



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA



GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

# APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CONTINUAÇÃO DE VELOCIDADE NA ANÁLISE DA VELOCIDADE DE MIGRAÇÃO

FERNANDO AUGUSTO SILVA CEZAR

SALVADOR – BAHIA

ABRIL – 2005



Aplicação do método de continuação de velocidade na análise da velocidade de  
migração

por

FERNANDO AUGUSTO SILVA CEZAR

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

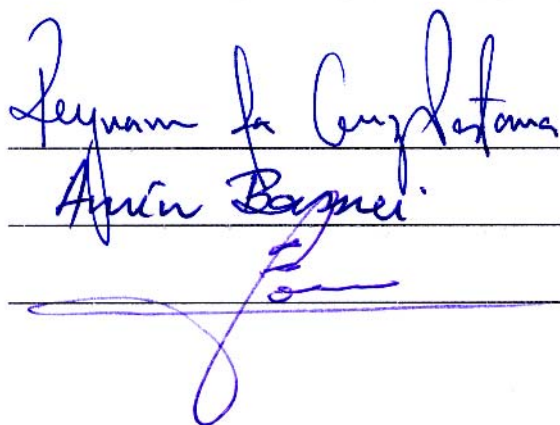
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA



Reynam da Cruz Pestana  
Amin Bassrei  
Milton José Porsani

Comissão Examinadora

Dr. Reynam da Cruz Pestana - Orientador

Dr. Amin Bassrei

Dr. Milton José Porsani

Data da aprovação: 20/04/2005

# RESUMO

Neste trabalho implementamos e aplicamos o método de continuação de velocidade proposto por Fomel (2003a) para estimar o campo de velocidade de dados sísmicos e mapear a seção sísmica migrada em tempo. Esse método transforma seções de afastamento constante migradas no tempo antes do empilhamento de acordo com mudanças na velocidade de migração. O empilhamento das seções de afastamento constante são acompanhadas de medidas de coerência *semblance*, gerando dois volumes de dados, um cubo de seções sísmicas empilhadas com velocidades constantes de migração e o outro cubo de medidas *semblance*. O campo de velocidade é então obtido pela análise de velocidade a partir dos painéis *semblance*. Ele é usado para extrair a seção sísmica migrada em tempo do cubo de seções empilhadas e migradas. Este tratamento foi aplicado com sucesso nos dados sísmicos sintéticos do modelo de velocidade constante e do modelo do domo. Além de mostrar os campos de velocidade estimados e as seções sísmicas migradas em tempo mapeadas neste dois casos, verificou-se o funcionamento adequado do operador de continuação de velocidade em famílias CRP's e em seções de afastamento constante. A continuação de velocidade foi aplicada a um dado sísmico do Golfo do México e o campo de velocidade estimado foi usado para correção de NMO. A seção empilhada resultante apresenta-se com qualidade comparável a outras duas seções empilhadas, uma associada a um campo de velocidade estimado por análise de NMO convencional e outra associada a um campo de velocidade *rms* convertido de um modelo em profundidade. Em geral, os resultados atestam a aplicabilidade do método de continuação de velocidade no processo de estimativa do campo de velocidade, bem como na etapa de imageamento sísmico.

# ABSTRACT

In this work we have implemented and applied the velocity continuation method proposed by Fomel (2003a) for velocity field estimation and time-migrated seismic section mapping. This method transforms constant-offset migrated sections before stack according with changes in migration velocity. The stack of these sections are followed by semblance coherence measures, leading to two volumes of data, one cube of stacked seismic sections with constant migration velocities and other cube of semblance measures. The velocity field is then obtained by velocity analysis from the semblance panels. It is used to extract the time-migrated seismic section from the cube of stacked and migrated sections. This approach was applied with success in two synthetic seismic datas, the constant velocity data and the dome data. More than showing the velocity fields and migrated sections in these two cases, it was verified an adequate performance of the velocity continuation operator in CRP's gathers and constant-offset sections. Velocity continuation was applied to the Gulf of Mexico data and the estimated velocity field was used for NMO correction. The stacked section derived had quality comparable to two others stacked sections, one associated with a velocity field estimated from conventional NMO analysis and other associated to rms velocity field converted from a depth model. Generally, the results confirms the applicability of the velocity continuation method in the process of velocity field estimation, as well as in seismic imaging.

# ÍNDICE

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| RESUMO . . . . .                                                      | ii  |
| ABSTRACT . . . . .                                                    | iii |
| ÍNDICE . . . . .                                                      | iv  |
| ÍNDICE DE TABELAS . . . . .                                           | vi  |
| ÍNDICE DE FIGURAS . . . . .                                           | vii |
| INTRODUÇÃO . . . . .                                                  | 1   |
| CAPÍTULO 1 Teoria da continuação de velocidade . . . . .              | 3   |
| 1.1 Cinemática e dinâmica da continuação de velocidade . . . . .      | 3   |
| 1.2 Tratamento espectral . . . . .                                    | 4   |
| CAPÍTULO 2 Aplicação da continuação de velocidade . . . . .           | 6   |
| 2.1 Algoritmo de continuação de velocidade . . . . .                  | 6   |
| 2.2 Da análise de velocidade ao mapeamento da seção migrada . . . . . | 8   |
| CAPÍTULO 3 Resultados . . . . .                                       | 12  |
| 3.1 Modelo de velocidade constante . . . . .                          | 12  |
| 3.2 Modelo do domo . . . . .                                          | 15  |
| 3.3 Dado sísmico do México . . . . .                                  | 26  |
| CAPÍTULO 4 Conclusões . . . . .                                       | 42  |
| Agradecimentos . . . . .                                              | 44  |
| APÊNDICE A Transformação tempo em tempo ao quadrado . . . . .         | 45  |
| APÊNDICE B Migração de seções de afastamento constante . . . . .      | 47  |
| B.1 Migração em seção de afastamento nulo . . . . .                   | 47  |
| B.2 Extensão à seções de afastamento constante . . . . .              | 48  |
| Referências Bibliográficas . . . . .                                  | 50  |
| ANEXO I Programa de continuação de velocidade . . . . .               | 51  |

|                  |                                                                                   |    |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>ANEXO II</b>  | <b>Análise de velocidade e cálculo do campo de velocidade</b>                     |    |
|                  | <i>rms</i> . . . . .                                                              | 62 |
| II.1             | Análise de velocidade . . . . .                                                   | 62 |
| II.2             | Conversão das tabelas <i>t versus x</i> em arquivos binários . . . . .            | 63 |
| II.3             | Interpolação na direção da variável tempo . . . . .                               | 63 |
| II.4             | Geração do campo de velocidade <i>rms</i> por concatenação dos arquivos . . . . . | 64 |
| II.5             | Interpolação do campo de velocidade na direção do ponto-médio . . . . .           | 65 |
| II.6             | Suavização do campo de velocidade . . . . .                                       | 65 |
| II.7             | Conversão entre campos de velocidade (opcional) . . . . .                         | 66 |
| <b>ANEXO III</b> | <b>Mapeamento da seção sísmica migrada em tempo</b> . . . .                       | 67 |

# ÍNDICE DE TABELAS

|     |                                                                                                                                                              |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 | Informações de aquisição do dado sísmico do modelo de velocidade constante e informações do espectro de velocidade do processo de continuação de velocidade. | 15 |
| 3.2 | Informações de aquisição do dado sísmico do domo e informações do espectro de velocidade do processo de continuação de velocidade. . . . .                   | 26 |
| 3.3 | Informações de aquisição do dado sísmico do México e parâmetros de entrada aplicados na continuação de velocidade. . . . .                                   | 29 |

# ÍNDICE DE FIGURAS

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Estrutura básica de um programa de continuação de velocidade. A leitura e gravação de dados podem ser feitos em seções de afastamento constante (sac) ou seções de velocidade constante (svc); t-t2 e t2-t indicam a transformação do tempo em tempo ao quadrado e sua inversa, fft2d e ifft2d indicam a transformação dupla de Fourier e sua inversa e ocv ilustra o operador de continuação de velocidade. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 8  |
| 2.2 | Estrutura básica que representa a implementação do método de continuação de velocidade adotada neste trabalho. A leitura e gravação de dados podem ser feitos em seções de afastamento constante (sac) ou seções de velocidade constante (svc); t-t2 e t2-t indicam a transformação do tempo em tempo ao quadrado e sua inversa, fft2d e ifft2d indicam a transformação dupla de Fourier e sua inversa e ocv ilustra o operador de continuação de velocidade. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 9  |
| 2.3 | Diagrama esquemático ilustrando o procedimento de continuação de velocidade, análise de velocidade e mapeamento da seção migrada em tempo. (a) Dado sísmico não empilhado e migrado com velocidade constante, usado como entrada para a aplicação do método de continuação de velocidade. Resultados da aplicação do método: (e) dado sísmico empilhado e migrado com diversas velocidades constantes; e (b) dado de medidas de coerência <i>semblance</i> para a análise de velocidade. Análise de velocidade: obtenção do (d) campo de velocidade <i>rms</i> por meio dos (c) painéis <i>semblance</i> . (f) Seção sísmica migrada em tempo mapeada com o auxílio do (d) campo de velocidade <i>rms</i> . (g) Seção sísmica migrada em tempo vista no plano. . . . . | 10 |
| 3.1 | Modelo em profundidade com velocidade constante e igual a 3500 <i>m/s</i> . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 15 |
| 3.2 | (a) Seção sísmica de afastamento nulo. (b) Seção sísmica de afastamento constante e igual a 1000 <i>m</i> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 16 |
| 3.3 | (a) Seção sísmica de afastamento nulo migrada com velocidade de migração igual a 2500 <i>m/s</i> a partir da seção da Figura 3.2a. (b) Seção sísmica de afastamento nulo migrada com velocidade de migração igual a 3500 <i>m/s</i> a partir da seção da Figura 3.2a. (c) Seção sísmica de afastamento nulo com velocidade de migração igual a 2500 <i>m/s</i> , gerada por continuação de velocidade a partir da seção da Figura 3.3b. (d) Seção sísmica de afastamento nulo com velocidade de migração igual a 3500 <i>m/s</i> , gerada por continuação de velocidade a partir da seção da Figura 3.3a. . . . .                                                                                                                                                      | 17 |



|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4  | (a) Seção sísmica de afastamento igual a 1000 $m$ migrada com velocidade de migração igual a 2500 $m/s$ a partir da seção da Figura 3.2b. (b) Seção sísmica de afastamento igual a 1000 $m$ migrada com velocidade de migração igual a 3500 $m/s$ a partir da seção da Figura 3.2b. (c) Seção sísmica de afastamento igual a 1000 $m$ com velocidade de migração igual a 2500 $m/s$ , gerada por continuação de velocidade a partir da seção da Figura 3.4b. (d) Seção sísmica de afastamento igual a 1000 $m$ com velocidade de migração igual a 3500 $m/s$ , gerada por continuação de velocidade a partir da seção da Figura 3.4a. . . . . | 18 |
| 3.5  | (a) Seção de afastamento mínimo igual a 25 $m$ . (b) Família CDP de valor igual a 3125 $m$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 19 |
| 3.6  | (a) Seção de afastamento mínimo igual a 25 $m$ e (b) família CRP de valor igual a 3125 $m$ , migrados com velocidade igual a 2500 $m/s$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 19 |
| 3.7  | (a) Seção de afastamento mínimo igual a 25 $m$ e (b) família CRP de valor igual a 3125 $m$ , migrados com velocidade igual a 1500 $m/s$ , por continuação de velocidade. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 20 |
| 3.8  | (a) Seção de afastamento mínimo igual a 25 $m$ e (b) família CRP de valor igual a 3125 $m$ , migrados com velocidade igual a 3500 $m/s$ , por continuação de velocidade. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 20 |
| 3.9  | (a) Seção de afastamento mínimo igual a 25 $m$ e (b) família CRP de valor igual a 3125 $m$ , migrados com velocidade igual a 6000 $m/s$ , por continuação de velocidade. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 21 |
| 3.10 | (a) Seção sísmica empilhada e migrada com velocidade constante de 2500 $m/s$ .<br>(b) Seção sísmica empilhada e migrada com velocidade constante de 4500 $m/s$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 22 |
| 3.11 | (a) Seção sísmica empilhada e migrada em tempo com velocidade de 3500 $m/s$ . (b) painel <i>semblance</i> indicando a mesma velocidade. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 23 |
| 3.12 | (a) Seção sísmica empilhada e migrada em tempo com velocidade de 3500 $m/s$ , com velocidade de migração inicial de 6000 $m/s$ . (b) Seção sísmica empilhada e migrada pelo método de migração de seções de afastamentos constante com velocidade de 3500 $m/s$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 24 |
| 3.13 | (a) Modelo em profundidade. (b) Campo de velocidade intervalar em tempo. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 25 |
| 3.14 | (a) Seção sísmica de afastamento mínimo igual a 15 $m$ e (b) família CDP de 2250 $m$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 26 |
| 3.15 | (a) Seção sísmica de afastamento mínimo igual a 15 $m$ e (b) família CRP de 2250 $m$ , migrados com velocidade de 1700 $m/s$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 27 |
| 3.16 | Seções sísmicas empilhadas e migradas com velocidade constante de (a) 1000 $m/s$ e (b) 1700 $m/s$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 28 |
| 3.17 | Painéis <i>semblance</i> de pontos-médios de (a) 2250 $m$ e de (b) 4500 $m$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 29 |

|      |                                                                                                                                                                                          |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.18 | (a) Campo de velocidade <i>rms</i> resultante do método de continuação de velocidade. (b) Seção sísmica migrada em tempo mapeada com o auxílio deste campo. . . . .                      | 30 |
| 3.19 | (a) Campo de velocidade <i>rms</i> verdadeiro obtido diretamente do campo de velocidade da Figura 3.13(a). (b) Seção sísmica migrada em tempo mapeada com o auxílio deste campo. . . . . | 31 |
| 3.20 | Modelo em profundidade proposto para o dado sísmico do México. . . . .                                                                                                                   | 32 |
| 3.21 | Campo de velocidade intervalar em tempo do dado sísmico do México, calculado a partir do campo de velocidade da Figura 3.20. . . . .                                                     | 33 |
| 3.22 | Seção sísmica empilhada e migrada com velocidade constante de 2133.6 <i>m/s</i> pela técnica de migração de seções de afastamento constante. . . . .                                     | 34 |
| 3.23 | Seção sísmica empilhada e migrada com velocidade constante de 2743.2 <i>m/s</i> , resultado da continuação de velocidade, da velocidade de 2133.6 a de 2743.2 <i>m/s</i> . . . . .       | 35 |
| 3.24 | Campo de velocidade <i>rms</i> estimado por análise de velocidade, aplicando a continuação de velocidade. . . . .                                                                        | 36 |
| 3.25 | Seção sísmica empilhada com o campo de velocidade da figura 3.24. . . . .                                                                                                                | 37 |
| 3.26 | Campo de velocidade <i>rms</i> estimado por análise de velocidade convencional ou de NMO. . . . .                                                                                        | 38 |
| 3.27 | Seção sísmica empilhada com o campo de velocidade da Figura 3.26. . . . .                                                                                                                | 39 |
| 3.28 | Campo de velocidade <i>rms</i> obtido diretamente do modelo em profundidade da Figura 3.20. . . . .                                                                                      | 40 |
| 3.29 | Seção empilhada com auxílio do campo de velocidade da Figura 3.28. . . . .                                                                                                               | 41 |
| A.1  | Seção sísmica resultante da aplicação da transformação tempo ao quadrado na seção sísmica da figura 3.11. . . . .                                                                        | 46 |

# INTRODUÇÃO

A migração de dados sísmicos é uma das etapas principais do processamento de dados sísmicos e é responsável por corrigir o posicionamento das reflexões enquanto colapsa as difrações. Considerando-se o modelo do refletor explosivo, isto equivale a dizer que as reflexões assumem a disposição no instante  $t = 0$ , quando as reflexões coincidem com a superfície dos refletores. Métodos de migração pré-empilhamento em tempo são indicados para dados sísmicos provenientes de meios geológicos onde há presença de refletores horizontais ou sub-horizontais contrastando com refletores de inclinação acentuada (Yilmaz, 2001), ou seja, em bacias sedimentares onde há ocorrência de falhas geológicas e domos de sal, feições geológicas susceptíveis à acumulação de hidrocarbonetos. Nesta condições, para conseguir seções sísmicas migradas de qualidade faz-se necessário a obtenção de um campo de velocidade que melhor represente a geologia e se ajuste a migração dos dados. O trabalho aqui descrito associa a migração pré-empilhamento em tempo à análise de velocidade levando a estimativa de um campo de velocidade e ao mapeamento da seção sísmica migrada.

O objetivo deste trabalho é avaliar o método de continuação de velocidade proposto por Fomel (2003a) como uma ferramenta no processo de análise da velocidade de migração de dados sísmicos. Este método muda a velocidade de migração no domínio da frequência e antes do empilhamento, empilha o conjunto de seções de afastamento constante a cada velocidade de migração alcançada e realiza medidas de coerência. Ele melhor define a correção de *moveout* residual convencional por considerar os movimentos laterais dos eventos refletidos migrados. Portanto, serve como uma boa ferramenta para estimativa do campo de velocidade, bem como para uma ótima seção empilhada de seções sísmicas migradas.

A continuação de velocidade pode ser interpretada como um processo artificial de transformação de imagens migradas no tempo de acordo com a mudança na velocidade de migração. Este processo possui propriedades como as das ondas, as quais foram descritas no artigo de Fomel (2003b). Hubral et al. (1996) usou o termo "ondas imagem" para descrever um princípio similar.

A aplicação do processo de continuação de velocidade para a análise de velocidade consiste nos seguintes passos: migração pré-empilhamento de dados no domínio de ponto-médio e de afastamento para gerar o dado inicial para a continuação; continuação de velocidade; empilhamento dos dados ao longo do afastamento para gerar os dados no domínio de ponto-médio e de velocidade; faz-se estimativa da melhor velocidade e então gera-se a imagem migrada final.

Os passos descritos acima foram usados para testar a metodologia de análise de velocidade e imageamento em dados sintéticos e em um dado real. A continuação de velocidade foi implementada no domínio espectral de Fourier para possibilitar uma melhor eficiência computacional do método de análise de velocidade. A seguir, são apresentados a parte teórica do método de continuação de velocidade (Capítulo 1), a descrição do algoritmo implementado para realizar a continuação de velocidade e todo o procedimento prático envolvido (Capítulo 2), a aplicação em dados sintéticos e em um dado real e a discussão dos resultados obtidos (Capítulo 3) e, por fim, análise dos resultados e as conclusões finais.

# CAPÍTULO 1

## Teoria da continuação de velocidade

Neste capítulo, é abordado o desenvolvimento analítico da teoria da continuação de velocidade com o objetivo de mostrar a procedência do operador de continuação de velocidade implementado computacionalmente. A seção 1.1 apresenta a equação cinemática da continuação de velocidade e as equações dinâmicas correspondentes que são usadas na seção seguinte. A seção 1.2 mostra a obtenção do operador de continuação de velocidade a partir das equações dinâmicas. Os detalhes do desenvolvimento teórico e a discussão das leis que determinam mudanças na geometria e intensidade das reflexões de acordo com a variação da velocidade de migração são apresentados no artigo de Fomel (2003b).

### 1.1 Cinemática e dinâmica da continuação de velocidade

A equação diferencial parcial, ou equação cinemática, que descreve o processo de continuação de velocidade para dados antes do empilhamento, é desenvolvida a partir de princípios geométricos, envolvendo a reflexão de raios em um meio de velocidade constante (Fomel, 2003b):

$$\frac{\partial \tau}{\partial v} = v\tau \left( \frac{\partial \tau}{\partial x} \right) + \frac{h^2}{v^3 \tau} - \frac{h^2 v}{\tau} \left( \frac{\partial \tau}{\partial x} \right)^2 \left( \frac{\partial \tau}{\partial h} \right)^2 \quad (1.1)$$

onde  $\tau$  é o tempo de trânsito vertical de ida (*one-way vertical travelttime*,  $\tau = z/v$ ),  $x$  é o ponto-médio,  $h$  é o meio-afastamento e  $v$  é a velocidade. O primeiro termo do lado direito da equação 1.1 corresponde à migração residual de afastamento nulo. Ele permanece quando o meio-afastamento  $h$  é zero. O segundo termo pode ser associado ao procedimento de *normal moveout* (NMO) residual. É o único que independe da inclinação do tempo de trânsito (*travelttime dip*),  $\partial \tau / \partial x$ . O terceiro termo, dependente da inclinação e do meio-afastamento, descreve o processo de *dip moveout* (DMO) residual.

Fomel (2003b) decompõe a equação 1.1 nas seguintes equações:

$$\frac{\partial \tau}{\partial v} = v\tau \left( \frac{\partial \tau}{\partial x} \right)^2, \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial v} = \frac{h^2}{v^3 \tau} \quad \text{e} \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial v} = -\frac{h^2 v}{\tau} \left( \frac{\partial \tau}{\partial x} \right)^2 \left( \frac{\partial \tau}{\partial h} \right)^2 \quad (1.4)$$

Elas são tratadas separadamente para simplificar a discussão teórica e o desenvolvimento matemático, visando a implementação computacional. A equação 1.2 é a equação cinemática para a continuação de velocidade de afastamento nulo, a equação 1.3 é a equação cinemática do processo de NMO residual e a equação 1.4, do processo de DMO residual.

Aplicando a teoria das características (Courant e Hilbert, 1989) às equações 1.2 e 1.3, Fomel (2003b) obtém as equações diferenciais dinâmicas correspondentes:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial v \partial t} + vt \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + F \left( x, t, v, P, \frac{\partial P}{\partial t}, \frac{\partial P}{\partial v}, \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0 \quad \text{e} \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial P}{\partial v} + \frac{h^2}{v^3 t} \frac{\partial P}{\partial t} + F(h, t, v, P) = 0 \quad (1.6)$$

onde  $P$  é o campo de onda. Segundo Fomel (2003a), a equação diferencial dinâmica do processo de DMO residual não é obtida devido a dificuldades ligadas a não linearidade da equação 1.4 e o efeito de DMO residual é ignorado na implementação.

A equação 1.5 governa o processo de continuação de velocidade após o empilhamento ou numa seção de afastamento nulo. É necessário, portanto, uma solução que permita a variação da velocidade  $v$  numa seção de afastamento nulo para se estimar várias dessas seções com diferentes velocidades de migração. Neste trabalho, é utilizada uma solução no espaço de Fourier. Além desse tratamento espectral, Fomel (2003a) também apresenta um algoritmo implementado por diferenças finitas. Para estender o processo de continuação de velocidade ao caso pré-empilhamento, o mesmo tratamento é aplicado à equação dinâmica de NMO residual (equação 1.6).

## 1.2 Tratamento espectral

É possível obter uma solução simples, no espaço de Fourier, para cada uma das equações diferenciais dinâmicas (1.5 e 1.6). Negligenciando-se os termos de correção de amplitude, o terceiro termo de cada uma dessas equações, o par de equações pode ser reescrito como

$$\left[ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial v} \frac{\partial}{\partial t} P(x, t, h = 0, v) + vt \frac{\partial^2}{\partial x^2} P(x, t, h = 0, v) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial v} P(x, t, h, v) + \frac{h^2}{v^3 t} \frac{\partial}{\partial t} P(x, t, h, v) = 0 \end{array} \right] \quad (1.7)$$

A substituição da variável  $t$  por  $\sigma$ , onde  $\sigma = t^2$  e  $\partial \sigma = 2t \partial t$ , e a aplicação da transformada dupla de Fourier, em relação a  $x$  e a  $\sigma$ , transformam o par de equações 1.7 nos pares 1.8, 1.9 e 1.10:

$$\left[ \begin{array}{l} 2 \frac{\partial}{\partial v} \frac{\partial}{\partial \sigma} P(x, \sigma, h = 0, v) + v \frac{\partial^2}{\partial x^2} P(x, \sigma, h = 0, v) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial v} P(x, \sigma, h = 0, v) + \frac{2h^2}{v^3} \frac{\partial}{\partial \sigma} P(x, \sigma, h, v) = 0 \end{array} \right] \quad (1.8)$$

$$\left[ \begin{array}{l} 2 \frac{\partial}{\partial v} \frac{\partial}{\partial \sigma} \bar{P}(k, \sigma, h = 0, v) - vk^2 \bar{P}(k, \sigma, h = 0, v) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial v} \bar{P}(k, \sigma, h, v) + \frac{2h^2}{v^3} \frac{\partial}{\partial \sigma} \bar{P}(k, \sigma, h, v) = 0 \end{array} \right] \quad (1.9)$$

$$\left[ \begin{array}{l} 2i\Omega \frac{\partial}{\partial v} \hat{P}(k, \Omega, h = 0, v) - vk^2 \hat{P}(k, \Omega, h = 0, v) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial v} \hat{P}(k, \Omega, h, v) + \frac{2i\Omega h^2}{v^3} \hat{P}(k, \Omega, h, v) = 0 \end{array} \right] \quad (1.10)$$

onde o último par é formado por equações diferenciais ordinárias de fácil resolução. Note que os pares de equações 1.9 e 1.10 são os resultados da aplicação da transformada de Fourier em relação a  $x$  e  $\sigma$ , respectivamente. Em seguida, resta obter a solução de cada equação diferencial:

$$\left[ \begin{array}{l} \int_{\hat{P}_0}^{\hat{P}} \frac{1}{\hat{P}} d\hat{P} = \frac{k^2}{2i\Omega} \int_{v_0}^v v dv \\ \int_{\hat{P}_0}^{\hat{P}} \frac{1}{\hat{P}} d\hat{P} = -2i\Omega h^2 \int_{v_0}^v \frac{1}{v^3} dv \end{array} \right] \quad (1.11)$$

$$\left[ \begin{array}{l} \ln \frac{\hat{P}}{\hat{P}_0} = \frac{ik^2(v_0^2 - v^2)}{4\Omega} \\ \ln \frac{\hat{P}}{\hat{P}_0} = -i\Omega h^2 (v_0^{-2} - v^{-2}) \end{array} \right] \quad (1.12)$$

$$\left[ \begin{array}{l} \hat{P}(k, \Omega, h = 0, v) = \hat{P}_0(k, \Omega, h = 0, v_0) e^{ik^2(v_0^2 - v^2)/4\Omega} \\ \hat{P}(k, \Omega, h, v) = \hat{P}_0(k, \Omega, h, v_0) e^{-i\Omega h^2(v_0^{-2} - v^{-2})} \end{array} \right] \quad (1.13)$$

As soluções das equações diferenciais de migração residual de afastamento nulo e NMO residual podem ser reformuladas numa única expressão:

$$\hat{P}(k, \Omega, h, v) = \hat{P}_0(k, \Omega, h, v_0) e^{i[k^2(v_0^2 - v^2)/(4\Omega) - \Omega h^2(v_0^{-2} - v^{-2})]} \quad (1.14)$$

o operador de continuação de velocidade pré-empilhamento. Observe que, se  $h = 0$ , a solução vira um operador pós-empilhamento.

Uma característica importante está encerrada na equação 1.14. Este operador permite a variação da velocidade de migração sem a necessidade de sair do espaço de Fourier. As transformações direta e inversa podem ser aplicadas uma vez cada, independente do número de velocidades desejadas. Em comparação com a aplicação de um método de migração no domínio da frequência com velocidade constante, com a finalidade de realizar análise de velocidade, isto garante um menor tempo de execução computacional. Nesta forma mais corriqueira, as transformações de Fourier são executadas quantas vezes forem as velocidades desejadas. Note ainda que ao empilhar o dado sísmico no espaço de Fourier, o termo do lado esquerdo da equação 1.14 é substituído por  $\hat{P}(k, \Omega, v)$ .

## CAPÍTULO 2

### Aplicação da continuação de velocidade

Uma vez obtido o operador de continuação de velocidade, resta mostrar como este é implementado na forma de um programa. Neste capítulo, são discutidos a implementação adotada da continuação de velocidade, assim como de todo o procedimento efetuado até o cálculo da seção sísmica migrada em tempo. Pretende-se mostrar, intuitivamente, como foram feitos a análise de velocidade, o empilhamento, as medidas de coerência e o mapeamento da seção sísmica migrada em tempo.

#### 2.1 Algoritmo de continuação de velocidade

A aplicação de técnicas como a substituição de variável e transformada de Fourier às equações diferenciais dinâmicas (equações 1.7), desprezando-se o termo associado ao processo de DMO residual por simplicidade (expresso na equação 1.4), permite chegar a uma solução analítica simples no domínio do número de onda  $k$  e da frequência da variável tempo ao quadrado  $\Omega$ , a equação 1.14. Para que seja possível aplicar esta solução, um algoritmo de continuação de velocidade precisa conter os seguintes passos:

1. Entrar com o dado sísmico ordenado em seções de afastamento constante migrado em tempo com velocidade constante  $v_0$ :  $P_0(t, x, h, v_0)$ .
2. Transformar a coordenada tempo  $t$  em tempo ao quadrado  $\sigma$ :  $P_0(\sigma, x, h, v_0)$ .
3. Aplicar a transformada rápida de Fourier em ambas as coordenadas do tempo ao quadrado  $\sigma$  e do ponto-médio  $x$ :  $\hat{P}_0(\Omega, k, h, v_0)$ .
4. Aplicar o operador de continuação de velocidade (equação 1.14) para alterar a velocidade de migração para  $v$ :  $\hat{P}(\Omega, k, h, v)$ .
5. Empilhar as seções de afastamento constante:  $\hat{P}(\Omega, k, v)$ .
6. Aplicar a transformada dupla inversa de Fourier:  $P(\sigma, x, v)$ .
7. Transformar a coordenada tempo ao quadrado  $\sigma$  na coordenada tempo  $t$ :  $P(t, x, v)$ .



## 8. Gravar a seção de velocidade constante.

Ao se repetir o passo 4 para diversos valores de velocidade  $v$ , empilhando o dado a cada ciclo, é obtido um cubo com dimensões de tempo, ponto-médio e velocidade. Ou seja, um conjunto de seções empilhadas e migradas em tempo com velocidade constante. Durante o empilhamento, são realizadas medidas de coerência *semblance*. Elas são necessárias para a análise de velocidade.

Um programa de computador que contemplasse os passos apresentados, implementando cada transformação no dado sísmico da forma mais direta e independente possível, teria a estrutura como a apresentada na Figura 2.1. A estrutura desse programa está dividido em 5 partes, separadas por linhas horizontais. Cada parte equivale a uma transformação: transformação do tempo em tempo ao quadrado ( $t-t^2$ ), transformada rápida de Fourier 2D (fft 2d), aplicação do operador de continuação de velocidade (ocv) e empilhamento, transformada rápida inversa de Fourier 2D (ifft 2d) e transformação do tempo ao quadrado em tempo ( $t^2-t$ ); considerando a ordem de execução. Além dessas operações, estão indicadas a leitura e a gravação dos dados. Existe duas possibilidades para a leitura e a gravação quanto ao tipo de organização dos dados: seções de afastamento constante (sac) ou seções de velocidade constante (svc). Portanto, a terceira linha do programa indica que a cada volta do ciclo é lida uma seção de afastamento constante. Não há necessidade de realizar uma leitura e uma gravação em cada parte do programa. Esta característica foi mantida para sugerir a idéia de que este único programa pode dar origem a 5 programas separados. Observe que na terceira parte do programa existe um ciclo de velocidade. Isto significa que, para cada valor de velocidade, haverá a leitura ordenada das seções de afastamento constante, que serão submetidas ao operador de continuação de velocidade (ocv), uma após a outra. Após o empilhamento, uma seção de velocidade constante (svc) é gravada, uma a cada volta do ciclo de velocidade. Este tipo de implementação garante que a variação da velocidade de migração seja alcançada sucessivas vezes sem a necessidade de sair do espaço de Fourier.

Uma implementação seguindo a estrutura básica apresentada na Figura 2.1 é suficiente. Entretanto, a implementação adotada neste trabalho segue a estrutura apresentada na Figura 2.2. Nesta estrutura, o ciclo de velocidade envolve a aplicação da transformação inversa de Fourier (ifft 2d). Esta transformação ocorre antes do empilhamento. Assim como na implementação anterior (Figura 2.1), e ao contrário da simples execução de um método de migração no domínio da frequência com velocidade constante, o dado sísmico é transformado apenas uma única vez para este domínio.

Para que um programa seja mais rápido, recomenda-se que o empilhamento seja aplicado logo após a transformação ocv. Isto implica que a transformação ifft2d é aplicada uma única vez a cada valor de velocidade, como na Figura 2.1. Esta modificação foi implementada, mas sem sucesso. A implementação computacional adotada, como na Figura 2.2, realiza

a transformação `ifft2d` uma quantidade de vezes igual ao número de seções de afastamento constante para cada valor de velocidade.

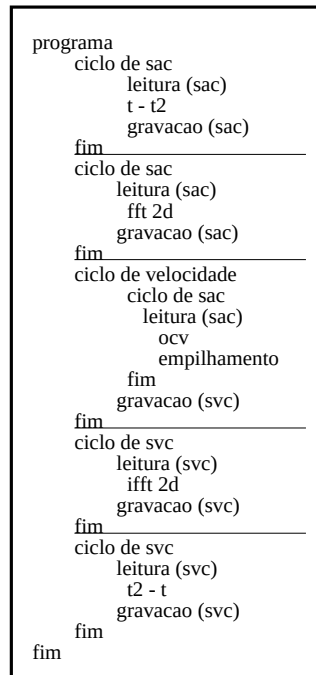


Figura 2.1: Estrutura básica de um programa de continuação de velocidade. A leitura e gravação de dados podem ser feitos em seções de afastamento constante (sac) ou seções de velocidade constante (svc);  $t-t_2$  e  $t_2-t$  indicam a transformação do tempo em tempo ao quadrado e sua inversa, `fft2d` e `ifft2d` indicam a transformação dupla de Fourier e sua inversa e `ocv` ilustra o operador de continuação de velocidade.

## 2.2 Da análise de velocidade ao mapeamento da seção migrada

A utilização do método de continuação de velocidade como uma ferramenta na análise da velocidade de migração compreende efetuar procedimentos adicionais à simples execução do programa de continuação de velocidade. Para melhorar a compreensão de todo o procedimento necessário para se obter um campo de velocidade e uma seção sísmica migrada em tempo de um dado sísmico, os dois resultados importantes da continuação de velocidade, foi elaborado um diagrama esquemático (Figura 2.3). O dado sísmico não empilhado e migrado com velocidade constante (Figura 2.3a) é a entrada do programa de continuação de velocidade. São resultados desse programa, o dado sísmico empilhado e migrado com diversas velocidades constantes (Figura 2.3e) e o dado com medidas de coerência *semblance* (Figura 2.3b). Este é organizado na forma de painéis *semblance* (Figura 2.3c), utilizados na análise

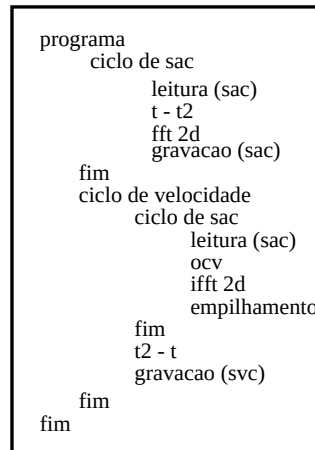


Figura 2.2: Estrutura básica que representa a implementação do método de continuação de velocidade adotada neste trabalho. A leitura e gravação de dados podem ser feitos em seções de afastamento constante (sac) ou seções de velocidade constante (svc);  $t-t_2$  e  $t_2-t$  indicam a transformação do tempo em tempo ao quadrado e sua inversa,  $\text{fft}2d$  e  $\text{ifft}2d$  indicam a transformação dupla de Fourier e sua inversa e  $\text{ocv}$  ilustra o operador de continuação de velocidade.

de velocidade para obtenção do campo de velocidade *rms* (Figura 2.3d). O campo de velocidade permite extrair a seção migrada em tempo (Figura 2.3f) do cubo de dados (Figura 2.3e). A Figura 2.3g é equivalente à Figura 2.3f, porém projetada num plano.

Um programa iterativo de visualização 3D consegue reproduzir os passos envolvidos nas Figuras 2.3b a 2.3g, exatamente como estão ilustradas (como está sugerido nas páginas 805-809 de Yilmaz (2001)). Mas, aqui, a realização de todo o procedimento representado pelo diagrama esquemático consistiu, na prática, na execução de procedimentos independentes divididos em 4 partes:

1. O programa de migração de seções de afastamento constante que prepara o dado sísmico como entrada para a continuação de velocidade, migrando-o com velocidade constante; implementado em FORTRAN90.
2. O programa de continuação de velocidade para gerar o cubo sísmico (Figura 2.3e) e o cubo de medidas de coerência (Figura 2.3b), implementado em FORTRAN90 (anexo I).
3. Conjunto de programas em *shell script* (anexo II) que utiliza comandos do *Seismic Unix* (SU) para efetuar a análise de velocidade e para construir o campo de velocidade *rms* (Figura 2.3d).
4. O programa em FORTRAN90 (anexo III) para mapear a seção sísmica migrada em

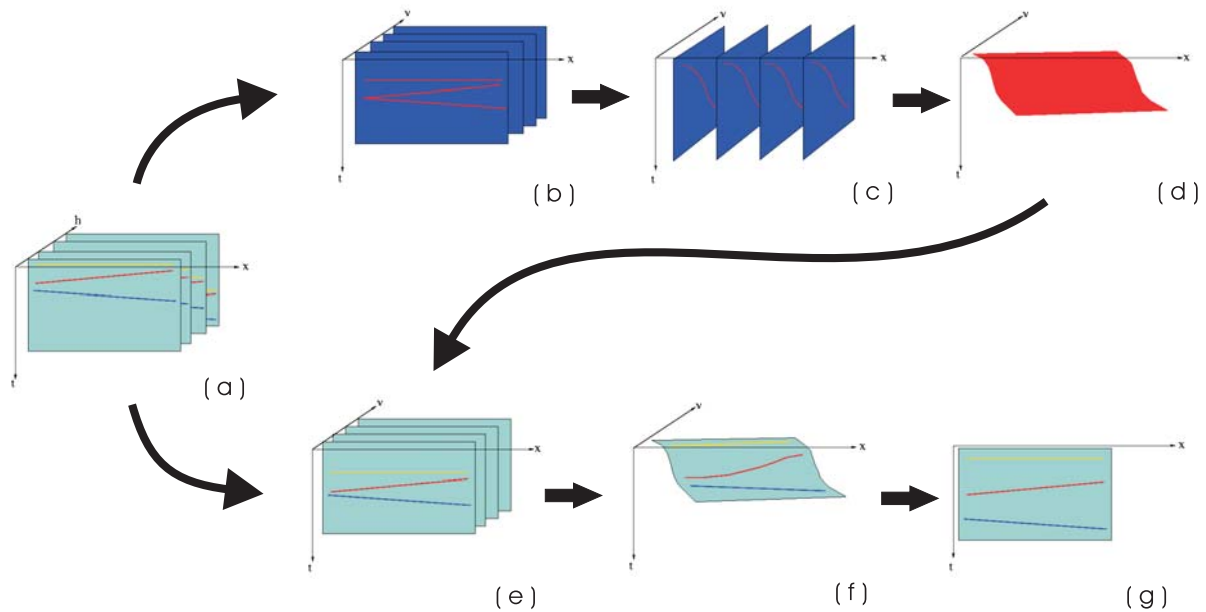


Figura 2.3: Diagrama esquemático ilustrando o procedimento de continuação de velocidade, análise de velocidade e mapeamento da seção migrada em tempo. (a) Dado sísmico não empilhado e migrado com velocidade constante, usado como entrada para a aplicação do método de continuação de velocidade. Resultados da aplicação do método: (e) dado sísmico empilhado e migrado com diversas velocidades constantes; e (b) dado de medidas de coerência *semblance* para a análise de velocidade. Análise de velocidade: obtenção do (d) campo de velocidade *rms* por meio dos (c) painéis *semblance*. (f) Seção sísmica migrada em tempo mapeada com o auxílio do (d) campo de velocidade *rms*. (g) Seção sísmica migrada em tempo vista no plano.

tempo (Figura 2.3f).

O Apêndice B contém uma breve apresentação da teoria e do algoritmo de migração do item 1. A discussão sobre o item 2 foi apresentada na Seção 2.1. O anexo que se refere ao item 3 está acompanhado de discussão. Ainda nesta seção, o item 4 será discutido.

A análise de velocidade aqui aplicada segue o princípio de que a migração de cada seção de afastamento constante forneceria imagens migradas idênticas se fosse possível usar um campo de velocidade correto para migrar cada uma das seções de afastamento constante. Isto significa que reflexões primárias em uma família CRP, análoga migrada e não empilhada de uma família CMP corrigida de NMO e DMO, estariam horizontalizadas. A aplicação da medida *semblance* tira proveito dessa redundância de informações, medindo a coerência ao longo dos afastamentos em famílias CRP, na forma de alinhamentos retílineos (Neidell e Taner, 1971). Assim, o valor *semblance* é uma medida da energia de focalização das reflexões

na direção do afastamento e varia no intervalo fechado  $[0, 1]$ . Uma vez que são empilhadas seções de afastamento constante migradas com velocidade constante, a energia de focalização está relacionada à velocidade.

A medida *semblance* não é avaliada diretamente de uma família CRP. Ela se adapta ao empilhamento das seções de afastamento constante. O empilhamento de um dado sísmico ordenado em seções de afastamento constante pode ser expresso por

$$P(x, t) = \frac{\sum_{h=1}^N P_h(x, t)}{N} \quad (2.1)$$

onde  $P_h(x, t)$  representa as seções de afastamento constante e  $N$  é o número de seções de afastamento constante. Aproveitando o estilo da equação 2.1, feita para representar o empilhamento das seções de afastamento constante, é proposta uma expressão para calcular medidas de coerência *semblance*:

$$S(x, t) = \frac{1}{N} \frac{\left( \sum_{h=1}^N P_h(x, t) \right)^2}{\sum_{h=1}^N (P_h(x, t))^2} \quad (2.2)$$

onde  $S(x, t)$  é uma "seção" cujas amplitudes são medidas de coerência *semblance* e tem o mesmo número de amostras e organização da seção empilhada  $P(x, t)$  (equação 2.1), como está representado na Figura 2.3b. A equação 2.2 indica que cada empilhamento gera um número de medidas *semblance* igual ao produto entre o número de amostras no tempo e o número de amostras no espaço. Enfim, os painéis *semblance* são obtidos de forma indireta, bastando selecioná-los, como indicado na Figura 2.3c.

Na prática, a medida *semblance* envolve ainda uma janela de tempo, aqui fixada em 6 amostras acima e 6 amostras abaixo do tempo de posicionamento de cada medida *semblance*, como foi sugerido por Neidell e Taner (1971). Em um dado sísmico de 4ms de intervalo de amostragem temporal, significa fixar uma janela de tempo de 48ms. Ao contrário da medida pontual expressa pela equação 2.2, esta implementação considera a vizinhança temporal em cada ponto e pode ser representada pela equação

$$S(x, t) = \frac{1}{N} \frac{\sum_t \left( \sum_{h=1}^N P_h(x, t) \right)^2}{\sum_t \left( \sum_{h=1}^N (P_h(x, t))^2 \right)} \quad (2.3)$$

O campo de velocidade *rms* pode ser pensado como uma função de duas variáveis, o ponto-médio  $x$  e o tempo  $t$ :  $v(x_i, t_j)$ . Esta função, uma superfície, está ilustrada na Figura 2.3d. Por outro lado, é útil pensá-lo como pontos fixos, assumindo  $v$  como mais uma coordenada, a terceira do espaço:  $(x_i, t_j, v(x_i, t_j))$ . Para se obter a seção sísmica migrada em tempo, basta selecionar as amplitudes de coordenadas  $x_i$ ,  $t_j$ , e  $v(x_i, t_j)$  do cubo de dados sísmicos e indicadas pelo campo de velocidade. Nisto consiste o mapeamento da seção sísmica dentro do cubo de dados.

## CAPÍTULO 3

# Resultados

O método de continuação de velocidade foi testado em dois dados sintéticos, em um modelo de velocidade constante (Seção 3.1) e no modelo do domo (Seção 3.2). A última seção (Seção 3.3) é reservada a discussão de uma aplicação em dado real. O campo de velocidade *rms* e a seção migrada em tempo são os resultados finais da aplicação do método de continuação de velocidade como uma ferramenta na análise da velocidade de migração. Antes desses resultados, porém, é útil ilustrar o funcionamento do operador de mudança de fase (equação 1.14) no modelo de velocidade constante, devido a sua simplicidade.

### 3.1 Modelo de velocidade constante

O modelo em profundidade com velocidade constante está apresentado na Figura 3.1. Ele possui refletores com variados ângulos de mergulho e toda extensão do modelo tem velocidade de propagação de ondas fixadas em  $3500\text{ m/s}$ , o que torna o modelo bastante simplificado do ponto-de-vista dos métodos de migração. As principais características do dado sísmico sintético podem ser verificadas na tabela 3.1. As informações referentes ao espectro de velocidade são parâmetros que foram aplicados na execução do programa de continuação de velocidade.

Para avaliar o funcionamento do operador de continuação de velocidade (equação 1.14), este foi aplicado a duas seções sísmicas de afastamento constante do modelo de velocidade constante, mostradas na Figura 3.2. A Figura 3.2a é uma seção de afastamento nulo, enquanto a Figura 3.2b é uma seção de afastamento igual a  $1000\text{ m}$ .

A Figura 3.3 serve para comparar os resultados da continuação de velocidade com os resultados da migração de seções de afastamento constante aplicada a seções de afastamento nulo (Apêndice B). As Figuras 3.3a e 3.3b são resultantes da migração da Figura 3.2a com velocidade de  $2500\text{ m/s}$  e  $3500\text{ m/s}$ , respectivamente. Alterando a velocidade de migração de  $2500\text{ m/s}$  para  $3500\text{ m/s}$ , por meio da continuação de velocidade, a imagem da Figura 3.3a é transformada na da Figura 3.3d. Pela continuação de velocidade, a imagem da Figura 3.3b foi transformada na da Figura 3.3c, passando à velocidade de  $2500\text{ m/s}$ . Os resultados da migração e da continuação de velocidade são equivalentes. Ou seja, as reflexões estão

corretamente posicionadas, as reflexões da Figura 3.3c em relação as da Figura 3.3a e as reflexões da Figura 3.3d em relação as da Figura 3.3b. Deve-se lembrar que este teste foi aplicado a uma seção de afastamento nulo. Consequentemente, não há participação do termo de NMO residual no processo, como determina a equação 1.14. Portanto, esses resultados mostram o funcionamento correto do termo de migração residual da continuação de velocidade.

Os resultados apresentados na Figura 3.4 são análogos aos apresentados na Figura anterior. Similarmente, as Figuras 3.4c e 3.4d resultam da aplicação da continuação de velocidade às Figuras 3.4b e 3.4a, respectivamente. E as seções das Figuras 3.4a ( $2500\text{ m/s}$ ) e 3.4b ( $3500\text{ m/s}$ ) foram obtidas por migração da seção da Figura 3.2b. Todavia, com um afastamento de  $1000\text{ m}$ , o termo de NMO residual opera simultaneamente com o termo de migração residual. Observe os deslocamentos verticais das reflexões associados ao termo de NMO residual. Verifica-se que os resultados são equivalentes, quando se compara a Figura 3.4a com a Figura 3.4c e a Figura 3.4b com a Figura 3.4d. Não existe a reflexão horizontal mais rasa na Figura 3.4d devido ao fato da mesma ter sido calculada a partir da Figura 3.4a, onde também ela não existe. Deve ser notado que o restante das reflexões foram deslocadas verticalmente para a posição correta. Isto pode ser verificado ao se comparar os tempos de todas as reflexões horizontais da Figura 3.4d com os tempos dessas reflexões na Figura 3.3d, por exemplo. Em conjunto com a Figura 3.3, estes testes asseguram o funcionamento correto do operador de continuação de velocidade.

É útil ainda observar o comportamento do operador de continuação de velocidade em famílias CRP. A Figura 3.5 mostra a seção sísmica de afastamento mínimo igual a  $25\text{ m}$  e uma família CDP de  $3125\text{ m}$ . Ao migrar o dado com velocidade de  $2500\text{ m/s}$ , temos os resultados da Figura 3.6. As Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 têm a mesma seção sísmica e a mesma família CRP, porém obtidas por continuação de velocidade para as velocidades de  $1500\text{ m/s}$ ,  $3500\text{ m/s}$  e  $6000\text{ m/s}$ , respectivamente. A família CRP de cada Figura é acompanhada da seção de afastamento mínimo migrada para se observar o efeito da mudança de velocidade de migração neste tipo de organização de dados também. As famílias CRP das Figuras 3.6 e 3.7 apresentam sobrecorreção devido à baixa velocidade de migração, enquanto a família CRP 3.9 apresenta subcorreção devido à alta velocidade de migração. A família CRP da Figura 3.8 está corrigida de NMO pelo uso da velocidade apropriada de migração. A sobrecorreção associada à baixa velocidade de migração e a subcorreção associada a alta velocidade de migração nestas CRP's estão em concordância com a relação entre a velocidade de NMO e a correção de NMO em famílias CDP's.

Verificamos os resultados da migração com velocidade constante em seções de afastamento constante. Ao empilhar todo o conjunto de dados migrados com velocidade constante, chegamos aos exemplos apresentados na Figura 3.10: duas seções empilhadas e migradas, uma com velocidade de  $2500\text{ m/s}$  e a outra com  $4500\text{ m/s}$ , respectivamente. Nestas duas

seções sísmicas, fica evidente que a focalização de reflexões ao longo de diferentes afastamentos não está contribuindo construtivamente para um único evento. Devido a velocidades de migração desapropriadas, as famílias CRP's não têm seus eventos horizontalizados.

A análise do painel *semblance* da Figura 3.11b indica a velocidade correta de migração, igual à  $3500\text{ m/s}$ . Com esta informação de velocidade, podemos extrair a seção sísmica migrada do cubo de dados, a seção sísmica da Figura 3.11a. A reflexão mais rasa apresenta uma descontinuidade a partir do ponto-médio de  $3400\text{ m}$ , aproximadamente, embora o refletor equivalente se estenda a mais de  $4000\text{ m}$ , como mostra a Figura 3.1. Isto se deve ao fato de ter sido executada uma migração com uma velocidade baixa de  $2500\text{ m/s}$ , que tornam as reflexões sobrecorrigidas, considerando a organização do dado sísmico em famílias CRP's (Figura 3.6b). Como a continuação de velocidade usou esse conjunto de dados com velocidade igual a  $2500\text{ m/s}$  para calcular todas as outras velocidades, parte das reflexões, as mais rasas e de afastamentos maiores, são perdidas. Isto pode ser verificado nas Figuras 3.8 e 3.9, onde as amplitudes da primeira reflexão com afastamentos maiores que  $500\text{ m}$  e da segunda reflexão com afastamentos maiores que  $2000\text{ m}$  não são recuperadas. Por isso, a seção de afastamento constante da Figura 3.4d não apresenta a primeira reflexão. A Figura 3.12a, mostra uma seção migrada obtida da mesma forma que a da Figura 3.11, entretanto, com a velocidade inicial de  $6000\text{ m/s}$ , o que torna as reflexões subcorrigidas. Neste caso, a primeira reflexão não apresenta descontinuidade, embora esteja estirada. O mesmo estiramento não ocorre na seção da Figura 3.11 uma vez que parte das primeiras reflexões, com afastamentos maiores, foram eliminadas. A Figura 3.12b é o resultado da aplicação da migração de seções de afastamento constante com velocidade de  $3500\text{ m/s}$  e empilhamento.



|                                |                 |
|--------------------------------|-----------------|
| número de tiros                | 128             |
| intervalo de tiro              | 25 <i>m</i>     |
| número de receptores           | 96              |
| intervalo de receptores        | 25 <i>m</i>     |
| número de amostras no tempo    | 512             |
| intervalo de amostras no tempo | 4 <i>ms</i>     |
| afastamento mínimo             | 25 <i>m</i>     |
| velocidade inicial de migração | 2500 <i>m/s</i> |
| valor mínimo de velocidade     | 1500 <i>m/s</i> |
| valor máximo de velocidade     | 6000 <i>m/s</i> |
| intervalo de velocidade        | 50 <i>m/s</i>   |

Tabela 3.1: Informações de aquisição do dado sísmico do modelo de velocidade constante e informações do espectro de velocidade do processo de continuação de velocidade.

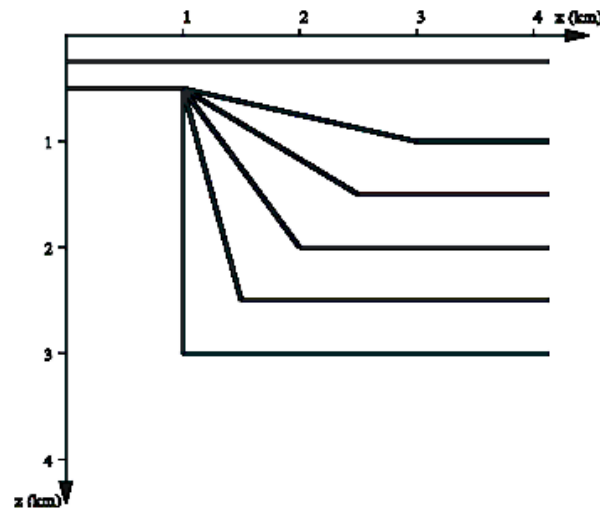


Figura 3.1: Modelo em profundidade com velocidade constante e igual a 3500 *m/s*.

## 3.2 Modelo do domo

O modelo em profundidade do domo apresenta camadas com velocidade constante e variações relativamente pequenas de velocidade vertical e horizontal (Figura 3.13a). A Figura 3.13b mostra o campo de velocidade intervalar em tempo, útil para comparar com a seção sísmica migrada em tempo resultante da continuação de velocidade. Ele foi obtido diretamente do

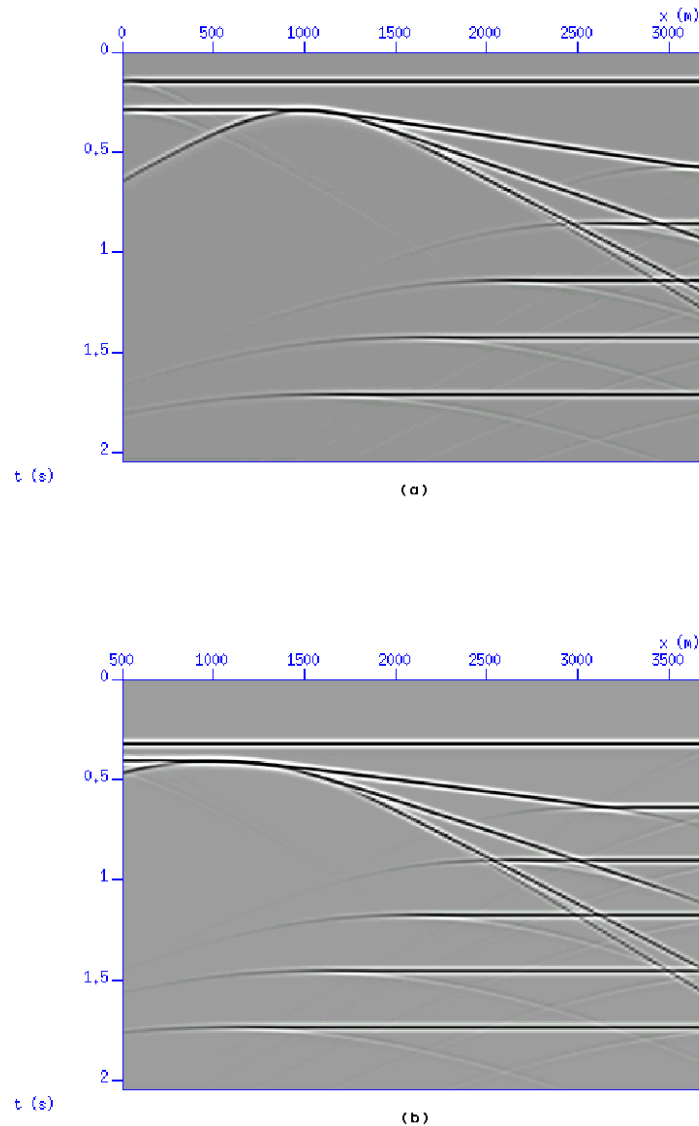


Figura 3.2: (a) Seção sísmica de afastamento nulo. (b) Seção sísmica de afastamento constante e igual a 1000  $m$ .

modelo em profundidade da Figura 3.13a. A tabela 3.2 mostra as principais informações de aquisição e parâmetros utilizados na execução da continuação de velocidade.

A Figura 3.14a mostra a seção de afastamento mínimo de 25  $m$ , enquanto a Figura 3.14b mostra o CDP de 2250  $m$ . Na Figura 3.15, a mesma seção de afastamento constante e o CRP de 2250  $m$  estão migrados com velocidade de 1700  $m/s$ . Observe que algumas reflexões estão aproximadamente horizontalizadas. As Figuras 3.16a e 3.16b são exemplos de seções sísmicas empilhadas e migradas com velocidade constante, de 1000  $m/s$  e 1700  $m/s$ , respectivamente. As Figuras 3.17a e 3.17b mostram dois painéis *semblance* de pontos-médios iguais a 2250  $m$  e 4500  $m$ . Na Figura 3.18, está apresentado o resultado final do método de continuação de velocidade: o campo de velocidade *rms* (Figura 3.18a) e a seção

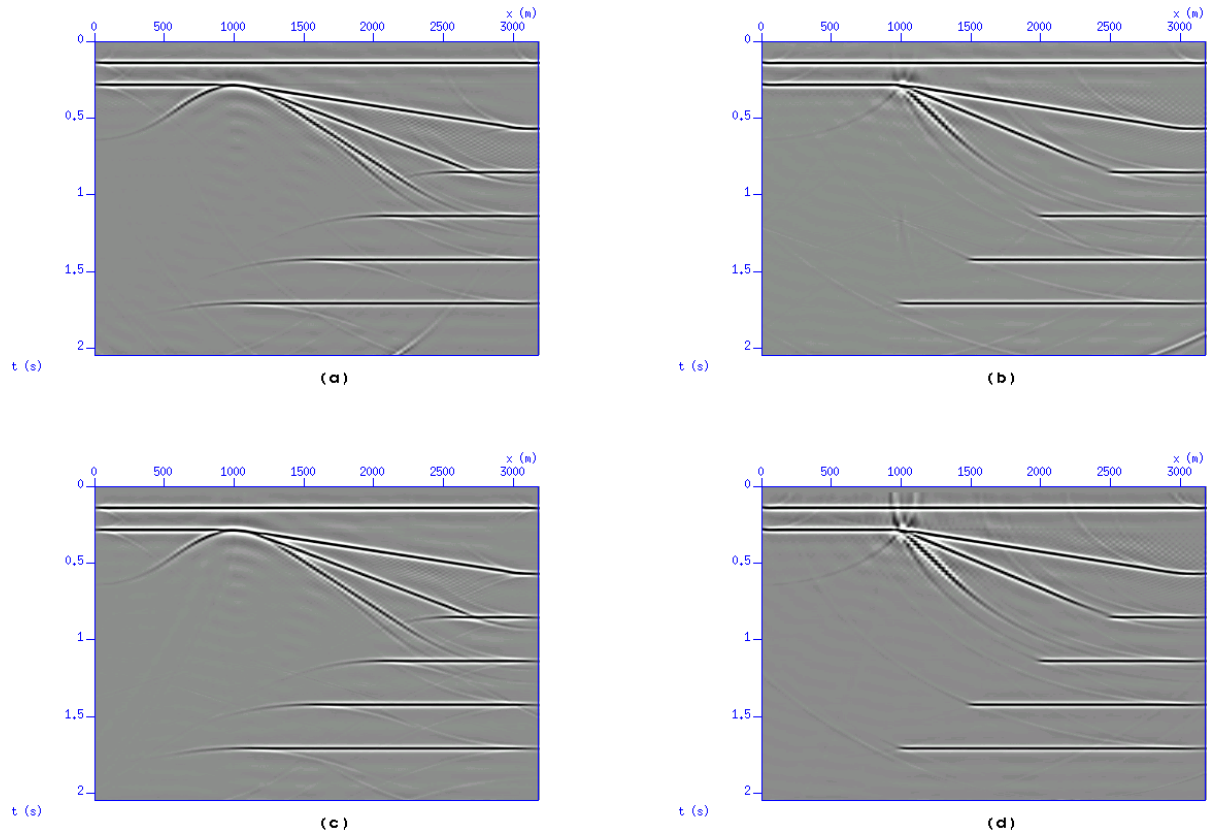


Figura 3.3: (a) Seção sísmica de afastamento nulo migrada com velocidade de migração igual a  $2500 \text{ m/s}$  a partir da seção da Figura 3.2a. (b) Seção sísmica de afastamento nulo migrada com velocidade de migração igual a  $3500 \text{ m/s}$  a partir da seção da Figura 3.2a. (c) Seção sísmica de afastamento nulo com velocidade de migração igual a  $2500 \text{ m/s}$ , gerada por continuação de velocidade a partir da seção da Figura 3.3b. (d) Seção sísmica de afastamento nulo com velocidade de migração igual a  $3500 \text{ m/s}$ , gerada por continuação de velocidade a partir da seção da Figura 3.3a.

sísmica migrada em tempo mapeada com auxílio deste campo. É possível ainda mapear uma seção sísmica migrada em tempo por meio do campo de velocidade *rms* verdadeiro do modelo. Este resultado está ilustrado na Figura 3.19. Embora os campos de velocidade sejam bem distintos, as seções migradas das Figuras 3.18b e 3.19b são muito semelhantes. Esta condição revela um aspecto positivo, o fato de se obter uma seção sísmica, mapeada com um campo de velocidade aproximado, semelhante ou idêntica a seção sísmica resultante do uso de um campo de velocidade verdadeiro.

A comparação das imagens das Figuras 3.18b e 3.19b com o campo de velocidade intervalar em tempo (Figura 3.13b) permite avaliar o posicionamento das reflexões. Em geral, as reflexões estão corretamente posicionadas. Há um detalhe ainda a ser comentado.

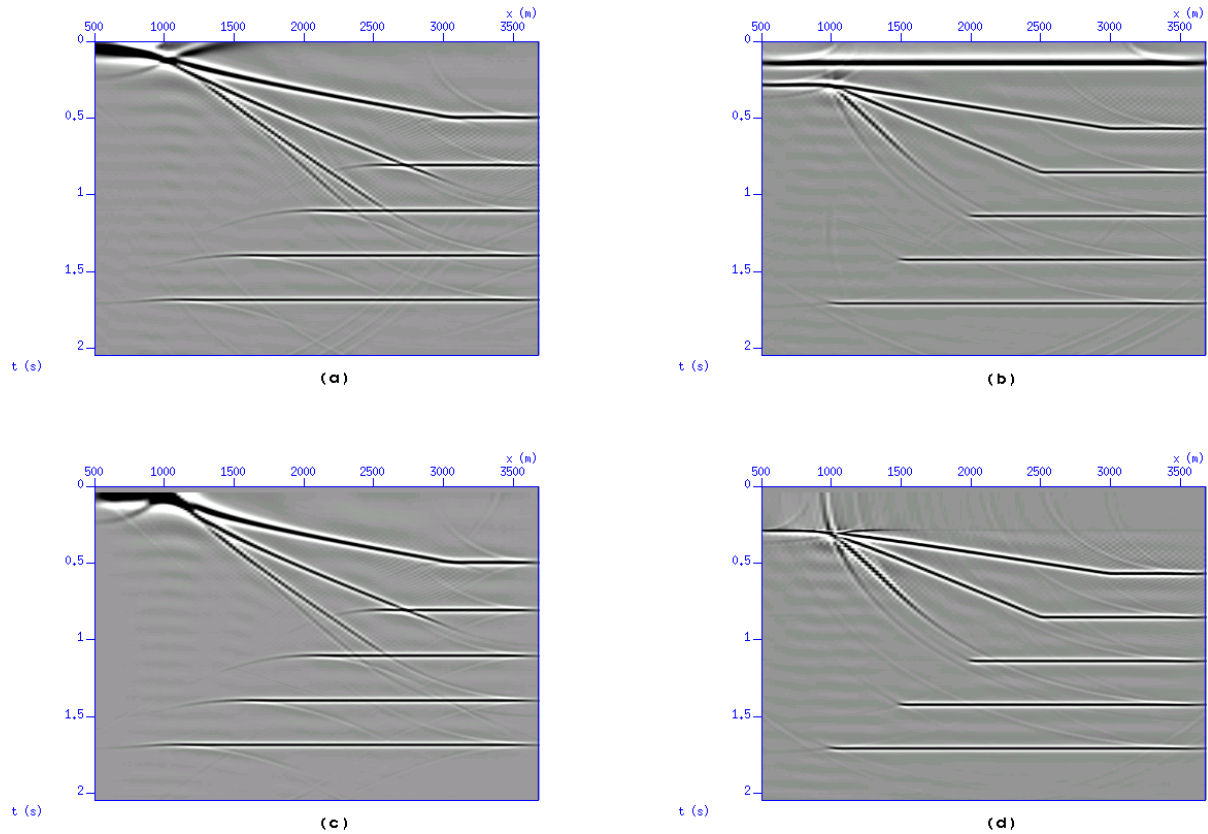


Figura 3.4: (a) Seção sísmica de afastamento igual a 1000  $m$  migrada com velocidade de migração igual a 2500  $m/s$  a partir da seção da Figura 3.2b. (b) Seção sísmica de afastamento igual a 1000  $m$  migrada com velocidade de migração igual a 3500  $m/s$  a partir da seção da Figura 3.2b. (c) Seção sísmica de afastamento igual a 1000  $m$  com velocidade de migração igual a 2500  $m/s$ , gerada por continuação de velocidade a partir da seção da Figura 3.4b. (d) Seção sísmica de afastamento igual a 1000  $m$  com velocidade de migração igual a 3500  $m/s$ , gerada por continuação de velocidade a partir da seção da Figura 3.4a.

O dado sísmico deste modelo tem 96 seções de afastamento constante. As seções sísmicas da Figura 3.16 resultam do empilhamento dessas 96 seções de afastamento constante. A Figura 3.16a apresenta 4 reflexões de baixa energia que cruzam as reflexões de interesse. Para suprimi-las das seções sísmicas finais (Figuras 3.18a e 3.18b), estas foram mapeadas de um cubo de dados com 10, e não 96, seções empilhadas.

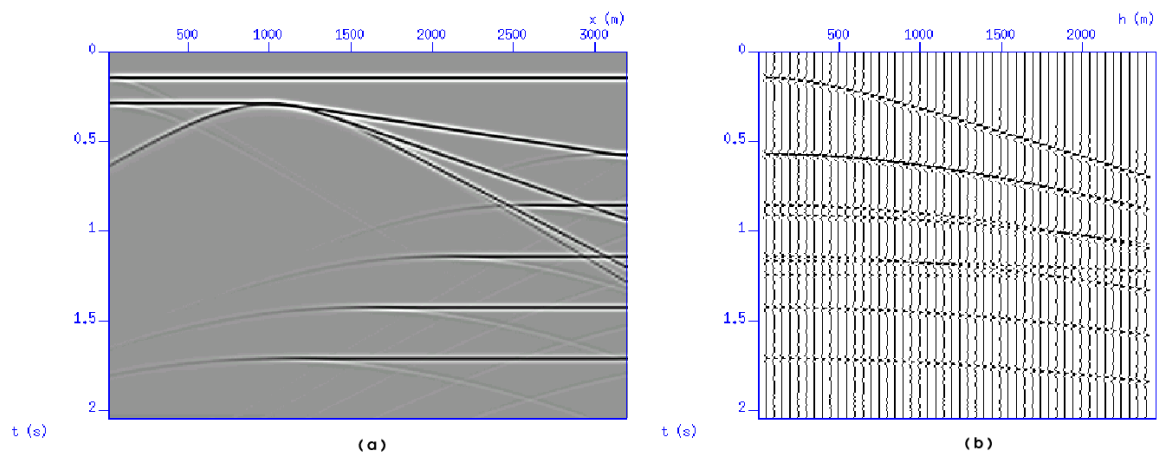


Figura 3.5: (a) Seção de afastamento mínimo igual a 25  $m$ . (b) Família CDP de valor igual a 3125  $m$ .

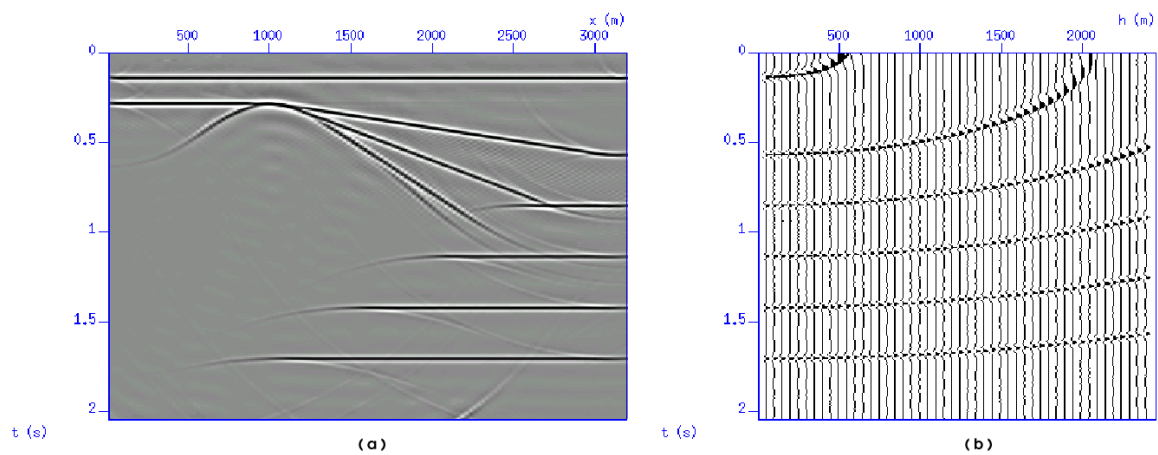


Figura 3.6: (a) Seção de afastamento mínimo igual a 25  $m$  e (b) família CRP de valor igual a 3125  $m$ , migrados com velocidade igual a 2500  $m/s$ .

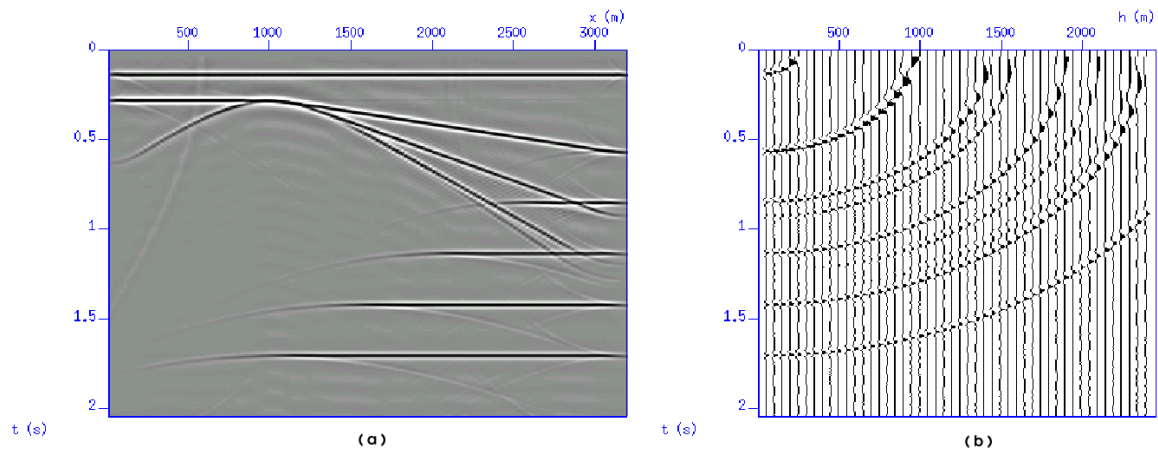


Figura 3.7: (a) Seção de afastamento mínimo igual a  $25\text{ m}$  e (b) família CRP de valor igual a  $3125\text{ m}$ , migrados com velocidade igual a  $1500\text{ m/s}$ , por continuação de velocidade.

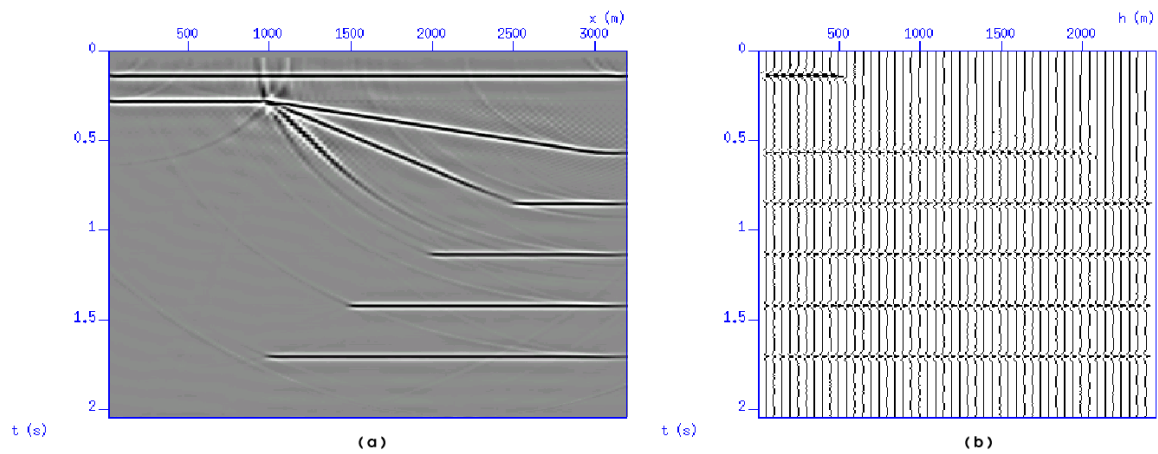


Figura 3.8: (a) Seção de afastamento mínimo igual a  $25\text{ m}$  e (b) família CRP de valor igual a  $3125\text{ m}$ , migrados com velocidade igual a  $3500\text{ m/s}$ , por continuação de velocidade.

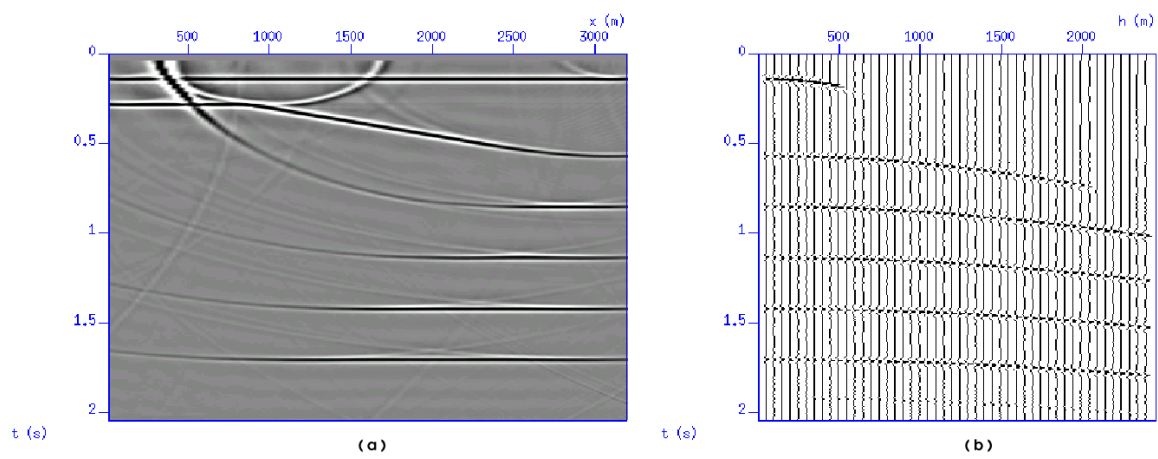


Figura 3.9: (a) Seção de afastamento mínimo igual a 25  $m$  e (b) família CRP de valor igual a 3125  $m$ , migrados com velocidade igual a 6000  $m/s$ , por continuação de velocidade.

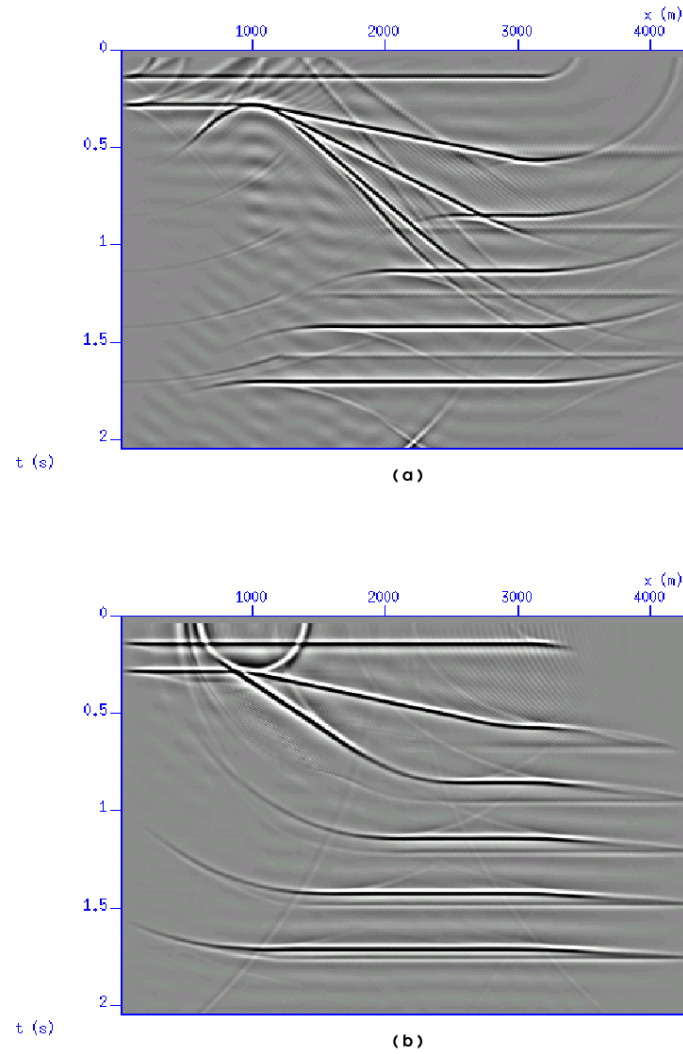


Figura 3.10: (a) Seção sísmica empilhada e migrada com velocidade constante de 2500  $m/s$ . (b) Seção sísmica empilhada e migrada com velocidade constante de 4500  $m/s$ .



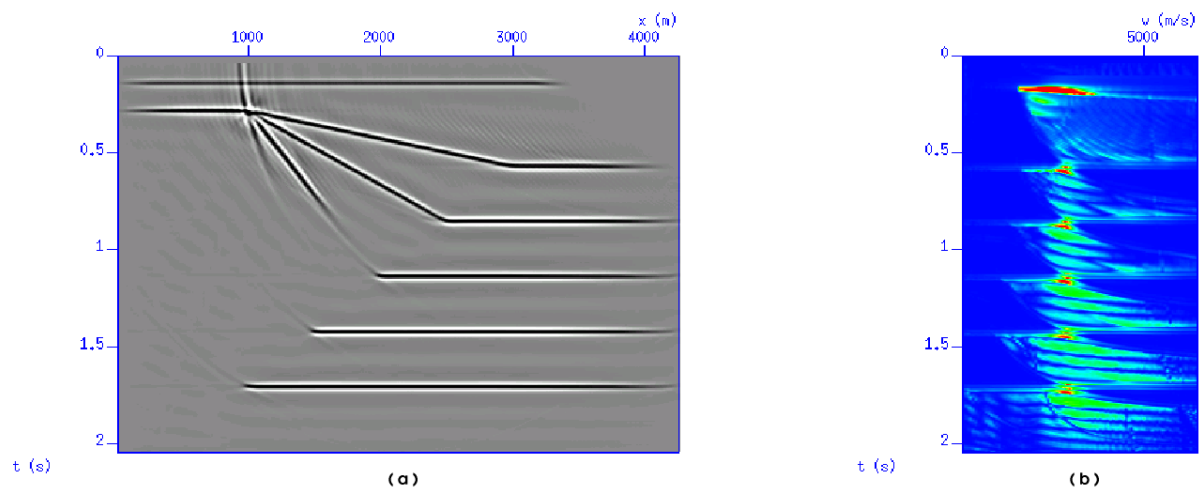


Figura 3.11: (a) Seção sísmica empilhada e migrada em tempo com velocidade de  $3500 \text{ m/s}$ . (b) painel *semblance* indicando a mesma velocidade.

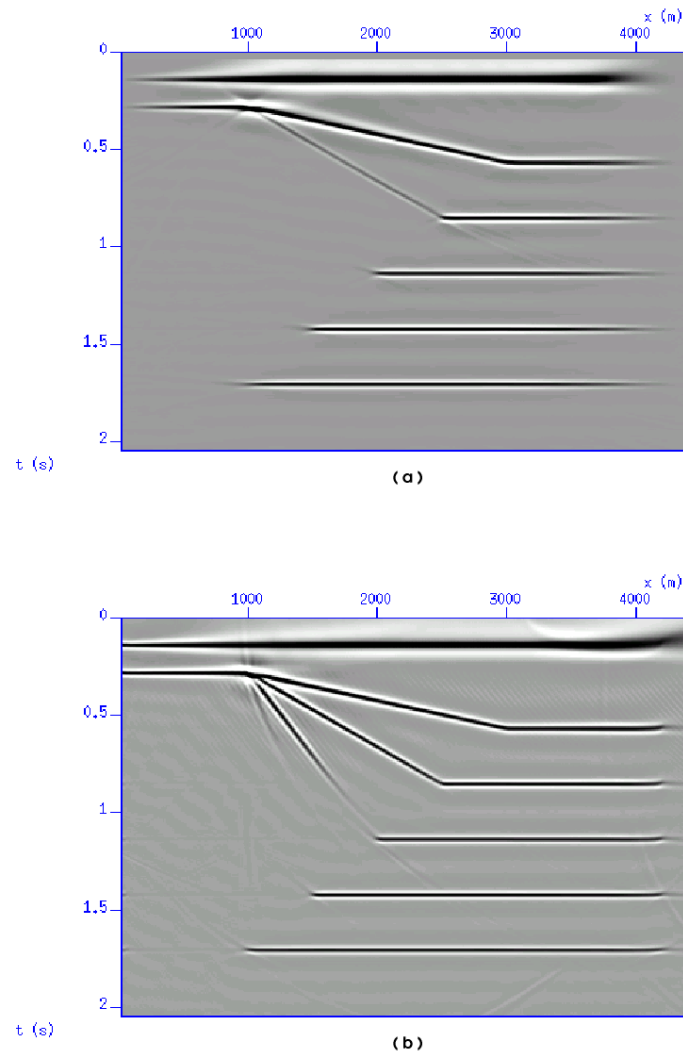


Figura 3.12: (a) Seção sísmica empilhada e migrada em tempo com velocidade de  $3500 \text{ m/s}$ , com velocidade de migração inicial de  $6000 \text{ m/s}$ . (b) Seção sísmica empilhada e migrada pelo método de migração de seções de afastamentos constante com velocidade de  $3500 \text{ m/s}$ .

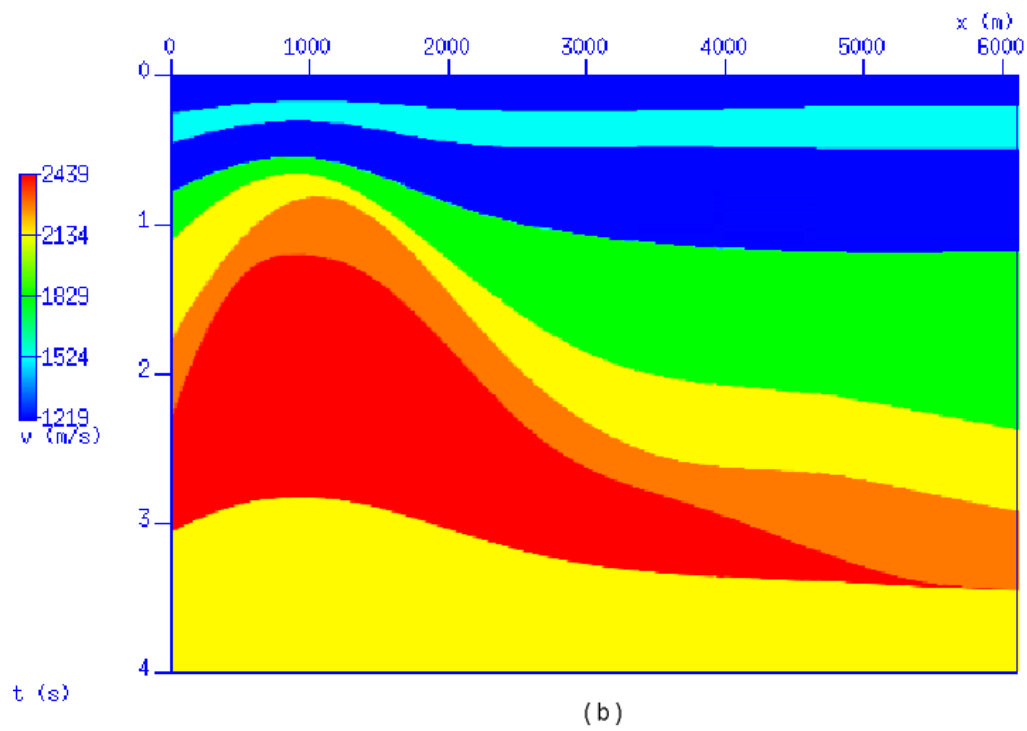
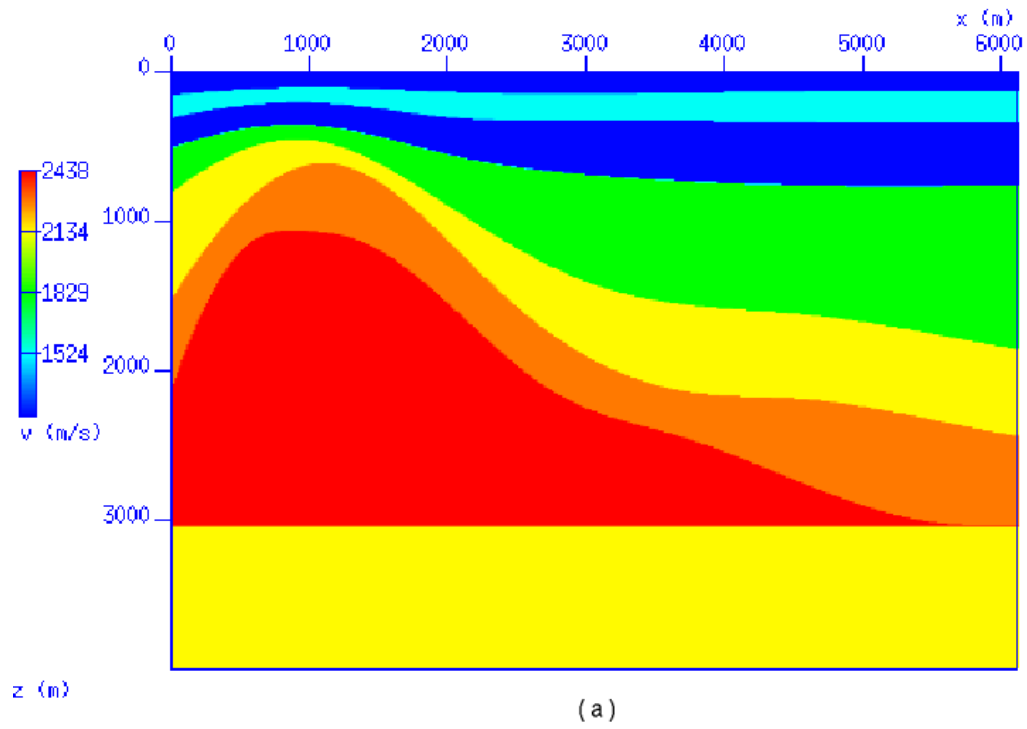


Figura 3.13: (a) Modelo em profundidade. (b) Campo de velocidade intervalar em tempo.

|                                |                 |
|--------------------------------|-----------------|
| número de tiros                | 407             |
| intervalo de tiro              | 15 <i>m</i>     |
| número de receptores           | 192             |
| intervalo de receptores        | 15 <i>m</i>     |
| número de amostras no tempo    | 1001            |
| intervalo de amostras no tempo | 4 <i>ms</i>     |
| afastamento mínimo             | 15 <i>m</i>     |
| velocidade inicial de migração | 1700 <i>m/s</i> |
| valor mínimo de velocidade     | 1000 <i>m/s</i> |
| valor máximo de velocidade     | 3000 <i>m/s</i> |
| intervalo de velocidade        | 25 <i>m/s</i>   |

Tabela 3.2: Informações de aquisição do dado sísmico do domo e informações do espectro de velocidade do processo de continuação de velocidade.

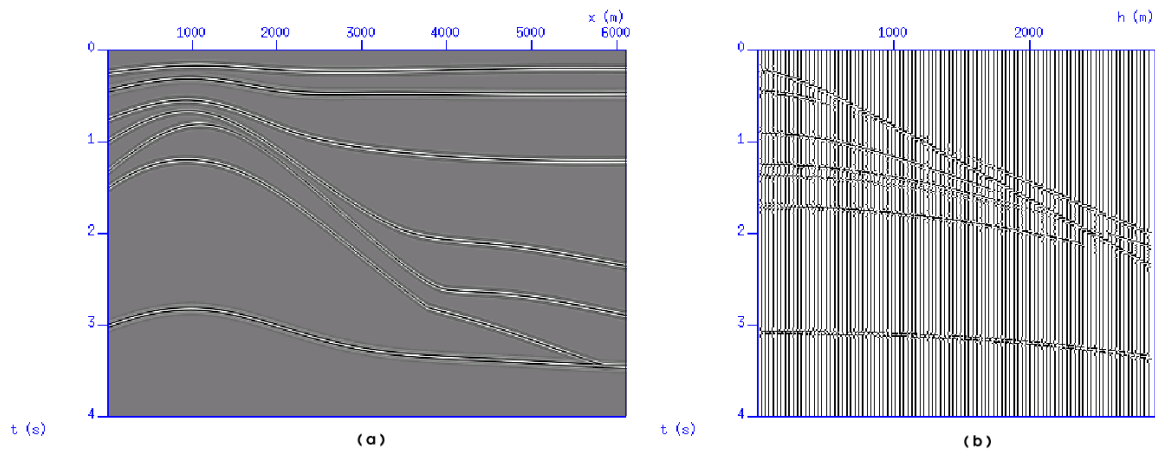


Figura 3.14: (a) Seção sísmica de afastamento mínimo igual a 15 *m* e (b) família CDP de 2250 *m*.

### 3.3 Dado sísmico do México

O dado sísmico do México é um dado real marítimo proveniente do Golfo do México. Ele apresenta um corpo de sal alongado horizontalmente a uma profundidade aproximada de 2000 *m* (Figura 3.20). A aplicação de técnicas de migração tem como objetivo o imageamento dos contornos desse corpo geológico e dos refletores abaixo dele. Entretanto, a avaliação aqui realizada restringiu-se a aplicação de campos de velocidade com a finalidade de efetuar a correção de NMO e empilhamento. A Figura 3.21 mostra como seria o modelo da Figura 3.20 na forma de um registro no tempo, ou um campo de velocidade intervalar em tempo, mais apropriado às comparações com as seções empilhadas desta seção.

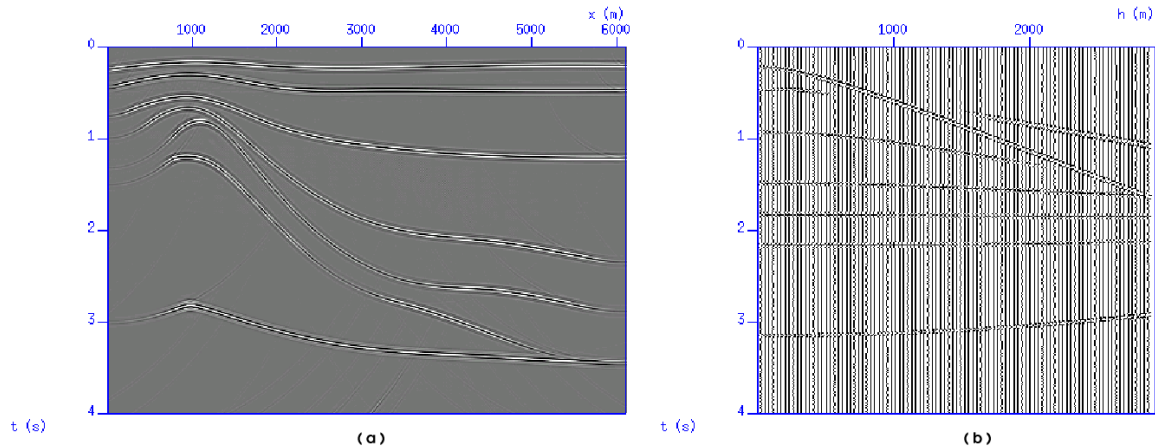


Figura 3.15: (a) Seção sísmica de afastamento mínimo igual a 15 m e (b) família CRP de 2250 m, migrados com velocidade de 1700 m/s.

As Figuras 3.22 e 3.23 ilustram seções empilhadas e migradas com velocidade constante de 2133,6 m/s e de 2743,2 m/s, respectivamente. A primeira é o resultado da migração de seções de afastamento constante. Por continuação de velocidade, esta foi transformada na segunda. Vale lembrar que a migração ou a mudança da velocidade de migração é sempre anterior ao empilhamento. Um exemplo de campo de velocidade estimado por continuação de velocidade, bem como uma seção sísmica empilhada após correção de NMO com auxílio deste campo, são mostrados nas Figuras 3.24 e 3.25.

Outros dois exemplos de campo de velocidade foram utilizados para corrigir e empilhar o dado sísmico do México. A Figura 3.26 mostra o campo de velocidade estimado por análise de NMO convencional. A seção sísmica empilhada após a correção de NMO por meio deste campo está na Figura 3.27. Um campo de velocidade (Figura 3.28) pode ser calculado diretamente da Figura 3.20. Usando-se este campo para correção de NMO e depois de se efetuar o empilhamento, chegamos ao resultado da Figura 3.29.

O aproveitamento dos três campos de velocidade em questão (Figuras 3.24, 3.26 e 3.28) para a correção de NMO e posterior empilhamento resultaram em imagens de qualidade satisfatória, como se pode observar nas seções empilhadas das Figuras 3.25, 3.27 e 3.29. Não foi aplicado nenhum processamento para atenuar a energia das reflexões múltiplas e, considerando as mesmas condições de processamento anterior a correção de NMO e empilhamento, a seção empilhada da Figura 3.29 foi a de melhor qualidade, como era esperado. Pelo menos uma característica importante diferencia as três seções empilhadas. As reflexões associadas ao topo e base do corpo de sal estão melhor definidas na seção empilhada da Figura 3.29. A observação dessas mesmas reflexões no campo de velocidade intervalar em tempo ajuda a identificá-las numa seção sísmica empilhada. Essas reflexões de topo e base do sal estão ligeiramente mais perceptíveis na seção da Figura 3.25, quando se compara com a da Figura

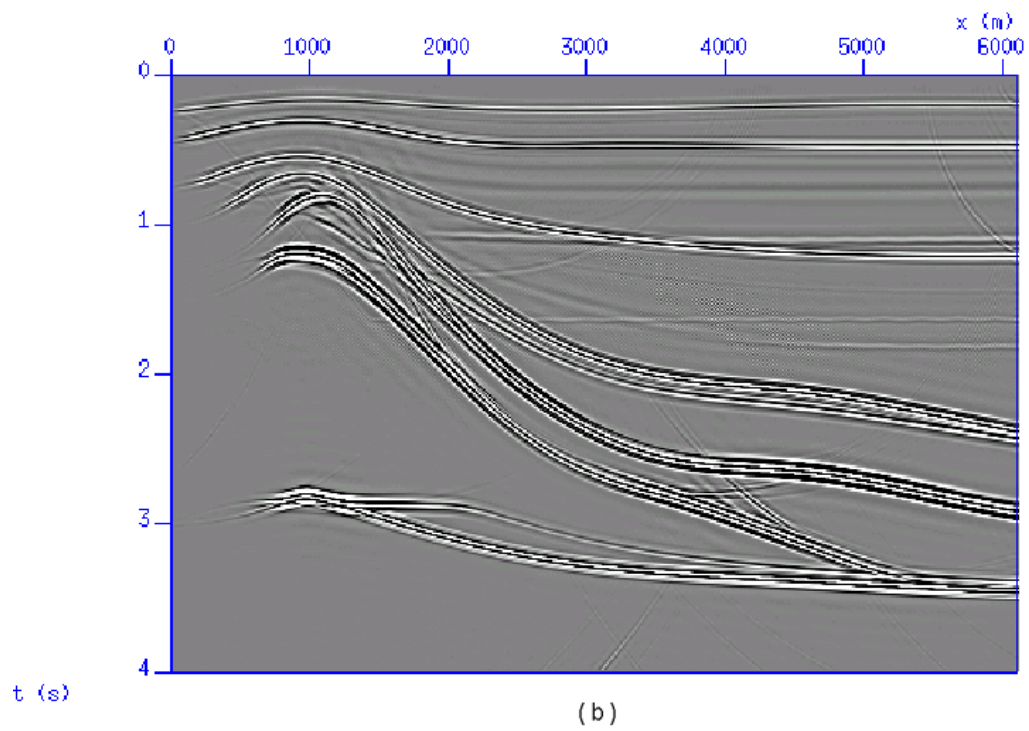
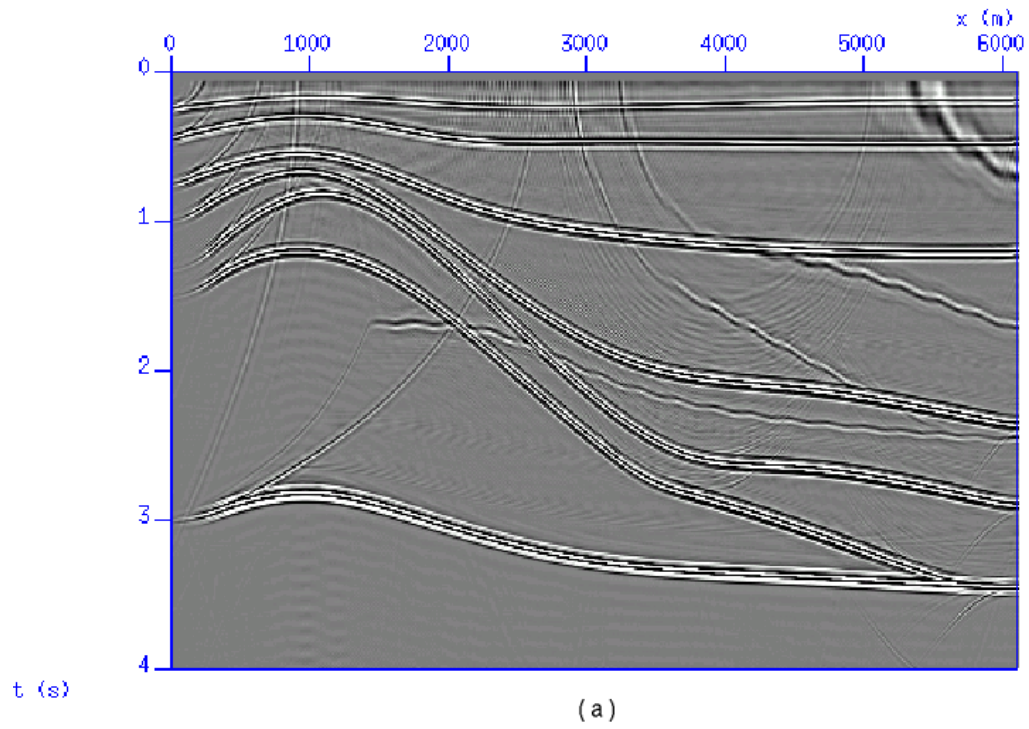


Figura 3.16: Seções sísmicas empilhadas e migradas com velocidade constante de (a)  $1000 \text{ m/s}$  e (b)  $1700 \text{ m/s}$ .

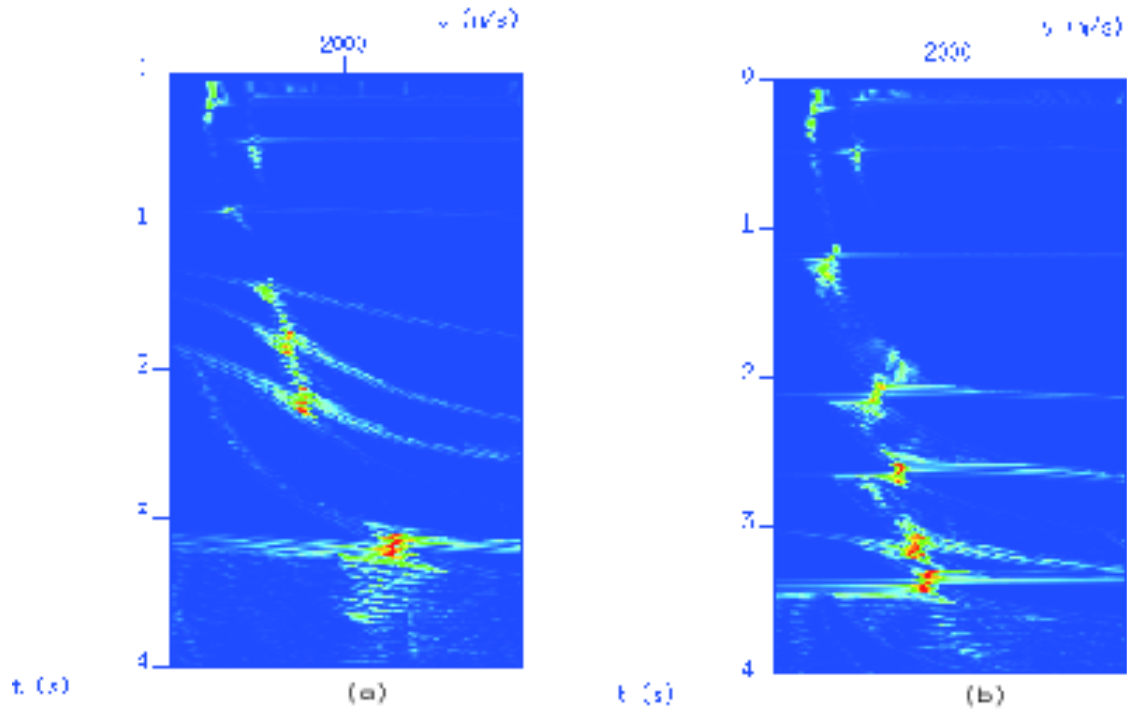


Figura 3.17: Painéis *semblance* de pontos-médios de (a) 2250 m e de (b) 4500 m.

|                                |             |
|--------------------------------|-------------|
| número de tiros                | 955         |
| intervalo de tiro              | 26,67 m     |
| número de receptores           | 180         |
| intervalo de receptores        | 26,67 m     |
| número de amostras no tempo    | 1501        |
| intervalo de amostras no tempo | 4 ms        |
| afastamento mínimo             | 100,58 m    |
| velocidade inicial de migração | 2133,6 m/s  |
| valor mínimo de velocidade     | 1463,04 m/s |
| valor máximo de velocidade     | 5862,16 m/s |
| intervalo de velocidade        | 24,38 m/s   |
| número de receptores usados    | 100         |

Tabela 3.3: Informações de aquisição do dado sísmico do México e parâmetros de entrada aplicados na continuação de velocidade.

3.27. A reflexão do topo superior tem melhor definição e as reflexões que estão entre a reflexão do topo e a reflexão da base tem menor energia na seção empilhada com auxílio do campo estimado pela continuação de velocidade.

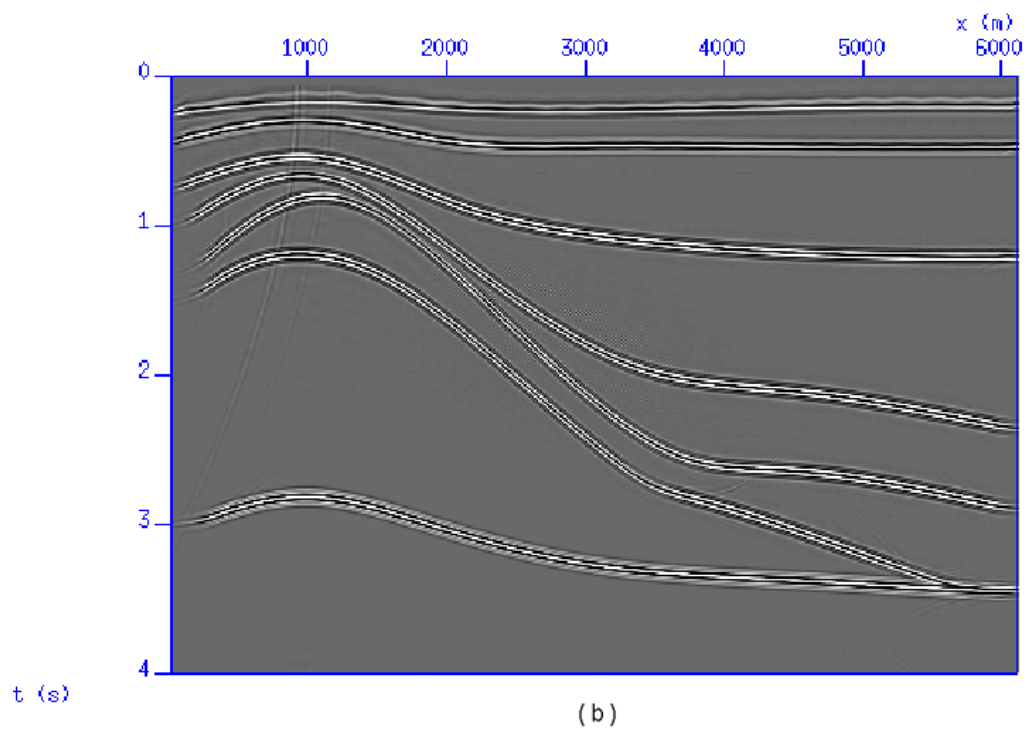
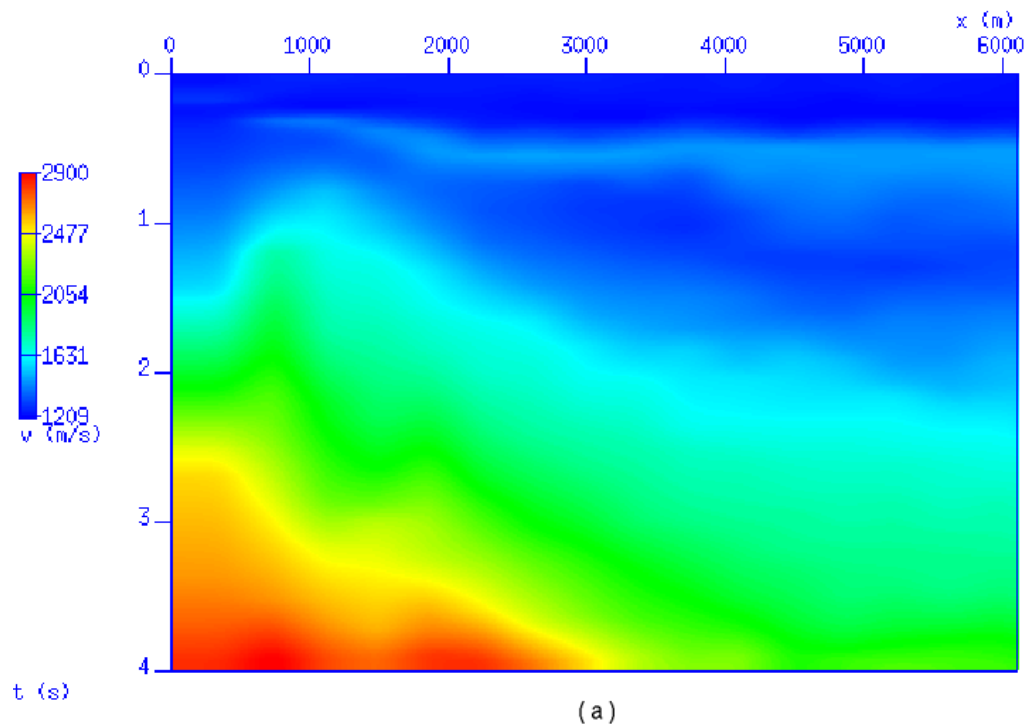


Figura 3.18: (a) Campo de velocidade *rms* resultante do método de continuação de velocidade. (b) Seção sísmica migrada em tempo mapeada com o auxílio deste campo.



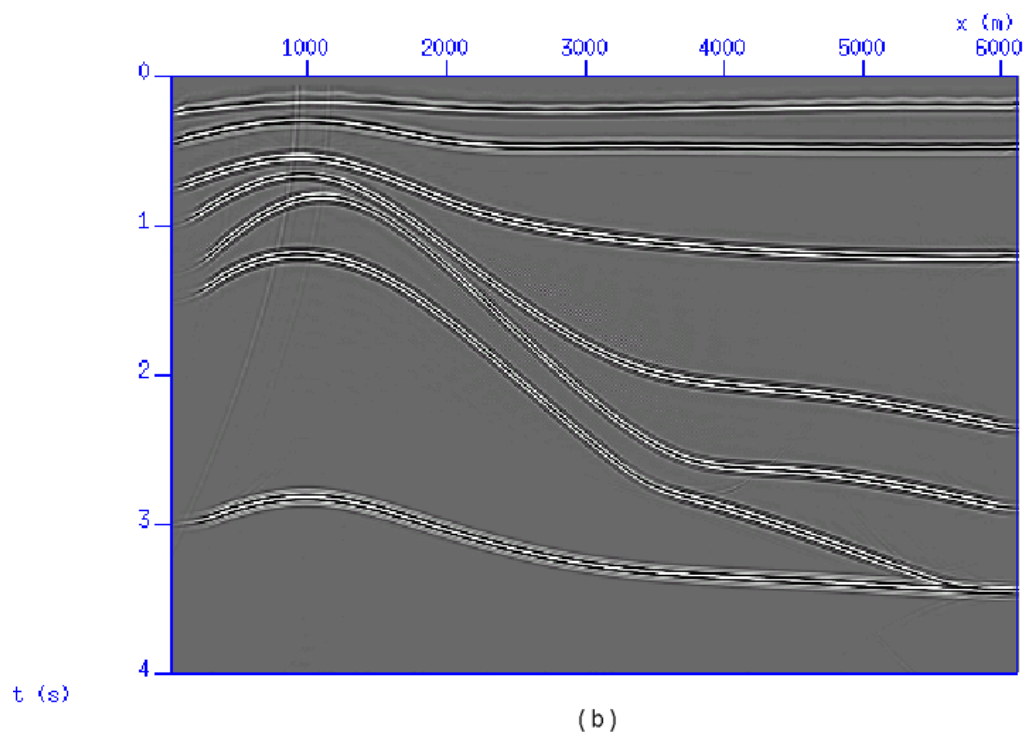
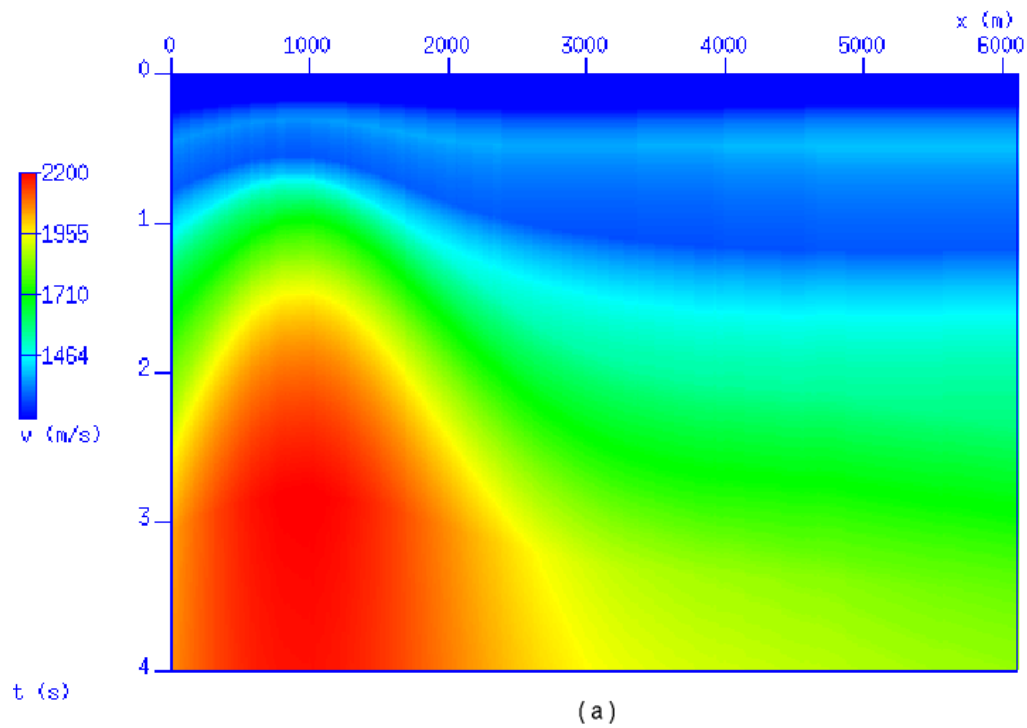


Figura 3.19: (a) Campo de velocidade *rms* verdadeiro obtido diretamente do campo de velocidade da Figura 3.13(a). (b) Seção sísmica migrada em tempo mapeada com o auxílio deste campo.

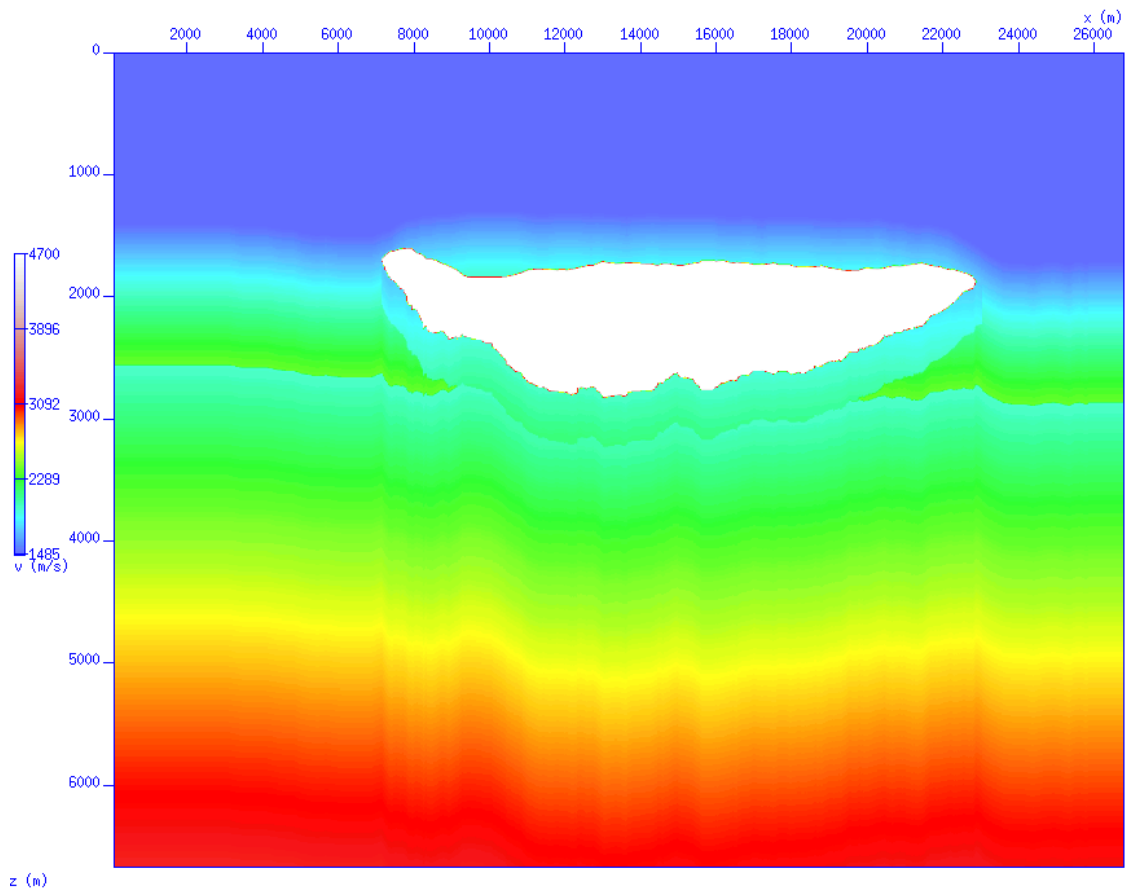


Figura 3.20: Modelo em profundidade proposto para o dado sísmico do México.

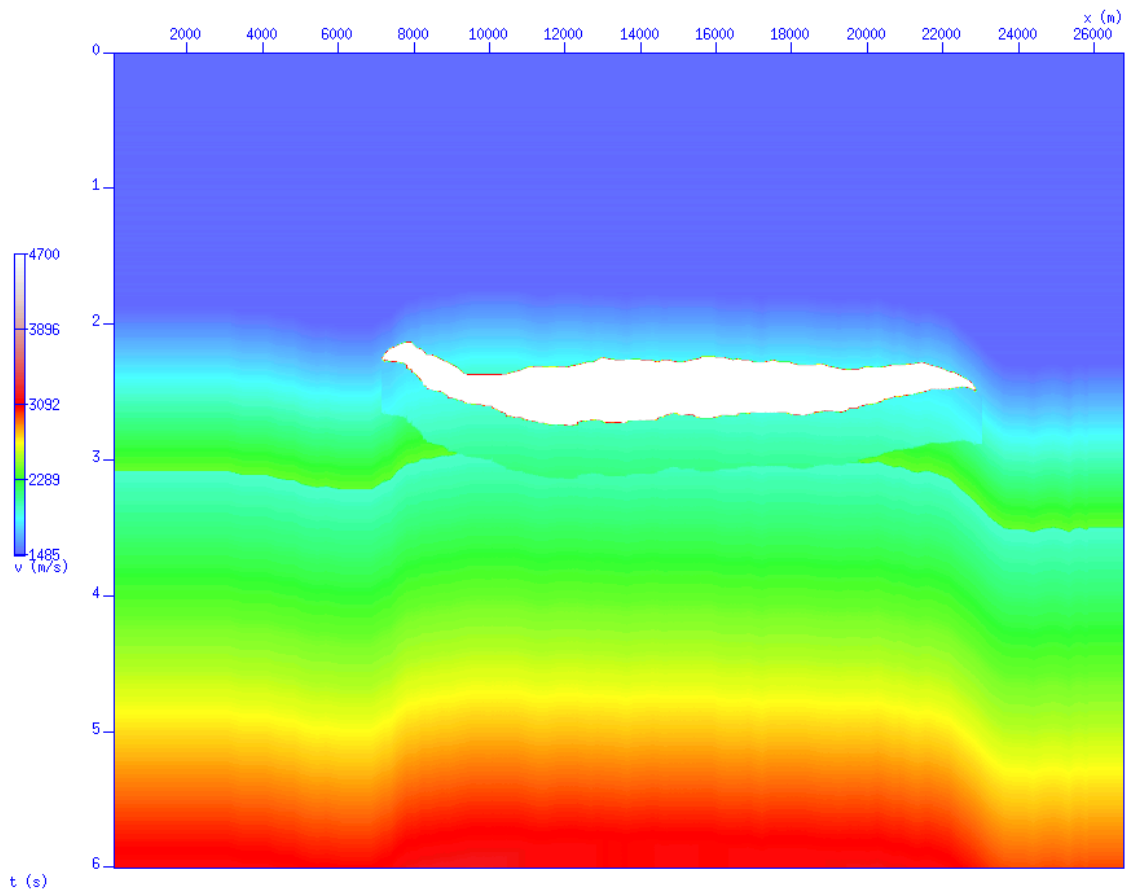


Figura 3.21: Campo de velocidade intervalar em tempo do dado sísmico do México, calculado a partir do campo de velocidade da Figura 3.20.

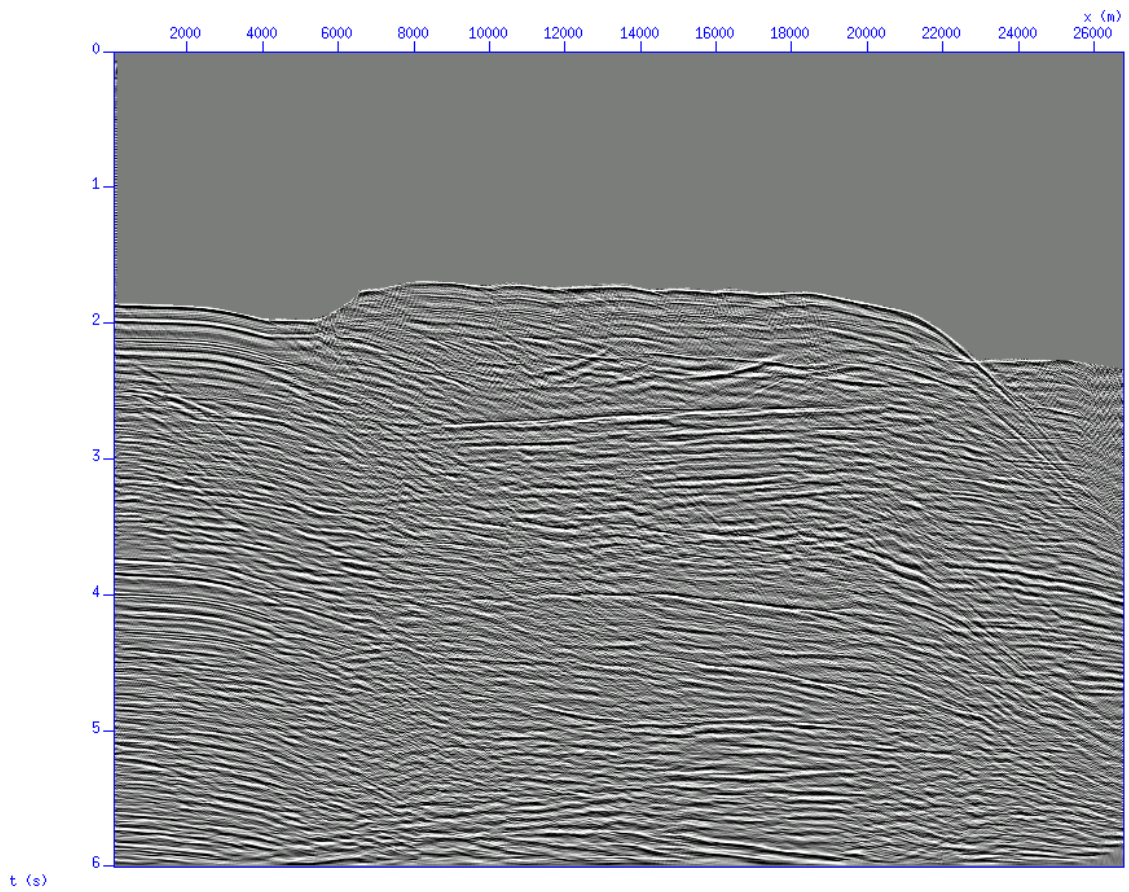


Figura 3.22: Seção sísmica empilhada e migrada com velocidade constante de  $2133.6 \text{ m/s}$  pela técnica de migração de seções de afastamento constante.

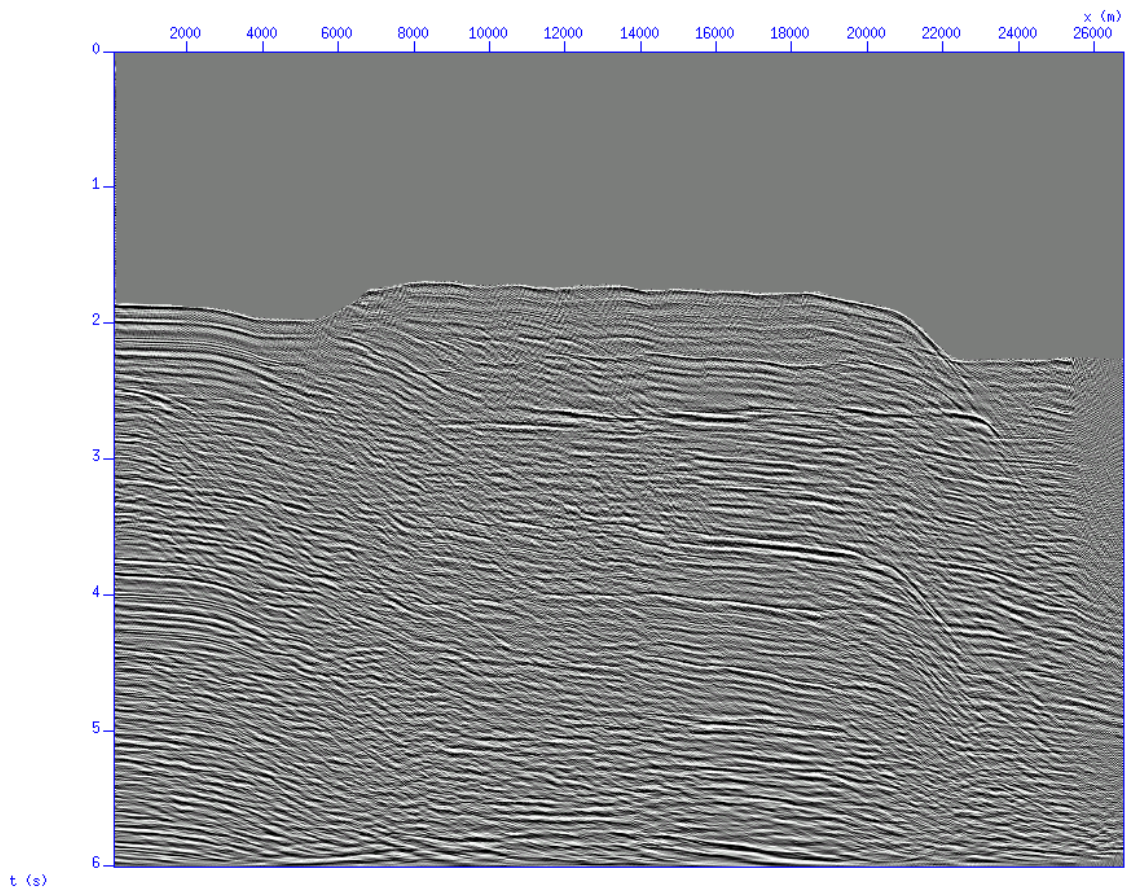


Figura 3.23: Seção sísmica empilhada e migrada com velocidade constante de  $2743.2 \text{ m/s}$ , resultado da continuação de velocidade, da velocidade de  $2133.6$  a de  $2743.2 \text{ m/s}$ .

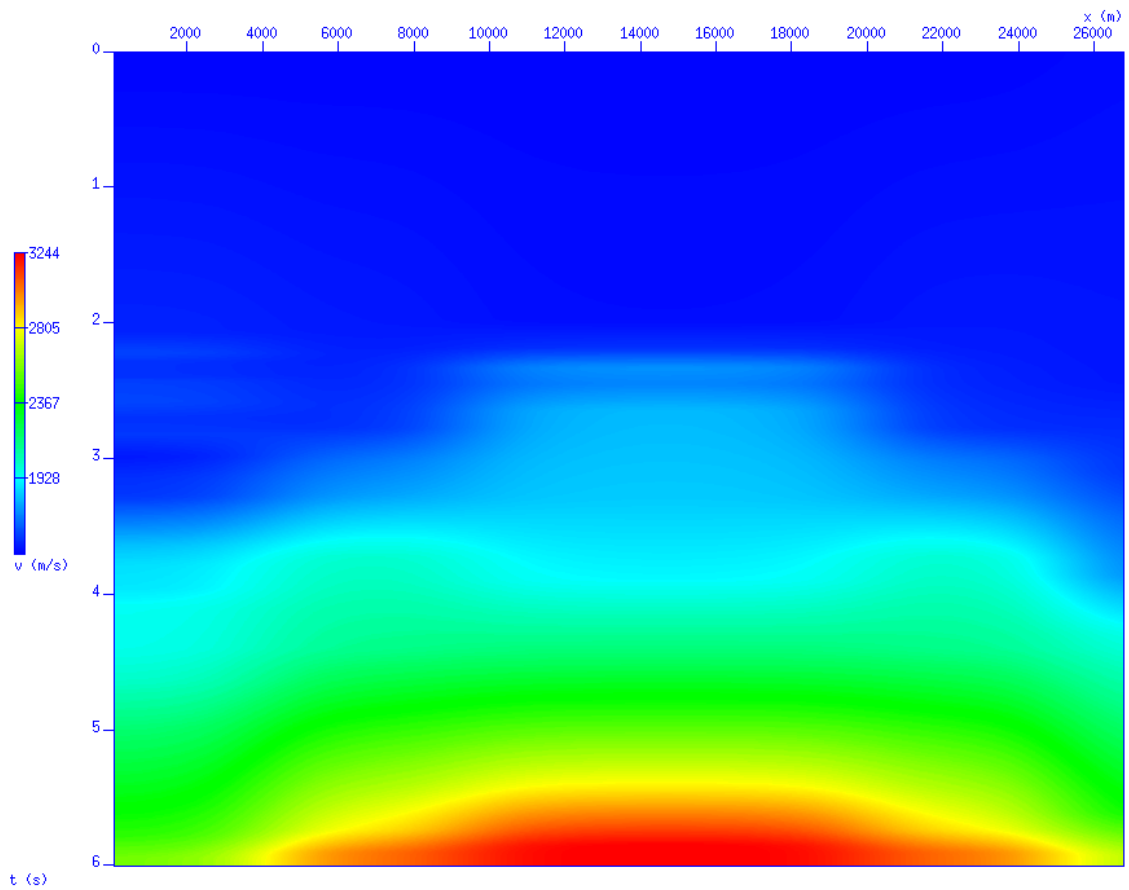


Figura 3.24: Campo de velocidade *rms* estimado por análise de velocidade, aplicando a continuação de velocidade.



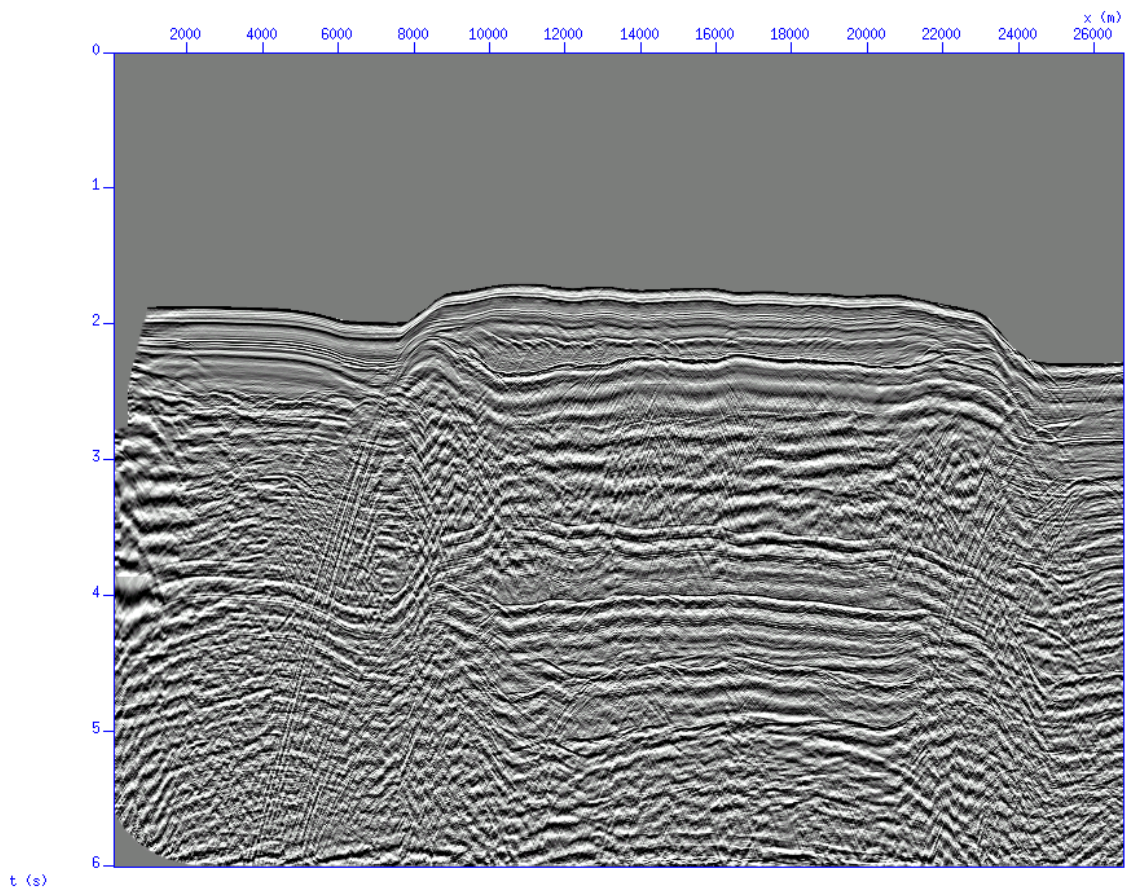


Figura 3.25: Seção sísmica empilhada com o campo de velocidade da figura 3.24.

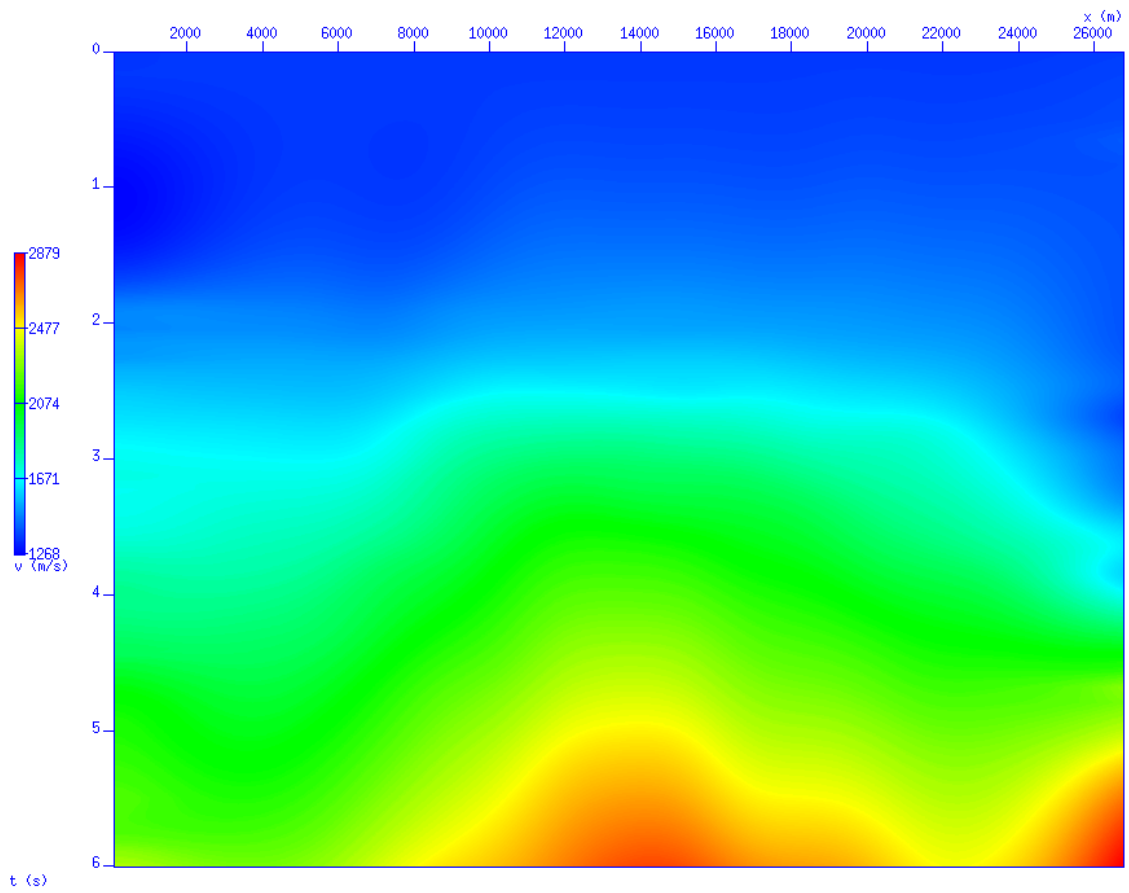


Figura 3.26: Campo de velocidade *rms* estimado por análise de velocidade convencional ou de NMO.



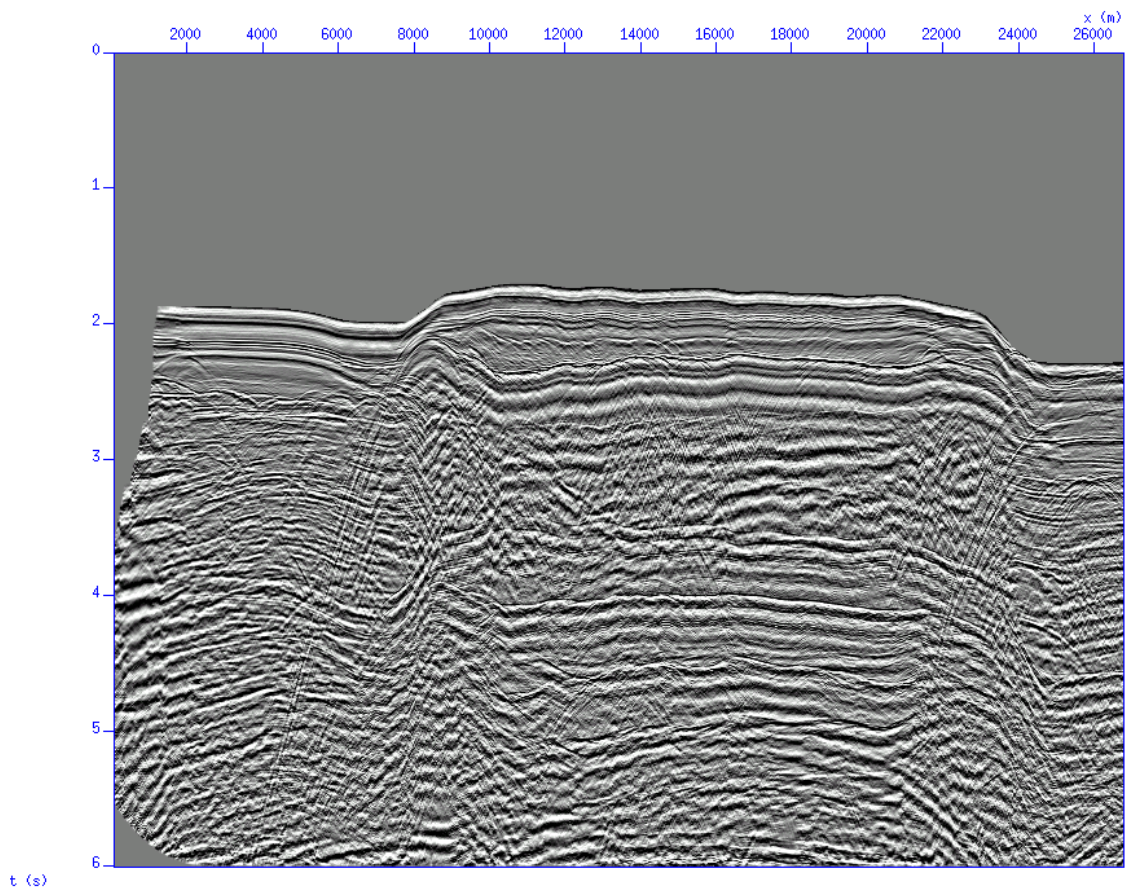


Figura 3.27: Seção sísmica empilhada com o campo de velocidade da Figura 3.26.

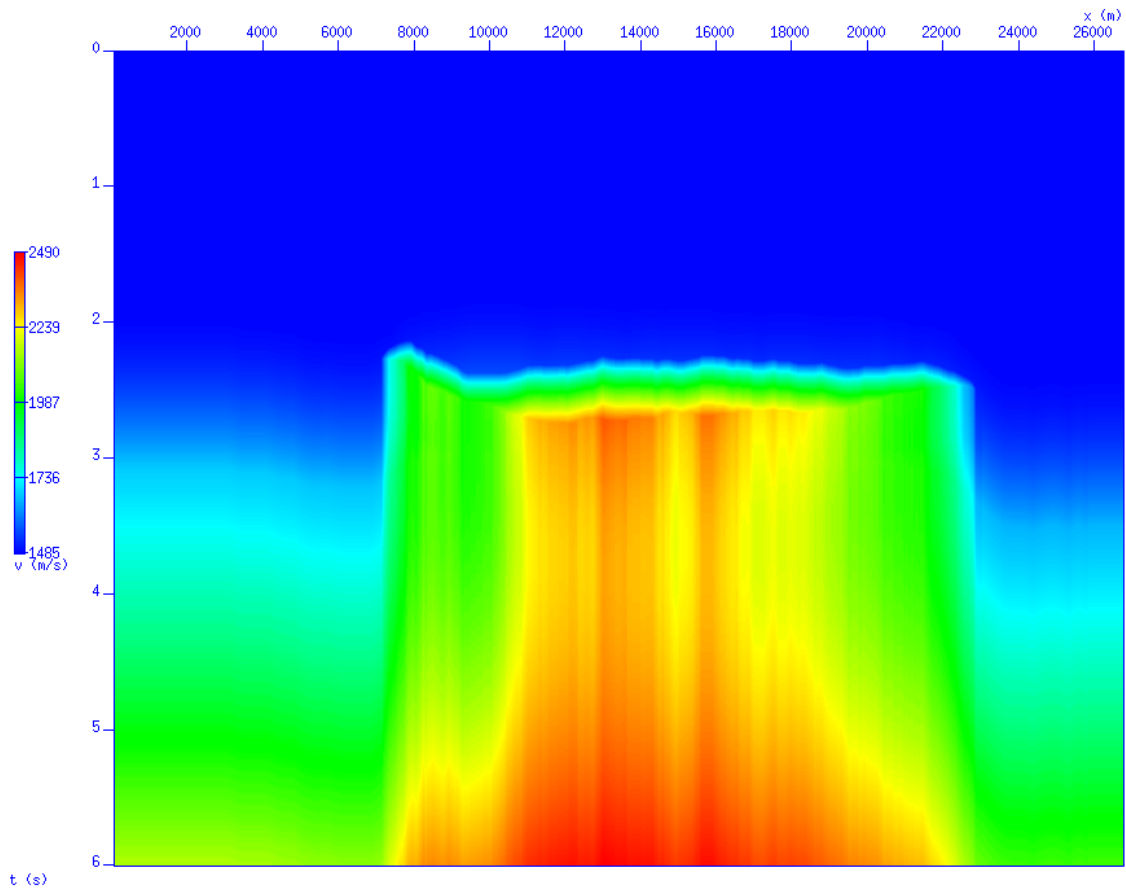


Figura 3.28: Campo de velocidade *rms* obtido diretamente do modelo em profundidade da Figura 3.20.

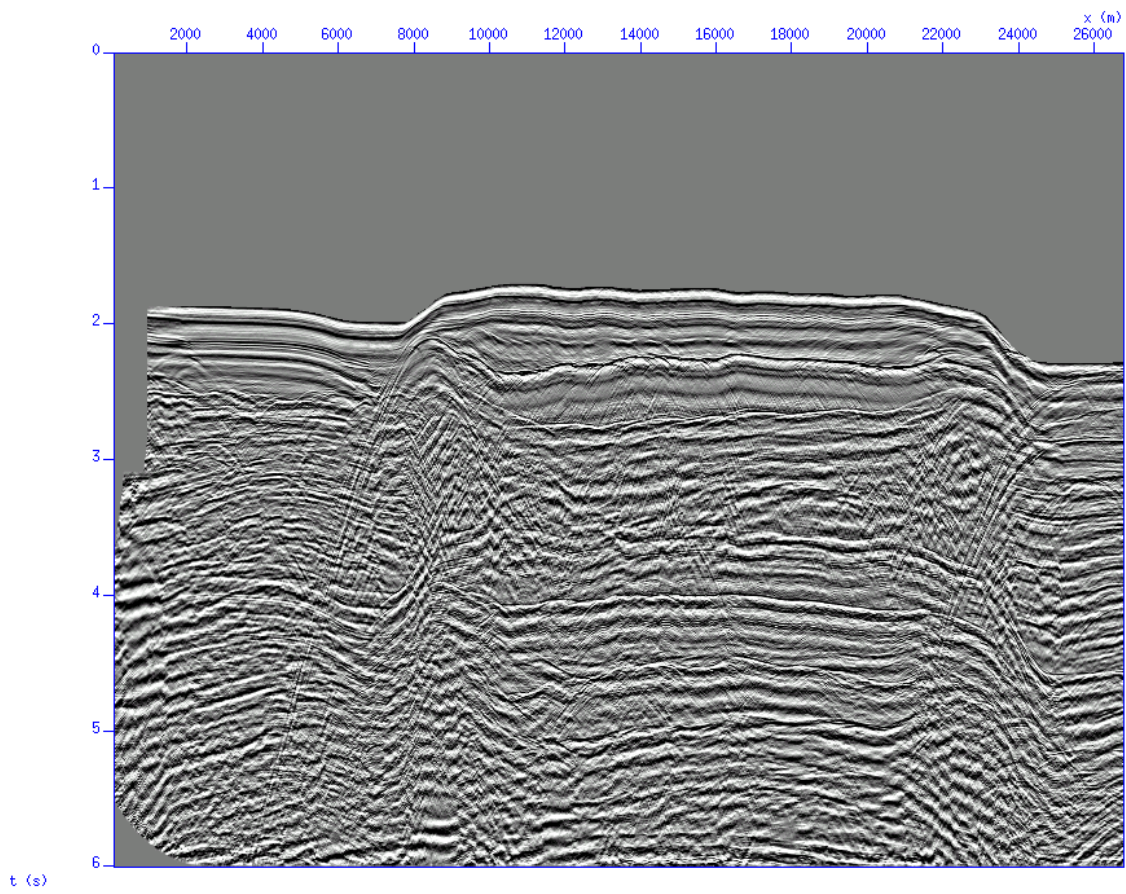


Figura 3.29: Seção empilhada com auxílio do campo de velocidade da Figura 3.28.

## CAPÍTULO 4

### Conclusões

Neste trabalho, foi aplicado o método de continuação de velocidade com a finalidade de realizar análise da velocidade de migração, obter o campo de velocidade *rms* e mapear a seção sísmica migrada em tempo. O campo de velocidade *rms* e a seção sísmica migrada em tempo, os dois resultados importantes da continuação de velocidade, foram obtidos com sucesso para os casos do modelo de velocidade constante e do modelo do domo. Em geral, os resultados apresentados atestam a aplicabilidade deste método no processo de estimativa do campo de velocidade, bem como na etapa de imageamento de dados sísmicos.

Testes preliminares efetuados no dado sísmico do modelo de velocidade constante garantem o funcionamento correto do operador de continuação de velocidade. A aplicação ao dado sísmico do modelo do domo resultam em imagens de qualidade satisfatória, um exemplo de aplicação em um modelo com variações horizontais e verticais de velocidade, mesmo que brandas. Neste modelo, a seção sísmica mapeada com o auxílio do campo de velocidade estimado por análise de velocidade foi muito semelhante a seção sísmica obtida através do campo verdadeiro.

Os testes aplicados ao dado sísmico real do México restringiram-se a utilização do campo de velocidade associado a continuação de velocidade para corrigir de NMO e empilhar o dado sísmico. A comparação com as outras seções empilhadas, relacionadas ao campo de velocidade estimado por análise de NMO convencional e ao campo estimado diretamente do modelo em profundidade garante o bom desempenho do campo associado à continuação de velocidade para o empilhamento de dados sísmicos.

Para melhorar a qualidade dos resultados, recomenda-se que seja melhorado o procedimento de análise de velocidade. A visualização dos painéis *semblance* e a seleção de picos de alta energia para definição das funções de velocidade, por meio da versão do *Seismic Unix* utilizado no trabalho, podem ser substituídos por programas com maior capacidade de iteração com o usuário. Isto pode resultar em campos de velocidades mais próximos ao verdadeiro, assegurando a obtenção de uma seção sísmica de qualidade.

Quanto a execução do programa de continuação de velocidade, recomenda-se que o empilhamento seja implementado logo após a execução do operador de continuação de velocidade, no domínio da frequência. Desta maneira, o programa ficaria mais rápido, pois a

transformada dupla inversa de Fourier seria acionada uma vez a cada valor de velocidade.

A alteração mais importante, que deve resultar nas melhorias mais significativas, é a implementação de um procedimento automático para estimar diretamente o campo de velocidade do cubo de medidas *semblance* gerado pelo método de continuação de velocidade. Este tipo de estimativa foi comentada por Fomel (2003a) e faz uso do método de mínimos quadrados para selecionar os picos de alta energia.

# Agradecimentos

Agradeço à Agência Nacional de Petróleo, ao Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia e ao Curso de Graduação em Geofísica a oportunidade de ser iniciado na pesquisa científica e na ciência da geofísica como bolsista. Agradeço também a oportunidade de participar dos congressos e encontros científicos com os recursos dessas instituições e da Fapesb.

Agradeço ao Professor Reynam da Cruz Pestana pela atuação imprescindível para o andamento e conclusão do trabalho, principalmente, sugerindo, com a experiência ausente ao iniciante, as soluções para contornar as dificuldades na implementação do trabalho.

Agradeço às pessoas que também influenciaram no meu aprendizado ou ajudaram diretamente ou indiretamente neste trabalho: os professores de geofísica, especialmente Botelho e Sato; Raimundo e Ricardo da PETROBRAS; os funcionários Joaquim, Joceane e Lenita; os amigos da pós-graduação e da graduação em geofísica, os amigos do Imbuí, da Ilha e da UFBA e os anteriores a minha passagem na universidade.

Agradeço à minha família, aos meus pais e ao meu irmão.

## APÊNDICE A

### Transformação tempo em tempo ao quadrado

A transformação da coordenada tempo em tempo ao quadrado foi implementada seguindo a implementação do programa *sutsq* do *Seismic Unix*. Na execução das transformações, o número de amostras e intervalo de amostragem são alterados com base nas relações

$$dtout = 0.2 \cdot ns \cdot dt^2 \quad (A.1)$$

$$nsout = 1 + \frac{ns}{0.2} \quad , \quad (A.2)$$

quando transformamos a variável tempo em tempo ao quadrado. Na transformação inversa, tempo ao quadrado em tempo, utilizam-se as relações

$$dtout = 0.004 \quad (A.3)$$

$$nsout = 1 + \frac{\sqrt{ns \cdot dt}}{0.004} \quad . \quad (A.4)$$

Note que, nas 4 equações,  $ns$  e  $dt$  são os valores de entrada do número de amostras no tempo e intervalo de amostragem, respectivamente. Enquanto que  $nsout$  e  $dtout$  são valores de saída. As variáveis  $ns$  e  $nsout$  são valores inteiros e  $dt$  e  $dtout$  são reais. Quando se sabe o número original de amostras no tempo, não é necessário usar a equação A.4.

Supondo que exista um único traço sísmico, com 1000 amostras no tempo e com intervalo de amostragem de 0.004 s (4 s de amostragem), teremos 5001 amostras e 0.0032 s<sup>2</sup> de intervalo de amostragem no domínio do tempo ao quadrado (16 s<sup>2</sup>+0.0032 s<sup>2</sup> de amostragem). O que o programa de transformação do tempo em tempo ao quadrado faz é, além de associar cada amplitude ao quadrado do seu tempo, interpolar a cada 0.0032 s<sup>2</sup> do novo traço sísmico de 5001 amostras. Na transformação inversa, o traço passa a ter 1001 amostras (1000, se ignorarmos a equação A.4) e 0.004 s de intervalo de amostragem. Observe que o número de amostras foi aumentado em cinco vezes neste exemplo. A aplicação do algoritmo de transformada rápida de Fourier, que exige que o número de amostras seja uma potência de 2, resultaria no valor de 8192 amostras para o traço de tempo ao quadrado.

A figura A.1 é o resultado da aplicação da transformação da variável tempo em tempo ao quadrado à seção sísmica da figura 3.11. Os refletores inclinados na forma de uma reta, ou seja,  $x(t) = a \cdot t$ , assume a forma descrita pela equação  $x(\sigma) = a\sqrt{\sigma}$ , uma vez que  $t = \sqrt{\sigma}$ .

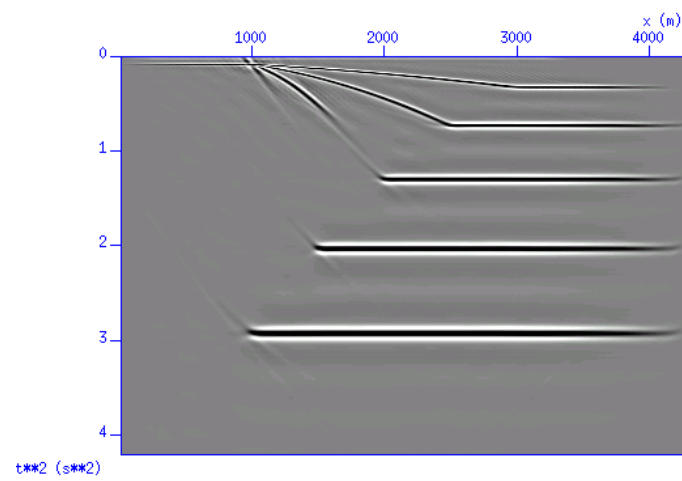


Figura A.1: Seção sísmica resultante da aplicação da transformação tempo ao quadrado na seção sísmica da figura 3.11.



## APÊNDICE B

### Migração de seções de afastamento constante

O método de continuação de velocidade usa como entrada um conjunto de seções de afastamento constante migrados com velocidade constante. O programa de migração adotado para preparar o dado sísmico para a continuação de velocidade é uma implementação do método descrito por Dubrulle (1983). É uma técnica de migração no domínio da frequência para seções de afastamento constante em meios homogêneos. Esta técnica de migração com velocidade constante é aplicada a cada seção de afastamento constante separadamente.

#### B.1 Migração em seção de afastamento nulo

O operador de migração de seções de afastamento nulo, no domínio da frequência, é dado pela seguinte expressão

$$U(\kappa_x, z, \omega) = U(\kappa_x, 0, \omega) \exp \left[ i \frac{2\omega z}{v} \left( 1 - \frac{\kappa_x^2 v^2}{4\omega^2} \right)^{1/2} \right] \quad (\text{B.1})$$

onde  $U(\kappa_x, 0, \omega)$  representa o campo de ondas no domínio da frequência, registrada na superfície ( $z = 0$ );  $U(\kappa_x, z, \omega)$ , a seção migrada em profundidade com velocidade  $v$ ;  $\kappa_x$  e  $\omega$  são o número de onda e frequência. O operador da equação (B.1) é incluído na equação de continuação para baixo do campo de onda  $u(x, z, t)$

$$u(x, z, t) = \int d\kappa_x \int d\omega \exp(i\omega t_0) U(\kappa_x, 0, \omega) \exp(i\kappa_x x + i\omega t) \quad (\text{B.2})$$

onde

$$t_0 = \frac{2z}{v} \left( 1 - \frac{\kappa_x^2 v^2}{4\omega^2} \right) \quad (\text{B.3})$$

Para realizar a implementação computacional é necessário definir as equações paramétricas da curva de difração

$$x = \frac{pv}{2} \frac{z}{\left( 1 - \frac{p^2 v^2}{4} \right)^2} \quad (\text{B.4})$$

$$t = \frac{2}{v} \frac{z}{\left( 1 - \frac{p^2 v^2}{4} \right)^{1/2}} \quad (\text{B.5})$$

que estão relacionadas pela equação  $t_0 = t - px$ , onde  $p$  é a inclinação da hipérbole,  $p = dt/dx$ . O seguinte algoritmo foi proposto por Dubrulle (1983):

1. Aplicar transformação dupla de Fourier em relação a  $x$  e  $t$ , cujos números de onda correspondentes são  $\kappa_x$  e  $\omega$ .
2. Para cada profundidade  $z$   
 Definir as equações paramétricas (B.4) e (B.5) da curva de difração em relação à  $p$ ;  
 Para cada par  $(\kappa_x, \omega)$ , tal que  $|pv/2| < 1$  e  $p = \kappa_x/\omega$ , computar as coordenadas  $x$  e  $t$  dos pontos onde a curva de difração tem uma tangente  $p$  usando as equações (B.4) e (B.5); calcular  $t_0$  por  $t_0 = t - px$ ;  
 Aplicar o deslocamento de fase,  $\omega t_0$ , aos componentes Fourier  $(\kappa_x, \omega)$  das seções de afastamento nulo como na equação (B.2); realizar a soma dos componentes modificados sobre todos os valores de  $\omega$ , que corresponde a integração em relação a  $\omega$  na equação (B.2);
3. Por fim, realiza-se uma transformada inversa de Fourier dos resultados em relação a  $\kappa_x$  para obter a seção migrada, como indicado pela integração em relação a  $\kappa_x$  na equação (B.2).

## B.2 Extensão à seções de afastamento constante

No caso de seções de afastamento não-nulos, a equação de difração é escrita como

$$t = \frac{1}{v} [(z^2 + (x - h)^2)^{1/2} + (z^2 + (x + h)^2)^{1/2}] \quad (\text{B.6})$$

e a inclinação dessa curva

$$p = \frac{dt}{dx} = \frac{1}{v} \left[ \frac{x - h}{(z^2 + (x - h)^2)^{1/2}} + \frac{x + h}{(z^2 + (x + h)^2)^{1/2}} \right] \quad (\text{B.7})$$

enquanto a expressão de  $t_0$  é modificada para

$$t_0 = t - px = \frac{1}{v} \left[ \frac{z^2 - h(x - h)}{(z^2 + (x - h)^2)^{1/2}} + \frac{z^2 + h(x + h)}{(z^2 + (x + h)^2)^{1/2}} \right] \quad (\text{B.8})$$

A extensão a migração de seções de afastamento não nulos requer que sejam definidas variáveis reduzidas, uma vez que não é possível, neste caso, desenvolver equações paramétricas para a curva de difração. Definem-se as variáveis reduzidas como

$$X = x/z \quad H = h/z \quad T = vt/z \quad (\text{B.9})$$

$$P = vp \quad T_0 = vt_0/z \quad . \quad (\text{B.10})$$

A migração de seções de afastamento constante é empregada seguindo os passos do algoritmo descrito abaixo:

1. Realizar transformada dupla de Fourier em relação a  $x$  e  $t$ , cujos números de onda correspondentes são  $\kappa_x$  e  $\omega$ ;

2. Para cada profundidade  $z$

Definir as variáveis reduzidas  $H$  e  $X$  pelas equações (B.10) (note que  $H$  é constante para um valor fixo de  $z$ ); Definir também  $T_0$  e  $P$  conforme as equações (B.10) e construir a tabela  $[P, T_0]$

Para cada par  $(\kappa_x, \omega)$  tal que  $p = |\kappa_x/\omega|$  e  $|pv| < 2$ , computar o tempo  $t_0$  pela equação (B.10) e por interpolação na tabela  $[P, T_0]$ ;

Aplicar deslocamentos de fase,  $\omega t_0$ , aos componentes Fourier  $(\kappa_x, \omega)$  das seções de afastamento constante e realizar a soma modificada dos componentes sobre todos os valores de  $\omega$ ;

3. Por fim, realizar transformada inversa de Fourier dos resultados com respeito a  $\kappa_x$  para obter a seção migrada.

## Referências Bibliográficas

- Courant, R. e Hilbert, D. (1989) Methods of mathematical physics, John Wiley & Sons.
- Dubrulle, A. A. (1983) Numerical methods for the migration of constant-offset sections in homogeneous and horizontally layered media, *Geophysics*, **48**(5):1195–1203.
- Fomel, S. (2003a) Time migration velocity analysis by velocity continuation, *Geophysics*, **68**(5):1662–1672.
- Fomel, S. (2003b) Velocity continuation and the anatomy of residual prestack time migration, *Geophysics*, **68**(5):1650–1661.
- Hale, D. (1991) Course notes: Dip moveout processing, Soc. Expl. Geophys.
- Hubral, P.; Tygel, M. e Schleicher, J. (1996) Seismic image waves, *Geophys. J. Internat.*
- Neidell, N. S. e Taner, M. T. (1971) Semblance and other coherency measures for multichannel data, *Geophysics*, **36**(3):482–497.
- Yilmaz, O. (2001) Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data, nº 10 In *Investigations in Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists.

## ANEXO I

### Programa de continuação de velocidade

```
program cvel
! Implementação do método de continuação de velocidade.
! Fomel, S., 2003b, Time-migration velocity analysis
! by velocity continuation: Geophysics, 68, 1662-1672.
! Fernando Cezar

complex, allocatable, dimension(:) :: cbuf, cbuft, semp
real, allocatable, dimension(:) :: cbuf1, cbuf2, cbuf3, cbuf4
!cbuf1, cbuf3 referem-se as amplitudes da secao.
!cbuf2, cbuf4 referem-se as medidas de coerencia semblance.
real, allocatable, dimension(:) :: sc
real, allocatable, dimension(:) :: h, v, cdpsac, cdpsemp
!h, v: meio-afastamento, velocidade
!cdpsac, cdpsemp: cdp da sac, cdp da sec semp
character*78 dataset, amp3d, semb3d
integer nfft(1), flag, nu, ku, nsh, nsh1, jv(8), ix
integer, allocatable, dimension(:) :: ifold

call date_and_time(values=jv) !Calculo do tempo.
id1=jv(3)
ihr1=jv(5)
imin1=jv(6)
!-----
! Entrada de parametros.
print *
print *, ' ... EXECUTANDO CONTINUACAO DE VELOCIDADE'
print *
! Dados comuns a todas as secoes de entrada.
print *, 'no. de tiros e intervalo (m) ?'
read(5,*) nt, dx !no. de tracos da sec. de afast. const. e int.
print *, 'no. de receptores e intervalo (m) ?'
read(5,*) nsac, dh !no. de sec. de afast. const. e int.
print *, 'no. de amostras no tempo e intervalo (s) ?'
read(5,*) ns, dt
print *, 'no. de cdps e intervalo (m) ?'
read(5,*) ntse, dxse !no. de tracos de sec. empilhada e int.
print *, 'valores minimos de cdp e offset (m) ?'
read(5,*) cdpmin, hf
print *, 'valor do primeiro tiro (m) ?'
read(5,*) ptiro
print *, 'velocidade de migracao (m/s) ?'
read(5,*) vo
print *, 'velocidades minima, maxima e intervalo (m/s) ?'
read(5,*) vi, vf, dv
print *, 'arquivo de entrada ?'
read(5,*) dataset
print *, 'arquivo para gravacao do cubo de amplitudes ?'
read(5,*) amp3d
print *, 'arquivo para gravacao do cubo semblance ?'
```

```

read(5,*) semb3d

if(vo==0.)then
    vo = 0.00001 ! vo=10.E-5
end if

allocate(h(nsac), cdpsemp(ntse), cdpsac(nt))
do nk=1, nsac !calculo dos valores de meio-afastamento
    h(nk) = (hf + dh*(nk-1))/2.0 !Divisao por 2: meio-afastamento
end do

do i=1, ntse !calculo do cdp da secao empilhada
    cdpsemp(i) = cdpmin + dxse*(i-1)
end do

nv = int((vf-vi)/dv+1.0)
allocate(v(nv))
do iv=1, nv
    v(iv) = vi + real(iv-1)*(dv) !calculo das velocidades
end do
print *

open(unit=11, file=dataset, access='direct', status='old', recl=4)
open(unit=13, file=amp3d, access='direct', status='replace', recl=4)
open(unit=33, file=semb3d, access='direct', status='replace', recl=4)
open(unit=15, file="tmp.ad", access='direct', status='replace', recl=8)
open(unit=18, file="relat.txt", access='sequential', status='replace')
open(unit=63, file='fold.bin', access='direct', status='replace', &
    &recl=4)
!-----
! 1) Leitura de secoes de afastamento constante (SAC) .
! 2) Aplicacao de transformacao tempo em tempo ao quadrado (t->t2) .
! 3) Aplicacao de FFT 2D .
! 4) Gravacao de SAC's (no espaco de Fourier) .

!LEMBRAR QUE: ns*dt = sqrt(ntout*dtout)
dtout = 0.2*ns*dt**2.0 ! Equacoes retiradas do
ntout = int(1 + ns/0.2) ! programa sutsq.
call ipot2(nt, mt) ! Transformando nt em mt, uma potencia de 2.
call ipot2(ntout, ms) ! Transformando ntout em ms, uma potencia de 2.
mt = 2*mt

sac: do nk=1, nsac ! Ciclo de empilhamento.

! Leitura de secao de afastamento constante.
allocate(cbuf1(nt*ns))
kk = (nk-1)*nt*ns
do j=1, nt*ns
    read(11,rec=j+kk) cbuf1(j)
end do

! Transformacao t->t2.
allocate(cbuf2(nt*ntout))
flag = 1
call ttsq_tsqt(flag, nt, ns, dt, cbuf1, cbuf2, ntout, dtout)
if(nk==1)then
    print *
    print *, 'transformacao t->t^2'
    print *, '          ntin=', ns, '          dtin=', dt
    print *, '          ntout=', ntout, '          dtout=', dtout
    print *

```

```

        end if
        deallocate(cbuf1)

! Modificando matriz para aplicar FFT e IFFT.
        if(nk==1)then
            print *
            print *, 'transformacao FFT'
            print *, '          potencia de 2 para os tracos (', nt, ' ) =>', mt
            print *, '          potencia de 2 para as amostras no tempo&
                & (', ntout, ' ) =>', ms
        end if
        allocate(cbuf(mt*ms))
        do j=1, nt
            k1 = (j-1)*ms
            k2 = (j-1)*(ms-ntout)
            do i=1, ntout
                cbuf(k1+i) = cmplx(cbuf2(k1+i-k2), 0.0)
            end do
            do i=ntout+1, ms
                cbuf(k1+i) = (0.0, 0.0)
            end do
        end do
        do i=nt*ms+1, mt*ms
            cbuf(i) = (0.0, 0.0)
        end do
        deallocate(cbuf2)

allocate(cbuft(mt*ms))
        call apfft(cbuf, cbuft, ntout, ms, nt, mt) ! Aplicacao da FFT 2D.
        deallocate(cbuf)

!Gravacao de arquivo temporario.
kk = (nk-1)*ms*mt
do j=1, mt*ms
        write(15,rec=j+kk) cbuft(j)
end do
deallocate(cbuft)

        end do sac
        close(unit=15)
        print *, 'gravacao de tmp.ad concluida'

!-----
! 1) Leitura de SAC (espaco de Fourier)
! 2) Aplicacao do operador de mudanca de fase (OMF).
! 3) Aplicacao de IFFT 2D.
! 4) Aplicacao do empilhamento.
! 5) Aplicacao da transformacao tempo ao quadrado em tempo (t2->t) .
! 6) Gravacao de secao empilhada com velocidade constante (SVC) .

        allocate(ifold(ntse))
        ifold = 0

        veloc: do iv=1, nv !Ciclo de velocidade.
! Vetores que armazenam valores empilhados e medidas de coerencia.
            allocate(semb(ms*ntse),sc(ms*ntse))
            semb = (0.0,0.0)
            sc = 0.0

            emp: do nk=1, nsac ! Ciclo de empilhamento.

```

```

do itr=1, nt !calculo do cdp da sac
  cdpsac(itr) = h(nk) + dx*(itr-1)
end do

! Leitura de SAC .
allocate(cbuft(mt*ms))
kk = (nk-1)*mt*ms
do j=1, mt*ms
  read(15,rec=j+kk) cbuft(j)
end do

call omf(cbuft, vo, v(iv), h(nk), ms, mt, dtout, dx) !Aplicacao do OMF.
allocate(cbuf(mt*ms))
call apifft(cbuft, cbuf, ntout, ms, nt, mt) ! Aplicacao da IFFT 2D.
deallocate(cbuft)
call emp_hdr(cbuf, semp, sc, cdpsac, cdpsemp, ms, mt, ntse, nt, ifold)
! Aplicacao do empilhamento.

deallocate(cbuf)
end do emp ! Fim do looping empilhamento.

if (iv==1) then
  do j=1, ntse
    write(63,rec=j) ifold(j)
  end do
  close(unit=63)
end if

```

!Ate aqui, o vetor sc apenas armazenou o somatorio dos quadrados  
!das amplitudes, efetuado na subrotina emp.

! Calculo do semblance. Semblance e definido pela seguinte razao:

$$\begin{aligned}
 & \text{!} \\
 & \text{!} \\
 & \text{!} \quad \quad \quad \text{sum} \quad \quad \text{nsac} \\
 & \text{!} \quad \quad \quad \text{dt} \quad \quad \text{h=1} \\
 & \text{!} \quad \text{sc(x,t)} = \frac{\text{sum} [ \text{sum} A(x,t,h)]^2}{\text{nsac sum} \text{sum} [(A(x,t,h))^2]} \\
 & \text{!} \quad \quad \quad \text{dt} \quad \text{h=1} \\
 & \text{!} \\
 & \text{!}
 \end{aligned}$$

! onde x, t, h representam ponto-medio, tempo e meio-afastamento.

!Medida semblance e feita numa janela de 48ms, (considerando que dt=4ms)

```

do i=1, ntse
  jj = (i-1)*ms
  do j=1, ms
    if( j<7 .or. j>(ms-6) )then
      if (sc(j+jj) == 0.0) then !evita divisao por zero
        sc(j+jj) = 0.0
      else
        sc(j+jj) = ((real(semp(j+jj)))*2.0)/((real(nsac))*(sc(j+jj)))
      end if
    else
      if(sc(j-6+jj)+sc(j-5+jj)+sc(j-4+jj)&
        &+sc(j-3+jj)+sc(j-2+jj)+sc(j-1+jj)&
        &+sc(j+jj)&
        &+sc(j+1+jj)+sc(j+2+jj)+sc(j+3+jj)&
        &+sc(j+4+jj)+sc(j+5+jj)+sc(j+6+jj) == 0.0) then
        sc(j+jj) = 0.0
      else
        sc(j+jj) = ((real(semp(j-6+jj)))*2.0+(real(semp(j-5+jj)))*2.0&
          &+(real(semp(j-4+jj)))*2.0+(real(semp(j-3+jj)))*2.0&

```



```

&+(real(semp(j-2+jj))*2.0+(real(semp(j-1+jj))*2.0&
&+(real(semp(j+jj))*2.0&
&+(real(semp(j+1+jj))*2.0+(real(semp(j+2+jj))*2.0&
&+(real(semp(j+3+jj))*2.0+(real(semp(j+4+jj))*2.0&
&+(real(semp(j+5+jj))*2.0+(real(semp(j+6+jj))*2.0)&
&/ (real(nsac)*(sc(j-6+jj)+sc(j-5+jj)+sc(j-4+jj)&
&+sc(j-3+jj)+sc(j-2+jj)+sc(j-1+jj)&
&+sc(j+jj)&
&+sc(j+1+jj)+sc(j+2+jj)+sc(j+3+jj)&
&+sc(j+4+jj)+sc(j+5+jj)+sc(j+6+jj)))
end if
end if
end do
end do

! Modificando matriz para poder aplicar t2->t.
allocate(cbuf1(ntse*ntout), cbuf2(ntse*ntout))
do j=1, ntse
  k1 = (j-1)*ntout
  k2 = (j-1)*(ms-ntout)
  do i=1, ntout
    cbuf1(k1+i) = (real(semp(k1+i+k2)))/(real(nsac)) !Normalizacao:
    cbuf2(k1+i) = sc(k1+i+k2) !divisao por nsac.
  end do
end do
deallocate(semp, sc)

! Transformacao t2->t.
! ddt = 0.004 !E' ddt e nns e nao dt e ns ! Equacoes retiradas do
! nns = int(1 + sqrt(ntout*dtout)/0.004) ! programa sutsq.
ddt = dt !Nao e necessario utilizar as equacoes do programa sutsq,
nns = ns !desde que conhecemos os valores dt e ns.
allocate(cbuf3(ntse*nns), cbuf4(ntse*nns))

flag = -1
call ttsq_tsq(flag, ntse, ntout, dtout, cbuf1, cbuf3, nns, ddt)
call ttsq_tsq(flag, ntse, ntout, dtout, cbuf2, cbuf4, nns, ddt)
deallocate(cbuf1, cbuf2)

if(iv == 1) then
  print *
  print *, 'transformacao t^2->t'
  print *, ' ntin=', ntout, ' dtin=', dtout
  print *, ' ntout=', nns, ' dtout=', ddt
end if

! Gravacao de SVC.
kk = (iv-1)*ntse*nns
do j=1, ntse*nns
  write(13,rec=j+kk) cbuf3(j) !Secao sismica.
  write(33,rec=j+kk) cbuf4(j) !Medida semblance.
end do
deallocate(cbuf3,cbuf4)

write(18,*) v(iv), 'm/s'
if(iv==1)then
  print *
end if
do i=10, 100, 10 !Esse ciclo imprime na tela porcentagem do programa
  n = int(real(i)*real(nv)/100.0) !que ja foi concluido.
  if(iv==n)then
    write(18,fmt='(i3a11)') i, '% concluido'
  end if
end do

```

```

        write(*,fmt='(i3a11)') i, '% concluido'
    end if
end do

end do veloc      ! Fim do looping velocidade.

deallocate(h, v, cdpsemp, cdpsac, ifold)
close(unit=13)
close(unit=33)
close(unit=11)

print *
call date_and_time(values=jv) !Calculo do tempo
id2=jv(3)
ihr2=jv(5)
imin2=jv(6)

write(18,*) 'inicio: dia ', id1, ', ', ', ', ihr1, 'h ', imin1, 'min'
write(18,*) 'fim: dia ', id2, ', ', ', ', ihr2, 'h ', imin2, 'min'
close(unit=18)

end program cvel

#####

!-----
!                                     SUBROTINAS
!-----
#####
! Subrotina que aplica operador de mudanca de fase.

subroutine omf(aux, ovi, ov, oh, oms, omt, odt, odx)
    real, allocatable :: rw(:), rkx(:)
    complex aux(oms*omt)
    real e1, e2, ovi, ov, oh
    integer oms, omt, nsh, nsh1

    complex, parameter :: ic = (0.,1.)

    allocate(rw(oms), rkx(omt))
!-----
! Calculo dos numeros de onda (rkx) e frequencia temporal (rw).

    pi = acos(-1.0)
    dw = 2.0*pi/(real(oms)*odt)
    dk = 2.0*pi/(real(omt)*odx)

    inykh = omt/2 + 1
    do i=1, inykh
        rkx(i) = (i-1)*dk
    end do
    do i=omt/2+2, omt
        rkx(i) = -rkx(omt+2-i)
    end do

    inyw = oms/2+1
    do i=1, inyw
        rw(i) = (i-1)*dw
    end do

```

```

    end do
    do i=oms/2+2, oms
        rw(i) = -rw(oms+2-i)
    end do
!-----
!Aplicacao do operador de mudanca de fase.
!A velocidade no termo e1 foi dividida por 2.
!Observar que o looping, inicia com valor 2, pois rw(1)=0.
! Observar o sinal negaivo em -ic ...
    tempo: do j=2, oms
        jj = (j-1)*omt
        traco: do i=1, omt
            e1 = ((ovi/2.0)**(2.0)-(ov/2.0)**(2.0))*((rkx(i))**2.0)/(4.0*rw(j))
            e2 = ((ovi/2.0)**(-2.0)-(ov/2.0)**(-2.0))*rw(j)*(oh)**2.0
            aux(jj+i) = aux(jj+i)*cexp(ic*cplx(-e1+e2,0.0))
        end do traco
    end do tempo
!-----
! teste para impressao
!     if ((jj+i>300000) .and. (jj+i<300021)) then
!         print *, jj+i, cbuf(jj+i)
!     end if
!-----
!-----
deallocate(rw, rkx)
end subroutine
#####

#####
subroutine emp_hdr(sac, semp, smc, cdpsac, cdpsemp, n1, n2, ne2, nl2, ifold)
!Realiza empilhamento.
    complex sac(n1*n2), semp(n1*ne2), traco(n1)
    real smc(n1*ne2), cdpsac(n2), cdpsemp(ne2)
    integer ifold(ne2)
    !n1: numero de amostras no tempo
    !n2: numero de tracos da sac
    !ne2: numero de tracos da semp
    !nl2: numero original de tracos da sac, valor do loop

    ic=0
    do itr=1, nl2 !percorre tracos da sac

        ipula = (itr-1)*n1
        do itp=1, n1
            traco(itp) = sac(itp+ipula) !selecao do traco
        end do

        procura: do jtr=1+ic, ne2 !percorre tracos da secao empilhada

            jpula = (jtr-1)*n1

            if (cdpsac(itr)==cdpsemp(jtr)) then
                do itp=1, n1
                    semp(itp+jpula) = traco(itp) + semp(itp+jpula)
                    smc(itp+jpula) = (real(traco(itp)))*2.0 + smc(itp+jpula)
                end do
                ifold(jtr) = ifold(jtr) + 1
                ic = jtr
                exit procura
            end if
        end do
    end do

```

```

        end do procura

    end do

end subroutine emp_hdr
#####

!#####
!-----
! Aplicacao da FFT.
! Variaveis:
!     ns => numero de amostras no tempo antes da aplicacao da subrotina ipot2
!     ms => numero de amostras no tempo depois da aplicacao da subrotina ipot2
!     nt => numero de tracos antes da aplicacao da subrotina ipot2
!     mt => numero de tracos depois da aplicacao da subrotina ipot2
!
! 17/01/03, Fernando Cezar

! entrada(cbuf, ns, ms, nt, mt), saida(cbuft)
subroutine apfft(cbuf, cbuft, ns, ms, nt, mt)
    complex cbuf(ms*mt), cbuft(ms*mt)
    integer nfft(1)

! Aplicacao da FFT na coordenada tempo ao quadrado, sigma=t**2.
    ndim = 1
    isign = 1
    iform = 1
    nfft(1)=ms
    call fft_geral(cbuf, nfft, ms, nt, ndim, iform, isign)

! Aplicacao da FFT na coordenada midpoint (ponto-medio).

! do i=ms*nt+1, ms*mt ! procedimento ja realizado no programa principal
!     cbuf(i) = 0.0
! end do

! Transposicao do vetor.
do j=1, ms
    kk = (j-1)*mt
    do i=1, mt
        kj = (i-1)*ms
        cbuft(i+kk)= cbuf(kj+j)
    end do
end do

nfft(1)=mt
call fft_geral(cbuft, nfft, mt, ms, ndim, iform, isign)
end subroutine
!-----
!#####

!#####
!-----
! Aplicacao da IFFT.
subroutine apifft(cbuft, cbuf, ns, ms, nt, mt)
    complex cbuft(ms*mt), cbuf(ms*mt)
    integer nfft(1)

! Aplicacao da IFFT na coordenada midpoint (ponto-medio).

```

```

nfft(1) = mt
isign = -1
iform = 1
ndim = 1
call fft_geral(cbuf, nfft, mt, ms, ndim, iform, isign)

! Transposicao do vetor.
do j=1, mt
  kk = (j-1)*ms
  do i=1, ms
    kj = (i-1)*mt
    cbuf(i+kk) = cbuf(kj+j)
  end do
end do

! Aplicacao da IFFT , coordenada tempo ao quadrado.
nfft(1) = ms

call fft_geral(cbuf, nfft, ms, nt, ndim, iform, isign)
end subroutine

!-----
!#####
! Realiza a transformacao da variavel tempo em tempo ao quadrado ( t=>t^2 )
! e a transformacao da variavel tempo ao quadrado em tempo ( t^2=>t ).
! Baseado no programa sutsq do pacote Seismic Unix, SU.
!
! Variaveis:
!   ns => numero de amostras no tempo
!   dt => intervalo de amostragem no tempo
!   nt => numero de tracos
!   ntout => numero de amostras no tempo apos transformacao
!   dtout => intervalo de amostragem apos transformacao
!   cbuf, cubft => amplitudes antes e depois da transformacao
!   ttsq1, ttsq2 => tempo antes e depois da transformacao
!
! 05/01/03, Fernando Cezar

! entrada(flag, nt, ns, dt, cbuf)
! saida(cbuf, ntout, dtout)
subroutine ttsq_tsq(flag, nt, ns, dt, cbuf, cubft, ntout, dtout)
  real, dimension(nt*ns) :: cbuf
  real, dimension(nt*ntout) :: cubft
  real, allocatable, dimension(:) :: ttsq1, ttsq2
  real, allocatable, dimension(:) :: f, fint
  integer flag ! flag=1 ! Opcao 1: tempo -> tempo ao quadrado
               ! flag=-1 ! Opcao 2: tempo ao quadrado -> tempo

!  select case(flag)
!    case(1)
!      print *
!      print *, '... aplicando a transformacao tempo em tempo ao quadrado,&
!              & t => t**2 :'
!      dtout = 0.2*ns*dt**2.0 ! equacoes retiradas do
!      ntout = int(1 + ns/0.2) ! programa sutsq
!    case(-1)
!      print *
!      print *, '... aplicando a transformacao tempo ao quadrado em tempo,&
!              & t**2 => t :'
!      dtout = 0.004 ! equacoes retiradas do
!      ntout = int(1 + sqrt(ns*dt)/0.004) ! programa sutsq
!  end select
  n = ns-1

```

```

! impressao dos valores
! print *, '          ntin=', ns, '          dtin=', dt
! print *, '          ntout=', ntout, '          dtout=', dtout
! print *

allocate(ttsq1(0:n), ttsq2(ntout))

select case(flag)
  case(1)
    do j=1, ns
      ttsq1(j-1) = (dt*real(j))*2.0      ! nodos: quadrado do tempo
    end do
  case(-1)
    do j=1, ns
      ttsq1(j-1) = sqrt(dt*real(j))      ! nodos: tempo
    end do
end select
do j=1, ntout
  ttsq2(j) = dtout*real(j)      ! coordenada onde interpolar
end do

allocate(f(0:n), fint(ntout))
do k=1, nt
  ii = (k-1)*ns
  kk = (k-1)*ntout
  do i=1, ns
    f(i-1) = cbuf(i+ii)
  end do
  call ill(1, n, ttsq1, f, ntout, ttsq2, fint)
  do i=1, ntout
    cbuft(i+kk) = fint(i)
  end do
end do
deallocate(f, fint)

deallocate(ttsq1, ttsq2)
end subroutine
#####

#####
!   Aplicacao da interpolacao linear de Lagrange. Kreyszig, Erwin;
!   Advanced engineering mathematics, 8th ed., pag. 849 .
!
!   Escolha da opcao do tipo de looping:
!   1) Looping rapido
!       Se os valores de xint estao em ordem crescente, e possivel
!   realizar o looping int2 (veja abaixo) mais rapido fazendo flag = 1 .
!   2) Looping convencional
!       Fazer flag = 2 .
!
! Variaveis:
! n => numero de nodos menos 1
! x(0:n) => matriz contendo os nodos
! f(0:n) => matriz das amplitudes associadas as coordenadas acima
! xint => numero de pontos a serem interpolados
! xint(nint) => matriz contendo as coordenadas onde se realiza
! a interpolacao
! fint(nint) => matriz com valores interpolados
!
! 18/01/03, Fernando Cezar
!
! entrada(n, x, f, nint, xint), saida(fint)

```

```

subroutine ill(flag, n, x, f, nint, xint, fint)
  real, dimension(0:n) :: x , f
  real, dimension(nint) :: xint, fint
  integer flag

  select case(flag)
  case(1) ! looping rapido
    k = 0
    ext1: do i=1, nint
      xx = xint(i)
      int1: do j=k, n-1      ! k e utilizado para tornar rapido o looping
        if (xx<x(0) .or. xx>x(n)) then
          fint(i) = 0.
          exit int1
        end if
        if (xx>=x(j) .and. xx<=x(j+1))then
          fint(i) = (xx-x(j+1))/(x(j)-x(j+1))*f(j) +&
            & (xx-x(j))/(x(j+1)-x(j))*f(j+1)
          k = j
          exit int1
        end if
      end do int1
    end do ext1
  case(2) ! looping convencional
    ext2: do i=1, nint
      xx = xint(i)
      int2: do j=0, n-1
        if (xx<x(0) .or. xx>x(n)) then
          fint(i) = 0.
          exit int2
        end if
        if (xx>=x(j) .and. xx<=x(j+1))then
          fint(i) = (xx-x(j+1))/(x(j)-x(j+1))*f(j) +&
            & (xx-x(j))/(x(j+1)-x(j))*f(j+1)
          exit int2
        end if
      end do int2
    end do ext2
  end select
end subroutine ill
!#####

```

## ANEXO II

# Análise de velocidade e cálculo do campo de velocidade *rms*

As seções apresentadas neste anexo são etapas independentes que devem ser aplicadas na ordem como está apresentada aqui. O conteúdo de cada seção deve ser salvo como um arquivo executável. Deve-se parametrizar os programas de acordo com as características do dado sísmico. A seção II.7 é opcional. Ela pode ser útil se houver necessidade de converter o campo de velocidade *rms* em um campo de velocidade intervalar em tempo ou em um campo de velocidade intervalar em profundidade.

### II.1 Análise de velocidade

```
#!/bin/sh
#Realiza análise de velocidade.
#Os arquivos mpicks.$cdp contém as tabelas de tempo versus
#velocidade no formato ascii.

#Saída: arquivos tipo mpicks.$cdp

#Parâmetros
n1=          #número de amostras no tempo
d1=          #intervalo de amostragem no tempo
f1=          #valor da primeira amostra de tempo
n2=          #número de amostras de velocidade
d2=          #intervalo de amostragem de velocidade
f2=          #primeiro valor de velocidade
cdpmin=      #valor mínimo de cdp para análise
cdpmax=      #valor máximo de cdp para análise
dcdp=        #intervalo de cdp para análise

#Ciclo de análise de velocidade
cdp=$cdpmin
while [ $cdp -le $cdpmax ]; do
    suwind <in.su key=cdp min=$cdp max=$cdp >lixo1
    suximage n1=$n1 d1=$d1 f1=$f1 n2=$n2 d2=$d2 f2=$f2 \
        cmap=hsv2 legend=1 <lixo1 mpicks=mpicks.$cdp title="cdp $cdp" &
    pause
# As três linhas seguintes realizam o incremento do ciclo
    cdp=`bc -l <<END
        $cdp + $dcdp
    END`
done
```



```
rm -rf lixo1
exit
```

## II.2 Conversão das tabelas $t$ versus $x$ em arquivos binários

```
#!/bin/sh
#Converte tabelas de tempo versus velocidade para o formato binário.

#Entrada: arquivos tipo mpicks.$cdp
#Saída: arquivos tipo mpicks$con.bin

# Parametros
cdpmin=      #valor mínimo de cdp usado na análise de velocidade
cdpmax=      #valor máximo de cdp usado na análise de velocidade
dcdp=        #intervalo de cdp usado na análise de velocidade

echo
echo "Utilize os valores de n, abaixo, no proximo fluxo !"
con=1
cdp=$cdpmin
while [ $cdp -le $cdpmax ]; do
    a2b n1=2 <mpicks.$cdp >mpicks$con.bin
    # As tres linhas seguintes sao o incremento do ciclo
    cdp='bc -l <<END
    $cdp + $dcdp
END'
    con='bc -l <<END
    $con + 1
END'
done

echo
exit
```

## II.3 Interpolação na direção da variável tempo

```
#!/bin/sh
#Realiza interpolacao na direcao da variável tempo.
#0 número de amostras de tempo de cada tabela passa
#a ter o número da amostras do dado sísmico.

#Entrada: arquivos tipo mpicks$con.bin
#Saída: arquivos mpicks$con-f02.bin

# Parâmetros
ntout=      #numero de amostras no tempo do dado sísmico
dxout=      #intervalo de amostragem no tempo
fxout=      #valor da primeira amostra de tempo

echo
echo "Utilize a saida abaixo no proximo fluxo!"

con=1      #Apos in devem ser escritos os valores de n como no exemplo abaixo
for nlin in 13 12 11 13 15 14 12 14 14 15 16 15 15 11 7 ; do
    unisam xyfile=mpicks$con.bin npairs=$nlin nout=$ntout dxout=$dxout \
```

```

        fxout=$fxout method=linear >mpicks$con-f02.bin
    echo "mpicks$con-f02.bin \\"
    con='bc -l <<END
    $con + 1
END' #

done

echo
exit

```

## II.4 Geração do campo de velocidade *rms* por concatenação dos arquivos

```

#!/bin/sh
# Gera o campo de velocidade por concatenação dos arquivos.

#Entrada: arquivos tipo mpicks$con-f02.bin
#Saída: arquivo nomeado na variável file

#Parâmetros
n1=          #número de amostras no tempo
f1=          #valor da primeira amostra no tempo
d1=          #intervalo de amostragem
n2=          #numero de cdps utilizados na análise de velocidade
f2=          #valor do primeiro cdp utilizado na análise de velocidade
d2=          #intervalo de cdp utilizado na análise de velocidade
file=mpicks-f03.bin  #nome do arquivo de saída

#Use os arquivos copiados do terminal, abaixo !
cat \
mpicks1-f02.bin \
mpicks2-f02.bin \
mpicks3-f02.bin \
mpicks4-f02.bin \
mpicks5-f02.bin \
mpicks6-f02.bin \
mpicks7-f02.bin \
mpicks8-f02.bin \
mpicks9-f02.bin \
mpicks10-f02.bin \
mpicks11-f02.bin \
mpicks12-f02.bin \
mpicks13-f02.bin \
mpicks14-f02.bin \
mpicks15-f02.bin >$file

#Primeira visualização do campo de velocidade
ximage n1=$n1 f1=$f1 d1=$d1 n2=$n2 f2=$f2 d2=$d2 legend=1 cmap=hsv2 \
    title=px-tudo:_campo_de_velocidade \
    label1=num_amost_tempo label2=num_amost_ponto-medio \
    <$file &

exit

```

## II.5 Interpolação do campo de velocidade na direção do ponto-médio

```

#!/bin/sh
#Interpola o campo de velocidade na direção do ponto-médio.

#Entrada: arquivo nomeado na variável input
#Saída: arquivo nomeado na variável output

input=mpicks-f03.bin    #campo de velocidade não interpolado
output=vrnst-1.bin      #campo de velocidade interpolado

#Parametros: arquivo de entrada (input)
nx1=                    #numero de amostras no tempo
dx1=                    #intervalo de amostras no tempo
fx1=                    #valor da primeira amostra no tempo
nx2=                    #número de cdps utilizados na análise de velocidade
dx2=                    #intervalo entre os cdps na análise de velocidade
fx2=                    #valor do primeiro cdp na análise de velocidade

#Parametros: arquivo de saída (output)
n1=                    #igual ao valor de entrada
d1=                    #igual ao valor de entrada
f1=                    #igual ao valor de entrada
n2=                    #numero de cdps do dado sísmico
d2=                    #intervalo de cdp do dado sísmico
f2=                    #primeira amostra de cdp do dado sísmico

#Interpolação na direção do ponto-médio
unisam2 nx1=$nx1 dx1=1 fx1=1 \
        n1=$n1 d1=1 f1=1 \
        nx2=$nx2 dx2=$dx2 fx2=$fx2 \
        n2=$n2 d2=$d2 f2=$f2 \
        method=linear <$input >$output

#Visualização do campo de velocidade interpolado
ximage n1=$n1 f1=1 d1=1 n2=$n2 f2=1 d2=1 legend=1 cmap=hsv2 \
        title=$output:_campo_de_velocidade \
        label1=num_amost_tempo label2=num_amost_ponto-medio <$output &
exit

```

## II.6 Suavização do campo de velocidade

```

#!/bin/sh
# Suaviza campo de velocidade.

#Entrada: arquivo nomeado na variável input (saída do fluxo anterior)
#Saída: arquivo nomeado na variável output

input=vrnst-1.bin
output=vrnst-s-1.bin

#Analisar o campo de velocidade variando os parâmetros r1 e r2 ...
#Parâmetros
n1=                    #número de amostras no tempo
n2=                    #número de cdps do dado sísmico
r1=                    #parâmetro de suavização na direção do tempo
r2=                    #parâmetro de suavização na direção do ponto-médio

```

```
smooth2 <$input r1=$r1 r2=$r2 n1=$n1 n2=$n2 | # r1 e r2 vai de 0 a 20
ximage n1=$n1 f1=1 d1=1 n2=$n2 f2=1 d2=1 legend=1 cmap=hsv2 \
    title=px-interp:_campo_de_velocidade_suavizado \
    label1=num_amost_tempo label2=num_amost_ponto-medio &

#Campo de velocidade definitivo. Usar apos analise na parte anterior ...
smooth2 <$input r1=$r1 r2=$r2 n1=$n1 n2=$n2 >$output

exit
```

## II.7 Conversão entre campos de velocidade (opcional)

```
#!/bin/sh
# Conversao entre tipos de campo de velocidade.

#Entrada: arquivo nomeado em input
#Saída: arquivo nomeado em output

#Parâmetros
input=          #arquivo de entrada
output=         #arquivo de saída
intype=vrms     #tipo de campo de velocidade de entrada
outtype=vintz   #tipo de campo de velocidade de saída
nt=            #número de amostras no tempo
dt=            #intervalo de amostragem no tempo
ft=            #primeira amostra de tempo
nz=            #número de amostras em profundidade
dz=            #intervalo de amostras em profundidade
fz=            #valor da primeira amostra em profundidade
nx=            #número de cdps do dado sísmico
f2=            #primeiro valor de cdp
d2=            #intervalo de cdp

#Teste
#velconv <$input intype=$intype outtype=$outtype nx=$nx \
#    nt=$nt dt=$dt ft=$ft nz=$nz dz=$dz fz=$fz |
#ximage n1=$nz f1=$fz d1=$dz n2=$nx f2=$f2 d2=$d2 legend=1 cmap=hsv2 \
#    title="vintz nz=$nz dz=$dz" \
#    label1="z (m)" label2="cdp (m)" &

#Conversão definitivo. Usar apos analise na parte anterior ...
velconv <$input intype=$intype outtype=$outtype nx=$nx \
    nt=$nt dt=$dt ft=$ft nz=$nz dz=$dz fz=$fz >$output

exit
```

## ANEXO III

# Mapeamento da seção sísmica migrada em tempo

```
program sfinal
!Obtem secao migrada final a partir do cubo de velocidade,
!aplicando interpolacao.

!dimensao mais rapida
!n1, d1, f1 -> numero de amostras, intervalo de amostragem e primeira amostra
!dimensao intermediaria
!n2, d2, f2 -> numero de amostras, intervalo de amostragem e primeira amostra
!dimensao mais lenta
!n3, d3, f3 -> numero de amostras, intervalo de amostragem e primeira amostra

!campovel(n1,n2) -> campo de velocidade
!cubovel(n1,n2,n3) -> cubo de velocidade (amplitudes)
!vcubo(n3) -> valores de velocidade do cubo
!smig(n1,n2) -> secao migrada final

    real, allocatable :: campovel(:,,:), vcubo(:), smig(:,,:)
    real, allocatable :: aux1(:)
    character*75 inamp, incampo, outmig
    real rx
!-----
!Leitura de dados.
    print *
    print *, 'n1, n2 ?'
    read(*,*) n1, n2
    print *, 'n3, f3, d3 ?'
    read(*,*) n3, f3, d3
    print *, 'nome do arquivo de dados gravados ?'
    read(*,*) inamp
    print *, 'campo de velocidade ?'
    read(*,*) incampo
    print *, 'arquivo para gravar secao migrada ?'
    read(*,*) outmig
    print *

    allocate(campovel(n1,n2), vcubo(n3), smig(n1,n2))

    allocate(aux1(n1*n2)) !entrada do campo de velocidade
    open(unit=11, file=incampo, access='direct', status='old', recl=4)
    do k=1, n1*n2
        read(11,rec=k) aux1(k)
    end do
    close(unit=11)
    call v1d_m2d(n2, n1, aux1, campovel)
    deallocate(aux1)
!-----
```

```

!Obtencao da secao migrada.
do k=1, n3
    vcubo(k) = f3 + real(k-1)*d3
end do
!Espectro de velocidade determinado
!na ananlise de velocidade.

open(unit=26, file=inamp, access='direct', status='old', recl=4)

do j=1, n2
    do i=1, n1
        vcampo = campovel(i,j) !vcampo: valor de velocidade selecionado do campo
        ciclo3: do k=1, n3-1
            iv1 = (k-1)*n2*n1 + (j-1)*n1 + i
            iv2 = k*n2*n1 + (j-1)*n1 + i
            if (vcampo>vcubo(k).and.vcampo<=vcubo(k+1)) then
                val1=abs(vcampo-vcubo(k))
                val2=abs(vcubo(k+1)-vcampo)
                read(26,rec=iv1) riv1
                read(26,rec=iv2) riv2
                smig(i,j) = ((vcampo-vcubo(k))/d3)*riv1&
                    & + ((vcubo(k+1)-vcampo)/d3)*riv2
                !interpolacao linear
            end if
            exit ciclo3
        end do
    end do
end do

close(unit=26)

!-----
!Gravacao dos dados.
open(unit=11, file=outmig, access='direct', status='replace', recl=4)
do j=1, n2
    jj = (j-1)*n1
    do i=1, n1
        write(11,rec=i+jj) smig(i,j)
    end do
end do
close(unit=11)

deallocate(campovel, smig)
print *, 'FIM'
!-----
end program sfinal

```