de amplitude máxima (LOEWENTHAL e HU, 1991, BOTELHO e STOFFA, 1988).

6.2 – Formulação

A migração reversa no tempo orientada ao alvo utiliza o algoritmo de síntese de frentes de onda que foi apresentada no capítulo 3. Através do algoritmo de síntese de frentes de onda famílias de múltiplas fontes e famílias de múltiplos tiros são obtidas na superfície de observação, cujas expressões matemáticas foram mostradas nas equações (3.9) e (3.10), respectivamente. As famílias de múltiplas fontes quando propagadas para o interior do modelo gera, nas proximidades da região de interesse de imageamento, frentes de onda de forma pré-definidas.

Suponha que uma família de múltiplas fontes $d_l(x, y, z = z_{obs}, t)$ e uma família de múltiplos tiros $\tilde{u}_l(x, y, z = z_{obs}, t)$ tenham sido obtidas na superfície de observação. A migração reversa no tempo orientada ao alvo envolve a propagação direta em tempo da família de múltiplas fontes (p_{inc}), propagação reversa no tempo da família de múltiplos tiros (p_{ref}) e aplicação de uma condição de imagem para a formação da imagem em profundidade. A imagem migrada em profundidade pode ser obtida através das seguintes definições já apresentadas no capítulo 2:

$$M_l(i, j, k) = p_{ref}(i, j, k, t = TD(i, j, k)), \tag{6.1}$$

$$M_l(i, j, k) = \frac{p_{ref}(i, j, k, t = TD(i, j, k))}{p_{inc}(i, j, k, t = TD(i, j, k))}, \tag{6.2}$$

$$M_l(i, j, k) = \sum_{t=0}^{T_{Final}} p_{ref}(i, j, k, t)\, p_{inc}(i, j, k, t), \tag{6.3}$$

$$M_l(i, j, k) = \frac{\sum_{t=0}^{T_{Final}} p_{ref}(i, j, k, t)\, p_{inc}(i, j, k, t)}{\sum_{t=0}^{T_{Final}} p_{inc}(i, j, k, t)\, p_{inc}(i, j, k, t)}, \tag{6.4}$$

onde $TD(i, j, k)$ é a matriz de tempo de trânsito a cada ponto da malha e T_{Final} é o tempo final de registro.

Nesta tese foi implementado o algoritmo de migração reversa no tempo orientada ao alvo utilizando a equação (6.2). A matriz de tempo de trânsito é obtida considerando a amplitude máxima do campo de onda incidente.

6.2.1 – A propagação direta da família de múltiplas fontes (p_{inc})

A propagação direta da família de múltiplas fontes (p_{inc}) para o interior do modelo é realizada através da equação da onda não-homogênea:

$$\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial z^2}-\frac{1}{c^2(x,y,z)}\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial t^2}=$$

$$\sum_{sy=1}^{N_{s_y}}\sum_{sx=1}^{N_{s_x}} s(t)\delta(x-x_{sx})\delta(y-y_{sy})\delta(z-z_{obs})*\gamma(x_{sx},y_{sy},z=z_{obs},t)=d_l(x,y,z=z_{obs},t).$$

(6.5)

Na solução da equação (6.5) são consideradas as seguintes condições iniciais:

$$u(x,y,z,t)=0 \quad \text{para } t\le 0\,, \tag{6.6}$$

$$\dot{u}(x,y,z,t)=0 \quad \text{para } t\le 0\,, \tag{6.7}$$

onde $\dot{u}(x,y,z,t)$ significa a derivada temporal do campo de pressão.

Na equação (6.5) é também aplicada a condição de contorno de Dirichlet que considera o campo de pressão nulo na superfície $z=0$, ou seja:

$$u(x,y,z=0,t)=0\,. \tag{6.8}$$

A equação (6.5) discretizada pelo método das diferenças finitas, com aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para a derivada temporal foi apresentada na equação (3.7), cuja expressão matemática é:

$$u_{i,j,k}^{n+1}=-\frac{1}{12}a_{i,j,k}\left\{\left(u_{i-2,j,k}^{n}+u_{i+2,j,k}^{n}+u_{i,j-2.k}^{n}+u_{i,j+2,k}^{n}+u_{i,j,k-2}^{n}+u_{i,j,k+2}^{n}\right)\right.$$

$$\left.-16\left(u_{i-1,j,k}^{n}+u_{i+1,j,k}^{n}+u_{i,j-1,k}^{n}+u_{i,j+1,k}^{n}+u_{i,j,k-1}^{n}+u_{i,j,k+1}^{n}\right)+90u_{i,j,k}^{n}\right\}$$

$$+2u_{i,j,k}^{n}-u_{i,j,k}^{n-1}+\ d_l^{\,n}(i,j,k=k_{obs})\,, \tag{6.9}$$

onde $a_{i,j,k} = \left(\frac{c_{i,j,k} \Delta t}{h} \right)^2$.

Durante a propagação direta da família de múltiplas fontes (p_{inc} **)** pela equação (6.9), o tempo de trânsito a cada ponto da malha é calculado considerando a amplitude máxima da frente de onda. Neste processo, as matrizes de tempo de trânsito $TD(i, j, k)$ e de amplitude máxima $A(i, j, k)$ são geradas. O pseudocódigo para o cálculo da matriz de tempo de trânsito e de amplitude máxima pode ser apresentado na forma:

Para cada tempo n
Para todos os pontos (i, j, k) *da malha*
$TD(i, j, k)$ e $A(i, j, k)$ não alteram
Se $|u(i, j, k)| \leq A(i, j, k)$.
$TD(i, j, k) = n$ e $A(i, j, k) = |u(i, j, k)|$,
Se $|u(i, j, k)| > A(i, j, k)$.
Fim todos os pontos
Fim tempo n

6.2.2 – A propagação reversa no tempo da família de múltiplos tiros (p_{ref})

A propagação reversa no tempo da família de múltiplos tiros (p_{ref} **)** é realizada através da equação da onda homogênea:

$$\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2(x,y,z)} \frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial t^2} = 0 \qquad (6.10)$$

com a família de múltiplos tiros como condição de contorno na superfície:

$$u(x, y, z = z_{obs}, t) = \sum_{sy=1}^{N_{sy}} \sum_{sx=1}^{N_{sx}} \gamma(x_{sx}, y_{sy}, z = z_{obs}, t) * sis(x, y, z = z_{obs}, t; x_{sx}, y_{sy}) . \qquad (6.11)$$

A equação (6.10) discretizada pelo método das diferenças finitas pode ser obtida da equação (6.9) desconsiderando o termo fonte, ou seja:

$$u_{i,j,k}^{n-1} = -\frac{1}{12} a_{i,j,k} \left\{ \left(u_{i-2,j,k}^{n} + u_{i+2,j,k}^{n} + u_{i,j-2.k}^{n} + u_{i,j+2,k}^{n} + u_{i,j,k-2}^{n} + u_{i,j,k+2}^{n} \right) \right.$$

$$\left. -16\left(u_{i-1,j,k}^{n} + u_{i+1,j,k}^{n} + u_{i,j-1,k}^{n} + u_{i,j+1,k}^{n} + u_{i,j,k-1}^{n} + u_{i,j,k+1}^{n} \right) + 90 u_{i,j,k}^{n} \right\} + 2u_{i,j,k}^{n} - u_{i,j,k}^{n+1} . \quad (6.12)$$

A propagação reversa no tempo da família de múltiplos tiros é realizada desde o tempo final de registro T_{Final} até o instante inicial zero.

Se forem geradas $N_{Famílias}$ famílias de múltiplos tiros cada uma é migrada e a imagem final em profundidade é formada pelo empilhamento de todas as imagens individuais, ou seja:

$$M(i,j,k) = \sum_{l=1}^{N_{Famílias}} M_l(i,j,k). \quad (6.13)$$

A Figura (6.1) apresenta o fluxograma para a migração reversa no tempo 3-D orientada ao alvo, para certa uma família de múltiplos tiros, utilizando a condição de imagem de tempo de excitação baseada no critério de amplitude máxima. Neste fluxograma foi considerado que a família de múltiplas fontes e a família de múltiplos tiros foram geradas com o algoritmo apresentado no capítulo 3.

Como na modelagem sísmica apresentada no Apêndice A, no algoritmo de migração reversa no tempo 3-D orientada ao alvo são usadas condições de contorno não-reflexivas nas faces laterais e camadas de amortecimento para evitar reflexões indesejáveis. As equações (A.14) e (A.15) devem ser respeitadas para evitar a dispersão numérica e garantir a estabilidade do algoritmo.

6.3 - Sumário

Visando reduzir o tempo de execução e custo da migração reversa no tempo convencional foi apresentado um novo algoritmo de migração reversa no tempo (RTM-*Reverse Time Migration*) 3-D orientada ao alvo para meios acústicos. No algoritmo famílias de múltiplas fontes são sintetizadas na superfície de observação de tal modo a incidirem em subsuperfície com forma pré-definida. As respectivas famílias de múltiplos tiros são também obtidas através de operadores de síntese apropriados. As famílias de múltiplos tiros são migradas e empilhadas para gerar um volume em profundidade.

No algoritmo proposto foi utilizada a condição de imagem de tempo de excitação baseada no critério de amplitude máxima, uma vez que na região de interesse de imageamento as frentes de onda têm formas pré-definidas, ou seja, existe apenas uma única chegada da frente de onda.

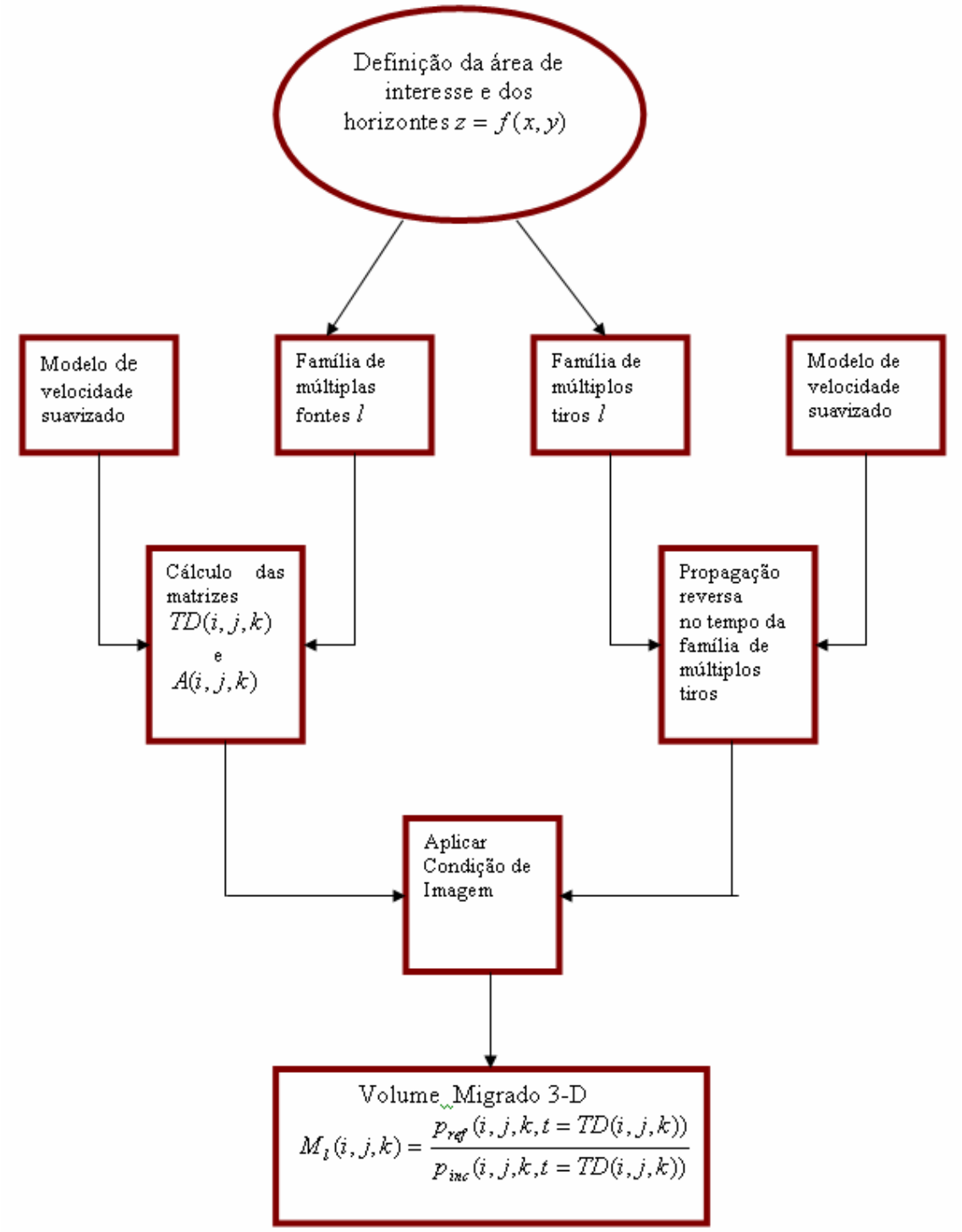


Figura 6.1 - Fluxograma para a migração reversa no tempo 3-D orientada ao alvo para a família de múltiplos tiros l.

7- APLICAÇÕES DA MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO ORIENTADA AO ALVO: 1ª PARTE CASOS 2-D

7.1 – Introdução

Neste capítulo será aplicado o algoritmo de migração reversa no tempo orientada ao alvo ao modelo sintético *Marmousi* (VERSTEEG e GRAU, 1991) e ao modelo *Salt Dome* (SEG/EAGE). Os modelos *Marmousi* e *Salt Dome* representam um grande desafio para os algoritmos de migração pré-empilhamento e inversão, uma vez que as áreas de interesse geológico se localizam abaixo de camadas muito complexas.

7.2 – Aplicação 1 – Modelo *Marmousi*

7.2.1 – Modelagem dos dados

Foram gerados 2301 sismogramas no modelo mostrado na Figura (7.1). Os parâmetros usados no algoritmo de modelagem sísmica foram os mesmos mencionados na aplicação do capítulo 2.

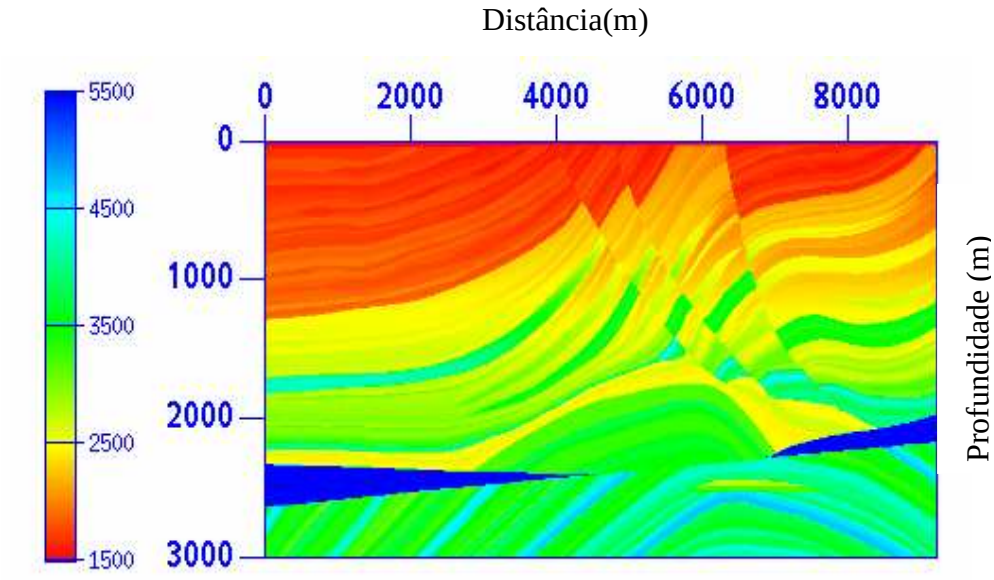


Figura 7.1 – Modelo de velocidade *Marmousi*

7.2.2 – A migração reversa no tempo orientada ao alvo

No Modelo *Marmousi* foram sintetizadas 13 famílias de múltiplas fontes para incidirem com determinados ângulos na profundidade $z = 2400\,\text{m}$. Para cada família de múltiplas fontes foi gerada a respectiva família de múltiplos tiros. Todas as famílias de múltiplos tiros foram migradas e empilhadas para obter uma seção final em profundidade.

a) Migração de uma família de múltiplos tiros - família de múltiplas fontes foi sintetizada para incidir com zero grau na profundidade $z = 2400\,\text{m}$

- Obtenção da família de múltipas fontes

As fontes sísmicas, sobre o horizonte na profundidade z=2400m, foram detonadas simultaneamente formando uma frente de onda que foi propagada até a superfície, gerando a família de múltiplas fontes (Figura (7.2)). Pelo fato do modelo *Marmousi* ser bastante complexo, nota-se que a frente de onda associada à família de múltiplas fontes é também bastante complexa.

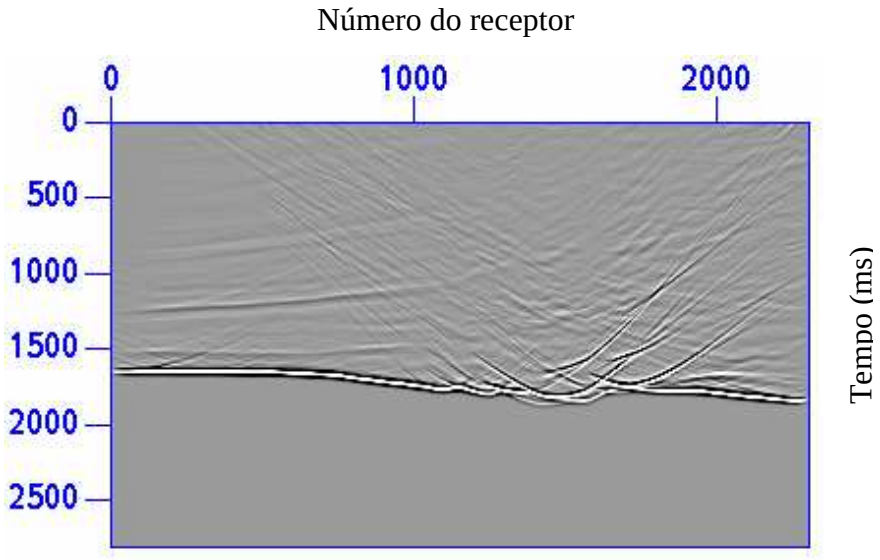


Figura 7.2– Família de múltiplas fontes gerada para incidir com ângulo de zero grau na profundidade z=2400m.

A família de múltiplas fontes foi propagada para o interior do modelo utilizando a equação (3.5). A seqüência de instantâneos na Figura (7.3) mostra as diferentes posições da frente de onda no modelo. A família de múltiplas fontes no início do modelo apresenta uma forma bem complexa, mas à medida que se aproxima da profundidade z=2400m torna-se plana e horizontal, ou seja, a forma pré-definida.

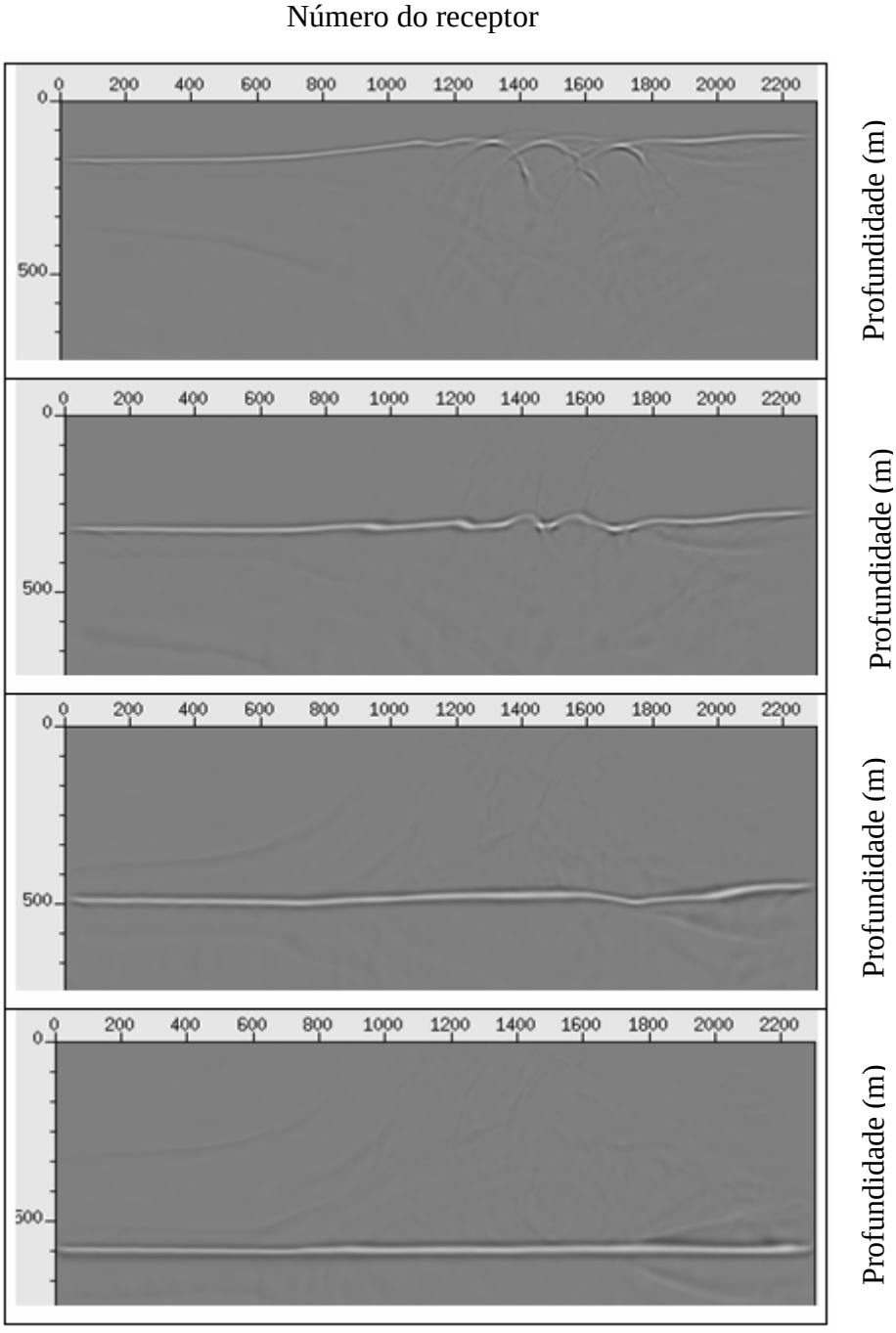


Figura 7-3 – Instantâneos da propagação da família de múltiplas fontes. A profundidade é obtida multiplicando o eixo z por 4m.

- Obtenção da família de múltiplos tiros

A convolução do operador de síntese com cada sismograma seguida do empilhamento no domínio do receptor comum gerou a família de múltiplos tiros (Figura (7.4)).

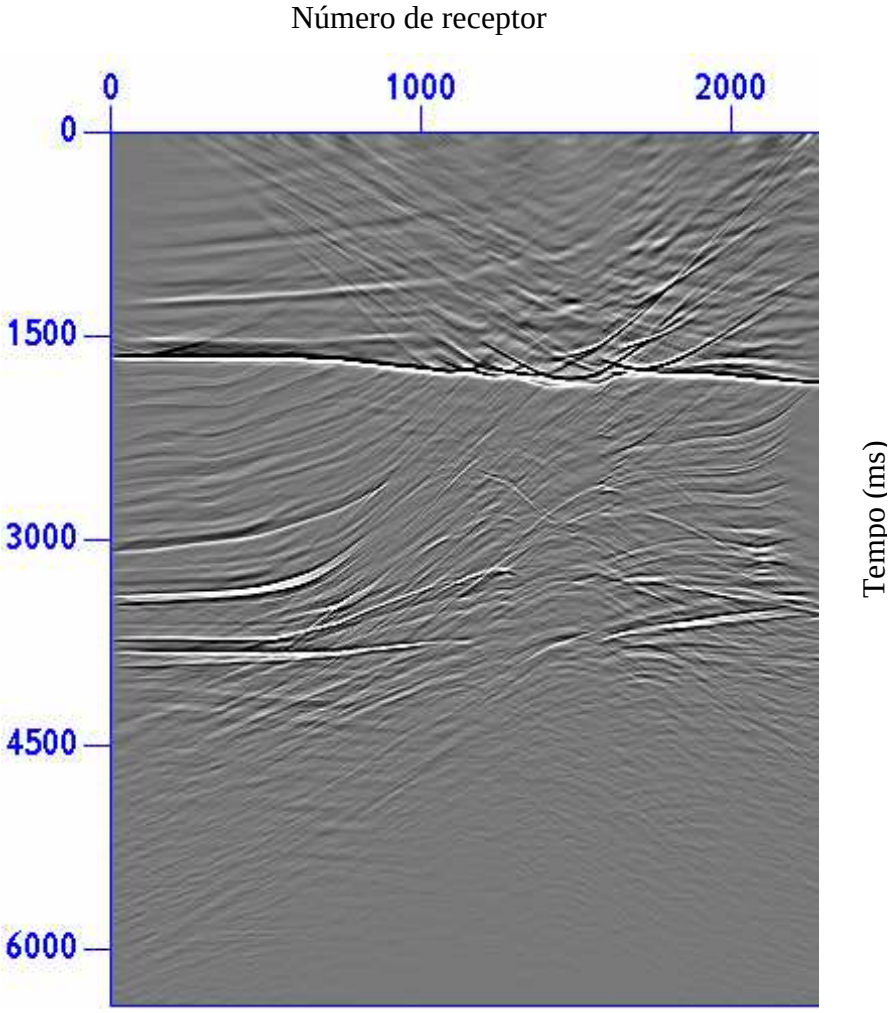


Figura 7.4- Família de múltiplos tiros correspondente a família de múltiplas fontes que incide com ângulo de zero grau na profundidade z=2400m.

- Cálculo das matrizes de tempo de trânsito e amplitude máxima

Durante a propagação direta da família de múltiplas fontes, para o interior do modelo, foi obtida a matriz de tempo de trânsito baseada no critério de amplitude

máxima da frente de onda. Durante a propagação direta também foi gerada a matriz de amplitude máxima da frente de onda.

Através da observação dos instantâneos mostrados na Figura (7.3), pode ser observado que os tempos de trânsito obtidos com base no critério de amplitude máxima é um excelente critério um vez que a energia do campo incidente, na região de interesse de imageamento, está concentrada na frente de onda. Na propagação do campo incidente pode-se observar também que a energia da frente de onda é muito maior do que a das ondas secundárias, ou seja, observa-se apenas uma única chegada. A Figura (7.5) mostra a matriz de tempo de trânsito obtida durante a propagação direta do campo da família de múltiplas fontes.

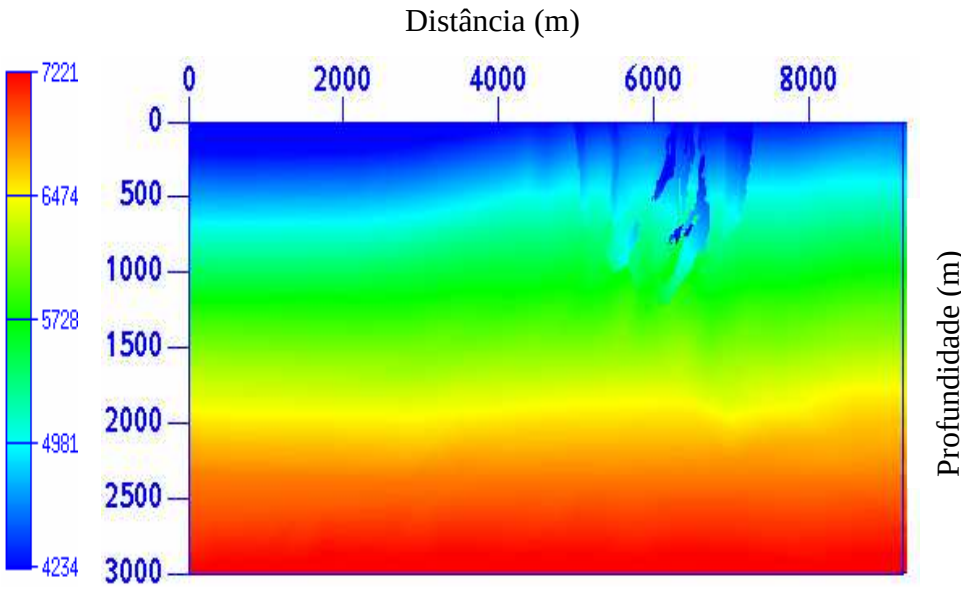


Figura 7.5 – Matriz de tempo de trânsito obtida da propagação direta da família de múltiplas fontes.

- Seção migrada em profundidade

A seção migrada, mostrada na Figura (7.6), é obtida por propagar de forma reversa no tempo a família de múltiplos tiros e aplicar a condição de imagem. Comparando a imagem em profundidade com o modelo de velocidade, pode ser observado que com apenas a migração de uma família de múltiplos tiros o modelo foi reconstituído. Na região de interesse de imageamento pode ser visto com nitidez as reflexões correspondentes ao topo e a base do reservatório.

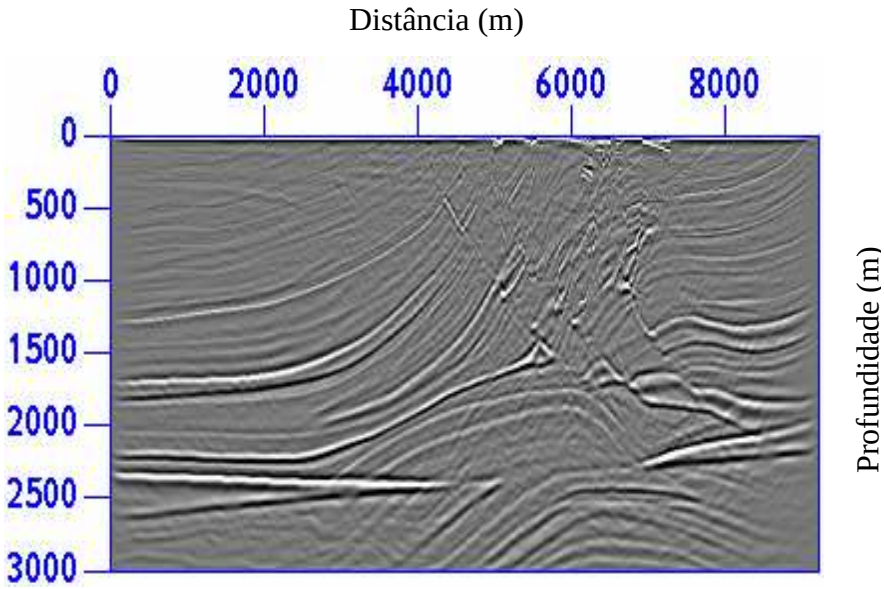


Figura 7.6 – Seção migrada que corresponde a uma família de múltiplas fontes que incide com zero grau na profundidade z=2400m.

b) Migração de uma família de múltiplos tiros - família de múltiplas fontes foi sintetizada para incidir com cinco graus na profundidade $z = 2400\,\mathrm{m}$

A família de múltiplas fontes foi sintetizada na superfície de observação de modo a gerar, na profundidade z=2400m, uma frente de onda com 5 graus de incidência. As Figuras (7.7) a (7.10) mostram a família de múltiplas fontes, a família de múltiplos tiros, a matriz de tempo de trânsito e a seção migrada.

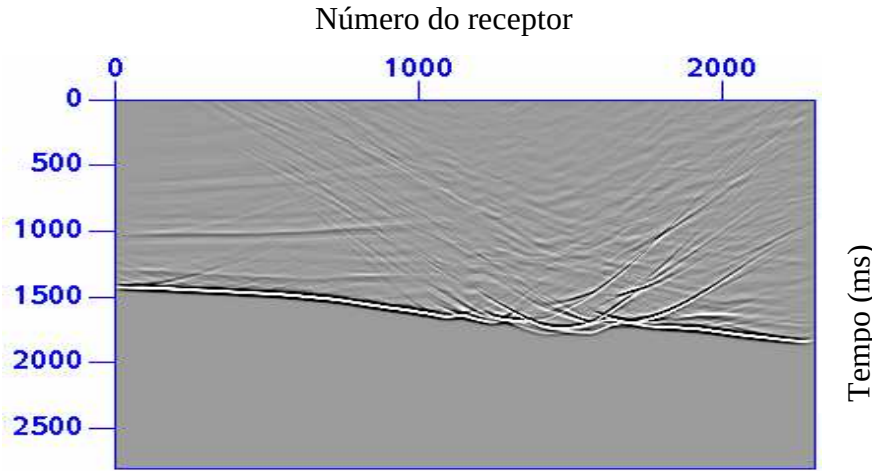


Figura 7.7 - Família de múltiplas fontes para uma incidência de 5 graus na profundidade z=2400m.

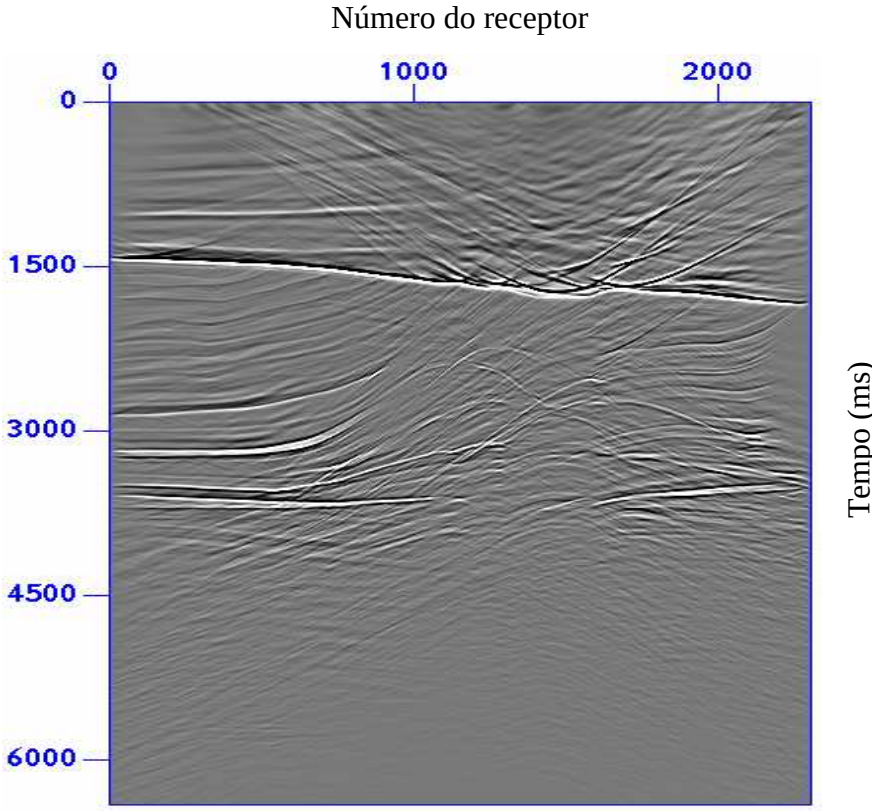


Figura 7.8 – Família de múltiplos tiros para incidência de 5 graus na profundidade z=2400m.

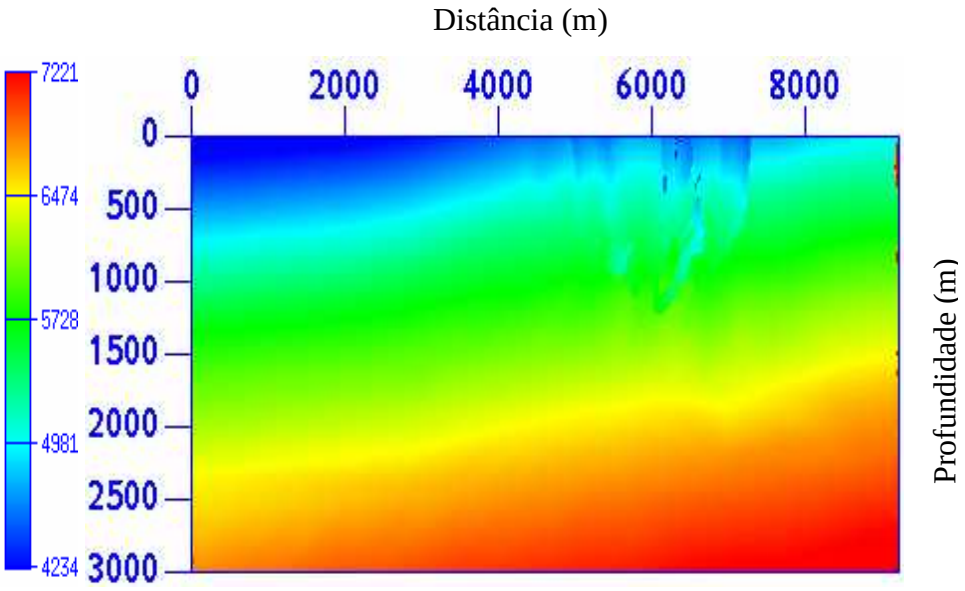


Figura 7.9 – Matriz de tempo de trânsito

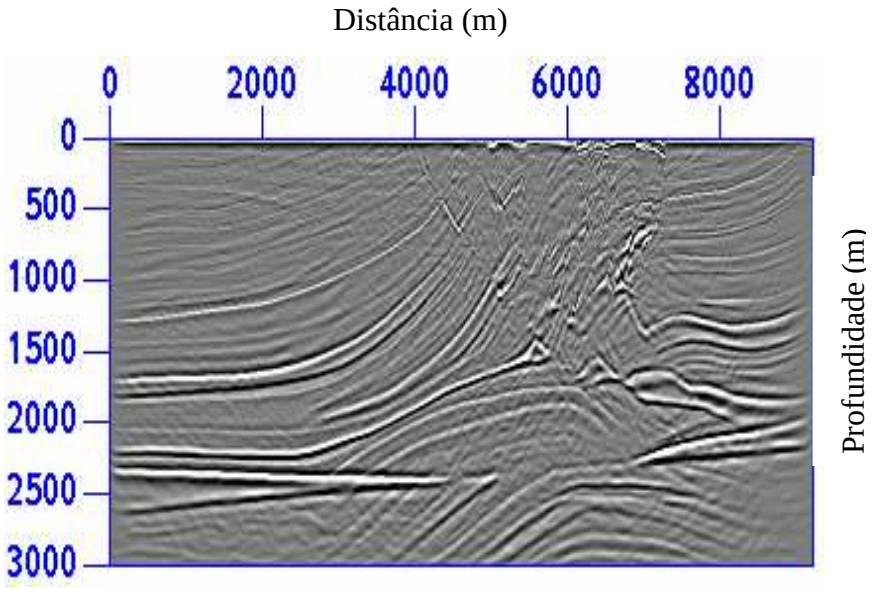


Figura 7.10 – Seção migrada que corresponde a uma família de múltiplas fontes que incide com cinco graus na profundidade z=2400m

c) Migração de 13 famílias de múltiplos tiros

Foram geradas 13 famílias de múltiplos tiros cujos operadores de síntese foram obtidos através de horizontes previamente definidos em subsuperfície como mostrado na Figura (7.11). As famílias de múltiplos tiros foram migradas e empilhadas para gerar a seção final. Foi realizado o empilhamento com 7 famílias e 13 famílias migradas (Figura (7.12)). Comparando os resultados dos empilhamentos das seções migradas, pode ser observado que o empilhamento com 7 seções foi equivalente ao com 13 seções. A Figura (7.13) mostra um *zoom* do resultado da migração com 7 famílias de múltiplos tiros e o modelo de velocidade na área do reservatório.

Na Figura (7.12) também é mostrado o resultado obtido com a migração reversa no tempo convencional que foi realizada no capítulo 2, onde foram migrados 2301 sismogramas. Comparando os resultados pode-se observar que com a migração de apenas 7 famílias múltiplos tiros foi suficiente para obter uma imagem em profundidade com qualidade semelhante a obtida com o algoritmo convencional migrando 2301 sismogramas. O tempo de execução da migração de uma família de múltiplos tiros no algoritmo proposto é o mesmo para migrar um único sismograma na migração reversa no tempo convencional. Portanto, como base nesta aplicação, a migração reversa no tempo orientada ao alvo foi cerca de 400 vezes mais rápida que o algoritmo de migração reversa no tempo convencional.

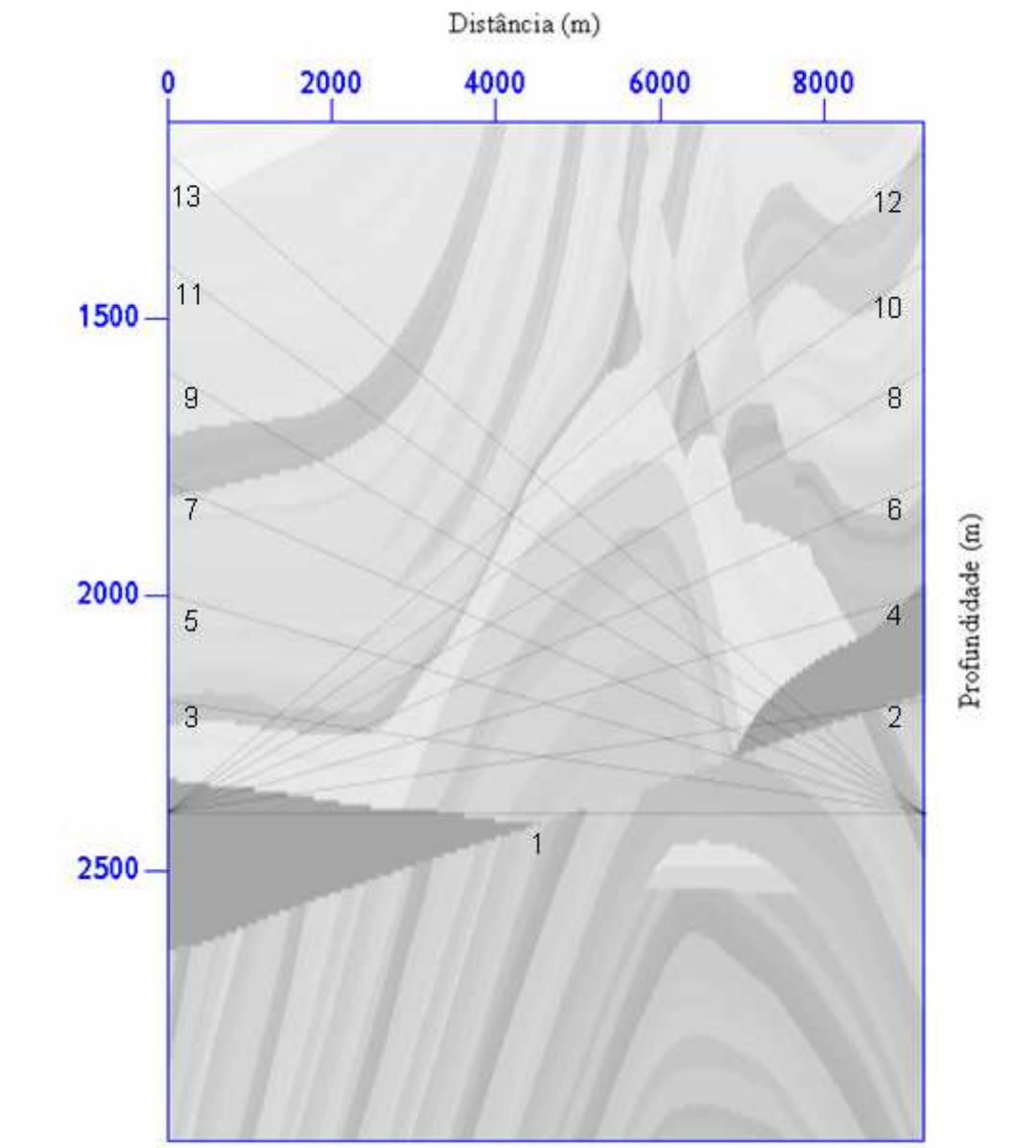


Figura 7.11 – Modelo de velocidade com os horizontes que foram usados para a geração do operador de síntese.

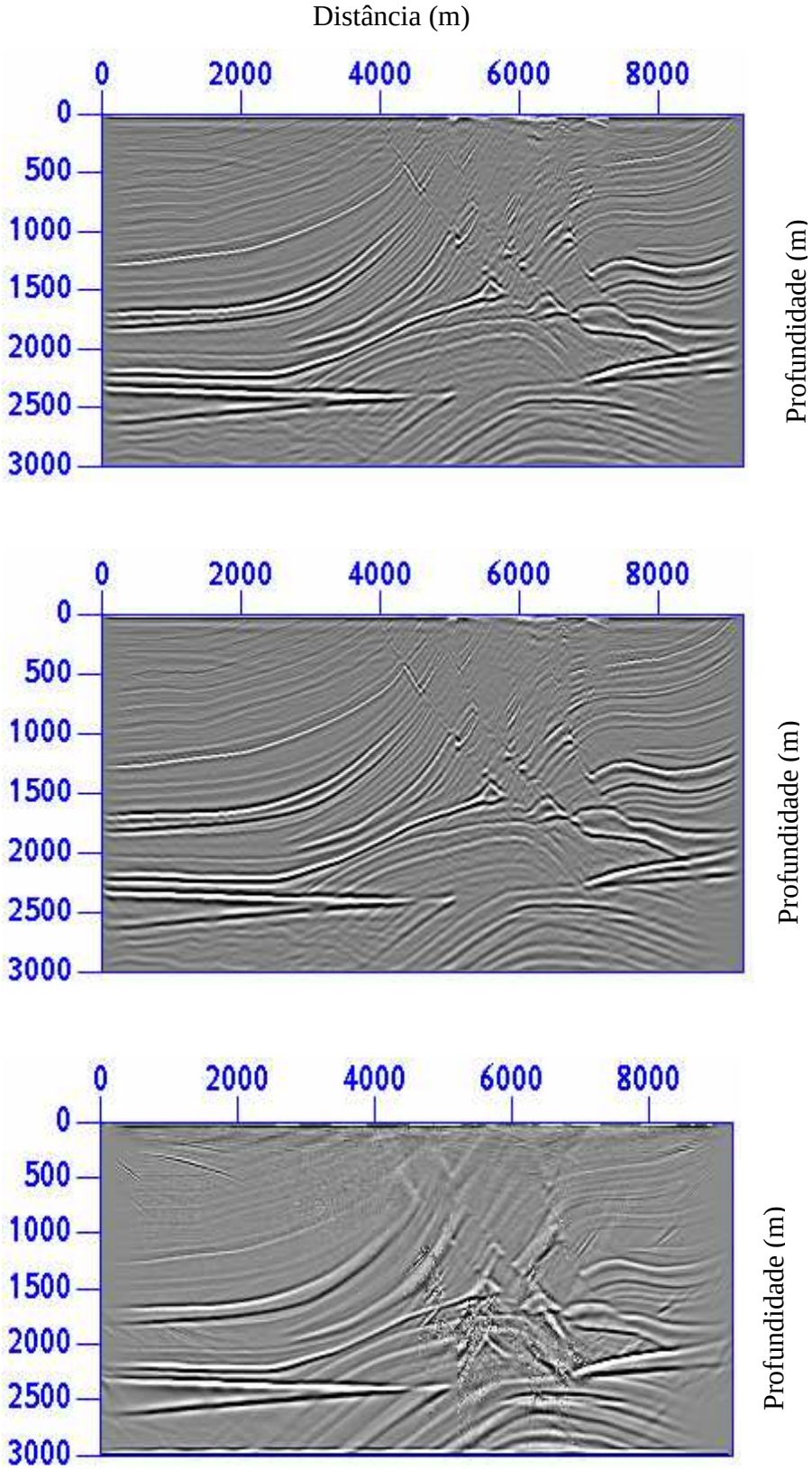
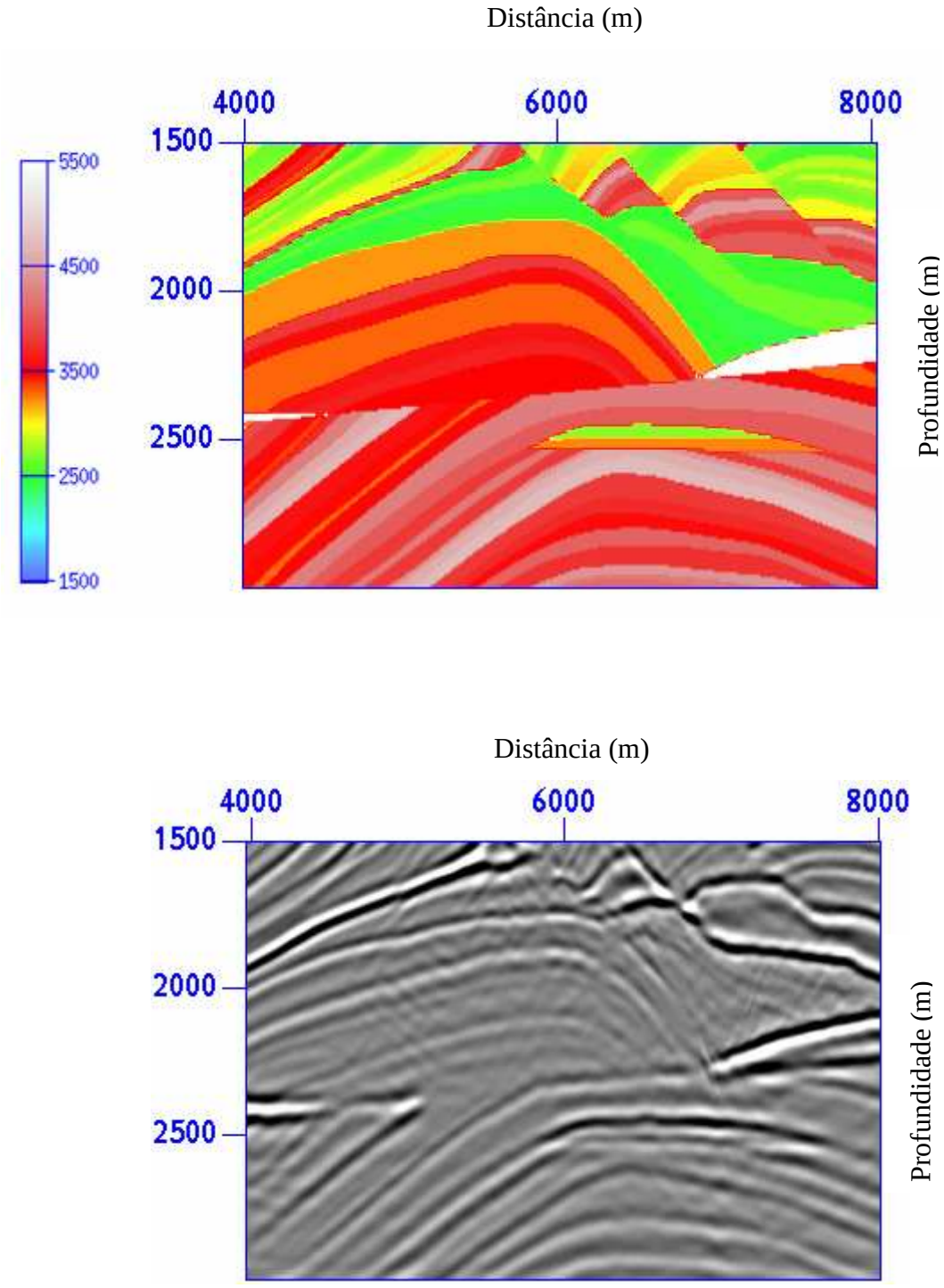


Figura 7.12 Superior: seção migrada com 7 famílias de múltiplos tiros; Meio: seção migrada com 13 famílias de múltiplos tiros; Inferior: seção migrada com o algoritmo convencional de migração reversa no tempo.



7.13 – Superior: *zoom* do modelo de velocidade: Inferior: *zoom* da seção migrada com 7 famílias de múltiplos tiros.

7.3 – Aplicação 2 – Modelo *Salt Dome*

7.3.1 – Modelagem dos dados

Foram gerados 1558 sismogramas no modelo *Salt Dome* exibido na Figura (7.14). Os parâmetros usados na modelagem sísmica foram os mesmos mencionados na aplicação do capítulo 4.

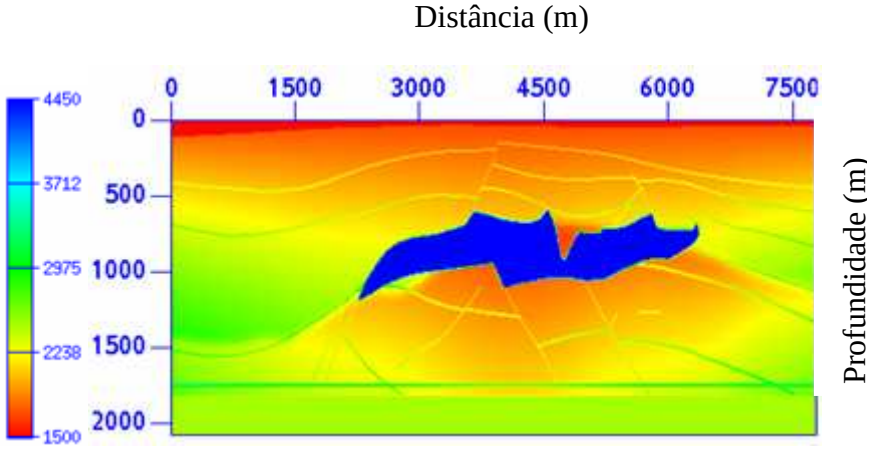


Figura 7.14 – Modelo de velocidade *Salt Dome*

7.3.2 – A migração reversa no tempo orientada ao alvo

A região de interesse de imageamento se localiza abaixo do domo de sal. No modelo *Salt Dome* foram sintetizadas 7 famílias de múltiplas fontes para incidirem com determinados ângulos na profundidade z=1500m. Os horizontes para encontrar os operadores de síntese estão mostrados na Figura (7.17) (Topo). Para cada família de múltiplas fontes foi gerada a respectiva família de múltiplos tiros e migrada. Todas as famílias de múltiplos tiros migradas foram empilhadas para obter a imagem final em profundidade.

a) Migração das famílias de múltiplos tiros

A Figura (7.15) mostra a família de múltiplas fontes, a famílias de múltiplos tiros, a matriz de tempo de trânsito e a imagem migrada. A família de múltiplas fontes foi sintetizada para incidir com zero grau na profundidade z=1500. Na Figura (7.16) a família de múltiplas fontes incide com 5 graus na mesma profundidade. Devido a

complexidade geológica do modelo pode-se perceber na família de múltiplas fontes as várias chegadas da frente de onda.

b) **Imagem final em profundidade**

Foi realizado o empilhamento das 7 famílias de múltiplos tiros migradas como está mostrado na Figura (7.17). Comparando a imagem em profundidade com o modelo de velocidade pode-se observar que o contorno do domo de sal e os refletores abaixo e acima do mesmo foram bem imageados, ou seja, o modelo geológico foi reconstituído.

7.4 - Sumário

Foi aplicado o algoritmo de migração reversa tempo orientada ao alvo em dados sintéticos que apresentam uma grande complexidade geológica (Modelo *Marmousi e Salt Dome*). Nos dois modelos o empilhamento de 7 famílias de múltiplos tiros migradas foi suficiente para gerar uma imagem em profundidade que reconstituiu de forma satisfatória as interfaces do modelo geológico.

No modelo *Marmousi* a imagem obtida com o algoritmo proposto e com o algoritmo de migração reversa no tempo convencional foram bastante semelhantes. O topo e a base do reservatório foram imageados com nitidez. Comparando os tempos de execução (modelo *Marmousi)* foi constatado que houve uma redução de cerca de 400 vezes no tempo de execução da migração reversa no tempo orientada ao alvo em relação à migração reversa no tempo convencional.

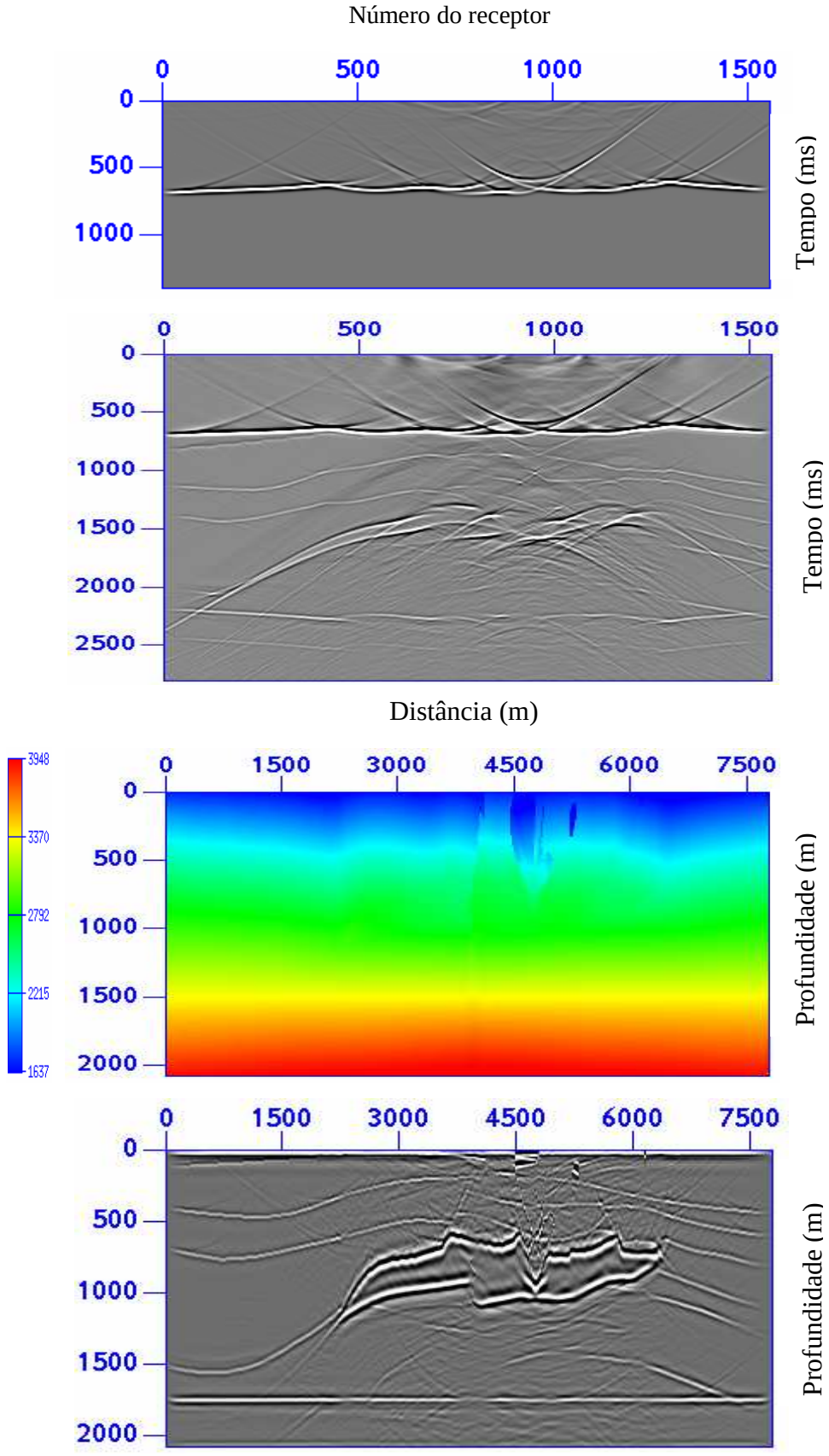


Figura 7.15 – De cima para baixo: Família de múltiplas fontes; família de múltiplos tiros; matriz de tempo de trânsito; imagem migrada. A família de múltiplas fontes incide com zero grau na profundidade z=1500m.

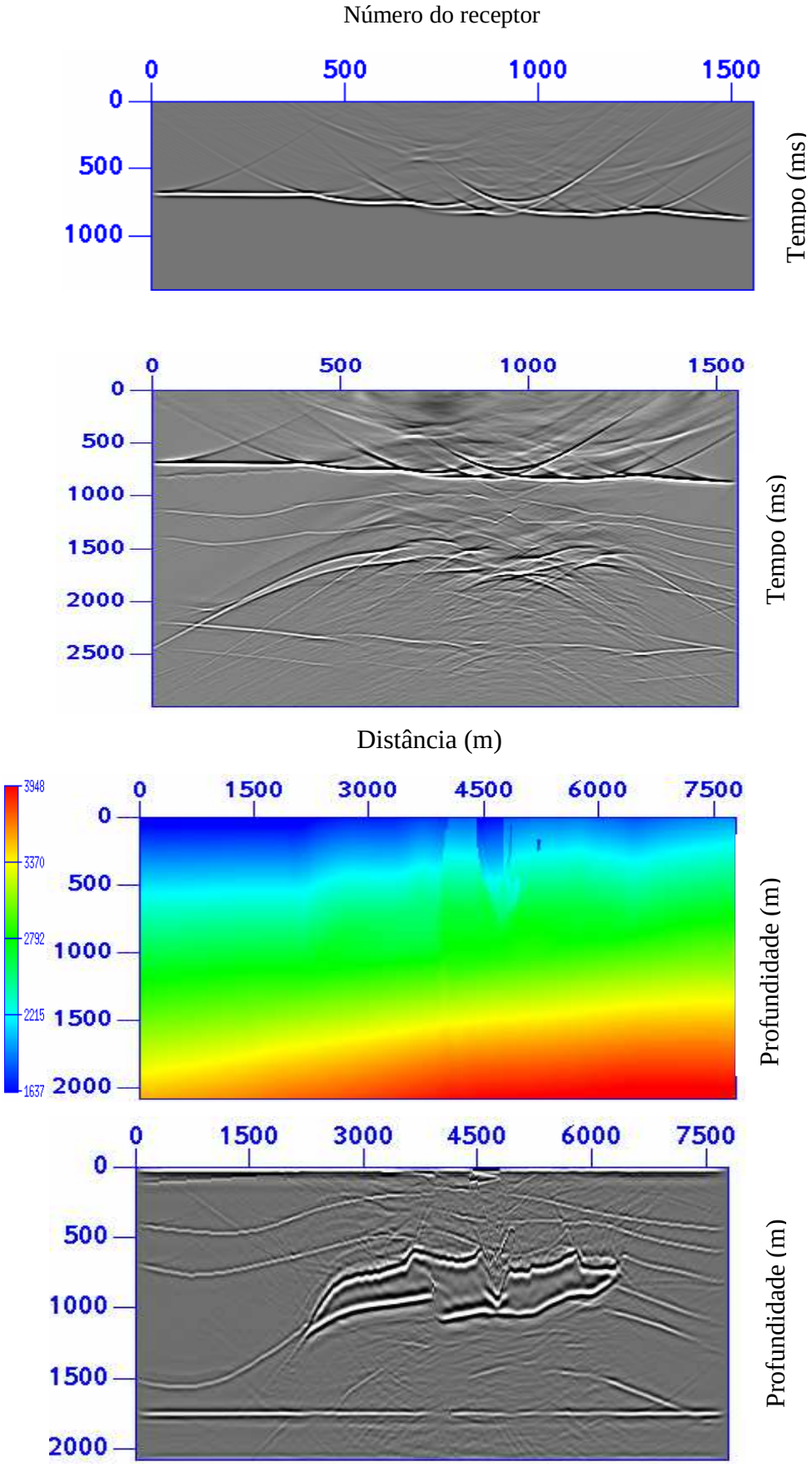


Figura 7.16 – De cima para baixo: Família de múltiplas fontes; família de múltiplos tiros; matriz de tempo de trânsito; imagem migrada. A família de múltiplas fontes incide com cinco graus na profundidade z=1500m.

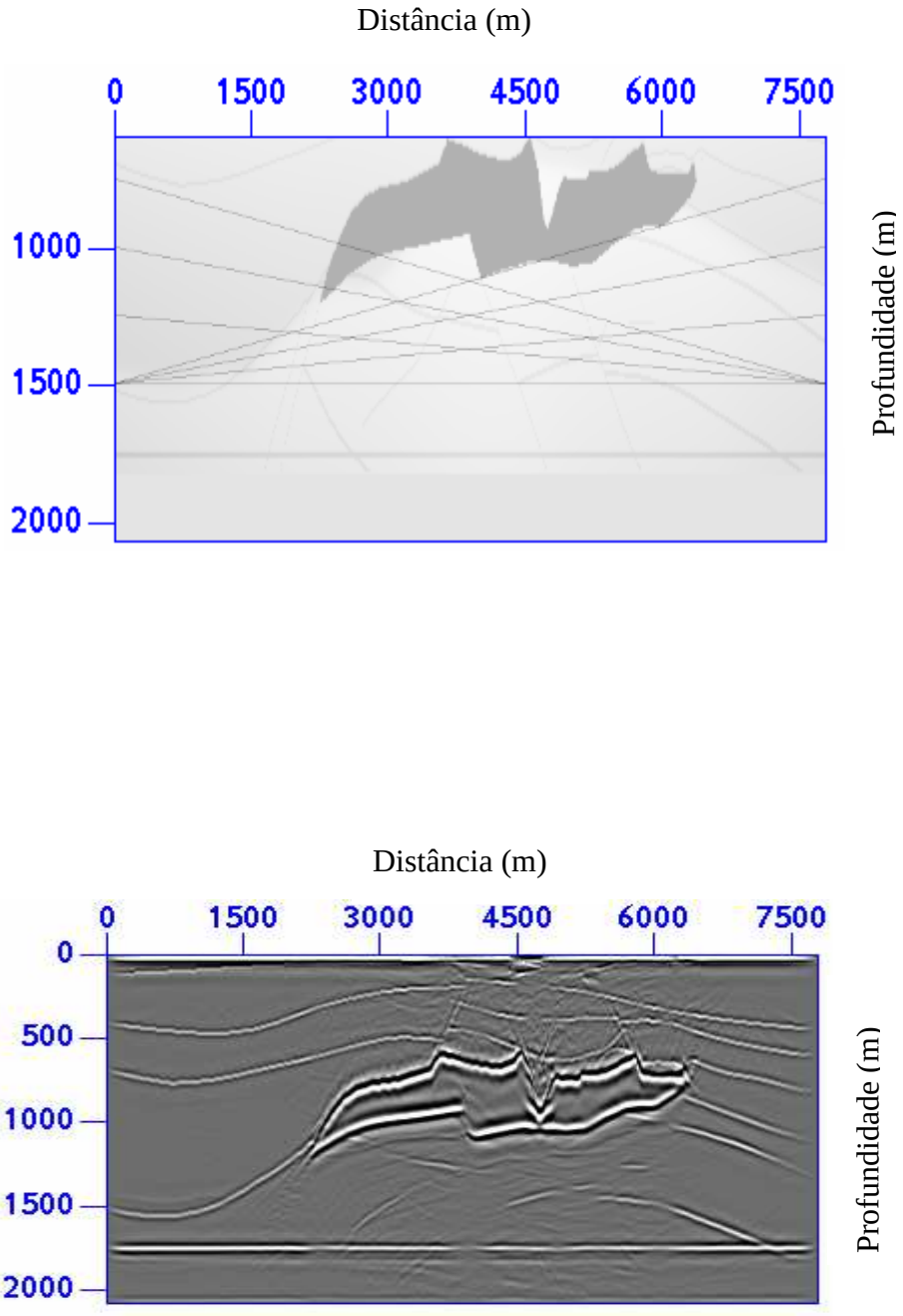


Figura 7.17 – Superior: modelo de velocidade com os horizontes para encontrar os operadores de síntese; Inferior: empilhamento de 7 seções migradas.

8 – APLICAÇÕES DA MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO ORIENTADA AO ALVO: 2ª PARTE CASOS 3-D

8.1 - Introdução

Neste capítulo será aplicado o algoritmo de migração reversa no tempo orientada ao alvo no modelo 3-D sintético *Overthrust* (SEG/EAGE). Serão realizadas duas aplicações: a primeira considerando uma geometria de aquisição especial com azimutes em todas as direções e a segunda para uma geometria de aquisição marítima convencional com *streamers*.

Na aquisição marítima com *streamer* será aplicada uma nova estratégia de migração reversa no tempo 3-D orientada ao alvo na qual uma família de múltiplos tiros é obtida para cada linha de levantamento e migrada. Para uma determinada síntese de frentes de onda em subsuperfície, o volume migrado é obtido pelo empilhamento de todas as linhas de levantamento migradas.

PRIMEIRA APLICAÇÃO: Aquisição com azimutes em todas as direções

8.2 - A modelagem dos dados 3-D

Os sismogramas foram gerados com o algoritmo de modelagem sísmica 3-D apresentado no Apêndice A. Para este tipo especial de aquisição os receptores foram colocados em cada ponto da malha e mantidos fixos. Os sismogramas 3-D foram gerados através da detonação da fonte sísmica em cada ponto da malha. Devido a limitação de recursos computacionais, esta aplicação foi realizada apenas na metade do modelo original. Portanto, os parâmetros utilizados na modelagem foram os mesmos utilizados na seção 5.2. A Figura 8.1 mostra duas seções transversais que se cruzam no meio do modelo.

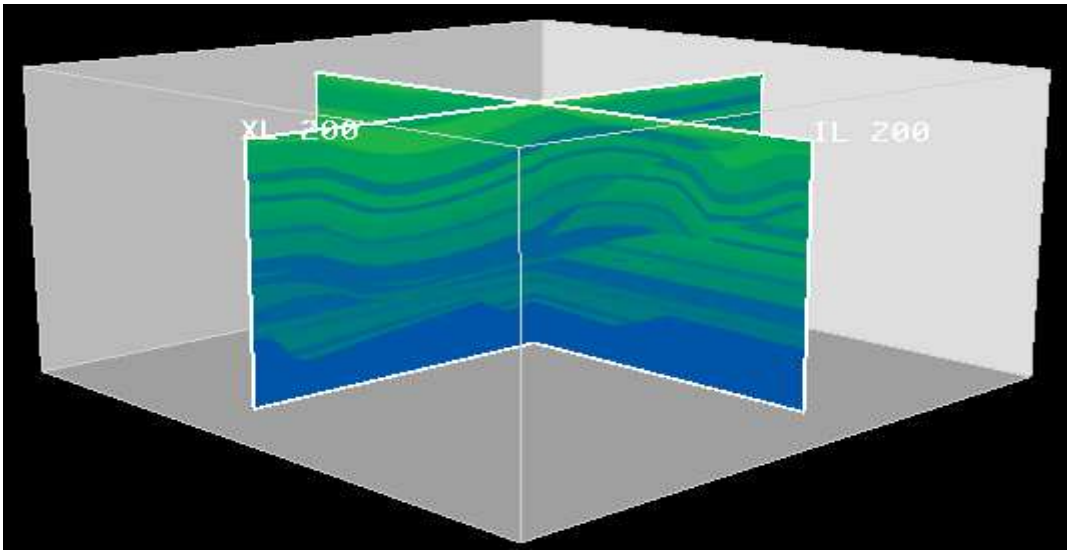


Figura 8.1 – Modelo de velocidade *Overthrust* reduzido. Escala vertical profundidade. A profundidade máxima 4650m.

8.3 - A síntese de frentes de onda 3-D

A família de múltiplas fontes foi sintetizada na superfície de observação de tal modo que, quando propagada para o interior do modelo, gere na profundidade $z = 2500m$, uma frente de onda 3-D plana e horizontal. As famílias de múltiplas fontes e de múltiplos tiros para esta situação já foram encontradas no Capítulo 5.

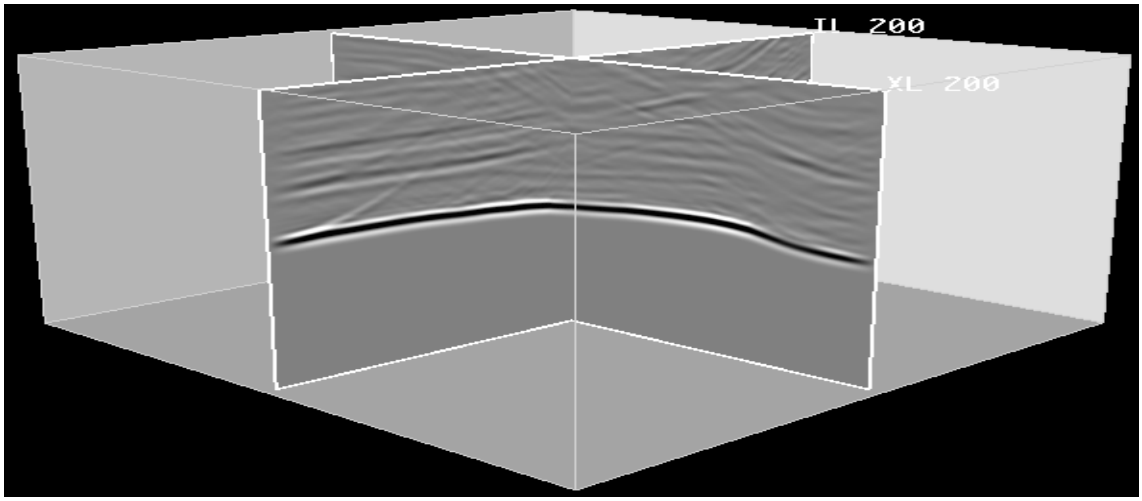


Figura 8.2 - Família de múltiplas fontes para gerar uma frente de onda plana e horizontal na profundidade $z = 2500m$. Escala vertical tempo. Tempo máximo 1600ms

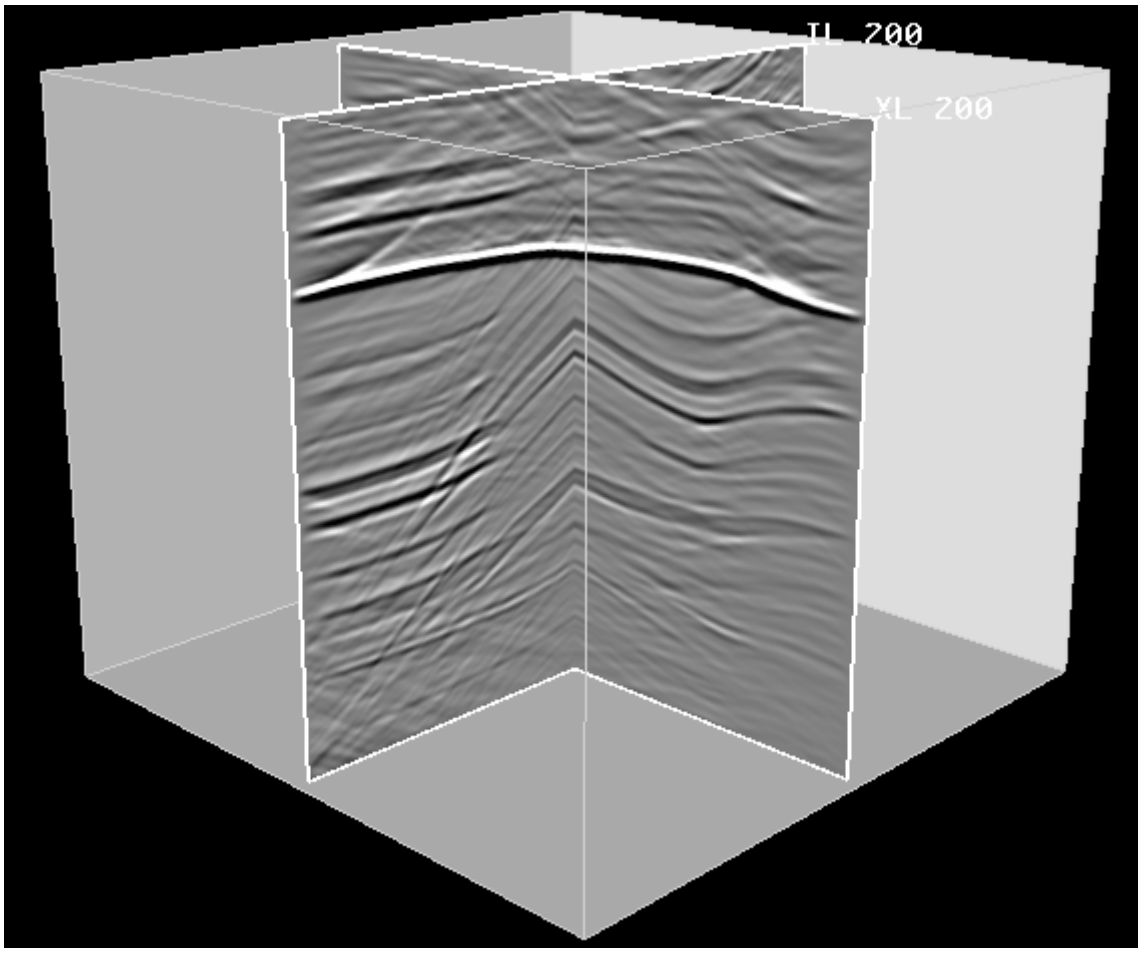


Figura 8.3 – Família de múltiplos tiros. Escala vertical tempo. Tempo máximo 3200ms.

8.4 – A migração reversa no tempo 3-D orientada ao alvo

A família de múltiplas fontes (Figura (8.2)) foi propagada diretamente para o interior do modelo para obter a matriz de tempo de trânsito a cada ponto da malha e a matriz de amplitude máxima. A família de múltiplos tiros (Figura (8.3)) foi propagada de forma reversa no tempo e aplicada a condição de imagem. A imagem migrada é mostrada na Figura (8.4).

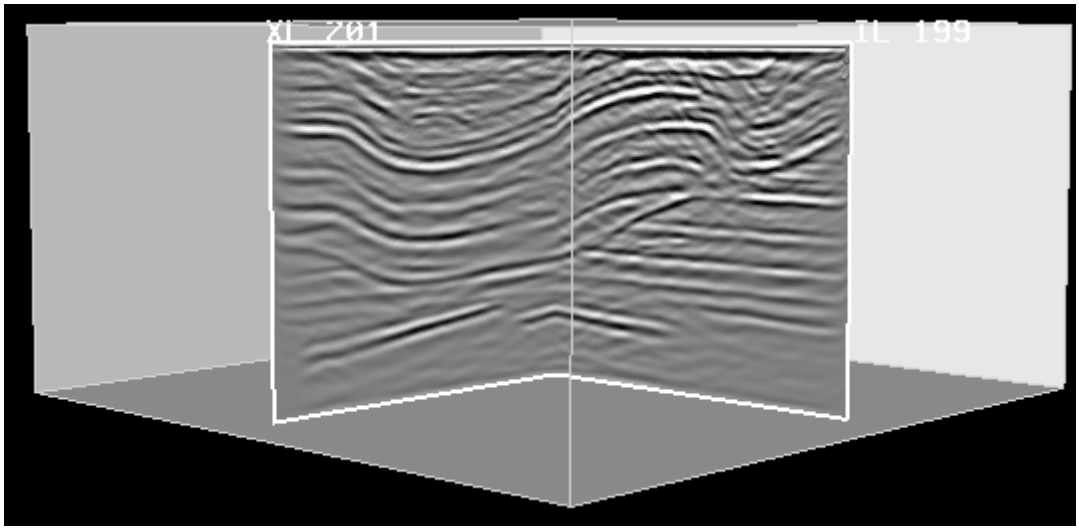


Figura 8.4 – Imagem migrada de duas linhas transversais. Escala vertical profundidade. Profundidade máxima 4650m.

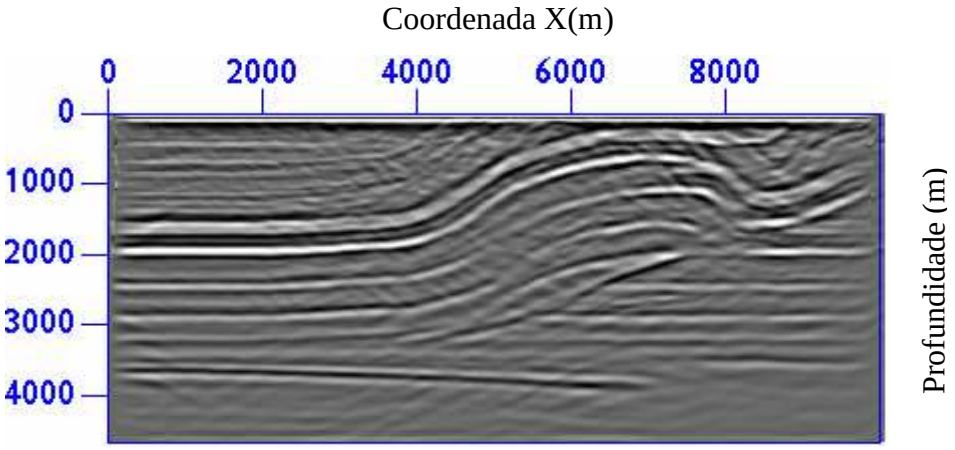


Figura 8.5a – Corte vertical do volume sísmico mostrado na Figura 8.4 na posição y=5000m.

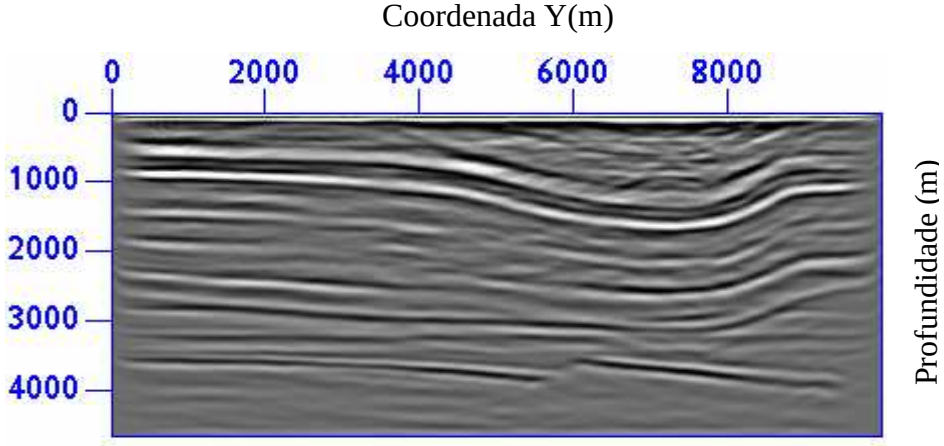


Figura 8.5b - Corte vertical do volume sísmico mostrado na Figura 8.4 na posição x=5000m.

SEGUNDA APLICAÇÃO: Aquisição marítima 3-D com *streamers*

Os levantamentos sísmicos marítimos 3-D de dados reais são realizados com o navio sísmico arrastando de 6 a 10 cabos com espaçamento entre eles que variam de 100 a 150m. Os levantamentos são em geral do tipo *flip-flop* (2 fontes sísmicas) onde cada detonação é realizada a cada 25m com alternância entre as fontes. Os cabos têm em média 6000m de comprimento. A Figura (8.6) mostra um exemplo da disposição do navio, dos cabos e das fontes utilizados na aquisição. Devido às correntes marinhas o navio sísmico não se movimenta em linha reta e nem os cabos permanecem ao longo da mesma direção (*feathering*).

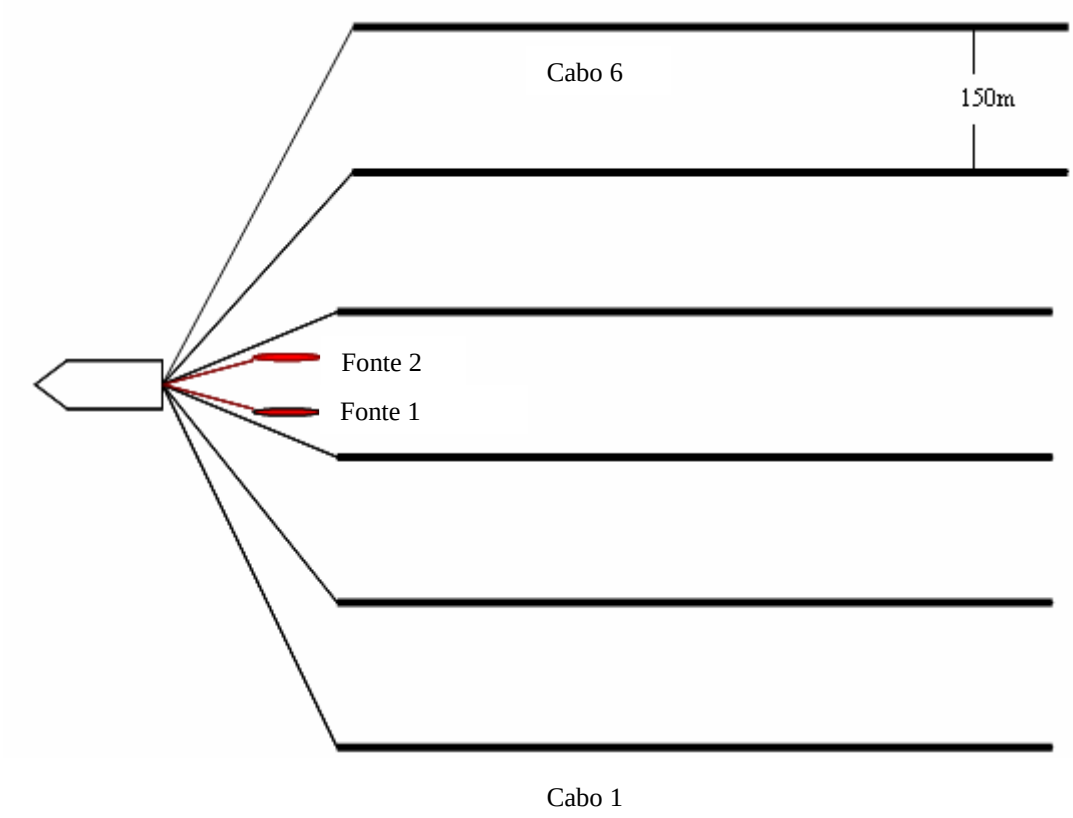


Figura 8.6 – Esquema de uma aquisição marítima 3-D com 6 cabos de 6000m.

8.5 – A modelagem dos dados marítimos 3-D

Na modelagem sísmica foi assumido que o navio se movimenta em linha reta (direção coordenada y constante) e que os cabos permanecem ao longo da mesma direção. Foram utilizados 6 cabos com espaçamento de 150m. A modelagem foi realizada com os seguintes parâmetros: intervalo de receptores 25m; intervalo de detonação 25m com fonte *flip-flop* (distância entre as fontes 75m); intervalo entre pontos da malha 25m nas direções x, y e z; intervalo de amostragem 2ms; número de pontos da malha nas direções x e y igual a 801; número de pontos da malha na direção z 187; freqüência de corte 35Hz; número de linhas de levantamento (*sail line*) igual a 37 e intervalo entre linhas de levantamento 450m. Os sismogramas foram gerados considerando uma geometria tipo *split spread*. Para esta aplicação foi utilizado todo o modelo *Overthrust* que corresponde a uma área de $400km^2$, enquanto que na aplicação anterior foi utilizada uma área de $200km^2$. A Figura (8.7) mostra o volume de velocidade intervalar e as Figuras (8.8a) e (8.8b) mostram cortes verticais do modelo

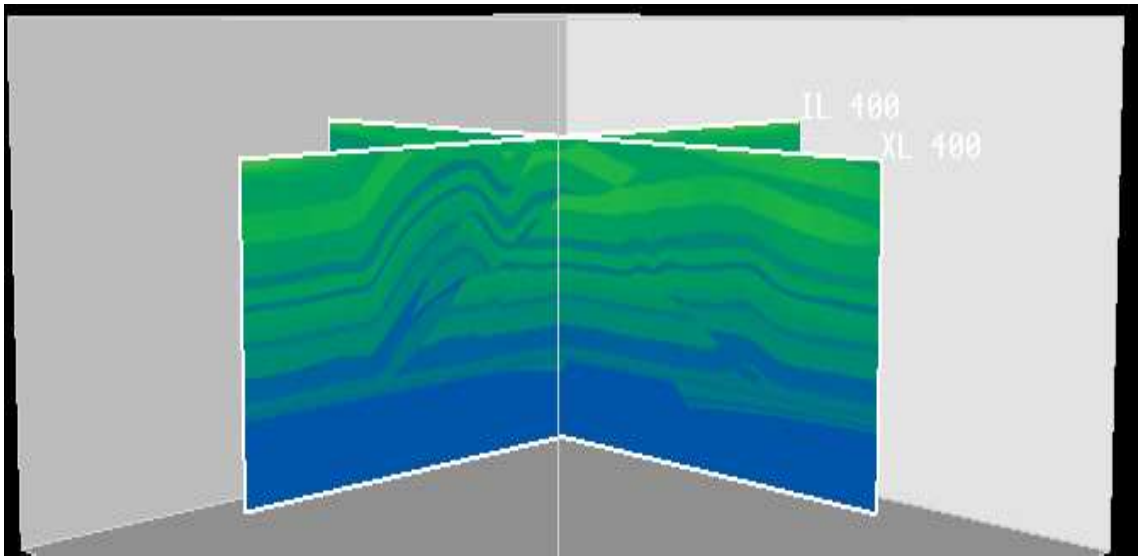


Figura 8.7 – Modelo de velocidade intervalar em profundidade mostrando dois cortes verticais que se cruzam no centro do modelo. Escala vertical profundidade. Profundidade máxima 4650m.

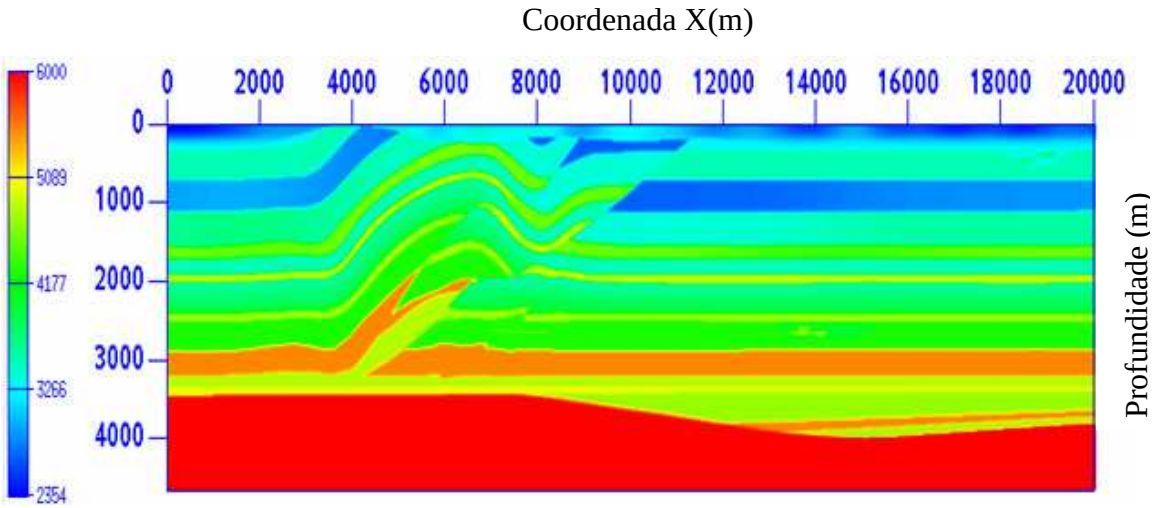


Figura 8.8a - Corte vertical do modelo de velocidade na posição y=10000m

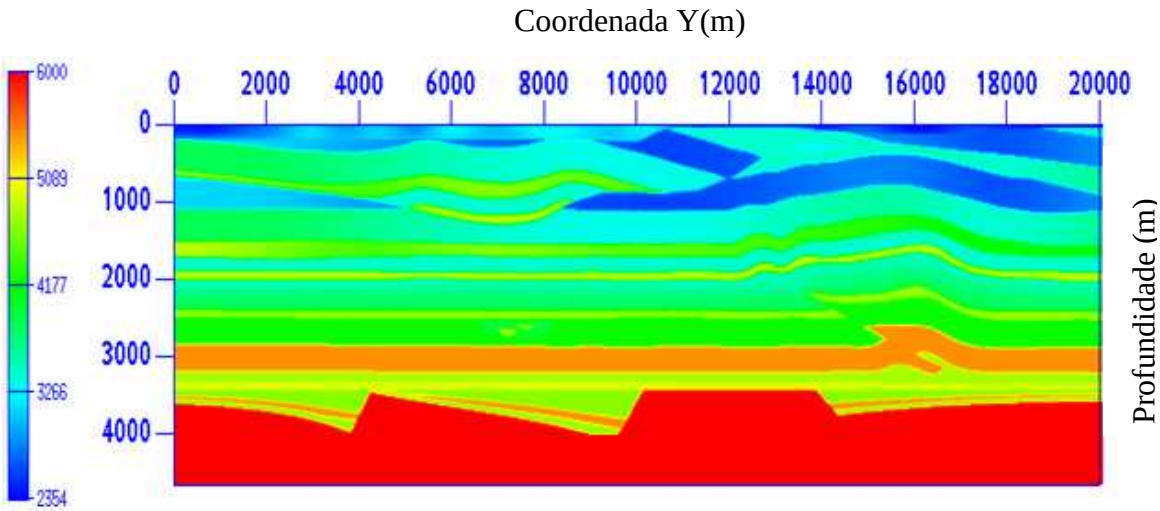


Figura 8.8b – Corte vertical do modelo de velocidade na posição x=10000m

a) A família de múltiplas fontes

Como na primeira aplicação a família de múltiplas fontes foi também sintetizada na superfície de observação de modo a ter uma frente de onda plana e horizontal na profundidade 2500m, quando propagada para o interior do modelo. Uma família de múltiplas fontes foi obtida para cada linha de levantamento (*sail line*).

A Figura (8.9) mostra uma família de múltiplas fontes para a linha de levantamento cuja coordenada de navegação do navio é y=10000m. A família de múltiplas fontes é composta de duas seções 2-D, cada uma correspondendo a uma fonte do levantamento *flip-flop*.

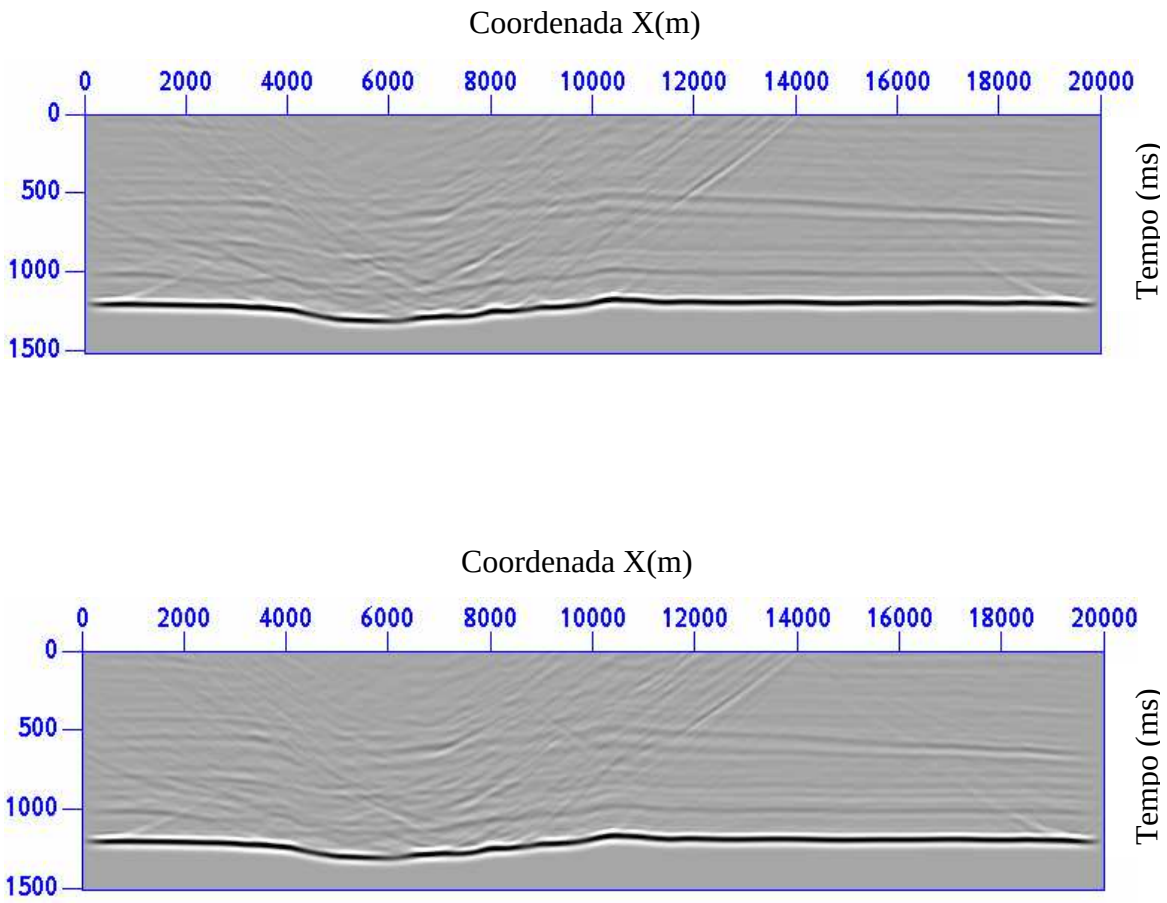


Figura 8.9 – Família de múltiplas fontes. Superior: família de múltiplas fontes para as detonações da fonte 1; Inferior: família de múltiplas fontes para as detonações da fonte 2.

b) A família de múltiplos tiros

Uma família de múltiplos tiros foi obtida para a linha de levantamento mencionada. Como a linha de levantamento possui 6 cabos, a família de múltiplos tiros é composta de 6 seções 2-D cada uma correspondendo a um cabo. A Figura 8.10 mostra a família de múltiplos tiros.

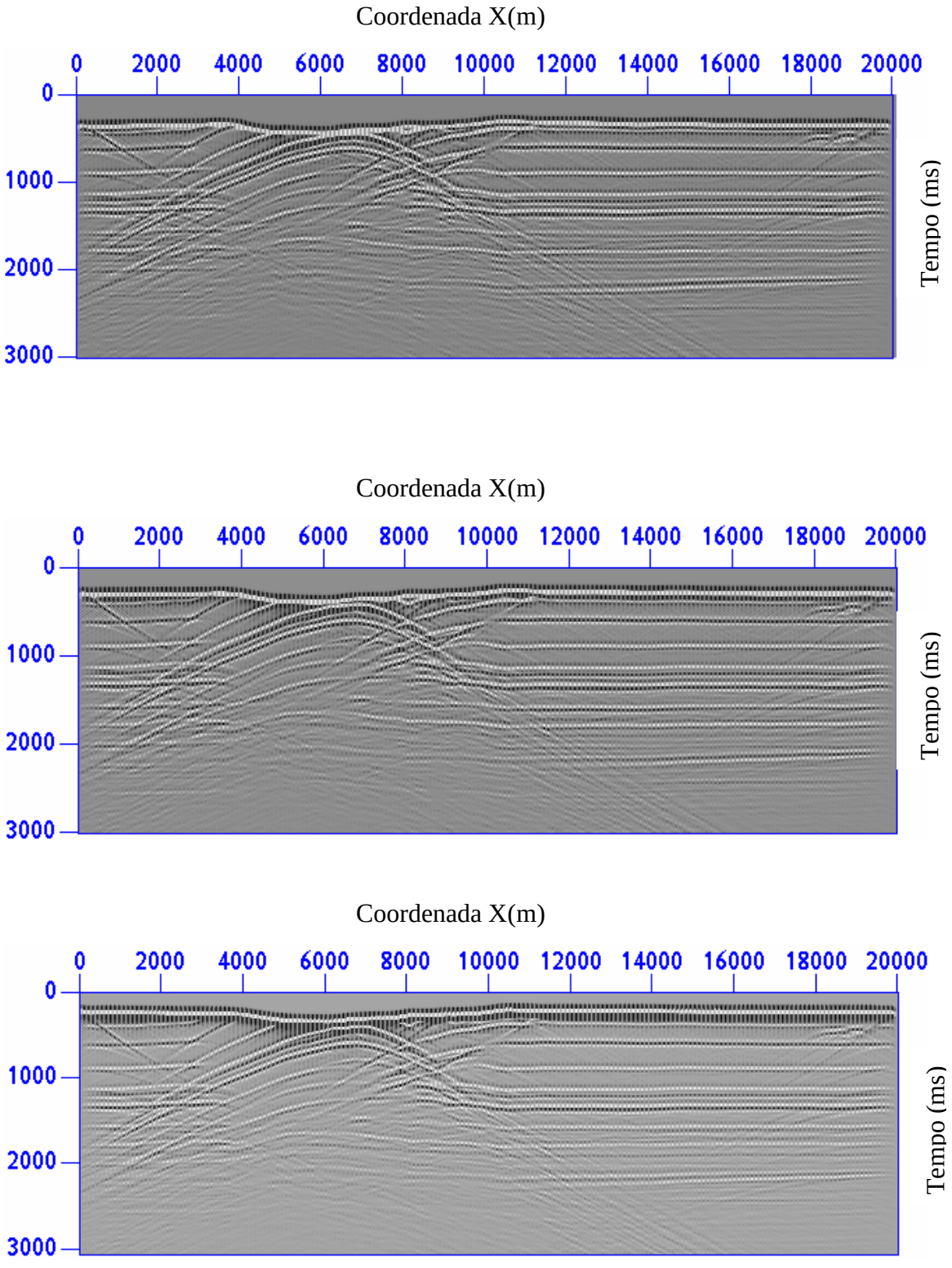


Figura 8.10a – Família de múltiplos tiros da linha de levantamento (y=10000m). Figura superior: cabo 1; Figura do meio: cabo 2; Figura inferior: cabo 3.

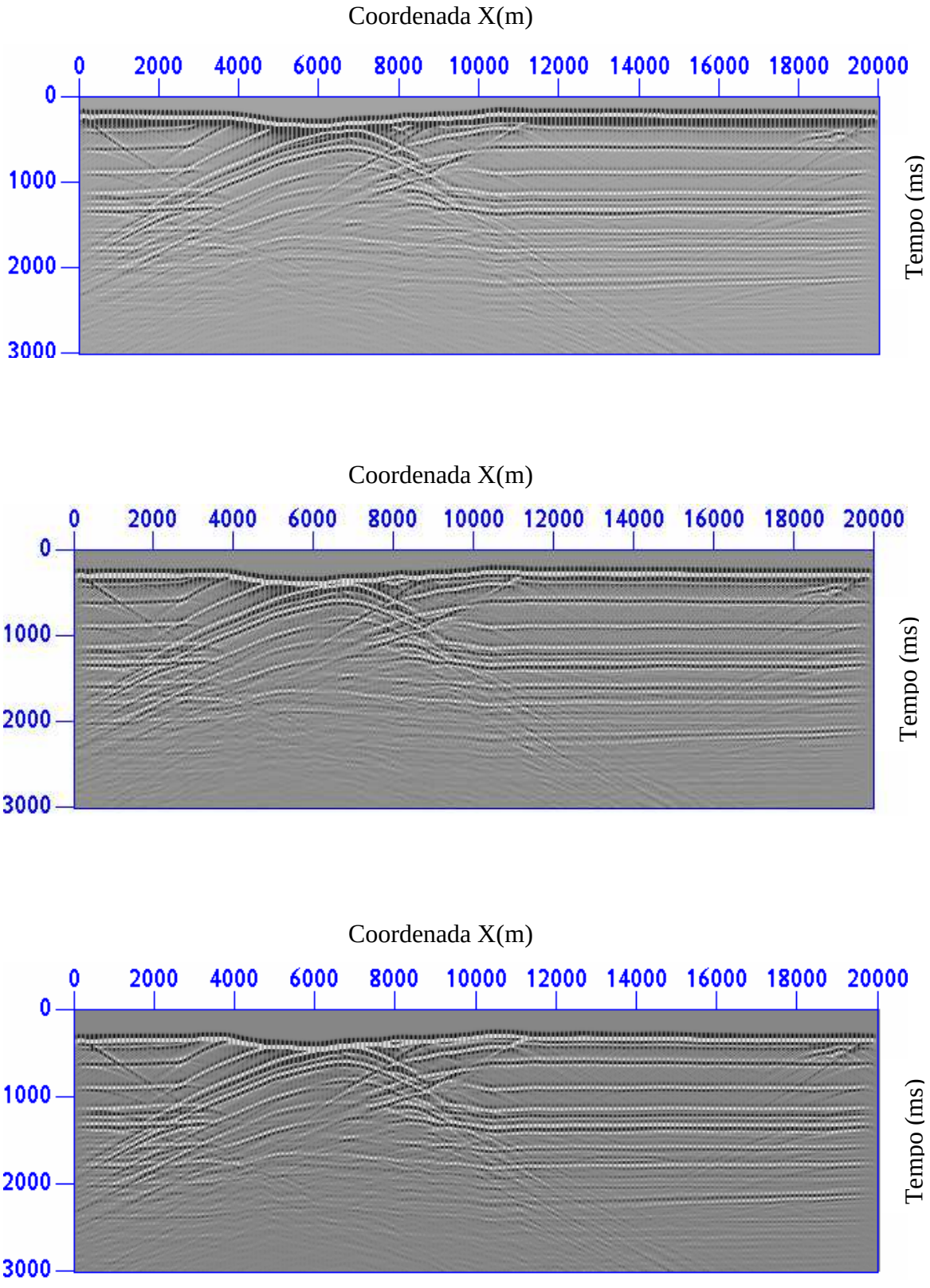


Figura 8.10b – Família de múltiplos tiros da linha de levantamento (y=10000m). Figura superior: cabo 4; Figura do meio: cabo 5; Figura inferior; cabo 6.

8.6 – A migração de uma linha de levantamento

A família de múltiplas fontes (Figura (8.9)) foi propagada para o interior do modelo para obter a matriz de tempo de trânsito e a matriz de amplitude máxima. A família de múltiplos tiros correspondente aos seis cabos, mostrada na Figura (8.10), foi propagada de forma reversa no tempo e aplicada a condição de imagem para gerar o cubo migrado em profundidade. A seção migrada coincidente com as coordenadas da linha de levantamento (y=10000m) é mostrada na Figura (8.11).

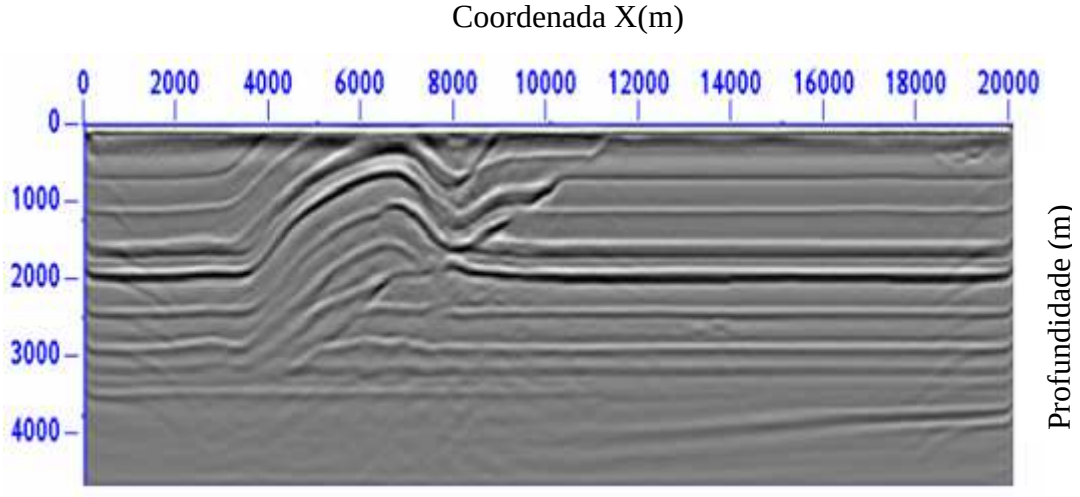


Figura 8.11 – Migração reversa no tempo orientada ao alvo de uma linha de levantamento com coordenada y=10000m

Cada tiro da linha de levantamento em estudo foi também migrado com o algoritmo de migração reversa no tempo 3-D convencional e empilhado. A seção migrada na posição da linha de levantamento (y=10000m) é mostrada na Figura (8.12). Comparando as imagens obtidas com o algoritmo proposto e a migração reversa no tempo 3-D convencional, pode-se observar que os resultados são bastante semelhantes. No entanto, comparando os tempos de execução, o da migração reversa no tempo orientada ao alvo foi cerca de 400 vezes inferior ao da migração reversa no tempo convencional.

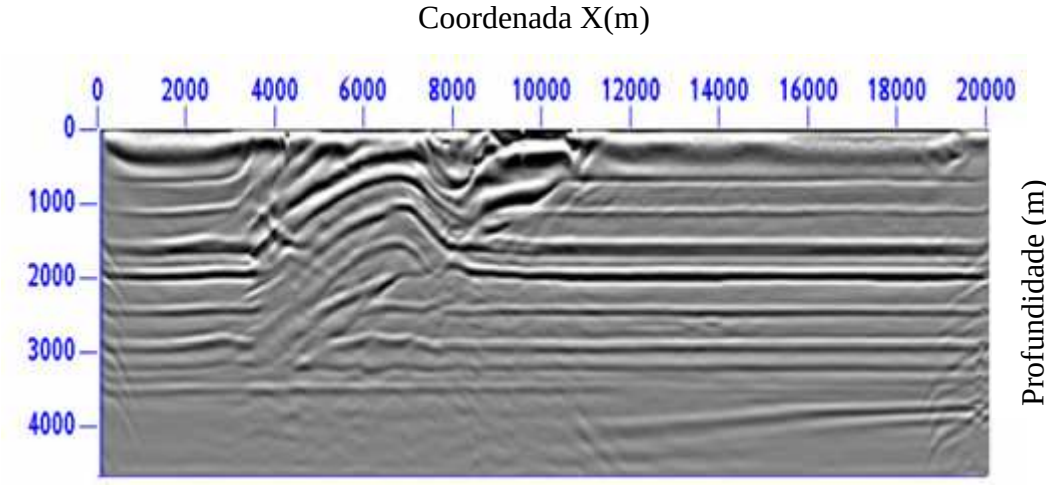


Figura 8.12 – Migração reversa no tempo 3-D convencional da linha de levantamento com coordenada y=10000m.

8.7 – Migração reversa no tempo orientada ao alvo de todas as linhas de levantamento

Todas as linhas de levantamento foram migradas e empilhadas gerando um volume migrado em profundidade. A Figura (8.13) mostra diversos cortes verticais extraídos do volume sísmico migrado e do modelo de velocidade, respectivamente. Comparando as imagens pode-se observar que as interfaces do modelo geológico foram totalmente reconstituídas com o algoritmo de migração proposto. Este fato também pode ser constatado comparando os *depth slice* na profundidade 2650m do volume de velocidade (Figura (8.14)) e do volume sísmico (Figura (8.15)). Para a obtenção do cubo sísmico migrado com algoritmo proposto foi utilizada apenas uma família de múltiplos tiros para cada linha de levantamento.

No *depth slice* pode ser observada as marcas da aquisição (*footprints*) na direção das linhas de levantamento. Este efeito pode ser atenuado gerando famílias de múltiplos tiros com menor espaçamento entre os cabos, uma vez que o utilizado foi de 150m. Utilizar também outras famílias de múltiplos tiros correspondentes a outros horizontes na área de interesse de imageamento.

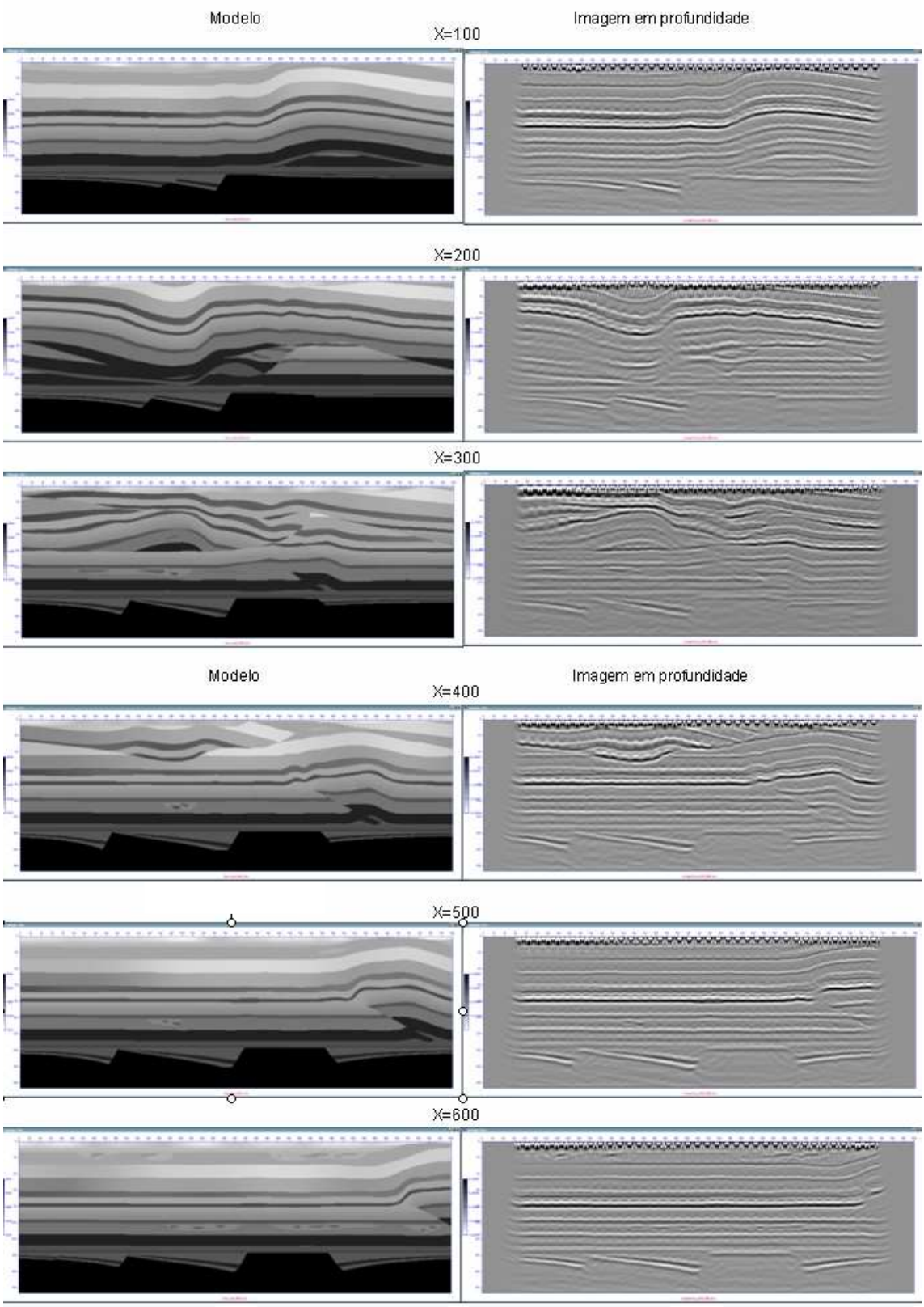


Figura 8.13 – Cortes verticais do modelo de velocidade (esquerda) e do cubo migrado em profundidade (direita) na direção transversal ao levantamento.

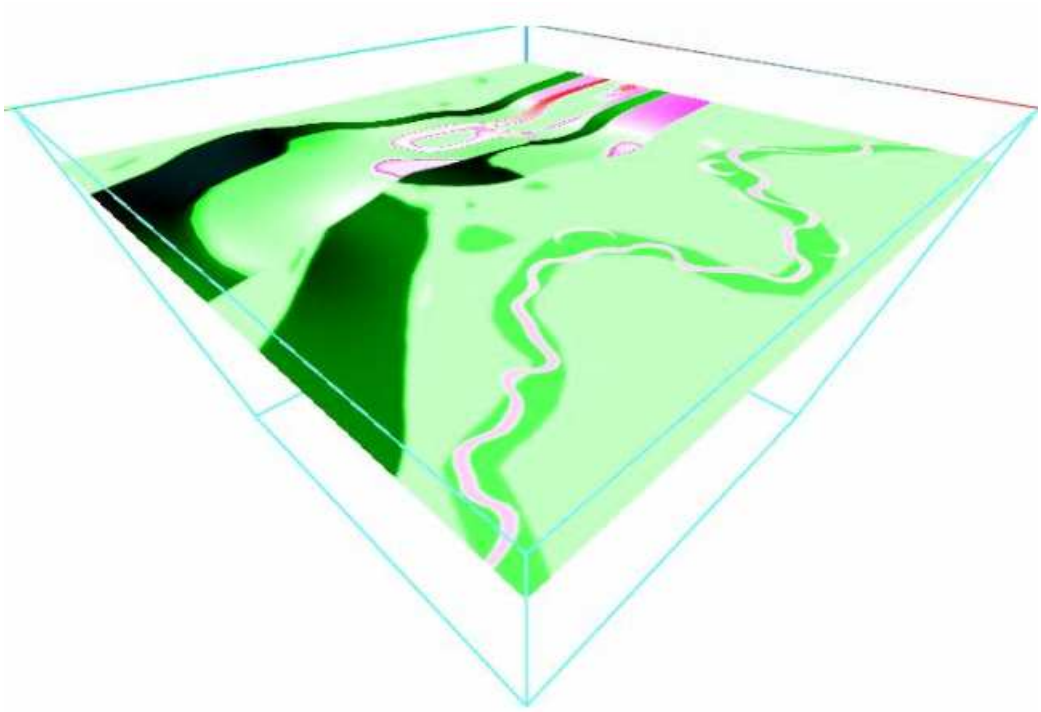


Figura 8.14 – *Depth slice* do modelo de velocidade na profundidade 2650m.

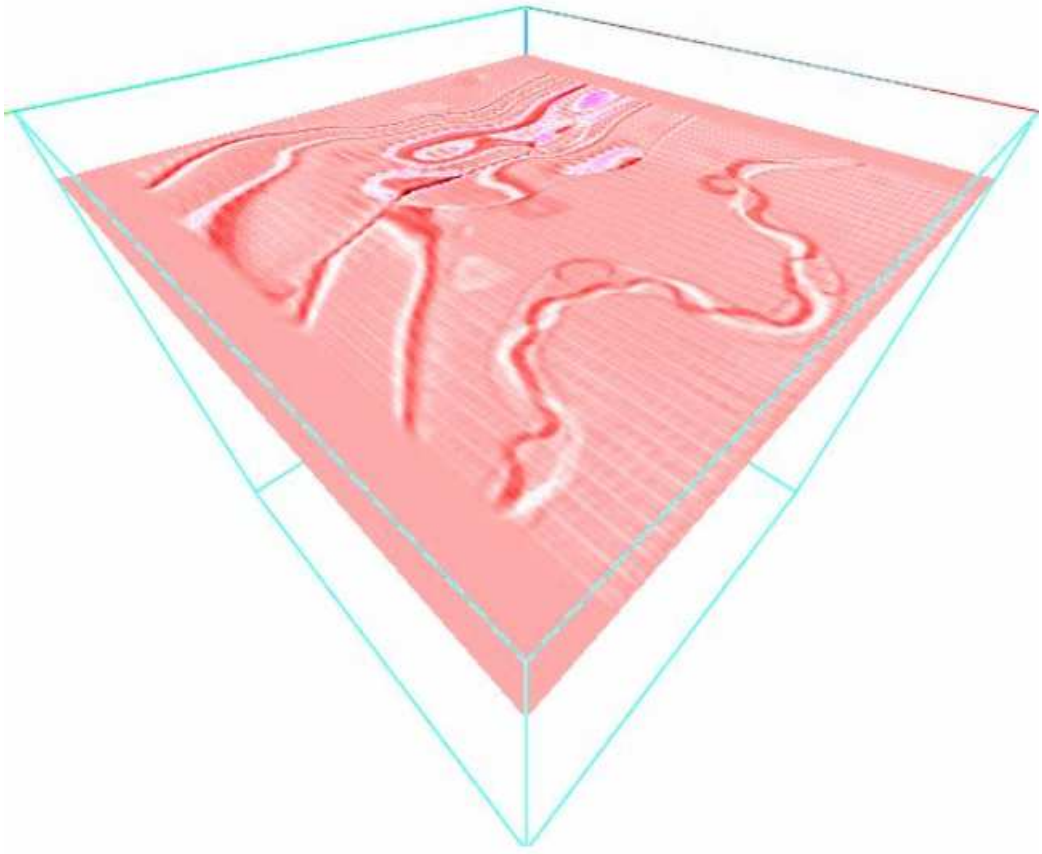


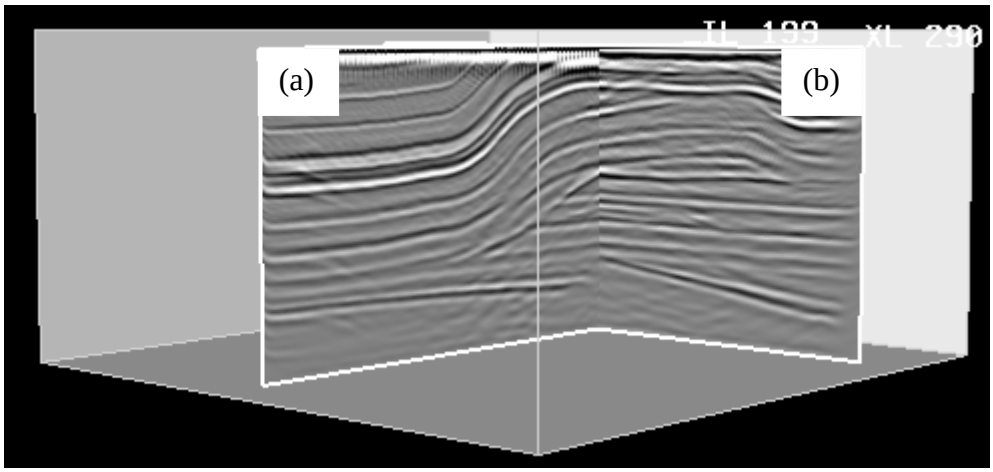
Figura 8.15 – *Depth slice* do cubo migrado na profundidade 2650m.

8.8 – Comparação entre os volumes migrados com os dois tipos de aquisições

Na primeira aplicação o tipo de aquisição possibilitou obter uma família de múltiplos tiros onde o empilhamento no domínio do receptor comum foi realizado utilizando traços de azimutes tanto nas direções do levantamento como na direção transversal.

Na segunda aplicação a aquisição foi do tipo marítima com 6 cabos separados de 150m. Portanto, os azimutes se concentraram próximo a direção da linha de levantamento. Em conseqüência deste fato a família de múltiplos tiros de cada linha de levantamento foi gerada considerando o empilhamento no domínio do receptor comum dos traços com azimutes próximos à direção das linhas de levantamento.

A Figura (8.16) mostra duas seções transversais com geometrias de aquisições diferentes (aplicações 1 e 2). Observando o cruzamento das duas seções pode-se constatar uma perfeita continuidade entre os dois volumes sísmicos. Este fato comprova que o algoritmo proposto pode ser aplicado em dados sísmicos de levantamentos marítimos com *streamers.*



8.16 – Duas seções transversais de dois volumes sísmicos migrados com geometrias de aquisições diferentes: (a) Imagem proveniente da segunda aplicação; (b) Imagem proveniente da primeira aplicação.

8.9 – Sumário

O algoritmo de migração reversa no tempo orientada ao alvo foi aplicado no modelo *Overthrust* (SEG/EAGE) para dois tipos diferentes de geometria de aquisição 3-D. Na primeira aplicação foi considerada uma aquisição com os receptores fixos em todos os pontos da malha e a fonte sísmica detonada em cada ponto. Na segunda aplicação foi considerada uma aquisição marítima 3-D com seis 6 cabos do tipo *flip-flop*, com os cabos e fontes se movimentando em linha reta. Em ambas as aplicações a família de múltiplas fontes foi sintetizada na superfície de observação de tal modo a gerar uma frente de onda plana e horizontal em $z = 2500m$.

Na primeira aplicação uma única família de múltiplos tiros foi obtida para toda a aquisição 3-D e migrada com o algoritmo de migração reversa no tempo 3-D orientada ao alvo. Na segunda aplicação uma família de múltiplos tiros foi obtida para cada linha de levantamento e migrada. As linhas de levantamento migradas foram empilhadas para gerar um volume sísmico em profundidade.

Em ambas as aplicações as imagens em profundidade foram bastante semelhantes ao modelo geológico. Este fato mostra que para dados de aquisição marítima 3-D a síntese de frentes de onda na direção próxima a do levantamento é um procedimento correto, conclusão obtida da aplicação ao modelo *Overthrust.*

Na segunda aplicação foram observadas marcas de aquisição (*footprints*) que podem ser atenuadas se for usado um menor espaçamento entre os cabos da linha de levantamento (espaçamento usado 150m). Utilizar também outras famílias de múltiplos tiros correspondentes a outros horizontes na área de interesse de imageamento. As marcas de aquisição são observadas nos *depth slice*.

Com objetivo de medir o tempo de execução e precisão da nova estratégia de migração proposta foi executado o algoritmo de migração reversa no tempo 3-D convencional de uma linha de levantamento. As imagens em profundidade na posição da linha de detonação obtida com os dois algoritmos são muito semelhantes. Comparando os tempos de execução foi constatado que o da migração reversa no tempo orientada ao alvo foi cerca de 400 vezes inferior ao da migração reversa no tempo convencional.

9 - CONCLUSÕES

Foi apresentada uma nova formulação da migração reversa no tempo (RTM-*Reverse Time Migration*) 3-D orientada ao alvo para meios acústicos. No algoritmo proposto famílias de múltiplas fontes são sintetizadas na superfície de observação de tal modo a incidirem nas proximidades área de interesse de imageamento com determinados ângulos. Para cada família de múltiplas fontes é gerada uma família de múltiplos tiros através da convolução de um operador de síntese com os sismogramas de campo pré-processados. Todas as famílias de múltiplos tiros são migradas e empilhadas para se obter um volume final em profundidade.

A migração de uma família de múltiplos tiros consiste nos seguintes passos: propagação direta da família de múltiplas fontes, propagação reversa no tempo da família de múltiplos tiros e aplicação de uma condição de imagem. Na propagação direta é utilizada a equação completa da onda não-homogênea tendo como termo fonte a família de múltiplas fontes. Na propagação reversa no tempo é utilizada a equação completa da onda homogênea onde a família de múltiplos tiros é usada como condição de contorno na superfície de observação. Em ambos os casos a solução da equação da onda é obtida pelo método das diferenças finitas com aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para a derivada temporal. A migração reversa no tempo orientada ao alvo utiliza a condição de imagem de tempo de excitação baseada no critério de amplitude máxima.

Na migração reversa no tempo convencional de tiro comum a condição de imagem mais empregada é a dada pela correlação dos campos descendentes e ascendentes (*lag* zero), ou seja, o campo gerado pela fonte e o campo proveniente da propagação reversa no tempo do sismograma. Este tipo de condição de imagem contempla as múltiplas chegadas associadas ao campo de onda da fonte, fato que contribui para aumentar a razão sinal/ruído do sismograma migrado. No entanto, o resultado da migração com esta condição de imagem oferece uma média dos coeficientes de reflexão em cada ponto em subsuperfície e não o coeficiente de reflexão para um ângulo de incidência específico. Este fato pode prejudicar inversões locais para o cálculo dos atributos elásticos das rochas.

Na migração reversa no tempo convencional com a condição de imagem de tempo de excitação baseada no critério de amplitude máxima, uma única chegada está associada a cada ponto em subsuperfície. Portanto, as chegadas secundárias não são

levadas em conta na obtenção da imagem migrada, fato que a princípio torna a condição de imagem com correlação cruzada preferível nos casos onde são observadas múltiplas chegadas. Por outro lado esta condição de imagem fornece o coeficiente de reflexão para o ângulo de incidência associado à chegada de maior energia.

Na migração reversa no tempo orientada ao alvo a condição de imagem com correlação cruzada e a condição de imagem de tempo de excitação baseada no critério de amplitude máxima são equivalentes pois na região de interesse de imageamento o campo de onda incidente é controlado, ou seja, a energia está concentrada na frente de onda. Neste caso a frente de onda tem energia muito maior do que as ondas secundárias, portanto, o resultado da correlação é praticamente o encontrado no intervalo de tempo correspondente a chegada de maior energia. Devido ao fato de a condição de imagem com correlação cruzada demandar uma carga computacional maior, no algoritmo proposto foi utilizada a condição de imagem de tempo de excitação baseada no critério de amplitude máxima.

A família de múltiplas fontes, o operador de síntese e a família de múltiplos tiros foram obtidas através de um novo algoritmo de síntese de frentes de onda que foi desenvolvido nesta tese. Neste algoritmo horizontes $z = f(x, y)$ são definidos nas proximidades da região de interesse de imageamento e sobre os quais são colocadas fontes pontuais que são detonadas simultaneamente de modo a gerar frentes de onda que são extrapoladas pela equação completa da onda até a superfície de observação. Para cada horizonte definido é encontrado um operador de síntese que convolvido com os sismogramas de campo pré-processados dá origem à família de múltiplos tiros. Nas extrapolações para obter o operador de síntese a equação completa da onda é discretizada pelo método das diferenças finitas com aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para a derivada temporal. Portanto, no algoritmo proposto a síntese de frentes de onda é realizada no domínio do tempo e utiliza a equação completa da onda, sem aproximação de Born. Nos algoritmos anteriores a síntese de frentes de onda é realizada no domínio da freqüência e utiliza a equação unidirecional da onda onde implicitamente está envolvida a aproximação de Born.

O algoritmo para obtenção do operador de síntese baseado exclusivamente em atrasos é inadequado nos casos onde acima da região de interesse existe grande variação lateral de impedância acústica. Desta forma foi proposto nesta tese um algoritmo que trabalha com o campo de onda completo (sem aproximação de Born), resultante da

extrapolação desde o horizonte $z = f(x, y)$ até a superfície de observação. Com isso são obtidas frentes de onda nas proximidades da área de interesse, sem variações apreciáveis de amplitude ao longo das mesmas.

Para obter o operador de síntese, determinar os tempos de trânsito e propagar de forma reversa no tempo as famílias de múltiplos tiros é usado o macro-modelo de velocidade que é obtido combinando técnicas de migração e tomografia sísmica (SOARES FILHO, 1994, FARRA e MADARIAGA, 1988). O macro-modelo de velocidade, como referenciado em BERKHOUT (1985), é dado pelas principais feições, ou seja, pelos horizontes mais significativos e as velocidades médias (suaves) entre os mesmos.

Foram realizadas aplicações do algoritmo de migração reversa no tempo orientada ao alvo com os seguintes dados 2-D:

a) Aplicação no Modelo *Marmousi* – Este modelo foi criado com o objetivo de testar algoritmos de inversão e migração pré-empilhamento (VERSTEEG e GRAU, 1991). É um modelo típico da Bacia Cuanza (Angola) que envolve grandes variações laterais de velocidade e o reservatório de interesse se encontra abaixo de camadas fortemente estruturadas. O algoritmo de migração reversa no tempo orientada ao alvo foi aplicado ao modelo utilizando 13 famílias de múltiplos tiros. As famílias de múltiplos tiros migradas foram empilhadas para gerar a seção em profundidade. Foi observado que o empilhamento de 7 seções migradas foi muito parecido ao que utilizou 13 seções migradas. O resultado do algoritmo proposto foi comparado com o obtido através da migração reversa no tempo convencional, onde foram usados 2301 sismogramas. Na área de interesse de imageamento as imagens em profundidade encontradas com os dois algoritmos apresentaram grande semelhança, em ambas pode ser observado com nitidez o topo e a base do reservatório. Comparando o tempo de execução dos dois algoritmos constatou-se que com o algoritmo proposto houve uma redução de 400 vezes no tempo de execução.

b) Aplicação no Modelo *Salt Dome* – O Modelo *Salt Dome* (SEG/EAGE) é típico do Golfo do México no qual se observa um corpo de sal (domo de sal alóctone) em contato com os sedimentos de velocidade bem mais baixa. É um modelo que oferece um grande desafio para os algoritmos de migração pré-empilhamento, uma vez que a área de interesse de imageamento se situa abaixo do domo de sal. O algoritmo de migração

reversa no tempo orientada ao alvo foi aplicado utilizando somente 7 famílias de múltiplos tiros. Comparando a imagem em profundidade com o modelo de velocidade observou-se que o domo de sal foi reconstituído com precisão, assim como os refletores localizados acima e abaixo do mesmo. Neste modelo foi também analisada a influência do tipo de aquisição e a ausência de afastamentos próximos na obtenção da família de múltiplos tiros. Foi concluído que a geometria deve ser do tipo *split spread* com os afastamentos próximos interpolados até zero.

O algoritmo de migração reversa no tempo orientada ao alvo foi também aplicado no modelo sintético 3-D *Overthrust* (SEG/EAGE) que é típico de regime tectônico compressional. Foram realizadas duas aplicações:

a) Primeira aplicação: A primeira aplicação foi realizada considerando uma geometria de aquisição 3-D com receptores distribuídos em todos os pontos da malha. Os sismogramas foram gerados pelas detonações em cada um dos pontos da malha. Uma família de múltiplas fontes foi obtida na superfície de observação de tal modo a gerar uma frente de onda plana e horizontal na profundidade 2500m. A família de múltiplos tiros foi obtida e migrada com o algoritmo de migração reversa no tempo orientada ao alvo. Vale a pena salientar que este tipo de aquisição que foi simulada, embora não seja realizável na prática de levantamentos marítimos, possui azimutes em todas as direções.

b) Segunda aplicação: A segunda aplicação foi realizada considerando uma geometria típica de uma aquisição marítima 3-D convencional com *streamers*. Foi simulada uma aquisição marítima com 6 cabos e fonte tipo *flip-flop*. Neste tipo de levantamento as fontes são detonadas em intervalos de tempo constantes, mas de forma alternada com o objetivo de otimizar a produção da aquisição marítima. Foram simuladas 37 linhas de levantamento. Como na aplicação anterior, a família de múltiplas fontes foi sintetizada na superfície de observação de tal modo a gerar uma frente de onda plana e horizontal na profundidade 2500m. Uma família de múltiplos tiros foi obtida para cada linha de levantamento e migrada com o algoritmo de migração reversa no tempo 3-D orientada ao alvo. As 37 famílias migradas foram empilhadas gerando um volume sísmico em profundidade.

Na primeira aplicação foi obtida uma única família de múltiplos tiros para toda a aquisição 3-D e migrada com o algoritmo de migração reversa no tempo orientada ao

alvo. Na segunda aplicação foi utilizada uma nova estratégia de migração reversa no tempo 3-D para dados de aquisição marítimos com *streamer*, na qual cada linha de levantamento é migrada de uma única vez. Em contraste com a migração reversa no tempo convencional 3-D, cada sismograma da linha de levantamento é migrado individualmente.

Comparando as imagens em profundidade resultante das duas aplicações pode ser observado que são muito semelhantes. Comparando vários cortes verticais do volume sísmico obtido pela estratégia proposta com os do modelo de velocidade *Overthust* pode-se concluir que as interfaces do modelo foram perfeitamente reconstituídas. Este fato também pode ser observado comparando o *depth slice* do modelo de velocidade com o do cubo sísmico. No *depth slice* do cubo sísmico são observados as marcas de aquisição (*footprints*) que podem ser atenuadas utilizando um menor espaçamento entre as famílias de múltiplos tiros de cada linha de aquisição, uma vez que o utilizado foi 150m.

Com o objetivo de medir o tempo de execução e precisão da nova estratégia de migração proposta foi executado o algoritmo de migração reversa no tempo 3-D convencional de uma linha de levantamento. As imagens em profundidade na posição da linha de detonação obtida com os dois algoritmos foram também muito semelhantes. Comparando os tempos de execução foi constatado que o da migração reversa no tempo 3-D orientada ao alvo foi cerca de 400 vezes inferior ao da migração reversa no tempo 3-D convencional. Esta redução no tempo de execução juntamente com a precisão da imagem obtida torna o algoritmo de migração proposto viável de ser aplicado rotineiramente na indústria.

Recomendações para trabalhos futuros:

- Estender o algoritmo de migração reversa no tempo orientada ao alvo para meios elásticos;

- Usar outros métodos para encontrar a solução da equação da onda (elementos finitos e volumes finitos);

- Utilizar as reflexões múltiplas de grande período para o imageamento com o algoritmo de migração proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKI, K., RICHARDS, P. G., 1980, 'Quantitative Seismology", 2nd ed. New York, W.H.Freeman and Co.

AMINZADEH, F., BRAC, J., KUNZ, T., 1997, "3-D Salt and Overthrust Models: SEG/EAGE 3-D modeling series", n.1, Society of Exploration Geophysicists.

BAYSAL, E., KOSLOFF, D. D., SHERWOOD, J. W. C., 1983, "Reverse time-migration", Geophysics, v. 48, pp. 1514-1524.

BAYSAL, E., KOSLOFF, D. D., SHERWOORD, J. W. C.,1984, "A two-way nonreflecting wave equation", Geophysics, v.49, pp. 132-141.

BERKHOUT, A. J., 1985, "Seismic migration: Imaging of acoustic energy by wavefield extrapolation. A. Theoretical aspects", 3rd Ed.; Elsevier Science Publ Co., Inc.

BERKHOUT, A. J., 1992, "Areal shot-record technology", J. Seis. Expl. 1, n. 3, 251-264.

BIONDI., 2006, "3-D seismic imaging", SEG Society of Exploration Geophyscists.

BOECHAT, J. B. T., CUNHA, P. E. M., SOARES FLHO, D. M., BULCÃO, A., MANSUR, W. J., 2005, "Migração RTM orientada ao alvo: experimentos numéricos em modelos que envolve tectônica salífera", 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.

BOECHAT, J. B. T., SOARES FILHO, D. M., CUNHA, P. E. M., BULCÃO, A., MANSUR, W. J., 2005, "Migração RTM orientada ao alvo". 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.

BOTELHO, M. A. B., STOFFA, P. L., 1988, "Velocity analysis using reverse time migration", Presented at the AGU annual meeting.

BULCÃO, A., 2004, "Modelagem e Migração Reversa no Tempo empregando operadores elásticos e acústicos", Tese de Doutorado, PEC-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CARCIONE, J. M., HERMAN, G. C, TEN KROODE, P. E., 2002, "Seismic modeling", Geophysics, v.67, pp. 1304-1325

CERJAN, C., KOSLOFF, D., RESHEF, M., 1985, "A Nonreflecting Boundary Condition for Discrete Acoustic and Elastic Wave Equations", Geophysics, v.50, pp. 705-708.

CHANG, W. F., McMECHAN, G. A., 1986, "Reverse-Time Migration of Offset Vertical Seismic Profiling Data Using the Excitation Time Imaging Condition", Geophysics, v.51, pp.67-84.

CHANG, W. F., McMECHAN, G. A., 1990, "3D acoustic prestack reverse-time migration", Geophysical Prospecting, v.38, pp. 737-756.

CLAPP, M. L., 2005 – "Imaging under salt illumination compesation by regularized inversion", Ph.D. Dissertation, Stanford University, USA.

CLAERBOUT, J. F., 1971, "Toward a unified theory of reflection mapping", Geophysics, v. 36, pp. 469-481.

CLAERBOUT, J. F., 1985, "Imaging the earth's interior", Brackwell Scientific Publications, Inc.

CUNHA, P. E. M., 1997, "Estratégias Eficientes para Migração Reversa no Tempo Pré-empilhamento 3-D em Profundidade pelo Método das Diferenças Finitas", Dissertação de Mestrado, P.P.P.G., Universidade Federal da Bahia.

CUNHA, P. E. M., PALERMO, L. A. C., 2003. "A Multi-Source version of the reverse time migration (RTM)", 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.

DUARTE, O. O., 1997, "Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia", 2ª ed. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geofísica.

DUQUET, B., LAILY, P., EHINGER, A., 2001, "3D plane wave migration of streamer data", Expanded Abstracts, SEG-Society of Exploration Geophysicists.

FARIA, E. L., 1986, "Migração antes do empilhamento utilizando propagação reversa no tempo", Dissertação de Mestrado, P.P.P.G., Universidade Federal da Bahia.

FARRA, V., MADARIAGA, R., 1988, "Non-linear reflection tomography", Geophys.J.R.Astr.Soc., v.95, pp. 135-147

JI, J., 1995, "Sequential Seismic Inversion Using Plane Wave Synthesis" – Ph.D Dissertation, Stanford University, USA.

LEVIN, S. 1984, "Principle of reverse-time migration", Geophysics, v.49, pp. 581-583.

LIU, F., WHITMORE, N. D., HANSON, D. W., DAY, R. S., MOSHER, C. C., 2004, "The impact of reciprocity on pre-stack source plane wave migration", Expanded Abstracts, SEG-Society of Exploration Geophysicists.

LIU, F., HANSON, D. W., WHITMORE, N. D., DAY, R. S., STOLT, R. H., 2006 – "Toward a unified analysis for source plane-wave migration", Geophysics v.71, pp. 5129-5139.

LOEWENTHAL, D., LU, L., ROBERTSON, R., SHERWOOD, J. W. C., 1976, " The Wave Equation applied to migration", Geophysical Prospecting, v.24, pp. 380-399.

LOEWENTHAL, D., MUFTI, I. R., 1983, "Reverse Time Migration in Spacial Frequency Domain", Geophysics, v.48, pp. 627-635.

LOEWENTHAL, D., STOFFA, P. L., FARIA, E. L., 1987, "Suppressing the Unwanted Reflections off the Full Wave Equation", Geophysics, v.52, pp.1007-1012.

LOEWENTHAL, D., HU, L., 1991, "Two methods for computing the imaging condition for common-shot pre-stack migration", Geophysics, v. 58, pp. 378-381.

McMECHAN, G. A., 1983, "Migration by Extrapolation of Time-Denpendent Boundary Values", Geophysical Prospecting, v.31, 413-420.

MUFTI, I. R., PITA, J. A., HUNTLEY, R. W., 1996, "Finite-Difference Depth Migration of Exploration-Scale 3-D Seismic Data", Geophysics, v.61,pp.776-794.

MULDER, W. A., PLESSIX, R. E., 2004, "A comparison between one-way and two-way wave equation migration", Geophysics, v.69, pp. 1491-1504.

NOLAN, C. J., SYMES, W. W., 1996, "Imaging and coherence in complex structure", Expanded Abstracts, SEG-Society of Exploration Geophysicists.

REYNOLDS, A. C., 1978, "Boundary Conditions for the Numerical Solutions of Wave Propagation Problems", Geophysics, v. 43, pp. 1099-1110.

RIETVELD, W. E. A., BERKHOUT, A. J., WAPENAAR, P. A., 1992 " Optimum seismic illumination of hydrocarbon reservoirs", Geophysics, v.57, pp. 1334-1345

RIETVELD, W. E. A., BERKHOUT, A. J., 1994. "Pre-stack depth migration by means of controlled illumination" , Geophysics, v. 59, pp. 801-809.

RIETVELD, W. E. A, 1995, "Controlled illumination of pre-stack seismic migration", Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology.

ROMERO, L. A., GHIGLIA, D. C., OBER, C. C., MORTON, S.A., 2000, "Phase encoding of shot records in pre-stack migration". Geophysics, v. 65, pp. 426-436.

ROSA FILHO, J. C., 2002, "Modelagem Sísmica de Ondas Elásticas e Migração Reversa no Tempo em Meios Transversalmente Isotrópicos", Dissertação de Mestrado, PEC-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SCHNEIDER, W. A., 1978, “Integral formulation for migration in two and three dimensions”, Geophysics, v.43, pp. 49-76

SCHULTZ, P. S., CLEARBOUT, J. F., 1978, “Velocity estimation and downward continuation by wave front synthesis”, Geophysics, v.43, pp. 691-714.

SOARES FILHO, D. M., 1994, “Inversão dos tempos das ondas refletidas: combinações de tomografia, migração e técnica de Dix”, Tese de Doutorado – P.P.P.G., Universidade Federal da Bahia.

VERSTEEG, R., GRAU, G. E., 1991, “The Marmousi experience: Proc. of 1990 EAGE Workshop on practical aspects of seismic data inversion.

WANG, C., ZHO, B., 2001, “Pre-stack depth migration experiment with multi-controlled illumination” Expanded Abstracts, SEG-Society of Exploration Geophysicists.

WAPENAAR, C. P. A., BERKHOUT, A. J., 1989, “Elasctic wavefield extrapolation redatuming of single-and multicomponent seismic data”, Elsevier Science Publ. Co., Inc.

YILMAZ, O., 2001, “Seismic Data Analysis”, SEG – Society of Exploration Geophysicists, Investigations in Geophysicists n. 10.

ZHANG, Y., SUN, J., NOTFORS, C., GRAY, S. H., CHERNIS, L., YOUNG, J., 2003, “Delayed-shot 3D depth migration”, Geophysics, v. 70, pp.E21-E28

ZHANG, Y., SUN, S. G., YOUNG, J., 2006, “Sampling Issues in Delayed-Shot Migration and Plane-Wave Migration”, EAGE-Expanded Abstracts.

WHITMORE, N. D., 1983, “Iterative depth migration by backward time propagation”, Expanded Abstracts, SEG-Society of Exploration Geophysicists.

ZHU, J., LINES, L. R., 1998, “Comparison of Kirchhoff and reverse-time migration methods with applications to pre-stack depth imaging of complex structures”, Geophysics, v. 63, pp. 1166-1176.

APÊNDICE A – MODELAGEM ACÚSTICA 3-D

A.1 - Introdução

Considere um meio acústico não-homogêneo e uma fonte sísmica na superfície deste meio. Em um determinado instante de tempo a fonte sísmica é detonada e inicia-se a propagação da onda para o interior do modelo geológico. Nas interfaces do modelo uma parte da energia é refletida retornando a superfície e outra parte é transmitida. Na superfície do meio estão posicionados os receptores para registrar os diversos tipos de ondas que retornam à superfície (reflexão primária, múltiplas, fantasmas, ondas convertidas, onda direta, *etc*.). Com a equação da onda que descreve o fenômeno da propagação pode-se simular qual é a resposta sísmica registrada na superfície (CARCIONE, 2002).

Neste Apêndice, a resposta sísmica registrada na superfície (sismograma) será obtida através da discretização da equação acústica da onda no domínio do tempo pelo método das diferenças finitas. Serão usadas aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para a derivada temporal.

A.2 – A equação acústica da onda

Considere um meio acústico não-homogêneo caracterizado por velocidade $c(x,y,z)$ e densidade constante igual a ρ_o. Seja $f(t)$ uma fonte sísmica na superfície do meio localizada na posição $(x_s, y_s, z_s = z_{obs})$. A equação acústica da onda que descreve a propagação do campo gerado pela fonte através do meio é (AKI e RICHARDS, 1980):

$$\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2(x,y,z)} \frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial t^2} = f(t)\delta(x-x_s)\delta(y-y_s)\delta(z-z_{obs}), \qquad \text{(A.1)}$$

onde $u(x, y, z, t)$ é o campo de pressão no ponto (x, y, z) e no instante t.

Na solução da equação (A.1) são consideradas as seguintes condições iniciais:

$$u(x, y, z, t) = 0 \quad \text{para } t \leq 0\,, \tag{A.2}$$

$$\dot{u}(x, y, z, t) = 0 \quad \text{para } t \leq 0\,, \tag{A.3}$$

onde $\dot{u}(x, y, z, t)$ significa a derivada temporal do campo de pressão.

Na equação (A.1) é também aplicada a condição de contorno de Dirichlet que considera o campo de pressão nulo na superfície $z = 0$, ou seja:

$$u(x, y, z = 0, t) = 0\,. \tag{A.4}$$

A.3– O termo fonte sísmica

A função fonte sísmica utilizada na modelagem será a derivada segunda da função Gaussiana (CUNHA, 1997) que é dada pela seguinte expressão matemática:

$$f(t) = \left[1 - 2\pi(\pi f_c t_d)^2\right] e^{-\pi(\pi f_c t_d)^2}\,, \tag{A.5}$$

onde:

- $t_d = t - 2\sqrt{\pi / f_c}$ é um tempo defasado;

- f_c é um parâmetro relacionado com a freqüência de corte da fonte sísmica, ou seja,

$$f_{corte} = 3\sqrt{\pi} f_c .$$

Os gráficos da função fonte e o seu espectro de amplitude são mostrados na Figura (A.1).

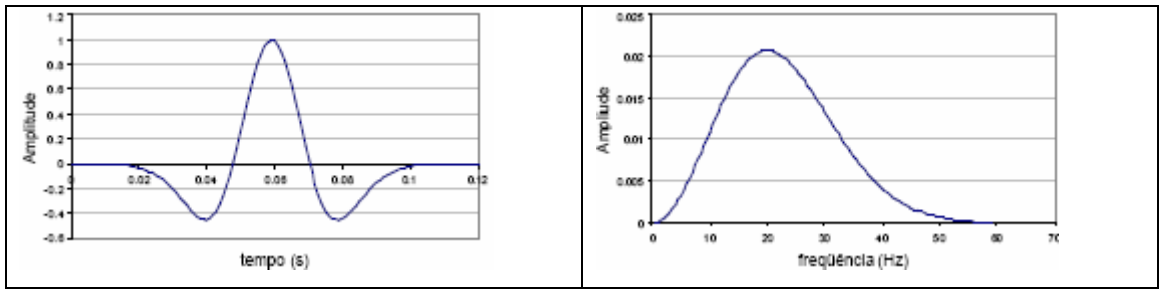


Figura A.1 – A função fonte sísmica e o espectro de amplitude para uma freqüência de corte igual a 60Hz.

A.4 –A discretização da equação acústica da onda pelo método das diferenças finitas

As variáveis espaciais que descrevem o meio, o tempo, o campo de pressão e a fonte sísmica na forma discretizada são:

$$x \to i\Delta x ,$$
$$y \to j\Delta y ,$$
$$z \to k\Delta z ,$$
$$t \to n\Delta t ,$$
$$u(x, y, z, t) \to u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) \to u_{i,j,k}^{n} ,$$
$$f(t) \to f(n\Delta t) \to f^{n} .$$

Os índices variam nos intervalos:

$$i = 1,2,\cdots, N_x ,$$
$$j = 1,2,\cdots, N_y ,$$
$$k = 1,2,\cdots, N_z ,$$

$$n = 1,2,\cdots, N_{total}\ .$$

Considerando uma malha uniforme $\Delta x = \Delta y = \Delta z = h$ as derivadas espaciais e a derivada temporal são discretizadas da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{12h^2}(-u^n_{i+2,j,k} + 16(u^n_{i-1,j,k} + u^n_{i+1,j,k}) - 30u^n_{i,j,k} - u^n_{i-2,j,k}) + O(h^4)\,, \quad \text{(A.6)}$$

$$\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial y^2} = \frac{1}{12h^2}(-u^n_{i,j+2,k} + 16(u^n_{i,j-1,k} + u^n_{i,j+1,k}) - 30u^n_{i,j,k} - u^n_{i,j-2,k}) + O(h^4)\,, \quad \text{(A.7)}$$

$$\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{12h^2}(-u^n_{i,j,k+2} + 16(u^n_{i,j,k-1} + u^n_{i,j,k+1}) - 30u^n_{i,j,k} - u^n_{i,j,k-2}) + O(h^4)\,, \quad \text{(A.8)}$$

$$\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial t^2} = \frac{1}{(\Delta t)^2}(u^{n+1}_{i,j,k} - 2u^n_{i,j,k} + u^{n-1}_{i,j,k}) + O(\Delta t^2)\,. \quad \text{(A.9)}$$

Substituindo as derivadas discretizadas na equação acústica da onda encontra-se a seguinte expressão:

$$u^{n+1}_{i,j,k} = -\frac{1}{12}a_{i,j,k}\Big\{\Big(u^n_{i-2,j,k} + u^n_{i+2,j,k} + u^n_{i,j-2.k} + u^n_{i,j+2,k} + u^n_{i,j,k-2} + u^n_{i,j,k+2}\Big)$$

$$-16\Big(u^n_{i-1,j,k} + u^n_{i+1,j,k} + u^n_{i,j-1,k} + u^n_{i,j+1,k} + u^n_{i,j,k-1} + u^n_{i,j,k+1}\Big) + 90u^n_{i,j,k}\Big\}$$

$$+ 2u^n_{i,j,k} - u^{n-1}_{i,j,k} + f^{\,n}\delta(i-i_s)\delta(j-j_s)\delta(k-k_s), \quad \text{(A.10)}$$

onde $a_{i,j,k} = \left(\frac{c_{i,j,k}\Delta t}{h}\right)^2$.

A.5- Atenuação das reflexões nas faces

Na aquisição sísmica de dados reais o semi-espaço para a propagação das ondas é infinito, sendo limitado apenas na superfície $z = 0$. Na modelagem de ondas sísmicas o meio é limitado por quatro faces laterais, uma inferior e uma superior. Devido a este fato vão aparecer, nos sismogramas modelados, reflexões indesejáveis provenientes destas faces. Portanto, nas faces laterais do modelo foram impostas condições de contorno não-reflexivas (REYNOLDS, 1978).

A condição de contorno não-reflexiva na face esquerda do modelo, para a onda propagando-se da direita para a esquerda, é obtida pela equação:

$$\frac{\partial u(x,y,z,t)}{\partial x} = -\frac{1}{c(x,y,z)}\frac{\partial u(x,y,z,t)}{\partial t} \ , \tag{A.11}$$

Empregando-se aproximações de primeira ordem para as derivadas espaciais e temporais, a equação (A.11) pode ser escrita na forma:

$$u^{n}_{i,j,k} = -\frac{h}{c_{i,j,k}\Delta t}\left(u^{n}_{i,j,k} - u^{n-1}_{i,j,k}\right) + u^{n}_{i+1,j,k} \ . \tag{A.12}$$

Para as demais faces do modelo as condições de contorno não-reflexivas podem ser obtidas de forma similar.

Com o objetivo de atenuar ainda mais as reflexões nas faces do modelo, foram empregadas as camadas de amortecimento (CERJAN *et al*., 1985):

$$w(k) = \exp\left[\left(-\ fat\left(n_{amort} - k\right)\right)^2\right] \ , \tag{A.13}$$

onde:

- k índice para indicar a distância de determinado ponto em relação à borda do modelo;

- w fator multiplicativo para atenuar o campo de pressão;

- fat fator de amortecimento;

- n_{amort} número de pontos do malha para a camada de amortecimento.

A.6- Critérios de dispersão numérica e estabilidade

A dispersão numérica e estabilidade são critérios que devem ser satisfeitos para que a resposta numérica obtida através da discretização da equação diferencial da onda, pelo método das diferenças finitas, seja uma boa aproximação.

Na implementação do programa de modelagem, utilizando o método das diferenças finitas, foram empregadas as seguintes expressões para evitar a dispersão numérica e garantir a estabilidade (BULCÃO, 2004):

$$h = \frac{V_{\min}}{\alpha f_{corte}}, \tag{A.14}$$

$$\Delta t = \frac{h}{\beta V_{\max}}, \tag{A.15}$$

onde:

- h é o espaçamento entre os pontos da malha nas direções x, y, z;

- Δt intervalo de tempo na discretizaçao temporal;

- f_{corte} freqüência de corte;

- V_{Min} menor velocidade intervalar presente no modelo de velocidade;

- $V_{Máx}$ maior velocidade intervalar presente no modelo de velocidade;

- α é o número de pontos da malha que serão empregados para representar o menor comprimento de onda, considerando a freqüência de corte e a menor velocidade do modelo.

- β determina o número de intervalos de tempo que serão necessários para que a frente de onda percorra uma distância equivalente ao espaçamento entre os pontos da malha, considerando a maior velocidade do modelo.

Na implementação do programa de modelagem sísmica foram considerados os valores α e β iguais a 5, com base nos experimentos de modelagem realizados por ROSA FILHO (2002).

A.7 - Sumário

Neste Apêndice foi implementado o algoritmo de modelagem acústica 3-D. No algoritmo a equação acústica da onda foi discretizada pelo método das diferenças finitas com aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para a derivada temporal. Com o objetivo de atenuar as reflexões indesejáveis provenientes das faces laterais do modelo foram utilizadas as condições de contorno não-reflexivas (REYNOLDS, 1978) e camadas de amortecimento (CERJAN *et al.*, 1985). Os sismogramas modelados nas aplicações foram gerados através da aplicação do algoritmo implementado neste Apêndice.

APÊNDICE B – EXPRESSÕES MATEMÁTICAS PARA A FAMÍLIA DE MÚLTIPLAS FONTES E FAMÍLIA DE MÚLTIPLOS TIROS

Neste Apêndice vão ser mostradas as expressões matemáticas que definem as famílias de múltiplas fontes e as famílias de múltiplos tiros.

Para uma fonte $f(t)$ na posição x_{si} da superfície, o sismograma correspondente é obtido através da solução da equação acústica da onda não-homogênea (Apêndice A):

$$\frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2(x,y,z)} \frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial t^2} = f(t)\delta(x - x_{si})\delta(z - z_{obs})$$

Então pode-se escrever as seguintes situações entre fontes e sismogramas gerados:

a) **Para uma função fonte** $f(t)$ **na posição** x_{si}**:**

Fonte	**sismograma**
$f(t)\delta(x - x_{si})\delta(z - z_{obs})$	$sis(x, z = z_{obs}, t, x_{si})$

b) **Para uma função** $f(t)$ **na posição** x_{si} **deslocada de** t_{ji} **tem-se**:

Fonte	**sismograma**
$f(t - t_{ji})\delta(x - x_{s_i})\delta(z - z_{obs}) =$	$sis(x, z = z_{obs}, t - t_{ji}) =$
$\delta(t - t_{ji}) * f(t)\delta(x - x_{si})\delta(z - z_{obs})$	$\delta(t - t_{ji}) * sis(x, z = z_{obs}, t, x_{si})$

onde t_{ji} corresponde a um deslocamento temporal da fonte na posição x_{si}.

c) Para uma função $f(t)$ que além de deslocada no tempo é multiplicada por um escalar a_{ji} :

Fonte	**sismograma**
$a_{ji}\delta(t-t_{ji})*f(t)\delta(x-x_{si})\delta(z-z_{obs})$	$a_{ji}\delta(t-t_{ji})*sis(x,z=z_{obs},t,x_{si})$

d) Para Na_i funções fontes $f(t)$ deslocadas em tempo e com amplitudes escalonadas por a_{ji} na posição x_{si} :

Fonte	**sismograma**
$\sum_{ji=1}^{Na_i} a_{ji}\delta(t-t_{ji})*f(t)\delta(x-x_{si})\delta(z-z_{obs})$	$\sum_{ji=1}^{Na_i} a_{ji}\delta(t-t_{ji})*sis(x,z=z_{obs},t,x_{si})$

e) Para N_{sx} traços cada um contendo Na_i funções $f(t)$ deslocadas em tempo e escalonadas:

Fonte	**sismograma**
$\sum_{i=1}^{N_{sx}}\sum_{ji=1}^{Na_i} a_{ji}\delta(t-t_{ji})*f(t)\delta(x-x_{si})\delta(z-z_{obs})$	$\sum_{i=1}^{N_{sx}}\sum_{ji=1}^{Na_i} a_{ji}\delta(t-t_{ji})*sis(x,z=z_{obs},t,x_{si})$

Definindo o operador de síntese da forma:

$$\gamma(x_{si},z=z_{obs},t)=\sum_{ji=1}^{Na_i} a_{ji}\delta(t-t_{ji}) \qquad \text{(B.1)}$$

a família de múltiplas fontes e a família de múltiplos tiros são escritas respectivamente como:

$$d(x, z = z_{obs}, t) = \sum_{i=1}^{Ns_x} \gamma(x_{si}, z = z_{obs}, t) * f(t)\delta(x - x_{si})\delta(z - z_{obs}), \quad \text{(B.2)}$$

$$\tilde{u}(x, z = z_{obs}, t) = \sum_{i=1}^{Ns_i} \gamma(x_{si}, z = z_{obs}, t) * sis(x, z = z_{obs}, t, x_{si}). \quad \text{(B.3)}$$

A família de múltiplas fontes e a família de múltiplos tiros podem ser definidas em três dimensões, respectivamente, pelas equações:

$$d(x, y, z = z_{obs}, t) = \sum_{j=1}^{Ns_y} \sum_{i=1}^{Ns_x} \gamma(x_{si}, y_{sj}, z = z_{obs}, t) * f(t)\delta(x - x_{si})\delta(y - y_{sj})\delta(z - z_{obs}) \quad \text{(B.4)}$$

$$\tilde{u}(x, y, z = z_{obs}, t) = \sum_{j=1}^{Ns_y} \sum_{i=1}^{Ns_x} \gamma(x_{si}, y_{sj}, z = z_{obs}, t) * sis(x, y, z = z_{obs}, t, x_{si}, y_{sj}) \quad \text{(B.5)}$$