



**COPPE/UFRJ**

MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO COM DIFERENTES CONDIÇÕES DE  
IMAGEM

Max Wanlemborg Xavier Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Webe João Mansur

Luiz Landau

Rio de Janeiro

Março de 2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO COM DIFERENTES CONDIÇÕES DE  
IMAGEM

Max Wantemberg Xavier Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

---

Prof. Luiz Landau, D.Sc.

---

Prof. Webe João Mansur, Ph.D.

---

Dr. Marco Antônio Cetale Santos, D.Sc.

---

Dr. André Bulcão, D.Sc.

---

Prof. José Luis Drummond Alves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2009

Silva, Max Wantemberg Xavier.

Migração Reversa no Tempo com Diferentes Condições de Imagem/Max Wantemberg Xavier Silva. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

IX, 95 p.: il.; 29,7 cm

Orientadores: Webe João Mansur

Luiz Landau

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 66 – 69.

1. Modelagem Acústica 2D. 2. Migração Reversa no Tempo. 3. Condições de Imagem. 4. Imageamento Sísmico. I. Mansur, Webe João *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

“À minha mãe, Maria da Luz Ferreira Xavier, que sozinha, conseguiu vencer inúmeras batalhas na criação de seus quatro filhos”.

***“Peçam, e lhes será dado!  
Procurem, e encontrarão! Batam,  
e abrirão a porta para vocês! Pois  
todo aquele que pede, recebe;  
quem procura, acha; e a quem  
bate, a porta será aberta”.***

***Mateus 7, 7-8.***

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me fortalecido nos momentos de fraqueza em toda minha vida.

A minha família, em especial, Maria da Luz Ferreira Xavier, Mick Wradley Xavier Silva, Mitchel Wagner Xavier Silva e Mitchela Wanessa Xavier Silva, pelo amor, compreensão e apoio ao longo da vida e, aos meus sobrinhos, Luiza Xavier e Davi Xavier, pois, são as crianças mais lindas do mundo, acrescentam muito no meu emocional e, aprendo muitas lições com eles.

A minha namorada Thaís Barreto Reis, pelo amor, apoio, compreensão e carinho em todos os momentos em que vivemos juntos.

Ao meu orientador, Professor Webe João Mansur, pelas inúmeras conversas sobre o conteúdo da dissertação e, pelos ensinamentos de vida que sempre buscou me passar.

Aos amigos e funcionários dos laboratórios Lab2M e LAMCE, pelo apoio e compreensão desde o início do mestrado.

Ao orientador, Professor Luiz Landau, pela oportunidade concedida e pelo apoio.

Agradeço a Agência Nacional do Petróleo (ANP), pelo apoio financeiro.

Resumo de Dissertação apresentada a COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO COM DIFERENTES CONDIÇÕES DE IMAGEM

Max Wanlemborg Xavier Silva

Março/2009

Orientadores: Webe João Mansur

Luiz Landau

Programa: Engenharia Civil

Esta dissertação apresenta um estudo comparativo de diferentes condições de imagem aplicadas na Migração Reversa no Tempo (RTM) de dados sísmicos. Esta comparação tem como objetivo avaliar a qualidade da seção migrada obtida e o custo computacional associado. O método numérico das diferenças finitas (MDF) foi utilizado na modelagem acústica bi-dimensional como técnica de discretização da equação completa da onda usando aproximações de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para as temporais. Foram utilizados três modelos de velocidades compressoriais para avaliar diferentes graus de complexidade geológica. Entre os mesmos encontra-se o modelo com camada pré-sal da SEG/EAGE dada à importância do imageamento nesta região para a indústria do petróleo atualmente. Foi realizada a migração pré-empilhamento, onde cada sismograma é migrado separadamente. Com o objetivo de melhorar o resultado da seção migrada pós-empilhamento foi utilizado a técnica de filtragem de dados conhecida por “mute” (silenciamento).

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## REVERSE TIME MIGRATION USING DIFFERENTS IMAGE CONDITIONS

Max Wanlemborg Xavier Silva

March/2009

Advisors: Webe João Mansur

Luiz Landau

Department: Civil Engineering

This dissertation presents a comparative study of different image conditions applied to reverse time migration (RTM) of seismic data. The study aims to evaluate the computational cost and the migrated section quality in terms of resolution. The finite difference method was used to discretize the complete wave equation in bidimensional acoustic modeling with fourth order spatial approximation and second order time approximation. In this work were studied three velocity models to evaluate different degrees of geological complexity. A SEG's model with salt layer was considered because of the importance of pre-salt regions to Brazilian petroleum industry. In this work it was carried out pre-stack migration where each seismogram is individually migrated. A data filtering technique called mute was used to improve the stacked migrated section.

# Índice

<b>Dedicatória</b>	<b>iv</b>	
<b>Agradecimentos</b>	<b>v</b>	
<b>Resumo</b>	<b>vi</b>	
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>	
<b>Índice</b>	<b>viii</b>	
<b>Capítulo I</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Metodologia e Objetivo da Dissertação. . . . .	4
<b>Capítulo II</b>	<b>Migração de Dados Sísmicos</b>	<b>7</b>
2.1	Introdução aos Principais Métodos de Migração. . . . .	8
2.2	Migração Reversa no Tempo. . . . .	11
<b>Capítulo III</b>	<b>Condições de Imagem</b>	<b>17</b>
3.1	Condição de Imagem com Tempo de Excitação. . . . .	18
3.2	Condição de Imagem com Correlação Cruzada. . . . .	23
3.2.1	Condição de Imagem com Correlação Cruzada Normalizada. . . . .	33
3.2.2	Outras Condições de Imagem. . . . .	36
<b>Capítulo IV</b>	<b>Resultados</b>	<b>40</b>
4.1	Modelo Simples. . . . .	40
4.2	Modelo com Camada Pré-Sal (SEG/EAGE Modificado) . . . . .	48
4.2.1	Modelo com Camada Pré-Sal Aumentado. . . . .	57
4.3	Modelo Overthrust. . . . .	61

<b>Capítulo V</b>	<b>Conclusões, Comentários e Trabalhos Futuros</b>	<b>70</b>	
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>74</b>	
	<b>Apêndice 1</b>	<b>Modelagem</b>	<b>78</b>
A.1.1	Modelagem Acústica 2D.....	79	
A.1.2	Cálculo nas Bordas e Fator Atenuador de Cerjan.....	85	
	<b>Apêndice 2</b>	<b>Filtragem de Dados</b>	<b>91</b>
A.2.1	Técnica de Filtragem <i>Mute</i> .....	91	

# Capítulo 1

## Introdução

A busca por reservatórios de petróleo é uma tarefa muito complexa, pois, exige altos investimentos e anos de estudos até encontrá-lo para possivelmente perfurá-lo. Milhares de profissionais são requisitados, tais como, engenheiros, geofísicos, geólogos, matemáticos, sondadores, físicos e outros. Apesar da estatística desfavorável, pelo baixo índice de acerto, as empresas de petróleo realizam altos investimentos em busca de reservatórios de hidrocarbonetos, pois, uma vez encontrado o prêmio é grande, as ações em bolsa de valores (caso ela possua) são valorizadas, como consequência do crescimento de seu patrimônio. Milhões de barris de petróleo podem ser extraídos de um mesmo reservatório e, considerando a cotação do barril acima de cem dólares, como ocorrido a pouco tempo atrás, pode-se ter idéia do lucro que uma empresa pode obter com esta mercadoria.

A camada pré-sal localizada entre os Estados do Espírito Santo e Santa Catarina nas bacias sedimentares de Campos, Santos e Espírito Santo, com aproximadamente oitocentos quilômetros de extensão e a sete mil metros de profundidade, exemplifica o alto investimento em tecnologia e mão-de-obra necessário para obter êxito na exploração e produção do petróleo. Pois, a camada de sal, que começou a ser formada a milhões de anos atrás com a separação dos continentes sul-americano e africano, tem características plásticas, além de estar localizada em águas profundas, o que dificulta o processo de perfuração, uma vez que, o poço pode ser fechado pela alta pressão existente em subsuperfície.

A figura a seguir ilustra um perfil típico de uma região onde há ocorrência de camadas de sal, incluindo a região do pré-sal:

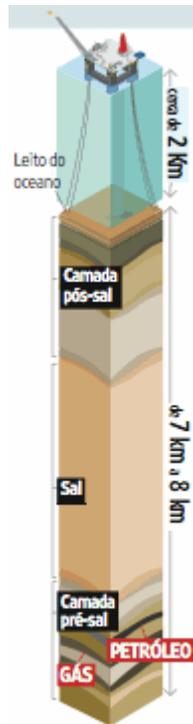


Figura 1.1 – Ilustração da profundidade da camada pré-sal (figura retirada do site [www.folha.com.br](http://www.folha.com.br)).

Uma dúvida frequente entre curiosos e iniciantes na área é a seguinte: Como encontrar petróleo?

Existem inúmeros métodos para explorar uma bacia sedimentar e, possivelmente, encontrar hidrocarbonetos, o método da sísmica de reflexão encontra-se entre os mais utilizados. Este método consiste basicamente em inserir energia nas camadas de rochas em subsuperfície provocadas por fontes pontuais como dinamite em terra ou canhão de ar comprimido no mar, criando-se assim, um campo de ondas que se propaga no meio rochoso, retornando, em parte, à superfície por reflexões ocorridas nas interfaces entre as

camadas de diferentes impedâncias acústicas. Esta energia que retorna à superfície é registrada por aparelhos, geofones em terra e hidrofones no mar, conhecidos como receptores. Cada receptor registra um chamado traço sísmico, e o conjunto dos traços sísmicos é chamado sismograma. Assim, esses dados trazem informações sobre as rochas em subsuperfície. Uma vez realizada a aquisição dos dados sísmicos, passa-se para a fase de processamento dos mesmos.

A figura abaixo ilustra o método sísmico de reflexão:

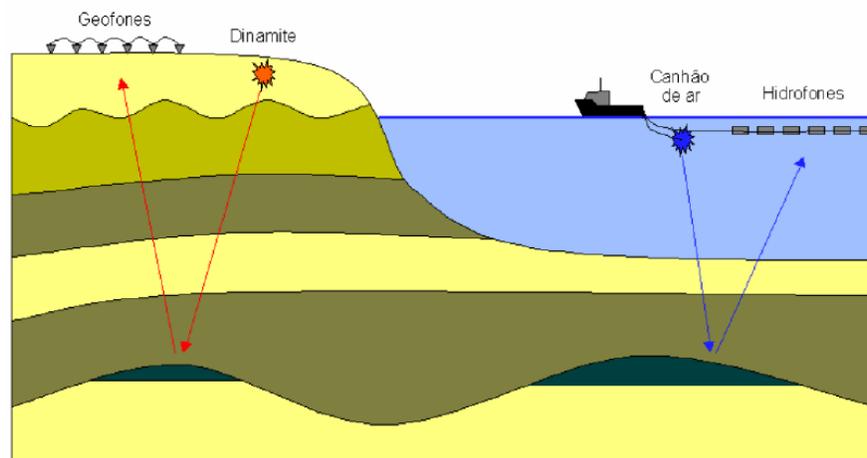


Figura 1.2 – Ilustração do método sísmico de reflexão (figura retirada do site da PUC Rio).

A fase de processamento dos dados sísmicos tem a finalidade de criar uma imagem das camadas de rochas em subsuperfície, que pode ser dada em tempo ou profundidade (ver capítulo 2), para que os intérpretes possam analisar o resultado obtido e avaliar a possível existência de um reservatório de petróleo. Caso seja concluído a existência do mesmo, na fase de interpretação da imagem, a razão custo/benefício é analisada para decidir por uma possível perfuração.

Isto conclui a fase de exploração de uma bacia sedimentar. Portanto, existem as fases de aquisição, processamento, interpretação dos dados e perfuração de poços. Desta maneira, pode-se encontrar um reservatório de hidrocarbonetos.

No processo de criação da imagem das camadas em subsuperfície, é necessário realizar a migração dos dados registrados no sismograma. Existem diversas maneiras de realizar esta tarefa (detalhado no capítulo 2), mas o método de migração utilizado nesta dissertação é o que propaga o campo de ondas inversamente no tempo, ou seja, a migração reversa no tempo, mais conhecida como RTM. Durante a migração RTM, é necessário utilizar condições e/ou equações conhecidas como condição de imagem, que tem a finalidade de formar a imagem do modelo geológico estudado em cada ponto da malha.

No próximo item serão tratados o objetivo, a metodologia e a importância do trabalho realizado nesta dissertação.

### 1.1 – Metodologia e Objetivo da Dissertação.

O objetivo desta dissertação, é realizar a migração reversa no tempo, apresentada pela primeira vez na década de 80 (BAYSAL et al, 1983; WHITMORE, 1983; LEVIN, 1984), com diferentes condições de imagem, em modelos geológicos simples e complexos, para fazer comparações em relação ao custo computacional e a qualidade da seção migrada obtida com cada condição. Entre as condições de imagem avaliadas está a condição de imagem com tempo de excitação, proposta por CLAERBOUT (1971), e uma condição de imagem que envolve o produto entre os campos de ondas incidentes e refletidos, proposta

pelo autor BULCÃO (2004), onde a função do campo de onda incidente é indicar a fase entre os campos incidentes e refletidos.

Um conjunto de condições de imagem fora abordado por SCHLEICHER, COSTA e NOVAIS (2007), com a finalidade de comparar a quantidade de artefatos produzidos e a qualidade de cada seção migrada. Outro trabalho realizado sobre este tema fora apresentado por KAELIN e GUITTON (2006), onde são apresentados resultados sobre as condições de imagem com correlação cruzada e correlação cruzada normalizada (ler capítulo 3).

A metodologia adotada consistiu em realizar a aquisição dos dados sísmicos na superfície de cada modelo geológico, utilizar a migração RTM separadamente para cada ponto de tiro com as diversas condições de imagem, aplicar um método de filtragem de dados em cada seção migrada, introduzido em SILVA (2008) e, empilhar as seções migradas.

O tema abordado é importante, uma vez que, a migração dos dados sísmicos é tarefa fundamental na exploração de uma bacia, e quão melhor ficar o resultado da seção migrada, melhor será para o intérprete identificar estruturas geológicas com características semelhantes a uma armadilha (trapa), responsável por reter hidrocarbonetos.

O tempo de processamento da migração tem grande importância para a indústria petrolífera, pois, é de interesse das empresas e pesquisadores realizar esta fase em um menor intervalo de tempo possível. Assim, como mencionado anteriormente, fora apresentado os tempos de processamento fornecidos com os resultados da migração RTM referente a cada condição de imagem implementada neste trabalho.

É importante salientar, que os programas desenvolvidos para esta dissertação não foram otimizados, ou seja, os algoritmos não foram implementados da maneira mais eficiente possível. Portanto, os tempos de cpu apresentados devem ser analisados de forma qualitativa. Os resultados apresentados foram obtidos com a utilização de apenas um processador, a utilização de clusters (máquina com vários processadores) e a otimização dos algoritmos fornecerá o tempo real de processamento.

# Capítulo 2

## Migração de Dados Sísmicos.

O processo de caracterização das camadas em subsuperfície com o método sísmico é iniciado com uma perturbação gerada na superfície, dinamite em terra ou canhão de ar comprimido no mar, por exemplo, que transfere ao meio energia que se propaga ao longo das camadas e retorna à superfície por reflexões nas interfaces entre as camadas de rochas ocasionadas por diferentes impedâncias acústicas. Esta fase de aquisição dos dados sísmicos onde existe uma fonte sísmica, propagação de energia ao longo das camadas em subsuperfície e registro da mesma pelos receptores, geofones em terra e hidrofones no mar, pode ser devidamente reproduzida pela modelagem computacional. Na prática, os dados registrados na superfície, gravados em arquivos denominados sismogramas, passam para a fase de processamento, onde os mesmos recebem tratamentos para remoção de dados relacionados a ruídos e, posteriormente, estes dados são utilizados na migração sísmica.

A finalidade da migração sísmica é posicionar corretamente os refletores em subsuperfície, utilizando os dados registrados no sismograma (informações sobre as camadas de rochas). Desta maneira, é possível se obter uma imagem da região geológica que está sendo explorada. Esta imagem fornecida pela migração, chamada de seção sísmica migrada, pode ser dada em tempo ou profundidade, sendo que os refletores são melhor posicionados com a migração dos dados sísmicos em profundidade e, na migração em tempo, pode ser necessário converter a escala vertical de tempo para profundidade. Com o resultado apresentado na seção sísmica migrada, os geólogos podem realizar interpretações

com a finalidade de localizar estruturas que se assemelham a uma armadilha (trapa), onde há a possibilidade da existência de reservatórios de hidrocarbonetos.

## 2.1– Introdução aos Principais Métodos de Migração.

Existem inúmeros métodos para migrar os dados sísmicos, entre os mais utilizados encontram-se, Migração Reversa no Tempo (RTM), Migração por Rotação de Fase (Phase Shift), Migração por Rotação de Fase mais Interpolação (PSPI), Migração *Split-Step* e, a mais utilizada na indústria do petróleo, a Migração Kirchhoff.

A Migração por Rotação de Fase (Phase Shift), introduzida por GAZDAG (1978) e detalhada por SILVA (2006), é baseada na equação da onda (apresentada na próxima seção) e, necessita da alteração do domínio espaço-tempo do sismograma registrado na superfície para o domínio da frequência-número de onda. Utilizando a chamada equação de dispersão, que relaciona velocidade, frequência e número de onda, obtém-se a equação de Helmholtz, que admite solução apenas para um domínio homogêneo. Caso exista variação de velocidade na vertical, deve-se realizar a extrapolação em profundidade utilizando intervalos de tempo  $\Delta z$ , considerando constante a velocidade horizontal. Para obter a seção migrada em profundidade é necessário retornar para o domínio espaço-tempo aplicando a Transformada Inversa de Fourier. O método “Phase Shift” é limitado quando se trata de significativas variações laterais de velocidades.

A Migração por Rotação de Fase mais Interpolação (Phase Shift Plus Interpolation), introduzida por GAZDAG (1984), foi apresentada com a finalidade de suprir a deficiência do método “Phase Shift” quando se trata de variação lateral de velocidade. O método utiliza

várias velocidades para cada passo em profundidade, as chamadas velocidades de referência, diferente do método “Phase Shift”, que utiliza apenas uma velocidade. Desta forma, após aplicada a Transformada de Fourier, tem-se  $n$  campos para  $n$  velocidades de referência, velocidades estas que estão restritas a um intervalo que possui como limites as velocidades mínima e máxima do modelo utilizado. Extrapola-se em profundidade os campos para cada velocidade de referência, dando origem aos campos de referência. O domínio destes campos é retornado para o espaço utilizando a Transformada Inversa de Fourier, onde os mesmos são interpolados, assim, obtém-se um campo interpolado para cada posição, restando, apenas, aplicar uma condição de imagem para obter a imagem em cada ponto da malha (SILVA 2006).

O método de migração “Split-Step”, abordada por POQUECHOQUE (2004) e STOFFA (1990), é similar ao método PSPI. Neste método, não é necessário utilizar interpolações para acomodar variações laterais de velocidades, o que torna este método menos custoso em termos computacionais em relação ao PSPI. A extrapolação dos campos de ondas em profundidade para cada velocidade de referência e, conseqüentemente, a interpolação dos campos de referência, também, não é necessário. Esta técnica utiliza apenas uma velocidade de referência, normalmente a velocidade média, desta maneira, obtém-se apenas um campo de referência e extrapola-se o campo utilizando os operadores de mudança de fase “Split-Step”, que atuam alternadamente nos domínios espaço-frequência e frequência-número de onda.

A Migração Kirchhof, como mencionado anteriormente é uma das mais utilizadas na indústria do petróleo e, é baseada na solução integral da equação da onda.

A Migração Reversa no Tempo (RTM), proposta por BAYSAL (1983) e abordada por SILVA (2002), baseia-se na extrapolação por diferenças finitas dos campos de ondas que partem da fonte sísmica e dos campos registrados nos receptores. Há aplicação de uma condição de imagem para fornecer a imagem em cada ponto da malha. Este método de migração está detalhado na próxima seção, pois, foi o método utilizado nesta dissertação.

Uma dúvida freqüente entre os iniciantes na área, diz respeito à necessidade de conhecer “a priori” o modelo de velocidades para realizar a migração, pois, o mesmo já caracteriza a geologia em subsuperfície e, a finalidade da migração é justamente fornecer uma seção migrada que possa imagear as interfaces entre as camadas de rochas. Assim, todo procedimento computacional é realizado para imagear uma região “conhecida”. Isto ocorre, pois, qualquer método de migração necessita de um modelo de velocidades aproximado para migrar os dados sísmicos.

A dúvida citada no parágrafo anterior é mais freqüente quando se trata da modelagem, pois, o modelo de velocidades utilizado para realizar a migração apresenta detalhes das estruturas geológicas. Assim, caso o método de migração seja eficiente, o resultado obtido na seção sísmica migrada deve ser semelhante ao modelo de velocidades utilizado. Na prática, o modelo de velocidades utilizado na migração é aproximado (macro-modelo) e não apresenta detalhes da estrutura geológica.

Apesar da incoerência citada acima, freqüente na modelagem, informações importantes são obtidas com a migração sísmica.

## 2.2– Migração Reversa no Tempo.

A migração reversa no tempo ou, “reverse time migration” (RTM), que surgiu no início da década de 80 (BAYSAL et al, 1983; WHITMORE, 1983; LEVIN, 1984), é reconhecida por fornecer excelentes resultados, mas com custo computacional elevado. Apesar do “preço” que se paga para realizar a migração RTM, esta é muito indicada quando se trata de modelos geológicos complexos, como, por exemplo, modelos que possuem flancos de sal ou modelos com bruscas variações laterais de velocidades. Em uma comparação com a migração Kirchhoff, realizada por YOON et al 2003, que é uma das mais utilizadas na indústria, a RTM se mostrou 15 vezes mais cara, mas forneceu melhores resultados.

As principais etapas realizadas no processo de migração reversa no tempo (RTM) estão listadas abaixo:

- 1- Leitura das velocidades no modelo suavizado;
- 2- Propagação para registro da matriz tempo de trânsito (TD) ou obtenção dos campos de ondas incidentes (ler capítulo 3).
- 3- Leitura dos dados registrados no sismograma;
- 4- Depropagação dos campos de ondas registrados no sismograma, através do método de diferenças finitas (MDF), do tempo final (  $t = T_{\text{final}}$  ) até o tempo inicial (  $t = 0$  ) de registro;
- 5- Aplicação de uma condição de imagem para gerar a imagem em cada ponto da malha.
- 6- Resultado (seção sísmica migrada).

O sismograma, arquivo com os campos de ondas registrados em cada receptor e em todos os tempos, é na migração RTM, uma condição de contorno, quando os receptores estão na superfície do modelo.

Desta maneira, os campos de ondas são injetados no programa de migração, em todos os tempos, e são depropagados do tempo final até o tempo inicial de registro, através do método numérico de diferenças finitas aplicado na equação homogênea da onda, e uma condição de imagem é utilizada para gerar a imagem em cada ponto da malha, obtendo como resultado, a seção sísmica migrada.

Existem diversas condições de imagem que podem ser implementadas na migração RTM, tais como, condição de imagem com tempo de excitação, que se baseia na formação da imagem com o campo de ondas refletido quando o tempo de depropagação for igual ao tempo de trânsito, condição de imagem com correlação cruzada entre os campos de ondas incidentes e refletidos, que fornecem a imagem em cada ponto da malha, com o somatório da multiplicação entre estes campos em todos os tempos e, outras condições de imagem, que junto com estas, estão detalhadas no próximo capítulo desta dissertação.

Como mencionado anteriormente, na migração RTM, utiliza-se a equação homogênea da onda para realizar a depropagação dos campos registrados no sismograma. Para o caso 2D, a equação homogênea é a seguinte:

$$\frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1)$$

Onde:  $\frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial x^2}$ ,  $\frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial z^2}$  e  $\frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial t^2}$  são, respectivamente, as derivadas de

segunda ordem em relação ao eixo x, eixo z e ao tempo t.

$c$  é a velocidade de propagação da onda acústica no meio.

$x$  e  $z$  são as coordenadas horizontal e vertical, respectivamente.

Como já mencionado, a equação anterior é resolvida com o método numérico de diferenças finitas (MDF), assim, utilizando os campos de ondas introduzidos no programa de migração nas posições dos receptores, obtém-se os valores dos campos nos demais pontos através da depropagação do tempo final até o tempo inicial de registro. Desta maneira, a equação homogênea da onda discretizada com o MDF para depropagação, fica como mostrado abaixo:

$$P_{i,j}^{n-1} = -\frac{1}{12}A(i,j)[P_{i-2,j}^n + P_{i+2,j}^n + P_{i,j-2}^n + P_{i,j+2}^n - 16(P_{i-1,j}^n + P_{i+1,j}^n + P_{i,j-1}^n + P_{i,j+1}^n) + 60P_{i,j}^n] + 2P_{i,j}^n - P_{i,j}^{n+1} \quad (2.2)$$

$$\text{tal que } A(i,j) = \left(\frac{c(i,j)\Delta t}{h}\right)^2 \quad (2.3)$$

Na equação (2.2), tem-se:

$P_{i,j}^{n-1}$ ,  $P_{i,j}^n$  e  $P_{i,j}^{n+1}$  são, respectivamente, os campos de onda nos tempos  $n - 1$ ,  $n$  e  $n + 1$ , no ponto de coordenadas  $i$  horizontal e  $j$  vertical;

$c(i,j)$  é a velocidade de propagação da onda acústica no ponto  $(i,j)$ ;

$h$  é o espaçamento entre pontos consecutivos da malha ( $\Delta x = \Delta z = h$ );

$\Delta t$  é o intervalo de tempo.

Observe na equação (2.2), que o valor do campo no tempo  $n - 1$  referente ao ponto  $(i,j)$ , é obtido utilizando os valores dos campos em pontos de sua “vizinça” e em dois

tempos superiores ( $n$  e  $n + 1$ ). Em outras palavras, com os valores dos campos no tempo atual  $n$  e no tempo superior  $n + 1$ , calcula-se os campos no tempo inferior  $n - 1$ , assim, os dados do sismograma são propagados inversamente no tempo, ou seja, do tempo final até o tempo inicial de registro.

É importante notar, que este operador discreto corresponde a uma aproximação de quarta ordem no espaço e segunda no tempo. No apêndice 1, este operador é tratado com maior detalhamento.

Abaixo, encontra-se um fluxograma ilustrando o processo de aquisição e realização da migração reversa no tempo (RTM):

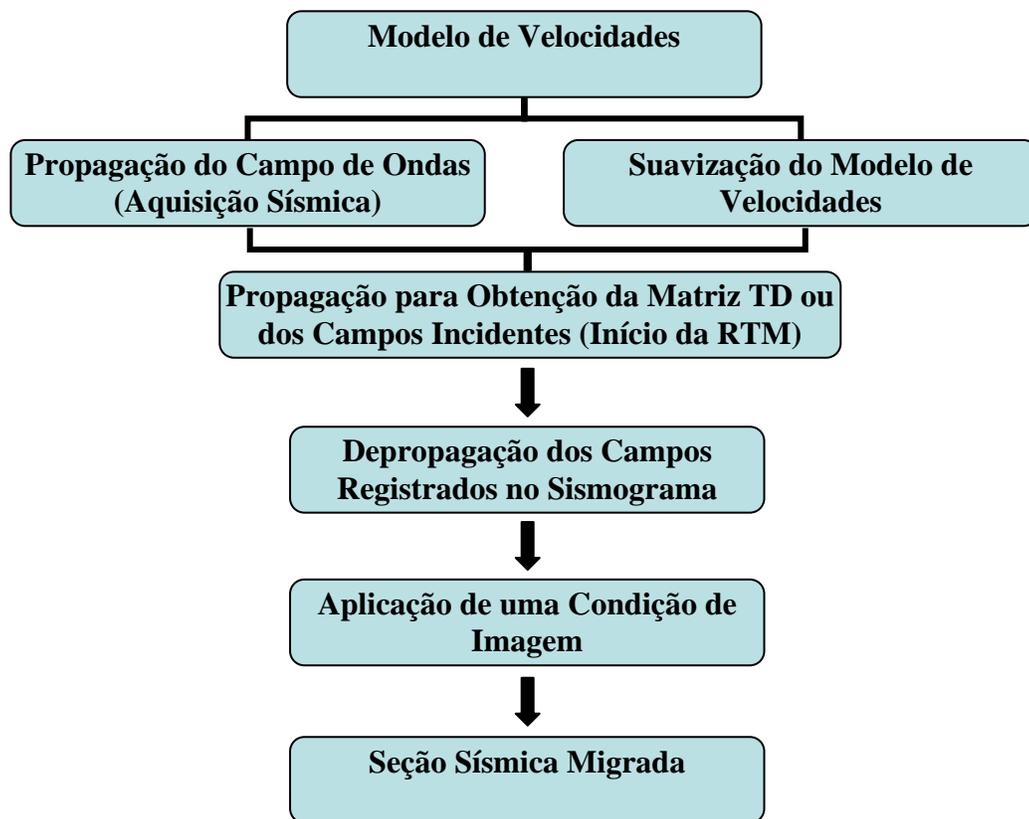


Figura 2.1 – Fluxograma ilustrando o processo de aquisição e realização da migração reversa no tempo.

Portanto, os dados registrados nos sismogramas, são introduzidos no programa de migração, juntamente com o modelo de velocidades suavizado. Assim, a seção migrada é gerada através da aplicação de uma condição de imagem aplicada nos campos depropagados do tempo final até o tempo inicial de registro.

Durante a migração reversa no tempo, as condições de estabilidade e dispersão numérica são atendidas da mesma maneira que na modelagem sísmica. Estas condições são definidas a partir da distância entre dois pontos consecutivos da malha,  $\Delta x$  para a coordenada  $x$  e  $\Delta z$  para a coordenada  $z$ , que representa profundidade no caso 2D e, também, utiliza-se o intervalo de tempo  $\Delta t$  nestas condições de estabilidade e dispersão. No apêndice 1 (modelagem), as questões estabilidade e dispersão numérica encontram-se com maior detalhamento.

Vale ressaltar, que nos programas de simulação de aquisição, migração e outros, condições são aplicadas nas bordas do modelo (REYNOLDS 1978 e CERJAN 1985), para amortecer as reflexões nas mesmas, pois, na realidade estas bordas não existem, uma vez que, o planeta não possui esta limitação. Assim, quando o campo de ondas atinge estas bordas, inexistentes na realidade, reflexões ocorrem e podem prejudicar o resultado final. A diminuição dos artefatos ocasionados pela aplicação das condições de bordas fornece melhores resultados. Este tema encontra-se detalhado no apêndice 1.

A migração RTM, bem como outros tipos de migração, pode ser realizada depois (pos-stack), ou antes (pre-stack), do empilhamento dos sismogramas, que consiste em somar ou não, respectivamente, antes de realizar a migração, os dados registrados nos sismogramas gerados com cada ponto de tiro. O resultado deste empilhamento de dados fica com características semelhantes ao modelo de velocidades utilizado.

Os resultados obtidos nesta dissertação (capítulo 4), foram realizados com a migração “pré-stack”, ou seja, cada sismograma foi migrado separadamente.

É importante evidenciar, que na migração reversa no tempo, há propagação e depropagação de campos de ondas. A propagação é responsável pelo registro da matriz tempo de trânsito (TD) ou pela obtenção dos campos de ondas incidentes (caso a condição de imagem implementada seja a que envolve correlação cruzada), pois, estes dados serão utilizados na depropagação. Esta última, ou seja, a depropagação, tem como objetivo propagar inversamente no tempo os dados registrados no sismograma para gerar a imagem em cada ponto da malha, com a aplicação de uma condição de imagem, obtendo, como resultado, a seção sísmica migrada.

A suavização do modelo de velocidades é realizada para reduzir as reflexões nas interfaces das camadas, uma vez que, estas reflexões, podem, somar-se com outros campos e causar uma distorção na matriz tempo de trânsito ou nos valores dos campos incidentes que serão utilizados na correlação cruzada durante a depropagação (capítulo 3).

# Capítulo 3

## Condições de Imagem

Após a aquisição dos dados sísmicos, que podem ser fornecidos pela modelagem (dados sintéticos), os mesmos recebem tratamentos para retirada de dados relacionados a ruídos e, posteriormente, o sismograma, arquivo que contém estes dados, é utilizado na etapa de migração sísmica.

A migração sísmica, como mencionado anteriormente, tem o objetivo de posicionar corretamente os refletores em subsuperfície (detalhado no capítulo 2). Nesta etapa, utiliza-se, em determinados métodos de migração, equações e/ou condições conhecidas como *condição de imagem*, que tem como finalidade, fornecer a imagem em cada ponto da malha, obtendo como resultado a seção sísmica migrada.

Existem inúmeras condições de imagem que podem ser implementadas, tais como, condição de imagem com tempo de excitação, que utiliza o tempo de chegada do campo de ondas em cada ponto da malha, condição de imagem com correlação cruzada entre os campos de ondas incidente e refletido, condição de imagem com correlação cruzada normalizada, entre outras. Estas condições podem ser aplicadas de diferentes maneiras, e o resultado obtido na seção migrada varia com cada condição de imagem.

Algumas condições de imagem e, algoritmos de implementação computacional foram apresentados na próxima seção.

### 3.1- Condição de Imagem com Tempo de Excitação

A condição de imagem com tempo de excitação é baseada no tempo que o campo de ondas, gerado de uma fonte pontual, leva para atingir cada ponto da malha a partir da fonte sísmica. Este tempo é armazenado durante a propagação do campo de ondas e é utilizado durante a depropagação dos dados registrados no sismograma, ou seja, na migração dos dados sísmicos.

A figura 3.1-1 ilustra a chegada do campo de ondas em pontos da malha.

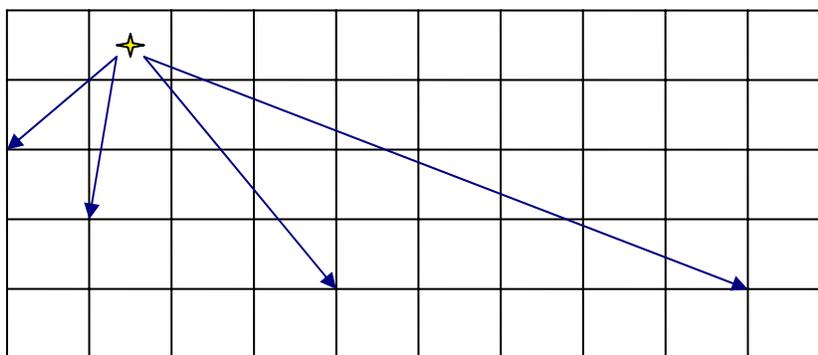


Figura 3.1-1 - Campo de ondas atingindo pontos da malha.

O tempo de chegada do campo de ondas cada ponto da malha, a partir da fonte sísmica, pode ser registrado de diferentes formas. Este tempo pode ser armazenado utilizando o método de traçado de raios (ray tracing), o critério da amplitude máxima, entre outros.

No critério da amplitude máxima, registra-se o tempo de chegada do campo de ondas em cada ponto da malha, quando a mesma alcança sua amplitude máxima. Assim, quando o campo de ondas atinge sua maior amplitude em cada ponto da malha, registra-se o tempo neste instante, para que o mesmo seja utilizado na etapa da migração dos dados sísmicos.

A figura 3.1-2 ilustra uma curva típica de amplitude de onda no tempo:

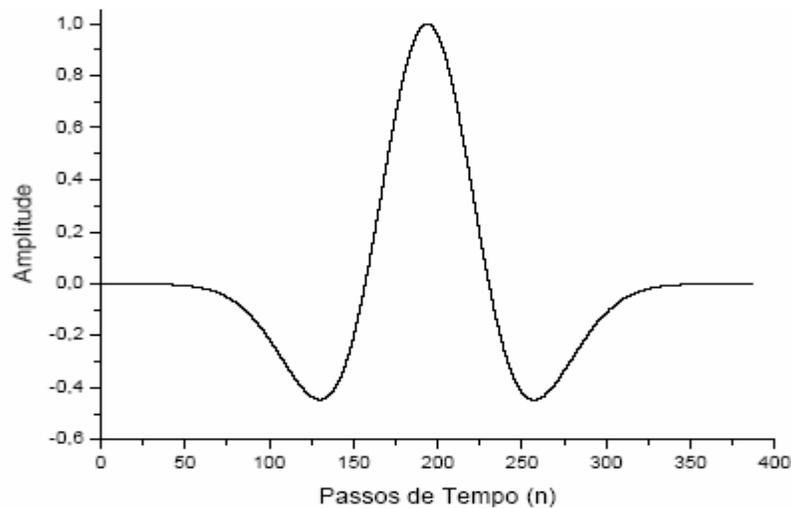


Figura 3.1-2 - Curva de amplitude de onda.

Todos os tempos de chegada do campo de ondas em suas respectivas amplitudes máximas são armazenados em uma matriz denominada matriz tempo de trânsito, que será, posteriormente, introduzida no programa que realiza a migração, onde haverá uma comparação entre os tempos da matriz e os tempos de depropagação dos dados registrados no sismograma.

Uma rotina que se pode implementar no programa para registro da matriz tempo de trânsito tem a seguinte estrutura:

***Faça o tempo variar do inicial até o final.***

***Se (  $(abs(P_{inc}(i, j)) \geq (abs(Am(i, j)))$  ) então,***

***$T(i, j) = n$***

***$Am(i, j) = abs(P_{inc}(i, j))$***

***Fim do loop Se***

***Fim da variação do tempo***

Na estrutura anterior, tem-se que  $P_{inc}(i, j)$  é o campo de ondas incidente em cada ponto da malha,  $Am(i, j)$  é matriz de amplitude,  $T(i, j)$  é a matriz que registra os tempos na amplitude máxima,  $i$  é coordenada horizontal e  $j$  vertical para cada ponto da malha e,  $n$  é a variável que controla a quantidade de intervalos de tempo.

A condição de imagem com tempo de excitação é implementada da seguinte forma: após a depropagação dos campos de ondas registrados no sismograma, há uma comparação entre o tempo registrado na matriz tempo de trânsito e o tempo de depropagação para cada ponto da malha, quando houver igualdade entre os mesmos, registra-se o campo de ondas depropagado, que é campo refletido. Desta forma, os campos de ondas propagados a partir da fonte sísmica e os depropagados dos receptores se encontram em tempo e espaço, o que indica a existência de um refletor.

Com este método, utilizando um único sismograma, apenas uma imagem em profundidade é formada (migração pre-stack). Várias imagens podem ser fornecidas com a migração de diferentes sismogramas separadamente, com o intuito de somá-las posteriormente, obtendo como resultado a seção sísmica empilhada.

A rotina que implementa a condição de imagem com tempo de excitação, utilizando o critério da amplitude máxima na migração reversa no tempo, tem a seguinte estrutura:

***Faça o tempo variar do final até o inicial***

***Se ( $n = T(i, j)$ ) então***

***Imagem( $i, j$ ) =  $P_{ref}(i, j)$***

***Fim do loop Se***

***Fim da variação do tempo***

No algoritmo anterior, tem-se:

$P_{ref}(i, j)$  é campo de ondas depropagado (campo refletido).

$T(i, j)$  é o tempo de trânsito em cada ponto da malha.

$n$  é a variável que controla a quantidade de intervalos de tempo da depropagação (tempo final até o inicial).

$Imagem(i, j)$  é a imagem formada em cada ponto da malha.

Ou seja, a imagem é formada quando a variável  $n$  da depropagação for igual a variável  $n$  registrada na matriz tempo de trânsito.

Uma outra maneira de registrar o tempo de chegada da onda direta em cada ponto da malha, durante a fase de propagação do campo de ondas, é através do critério da amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra (BULCÃO 2004). Segundo o autor que propôs este novo critério para a obtenção da matriz tempo de trânsito, a mesma apresenta um comportamento mais suave para as regiões mais distantes do ponto de tiro (fonte sísmica).

A rotina proposta pelo autor para obtenção da matriz tempo de trânsito tem a seguinte estrutura:

$$cond1 = ((t - T(i, j)) \leq (1.5 * T_f))$$

$$cond2 = (P_{inc}(i, j, t) > Am(i, j))$$

$$cond3 = (Am(i, j) = 0.0)$$

*Se (cond2 .and.( cond1 .or. cond3 )) então*

$$Am(i, j) = P_{inc}(i, j, t)$$

$$T(i, j) = t$$

*Fim do loop Se*

Onde *cond1*, *cond2* e *cond3* são variáveis lógicas que receberão os valores calculados nas expressões descritas acima e  $T_f$  é um intervalo de tempo associado ao comprimento de onda da fonte sísmica. O valor de  $T_f$  é obtido utilizando a frequência de corte da fonte sísmica ( $f_c$ ) e o valor é calculado através da equação (3.1-1).

$$T_f = 2 \frac{\sqrt{\pi}}{f_c} \quad (3.1-1)$$

O método do traçado de raios (ray tracing) para obter a matriz tempo de trânsito tem menor custo computacional do que o critério da amplitude máxima (que é feito por diferenças finitas). Mas existem problemas associados a este método, que é feito por interpolações entre raios para calcular o tempo de chegada do campo de ondas em cada ponto do grid a partir do ponto de tiro. Um dos problemas são as chamadas zonas de sombra, que não são imageadas pela migração reversa no tempo, pois não há passagem de raios devido a distribuição do modelo de velocidades. Outro problema relacionado ao método ray tracing são as regiões onde os pontos da malha possuem mais de um tempo de trânsito, pois nestas regiões os raios se interceptam (multipath), neste caso, é considerado o menor tempo.

Portanto, foram mencionados três métodos para obtenção da matriz tempo de trânsito, o critério da amplitude máxima, o método “ray tracing” e o critério da amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra, que são maneiras de obter o tempo de chegada do campo de ondas em cada ponto do grid para formar a matriz tempo de trânsito, que será introduzida no programa de migração.

É importante salientar a importância da suavização do modelo de velocidades durante a fase de propagação do campo de ondas, momento onde se registra a matriz tempo de trânsito e, na fase de migração dos dados sísmicos. A suavização do modelo de velocidades ou vagariedade, que é o inverso da velocidade, tem a finalidade de diminuir as fortes reflexões nas interfaces. Uma vez não reduzidas, estas reflexões podem somar-se a outros valores de amplitudes causando uma distorção nos valores das amplitudes máximas e, conseqüentemente, o resultado registrado na matriz tempo de trânsito não será correto.

### 3.2 - Condição de Imagem com Correlação Cruzada

Outra maneira de formar a imagem da estrutura geológica em profundidade é através da condição de imagem com correlação cruzada entre os campos de ondas incidentes e refletidos. Os campos de ondas incidentes são obtidos através da propagação a partir da fonte sísmica e, depropagando os campos registrados no sismograma, obtém-se, os campos de ondas refletidos. Ambos os campos incidentes e refletidos são calculados com extrapolador de diferenças finitas.

Para ajudar na formação do conceito, observe a figura (3.2-1) que representa um modelo geológico simples de duas camadas com três pontos. Os pontos A e C estão acima do único refletor do modelo e, o ponto B está sobre o mesmo.

É importante salientar, que o exemplo citado abaixo foi elaborado com a única finalidade de formar o conceito de correlação cruzada. Assim, a situação suposta no mesmo tem como objetivo apenas facilitar o entendimento desta condição de imagem e, não, apresentar uma situação real de propagação com reflexões nas interfaces.

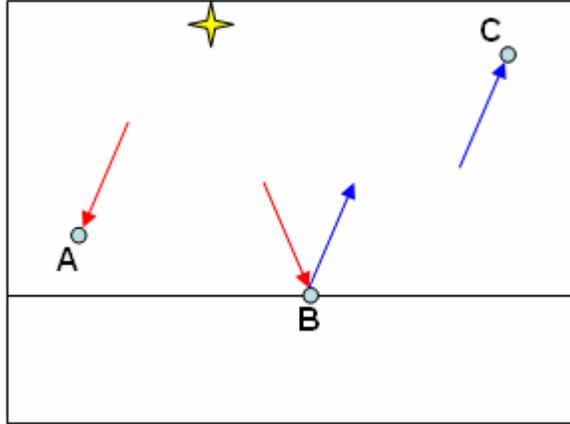


Figura 3.2-1 - Ilustração de campos de ondas incidente (seta vermelha) e refletido (seta azul).

Suponha que após a detonação da fonte sísmica o campo de onda atinja primeiro o ponto A, depois o ponto B e, finalmente o ponto C. O campo de ondas que atinge o ponto A é campo incidente (representado por seta vermelha), pois, ainda não houve reflexão. No ponto B, que está sobre o refletor, existe campo de ondas incidente e refletido (representado por seta azul). Já no ponto C, o campo de onda é refletido, pois, atingiu o mesmo após a colisão com a interface. Então, se consideramos os valores dos campos incidente  $P_{inc}$  e refletido  $P_{ref}$  em cada um dos três pontos citados e fizemos o produto entre os mesmos temos:

No ponto A,  $P_{inc} \times P_{ref} = 0$ , pois, o valor do campo de onda refletido em A é zero.

No ponto B,  $P_{inc} \times P_{ref} \neq 0$ , pois, os campos de ondas incidente e refletido são diferentes de zero neste ponto.

No ponto C,  $P_{inc} \times P_{ref} = 0$ , pois, o valor do campo incidente em C é zero.

Portanto, o valor do produto entre os campos de ondas incidentes e refletidos é diferente de zero apenas no ponto B que está sobre o refletor. É nesta idéia que se baseia a condição de imagem com correlação cruzada. Ou seja, os campos de ondas incidente e

refletido se encontram em tempo e, espaço, apenas sobre o refletor, o que torna o produto entre eles diferente de zero neste determinado tempo.

Então, ocorre a seguinte situação sobre o produto dos campos de ondas:

$$P_{inc}(i, j, t) \times P_{ref}(i, j, t) \neq 0 \text{ nos pontos sobre o refletor.}$$

$$P_{inc}(i, j, t) \times P_{ref}(i, j, t) = 0 \text{ nos pontos fora do refletor.}$$

Nos produtos acima, tem-se:

$P_{inc}(i, j, t)$  é o campo de ondas incidente no ponto e tempo indicado;

$P_{ref}(i, j, t)$  é o campo de ondas refletido no ponto e tempo indicado;

$i$  e  $j$  representam, respectivamente, as coordenadas horizontal e vertical (caso 2D);

$t$  é o tempo decorrido.

Baseado no que foi escrito anteriormente, a imagem em cada ponto da malha é dada através da seguinte equação matemática (caso 2D):

$$\text{Imagem}(i, j) = \sum_{t=0}^{t=Nt} P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t) \quad (3.2-1)$$

Tal que:

$\text{Imagem}(i, j)$  é a imagem do ponto com coordenadas  $i$  horizontal e  $j$  vertical.

$Nt$  é o número total de passos de tempo.

Ou seja, a imagem em cada ponto é formada com o somatório da multiplicação entre os campos de ondas incidentes e refletidos em todos os tempos.

Teoricamente, o somatório será diferente de zero apenas nos pontos sobre o refletor, onde apenas uma parcela do mesmo não terá seu valor nulo. Nos demais pontos, o somatório assumirá valor nulo, bem como, todas as suas parcelas. Em termos computacionais, o produto entre os campos de ondas incidente e refletido terá valores maiores próximo aos refletores e, nos demais pontos, assumirá valores menores ou nulo.

Como mencionado anteriormente, o campo de ondas incidente é obtido durante a fase de propagação do campo a partir da fonte sísmica. Uma maneira de gerar a imagem do modelo em profundidade é aquela que armazena estes campos de ondas na memória e, posteriormente, os introduz no programa de migração para realizar a correlação cruzada com os campos de ondas refletidos (obtido com a depropagação dos campos registrados no sismograma). O armazenamento dos campos de ondas incidentes pode ser feito com o seguinte algoritmo:

***Faça o tempo variar do inicial até o final.***

***Se ((  $n > (TD(i, j) - int)$  ) e (  $n < (TD(i, j) + int)$  ))) then***

***$m = n - (TD(i, j) - int)$***

***$P_{inc}(i, j, m) = P3(i, j)$***

***Fim do loop Se***

***Fim da variação do tempo***

No algoritmo anterior, tem-se:

***$P_{inc}(i, j, m)$***  é a variável que está armazenando os campos incidentes;

***$P3(i, j)$***  é o campo de ondas incidente que está sendo armazenado;

***$TD(i, j)$***  é o tempo de trânsito da frente de ondas em cada ponto do modelo;

***$int$***  é parâmetro inteiro (controla o intervalo de registro);

$m$  é variável para relacionar os campos registrados com seus tempos;

$n$  é a quantidade de passos de tempo decorrido.

Observe que existe na rotina um intervalo aberto centrado no tempo de trânsito de cada ponto do modelo ( $TD(i, j)$ ), assim, é possível diminuir a quantidade de dados a serem armazenados, pois, este é o grande problema deste método. A teoria diz que se deve correlacionar os campos de ondas em todos os tempos, mas isso seria muito custoso computacionalmente com o método citado.

Abaixo, é dado um exemplo para auxiliar no entendimento da variável  $m$  do algoritmo:

Suponha que para um determinado ponto da malha tenha-se  $TD = 800$  e, o parâmetro  $int$  tenha valor 100. Então,  $TD - int = 800 - 100 = 700$  e  $TD + int = 800 + 100 = 900$ . Logo, o intervalo de registro dos campos de ondas incidentes para este ponto é (700, 900). Com isso, após o início do “loop” temporal, quando o tempo for igual a 701, o mesmo atenderá ao intervalo de registro deste ponto. Então,  $m = n - (TD - int) = 701 - 700 = 1$  para este ponto, este tempo e assim sucessivamente. O último valor de  $m$  para cada ponto da malha é  $(2int - 1)$ . Assim, os campos de ondas são armazenados relacionando com o  $m$  que varia de 1 até  $(2int - 1)$  e não com o tempo decorrido (para este método).

Agora os dados com os campos incidentes são injetados no programa de migração para que a imagem em cada ponto da malha seja formada. A rotina que pode ser implementada para formação da imagem em profundidade tem a seguinte estrutura:

***Faça o tempo variar do final até o inicial.***

***Se  $((n > (TD(i, j) - int))$  e  $(n < (TD(i, j) + int))$ ) então***

$$m = n - (TD(i, j) - int)$$

$$Imagem(i, j) = Imagem(i, j) + (P_{inc}(i, j, m) \cdot P_{ref}(i, j))$$

***Fim do loop Se***

***Fim da variação do tempo***

Na estrutura anterior, tem-se:

***Imagem(i, j)*** é a imagem no ponto de coordenadas i horizontal e j vertical.

Note que o intervalo aberto centrado no tempo de trânsito também está sendo utilizado e, como o tempo de registro varia do final até o inicial (RTM), o valor de m vai de (2.int-1) até 1.

Como mencionado anteriormente, o problema deste método é o armazenamento dos campos de ondas incidentes para cada ponto de tiro. Uma maneira de contornar este problema é realizar no mesmo programa, um primeiro “loop” temporal, começando do tempo inicial até o tempo final de registro, para armazenar os campos incidentes e, em seguida, um segundo “loop” temporal, que vai do tempo final até o tempo inicial de registro, para realizar a correlação cruzada entre os campos. A vantagem é que não está sendo gerado um arquivo de saída para cada ponto de tiro, pois, o primeiro “loop” armazena os campos incidentes em um vetor que é utilizado no segundo “loop” temporal.

Outra maneira de formar a imagem em cada ponto da malha, sem utilizar a matriz tempo de trânsito, é realizando dois “loops” temporais da seguinte forma:

1° *loop* temporal:

- 1- Propaga-se o campo de ondas até um tempo suficiente (t - r) para o mesmo ultrapassar o último refletor do modelo.

- 2- Os campos de ondas relacionados aos dois últimos tempos ( $t - r$  e  $t - r - 1$ ) desta propagação são utilizados na depropagação.

2° *loop* temporal:

- 1- Depropaga-se os dados registrados no sismograma do tempo final até o tempo inicial de registro.
- 2- Depropagar os campos incidentes a partir do tempo ( $t - r$ ), utilizando os campos incidentes dos dois últimos tempos da propagação ( $t - r$  e  $t - r - 1$ ) como condição inicial e, realizar a correlação cruzada simultaneamente.

Onde  $r$  é parâmetro que reduz o tempo de propagação realizado no primeiro “loop”, ou seja, não é necessário propagar até o tempo final de registro do sismograma.

O problema deste método é quando o campo de ondas incidente atinge as bordas do modelo, pois, as condições aplicadas nas bordas, existentes para diminuir as reflexões nas mesmas, reduzem os valores dos campos em cada ponto e, estes campos, quando são depropagados, junto com os dados do sismograma, não voltam às configurações iniciais prejudicando a seção sísmica migrada.

Uma maneira de resolver este problema é armazenar os valores dos campos nas bordas do modelo para utilizá-los na depropagação dos campos incidentes, assim, há uma re-introdução de energia, o que ocasiona numa melhora da imagem. Pode-se, também, aumentar o modelo de velocidades, para que o campo de ondas incidente não alcance as bordas do modelo, portanto, não perderia energia nas bordas. Mas este procedimento é computacionalmente mais custoso.

Analisando a figura (3.2-2), percebe-se a diferença no resultado da depropagação dos campos incidentes quando há ou não re-introdução de energia:

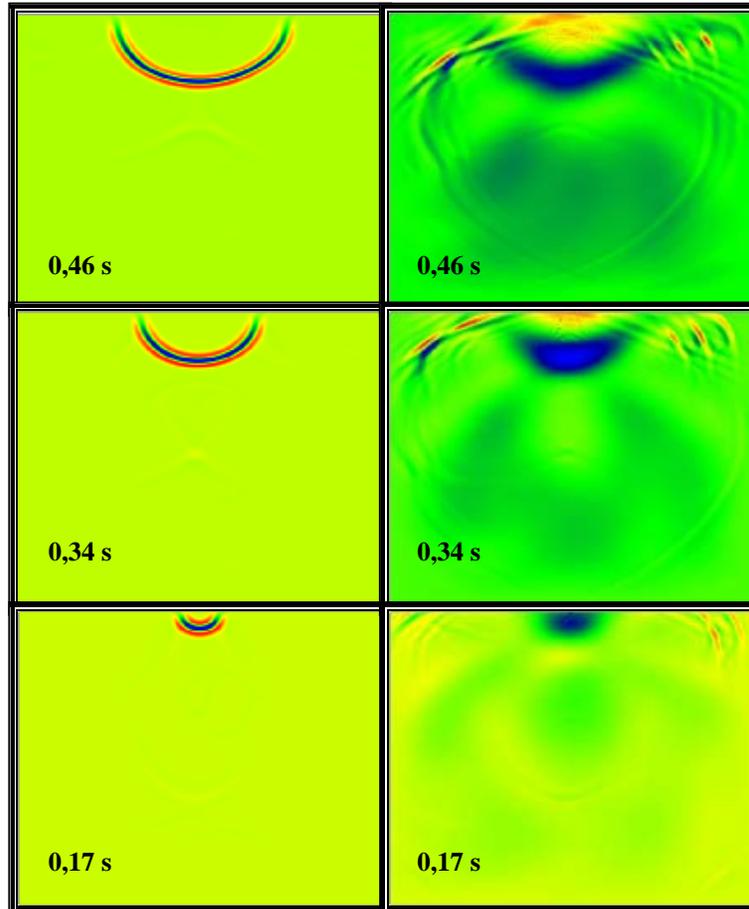


Figura 3.2-2 – Imagem da depropagação do campo de ondas incidente com e sem re-introdução de energia nos tempos 0,46, 0,34 e 0,17 segundos.

Observe na figura (3.2-2), a importância da re-introdução de energia na fase de depropagação dos campos de ondas incidentes para correlacionar com os campos refletidos. A coluna esquerda da figura mostra que o campo de ondas incidente retornou as configurações iniciais com a re-introdução de energia.

Abaixo, encontram-se os resultados das seções migradas, referentes ao modelo na figura (3.2-3), com fonte posicionada na metade do modelo, quando há ou não re-introdução de energia:

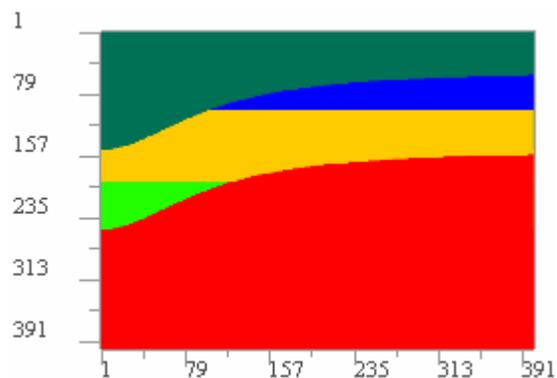


Figura 3.2-3 – Modelo de velocidades simples.

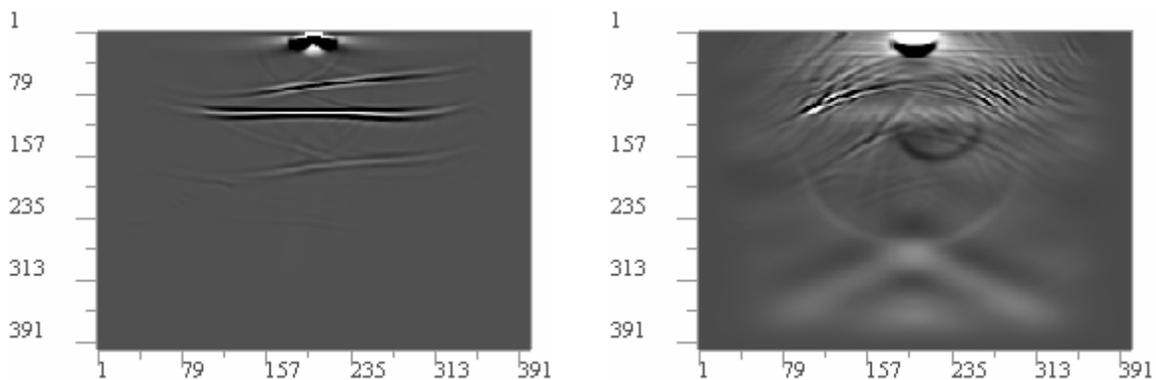


Figura 3.2-4 – Seção migrada com e sem re-introdução de energia na correlação cruzada, respectivamente.

A figura (3.2-4), mostra que o resultado da seção migrada com re-introdução de energia fornece os refletores em subsuperfície, o que não acontece quando não há re-introdução.

Abaixo, encontra-se um algoritmo que pode ser implementado para registrar a energia que será re-introduzida durante a depropagação dos campos de ondas incidentes:

***Faça o tempo variar do inicial até (  $Nt - r$  )***

***Se ((  $i = Na + 1$  ) e (  $j < Nz - Na$  )) então***

$$P_{esquerda}(n, j) = P_{inc}(i, j)$$

***Fim do loop Se***

***Se ((  $i > Na + 1$  ) e (  $i \leq Nx - Na - 1$  ) e (  $j = Nz - Na - 1$  )) então***

$$P_{inferior}(i, n) = P_{inc}(i, j)$$

***Fim do loop Se***

***Se ((  $i = Nx - Na - 1$  ) e (  $j < Nz - Na - 1$  )) então***

$$P_{direita}(n, j) = P_{inc}(i, j)$$

***Fim do loop Se***

***Fim da variação do tempo***

Na estrutura anterior, tem-se:

$Nx$  e  $Nz$  são as quantidades de pontos da malha na horizontal e vertical, respectivamente.

$Nt$  é a quantidade total de passos de tempo.

$r$  é uma constante para reduzir a quantidade de passos de tempo no primeiro *loop* temporal.

$Na$  é um parâmetro relacionado as bordas atenuadoras de Cerjan (Apêndice 1).

$P_{esquerda}(n, j)$ ,  $P_{inferior}(i, n)$  e  $P_{direita}(n, j)$ , tem a função de registrar os campos de ondas incidentes.

$n$  varia a quantidade de passos de tempo.

### 3.2.1 – Condição de Imagem com Correlação Cruzada Normalizada

Na seção anterior, foi apresentado a condição de imagem com correlação cruzada entre os campos de ondas incidentes (obtidos com a propagação do campo de ondas a partir da fonte sísmica) e refletidos (obtidos com a depropagação dos campos registrados no sismograma). Conforme visto em bibliografia (KAELIN e GUITTON 2006), esta condição de imagem fornece excelentes resultados para meios com baixo contraste de impedância acústica, mas, para modelos geológicos mais complexos, com altos contrastes de impedância, os artefatos ficam mais fortes e prejudicam a seção migrada. Uma maneira de melhorar a imagem para estes meios mais complexos é normalizar a condição de imagem com correlação cruzada com os campos de ondas incidentes ou refletidos, ou seja, divide-se o somatório do produto entre os campos incidentes e refletidos pelo somatório do quadrado dos campos incidentes ou pelo somatório do quadrado dos campos refletidos. Assim, estas condições de imagem ficam da seguinte forma:

Normalizando a correlação cruzada com os campos incidentes (*source illumination*):

$$\text{Imagem}(i, j) = \frac{\sum_{t=0}^{t=Nt} P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t)}{\sum_{t=0}^{t=Nt} P_{inc}^2(i, j, t)} \quad (3.2-2)$$

A imagem em cada ponto é formada com a divisão do somatório dos produtos das amplitudes dos campos incidente e refletido, pelo somatório do quadrado das amplitudes dos campos incidentes em todos os tempos.

Normalizando a correlação cruzada com os campos refletidos (*receiver illumination*):

$$\text{Imagem}(i, j) = \frac{\sum_{t=0}^{t=Nt} P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t)}{\sum_{t=0}^{t=Nt} P_{ref}^2(i, j, t)} \quad (3.2-3)$$

Nesta condição, a imagem em cada ponto é formada com a divisão do somatório dos produtos das amplitudes dos campos de ondas incidentes e refletidos, pelo somatório do quadrado dos campos refletidos em todos os tempos.

Nas expressões (3.2-2) e (3.2-3), temos que:

$\text{Imagem}(i, j)$  é a imagem do ponto com coordenadas  $i$  horizontal e  $j$  vertical.

$P_{inc}(i, j, t), P_{ref}(i, j, t)$  são os campos de ondas incidente e refletido, respectivamente.

$Nt$  é a quantidade total de passos de tempo do sismograma.

$t$  é o tempo decorrido.

Então, pode-se melhorar o resultado da seção migrada em meios geológicos mais complexos normalizando a correlação cruzada com os campos de ondas incidentes ou refletidos. A normalização com os campos incidentes melhora a imagem perto da fonte sísmica, enquanto a normalização com os campos refletidos melhora toda a imagem, segundo literatura especializada (KAELIN e GUITTON 2006).

Uma maneira de implementar a condição de imagem normalizada com os campos incidentes tem a seguinte estrutura:

***Faça o tempo variar do final até o inicial.***

***Se  $((n > (TD(i, j) - int))$  e  $(n < (TD(i, j) + int)))$  então***

$$m = n - (TD(i, j) - int)$$

$$nume(i, j) = nume(i, j) + (P_{inc}(i, j, m) \cdot P_{ref}(i, j))$$

$$deno(i, j) = deno(i, j) + (P_{inc}(i, j, m) \cdot P_{inc}(i, j, m))$$

***Fim do loop Se***

***Fim da variação do tempo***

$$Imagem(i, j) = nume(i, j) / deno(i, j)$$

Note que neste método utiliza-se o tempo de trânsito para determinar o tamanho dos intervalos onde serão feitas as correlações entre os campos incidentes e refletidos.

No algoritmo anterior, tem-se:

***TD(i, j)*** é o tempo de trânsito em cada ponto.

***int*** é parâmetro para determinar o tamanho dos intervalos.

***nume(i, j)*** é a variável que armazena a soma dos produtos entre os campos de ondas incidentes e refletidos.

***deno(i, j)*** é a variável que armazena o somatório do quadrado dos valores dos campos incidentes.

***P<sub>inc</sub>(i, j, m)*** é o campo incidente no ponto de coordenadas i horizontal e j vertical.

***P<sub>ref</sub>(i, j)*** é o campo refletido no ponto indicado.

***n*** é a quantidade de intervalos de tempo decorrido.

Desta maneira, a imagem em cada ponto da malha é formada com a condição de imagem com correlação cruzada normalizada com os campos incidentes.

A implementação computacional para normalizar com os campos de ondas refletidos é semelhante à normalização da correlação cruzada com os campos incidentes.

### 3.2.2 – Outras Condições de Imagem

Analisando a equação (3.2-1) de formação da imagem em cada ponto da malha, com a condição de imagem com correlação cruzada entre os campos de ondas incidentes (obtido a partir da fonte sísmica) e refletidos (obtido com a depropagação dos campos registrados no sismograma), percebe-se que, se o produto entre os campos em algum ponto e tempo específico for negativo, ou seja, os sinais não estão em fase, teremos uma parcela do somatório que irá subtrair ao invés de acrescentar. Partindo deste raciocínio, onde considera-se ou não as fases dos campos incidentes e refletidos, surgem as seguintes condições de imagem propostas por BULCÃO (2004):

$$\text{Imagem}(i, j) = \sum_{t=0}^{t=Nt} P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t) \text{ apenas para } P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t) > 0 \quad (3.2-4)$$

$$\text{Imagem}(i, j) = \sum_{t=0}^{t=Nt} P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t) \text{ apenas para } P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t) < 0 \quad (3.2-5)$$

Ou seja, na equação (3.2-4) considera-se apenas os produtos positivos e na equação (3.2-5) apenas os produtos negativos. Desta forma, evita-se que parcelas tenham sinais opostos num mesmo somatório, não contribuindo na formação da imagem.

Outra maneira de gerar a imagem em profundidade é através da condição de imagem que calcula a razão entre os campos incidentes e refletidos em cada ponto. Esta razão pode ser calculada no tempo que a máxima amplitude leva para chegar em cada ponto da malha.

A equação que forma a imagem com esta condição de imagem é a seguinte:

$$\text{Imagem}(i, j) = \frac{P_{ref}(i, j, t)}{P_{inc}(i, j, t)} \quad (3.2 -6)$$

Na equação anterior, tem-se:

$\text{Imagem}(i, j)$  é a imagem no ponto com coordenadas  $i$  horizontal e  $j$  vertical.

No numerador utiliza-se os campos refletidos e no denominador os campos incidentes em cada ponto da malha.

Como o tempo  $t$  pode ser o tempo que o campo de ondas leva para atingir sua amplitude máxima em cada ponto do modelo, o que diferencia esta condição de imagem da condição com tempo de excitação é a divisão do valor do campo refletido pelo valor do campo de ondas incidente.

Um problema relacionado a esta condição de imagem é o quando o denominador assume valor nulo, pois, estar-se-ia dividindo os campos refletidos por zero, o que é matematicamente indefinido. Para contornar tais problemas, foram apresentadas novas condições de imagem em VALENCIANO (2002), que estão listadas abaixo:

$$\text{Imagem}(i, j) = \sum_{t=0}^{t=Nt} \frac{P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t)}{(P_{inc}(i, j, t))^2 + \varepsilon^2} \quad (3.2 -7)$$

Observe na equação anterior o termo  $\varepsilon^2$ , existente no denominador para evitar a divisão por zero.

$$\text{Imagem}(i, j) = \sum_{t=0}^{t=Nt} \frac{P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t)}{(P_{inc}(i, j, t))^2 + q\varepsilon^2} \quad (3.2-8)$$

O que diferencia a condição de imagem (3.2-8) da anterior (3.2-7) é o termo  $q$  multiplicando  $\varepsilon^2$ . Este termo é uma função inversamente proporcional ao campo incidente, que faz  $q\varepsilon^2$  tender a zero quando o valor do campo incidente for suficiente para gerar a imagem no ponto indicado, caso contrário, ou seja, quando o valor do campo incidente tender a zero, a parcela  $q\varepsilon^2$  vai evitar a divisão do numerador por um valor nulo.

Baseado em idéias similares as anteriores, outra condição de imagem foi apresentada por BULCÃO (2004) e tem a seguinte formulação:

$$\text{Imagem}(i, j) = \sum_{t=0}^{t=Nt} \frac{P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t)}{\sqrt{(P_{inc}(i, j, t))^2 + \varepsilon^2}} \quad (3.2-9)$$

Note que o denominador possui um termo para evitar a divisão por zero e que a função do campo de ondas incidente é apenas determinar a fase entre os campos refletidos e incidentes, uma vez que, a raiz quadrada do valor do campo ao quadrado nos dará um valor positivo.

Analogamente ao raciocínio utilizado anteriormente, que utiliza a idéia de fase entre os campos de ondas incidente e refletido, o mesmo autor propôs mais duas condições de imagem partindo da anterior. As mesmas foram apresentadas na página seguinte:

$$\text{Imagem}(i, j) = \sum_{t=0}^{t=Nt} \frac{P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t)}{\sqrt{(P_{inc}(i, j, t))^2 + \varepsilon^2}} \text{ apenas para } P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t) > 0 \quad (3.2 -10)$$

Desta forma, quando os sinais dos campos forem diferentes causando um produto negativo ou nulo esta parcela do somatório é desconsiderada.

$$\text{Imagem}(i, j) = \sum_{t=0}^{t=Nt} \frac{P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t)}{\sqrt{(P_{inc}(i, j, t))^2 + \varepsilon^2}} \text{ apenas para } P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t) < 0 \quad (3.2 -11)$$

Nesta condição de imagem, é considerado apenas as parcelas do somatório onde os campos incidente e refletido não estão em fase, ou seja, o produto entre eles é negativo.

# Capítulo 4

## Resultados

Neste capítulo, será apresentado o resultado da migração RTM utilizando dados sísmicos sintéticos, em modelos geológicos simples e complexos. A migração reversa no tempo foi realizada em todos os modelos com algumas das condições de imagem apresentadas anteriormente, com o intuito de comparar a qualidade da imagem e o custo computacional (os tempos de cpu devem ser analisados de forma qualitativa). Foi realizada a migração pré-empilhamento, onde cada sismograma é migrado separadamente. Em seguida, as seções migradas e filtradas, com a técnica de filtragem de dados *mute* (silenciamento), foram somadas obtendo a seção sísmica empilhada.

Os valores utilizados na modelagem e na migração, para as constantes  $\alpha$  e  $\beta$ , existentes para garantir a estabilidade e evitar a dispersão numérica, foi igual a cinco. A frequência de corte aplicada nos três modelos foi quarenta Hertz e, as dimensões aplicadas nos retângulos utilizados nas bordas atenuadoras de Cerjam, foram cinquenta pelo número de pontos na vertical e cinquenta pelo número de pontos na horizontal (Apêndice 1).

### 4.1– Modelo Simples.

Na página seguinte, encontra-se o primeiro modelo de velocidades sobre o qual foi realizada a modelagem e, posteriormente, a migração reversa no tempo aplicando diferentes condições de imagem. Observe na figura, os refletores existentes e, as variações de velocidades deste modelo geológico:

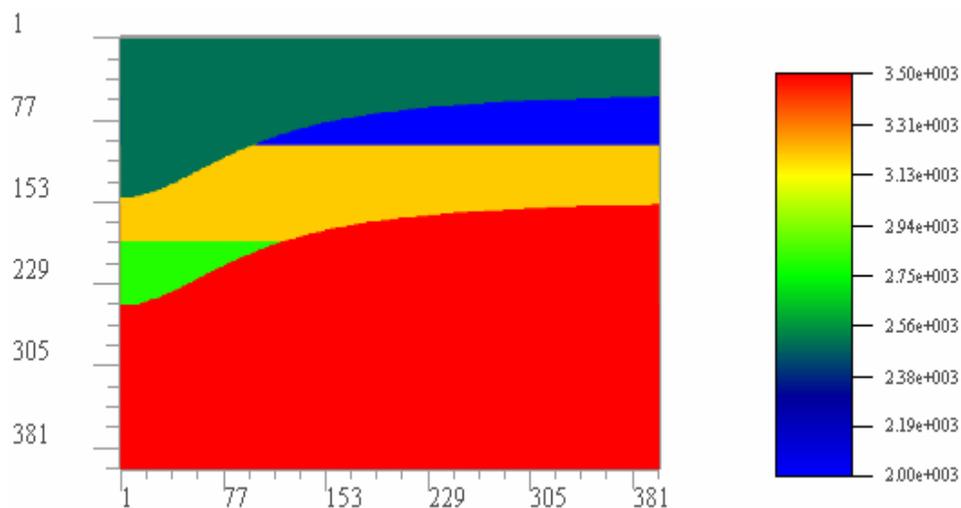


Figura 4.1 – Modelo de velocidades simples.

Na tabela abaixo, estão algumas informações sobre a modelagem e a migração realizadas neste modelo de velocidades:

<i>Total de passos de tempo</i>	5000
<i>Passo de tempo (dt)</i>	0,00057s
<i>Número de pontos na horizontal</i>	400
<i>Número de pontos na vertical</i>	400
<i>Espaçamento entre pontos da malha (h)</i>	10m
<i>Velocidade mínima do modelo</i>	2000m/s.
<i>Velocidade máxima do modelo</i>	3500m/s

Tabela 4.1 – Dados sobre a modelagem e a migração referentes ao modelo simples.

A primeira seção migrada foi obtida aplicando a *condição de imagem com tempo de excitação* separadamente em cada posição da fonte. Os dados foram registrados na superfície, em todos os pontos com coordenada vertical da malha igual a três ( $3h = 30$  metros de profundidade), para cada ponto de tiro. Foram dados trezentos tiros na superfície do modelo, com mesma coordenada vertical dos receptores, começando com coordenada horizontal cinquenta e um e, finalizando, com coordenada horizontal trezentos e quarenta e nove (posição das fontes fora das regiões onde se aplicam as bordas atenuadoras de Cerjan - Apêndice 1).

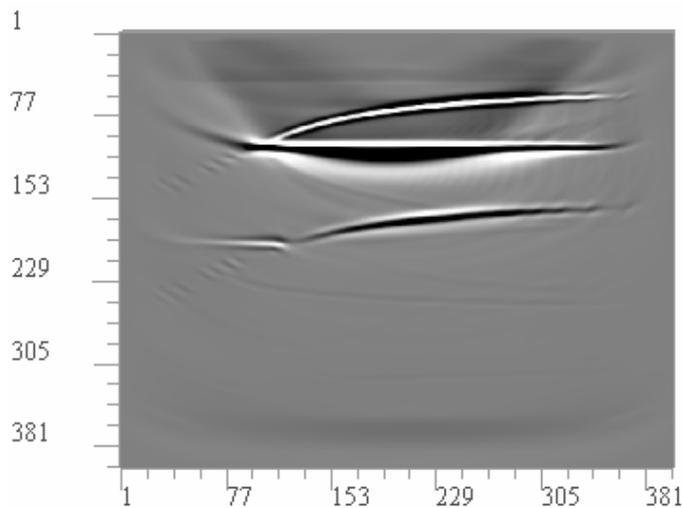


Figura 4.2 – Seção empilhada com a condição de imagem com tempo de excitação.

Comparando a seção migrada empilhada, fornecida através da migração RTM, com o modelo de velocidades, percebe-se que algumas partes do modelo não foram bem imageadas, devido, às condições aplicadas nas bordas. Abaixo do último refletor do modelo, pode ser visto, a existência de dados relacionados a ondas múltiplas.

Na figura 4.3, a migração foi realizada com a *condição de imagem com correlação cruzada* entre os campos de ondas incidentes e refletidos. Os sismogramas foram registrados com receptores nos pontos com coordenada vertical da malha igual a três ( $3h = 30$  metros de profundidade). Foram colocadas trezentas fontes com mesma coordenada vertical dos receptores, partindo da coordenada horizontal cinquenta e um e, terminando com coordenada horizontal trezentos e quarenta e nove (posição das fontes fora das regiões onde se aplicam as bordas atenuadoras de Cerjan - Apêndice 1).

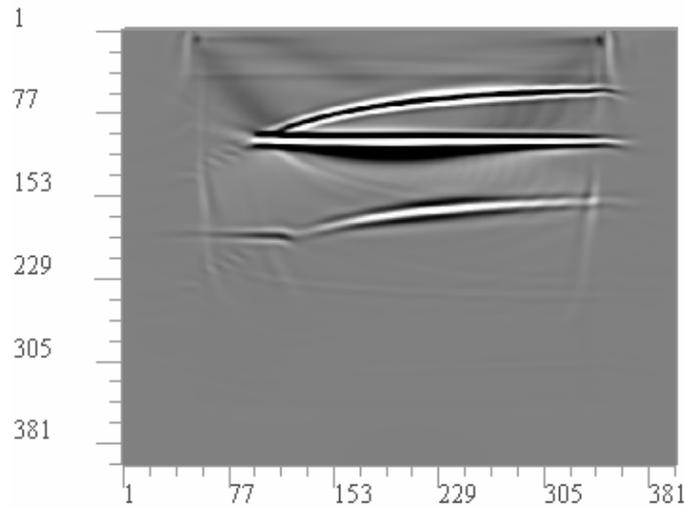


Figura 4.3 – Seção empilhada com a condição com correlação cruzada entre os campos de onda incidente e refletido.

Note que a seção migrada empilhada utilizando esta condição de imagem entre os campos incidentes e refletidos forneceu melhor resultado do que a anterior, que foi obtida com a condição de imagem com tempo de excitação. A figura 4.3, mostra a existência de dados relacionados a múltiplas internas.

A próxima *condição de imagem* utilizada para gerar a seção migrada foi *proposta em BULCÃO (2004)*. Esta condição também considera os valores dos campos de ondas incidente e refletido. A equação que fornece a imagem em cada ponto da malha utilizando esta condição de imagem é (detalhada no capítulo anterior):

$$\text{Imagem}(i, j) = \sum_{t=0}^{t=Nt} \frac{P_{inc}(i, j, t) \cdot P_{ref}(i, j, t)}{\sqrt{(P_{inc}(i, j, t))^2 + \varepsilon^2}} \quad (4.1-1)$$

A seção sísmica empilhada obtida com a aplicação desta condição de imagem, proposta em BULCÃO 2004, realizada nas mesmas condições das anteriores, é indicada na figura 4.4:

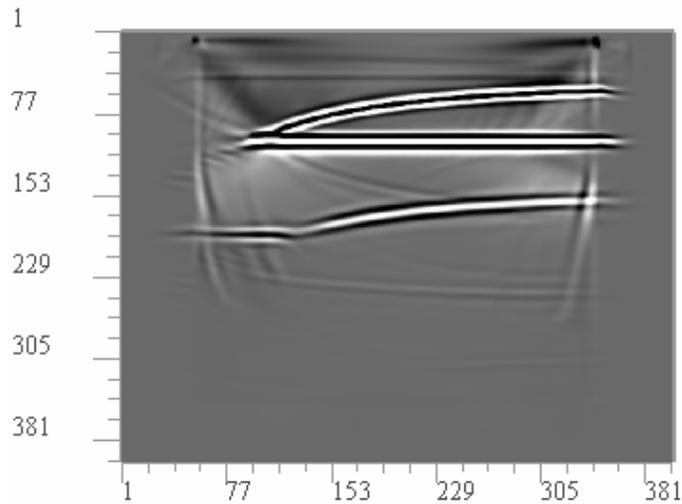


Figura 4.4 – Seção empilhada com a condição de imagem proposta em Bulcão (2004).

Observe na figura (4.4), que esta condição de imagem forneceu uma excelente seção migrada. Fazendo uma comparação com os resultados anteriores, pode-se observar que esta forneceu melhor resultado próximo as bordas do modelo. Este resultado também mostra dados relacionados a ondas múltiplas.

A seção sísmica empilhada abaixo foi obtida utilizando a migração RTM com a aplicação da *condição de imagem com correlação cruzada normalizada* entre os campos incidentes e refletidos. As quantidades de pontos de tiro e de canais receptores são iguais as anteriores.

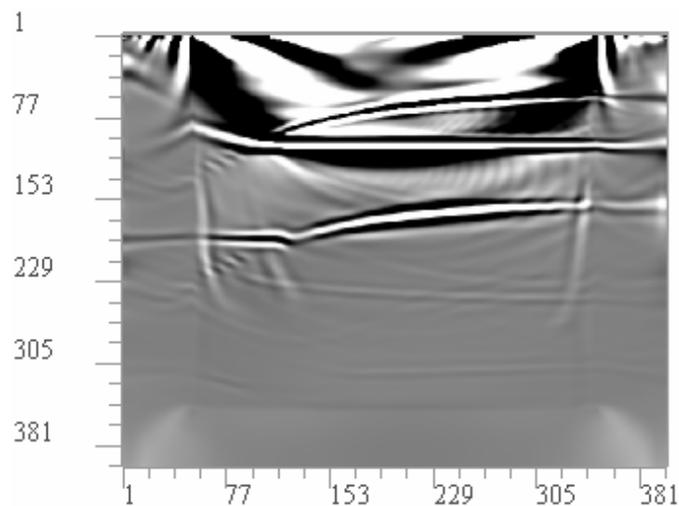


Figura 4.5 – Seção empilhada com a condição de imagem com correlação cruzada normalizada.

Note que os refletores foram bem imageados, inclusive dentro das bordas, o que não ocorreu com as outras condições de imagem. Mas há bastante artefatos próximo à superfície. Estes artefatos podem ser reduzidos utilizando outra técnica de filtragem de dados. Dados referentes a múltiplas internas também podem ser vistos neste resultado.

Para efeito de comparação, as quatro seções migradas apresentadas anteriormente foram colocadas nesta página e, encontram-se abaixo:

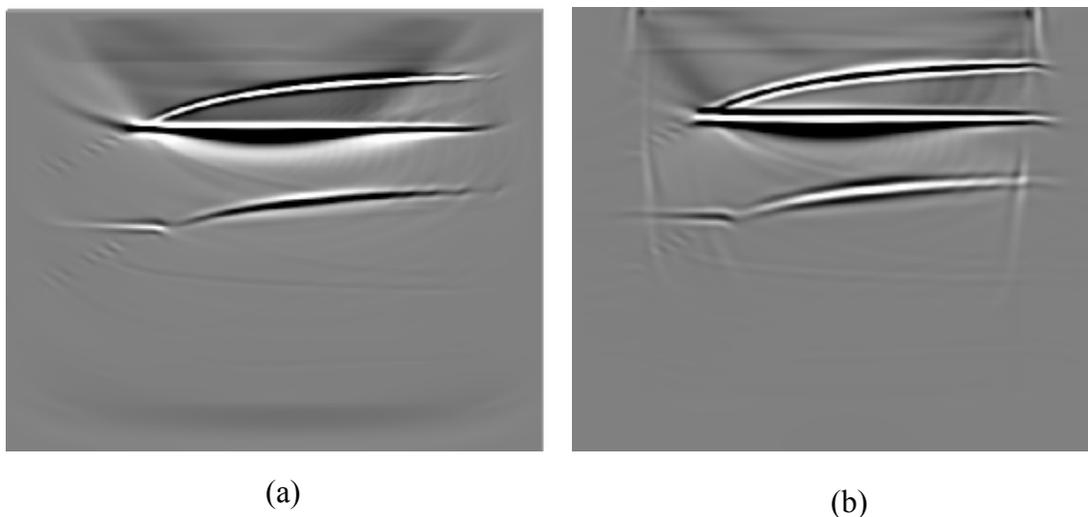


Figura 4.6 – Seção migrada com a condição de imagem: (a) *Tempo de Excitação*. (b) *Correlação Cruzada*.

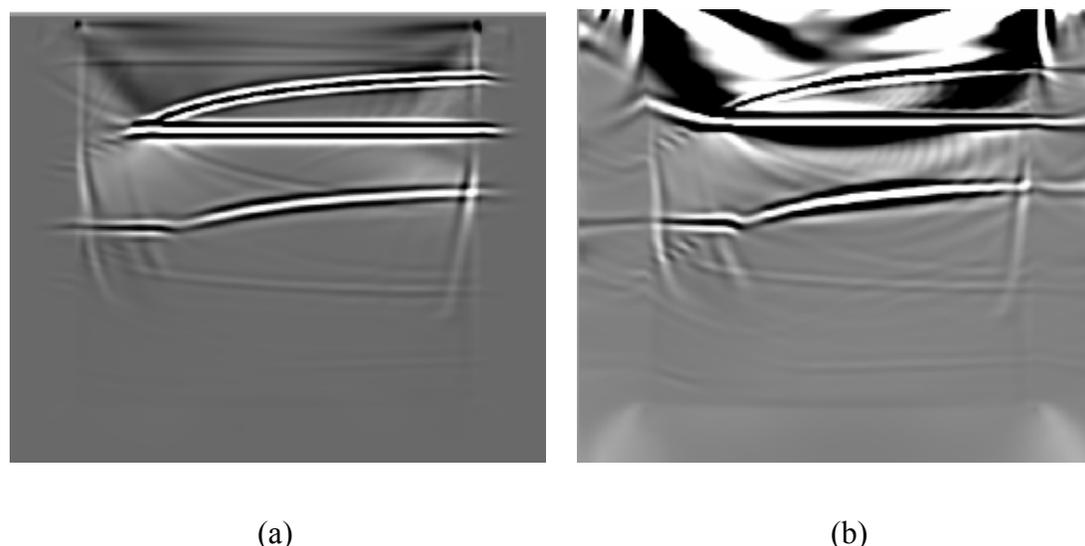


Figura 4.7 – Seção migrada com a condição de imagem: (a) *Correlação Cruzada proposta em Bulcão 2004*. (b) *Correlação Cruzada Normalizada*.

Os melhores resultados foram obtidos com a condição de imagem com correlação cruzada (figura 4.6 (b)) e com a condição proposta em Bulcão 2004 (figura 4.7 (a)), pois, imagearam com qualidade os refletores e obtiveram menos artefatos.

Uma vez apresentado o resultado obtido nas seções migradas empilhadas referentes a cada condição de imagem, resta saber o custo computacional para realizar a migração RTM utilizando estas condições.

Na tabela abaixo, encontra-se o custo computacional referente a cada condição de imagem com apenas dez posições da fonte sísmica:

<i>Condição de Imagem</i>	<i>Matriz tempo de trânsito</i>	<i>Migração</i>	<i>Total</i>
<i>Tempo de Excitação</i>	2min e 39s	3min e 12s	5min e 51s
<i>Correlação Cruzada</i>	Não tem	7min e 41s	7min e 41s
<i>Correlação Cruzada Normalizada</i>	Não tem	9min e 9s	9min e 9s
<i>Correlação Cruzada Bulcão</i>	Não tem	10min e 13s	10min e 13s

Tabela 4.2 – Tempo de processamento com cada condição de imagem.

Analisando a tabela 4.2, percebe-se que a condição de imagem que forneceu a seção empilhada com maior tempo de processamento, foi a condição de imagem proposta em Bulcão 2004. O menor tempo foi fornecido pela condição de imagem com tempo de excitação.

Como mencionado anteriormente, os tempos de cpu apresentados devem ser analisados de forma qualitativa.

## 4.2 – Modelo com Camada Pré-Sal (SEG/EAGE Modificado)

Nesta seção, são exibidos os resultados da migração reversa no tempo aplicando as diferentes condições de imagem, utilizando um modelo muito complexo, que contém um domo de sal, onde a grande dificuldade relacionada a este modelo é imagear a região do pré-sal, ou seja, a parte que se encontra abaixo da camada salina. Esta camada é conhecida por ser excelente rocha selante, servindo como uma espécie de bloqueio para os hidrocarbonetos, desta forma, é possível acumular óleo e/ou gás nesta região. É imensa a importância de trabalhos que estudem o imageamento com domos salinos, uma vez que, reservatórios de petróleo podem ser encontrados em regiões como esta.

Abaixo, encontra-se o modelo de sal utilizado na modelagem e, posteriormente, na migração RTM com aplicação das diferentes condições de imagem:

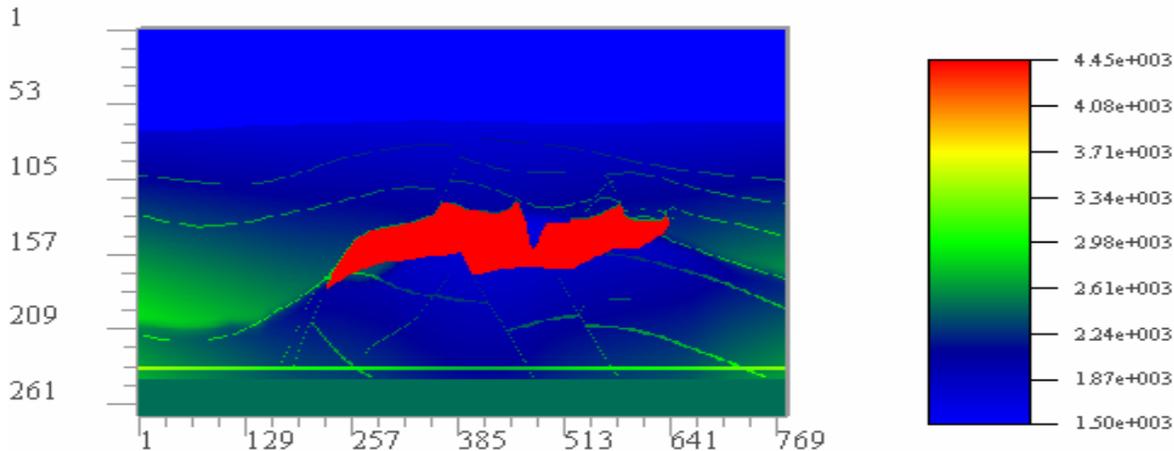


Figura 4.8 – modelo de velocidades com domo de sal.

Percebe-se no modelo acima as bruscas variações de velocidades.

Na próxima página, será apresentado algumas informações sobre a modelagem e a migração realizadas neste modelo de velocidades (tabela 4.3):

<i>Total de passos de tempo</i>	6000
<i>Passo de tempo (dt)</i>	0,00034s
<i>Número de pontos na horizontal</i>	780
<i>Número de pontos na vertical</i>	269
<i>Espaçamento entre pontos da malha</i>	7,5m
<i>Velocidade mínima do modelo</i>	1500m/s.
<i>Velocidade máxima do modelo</i>	4450m/s

Tabela 4.3 – Dados sobre a modelagem e a migração referentes ao modelo com camada salina.

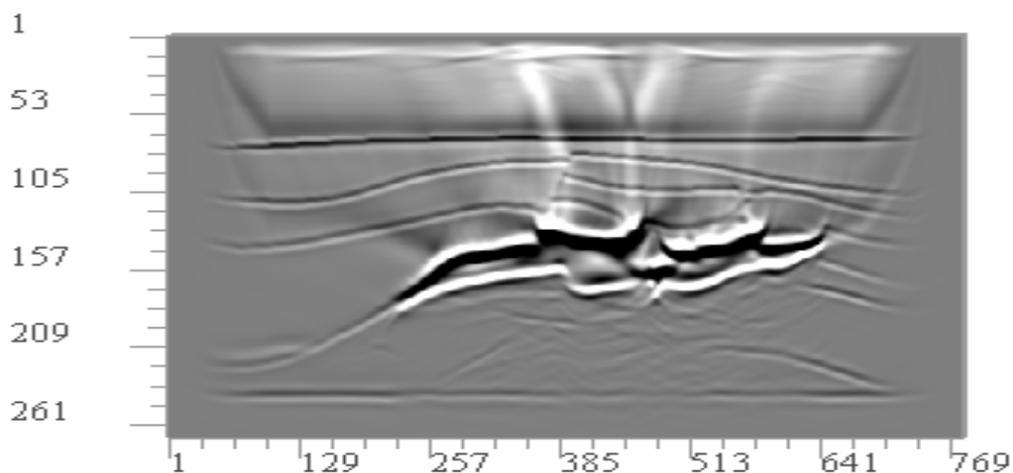


Figura 4.9 – Seção migrada empilhada fornecida com a aplicação da condição de imagem com tempo de excitação.

A figura anterior mostra o resultado da migração reversa no tempo com a aplicação da *condição de imagem com tempo de excitação*. A modelagem foi realizada com tiros a partir da coordenada horizontal cinquenta e um até a coordenada horizontal setecentos e

vinte e nove (fontes posicionadas fora das regiões onde se aplicam as bordas atenuadoras de Cerjan – Apêndice 1), com coordenada vertical da malha igual a três ( $3h = 3 \times (7,5) = 22,5$  metros de profundidade). Utilizando a mesma coordenada vertical das fontes sísmicas, foram posicionados os receptores para registrar os dados nos sismogramas (registrando em todos os pontos com coordenada vertical da malha igual a três).

Percebe-se na figura 4.9, que a região pré-sal não foi imageada com eficiência, assim, a escala de amplitudes foi modificada com o intuito de realçar os refletores nesta região, mas este procedimento também realçar os artefatos existentes na imagem.

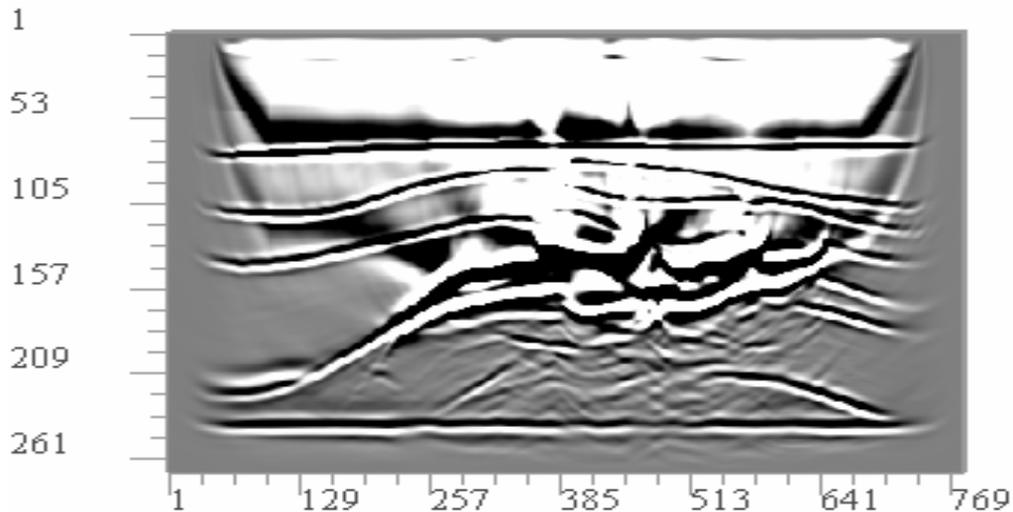


Figura 4.10 – Seção migrada empilhada fornecida com a aplicação da condição de imagem com tempo de excitação, em outra escala de amplitudes.

A figura 4.10 é a mesma seção migrada empilhada apresentada na figura 4.9 mas em outra escala de amplitudes. Percebe-se, que os refletores na região pré-sal foram realçados, bem como, os artefatos existentes na imagem, mas este realce não foi suficiente para imagear esta região com eficiência.

A próxima figura mostra o resultado da migração RTM com a aplicação da *condição de imagem com correlação cruzada* entre os campos de ondas incidentes e refletidos. Os dados sísmicos sintéticos foram obtidos nas mesmas condições citadas para a condição de imagem com tempo de excitação.

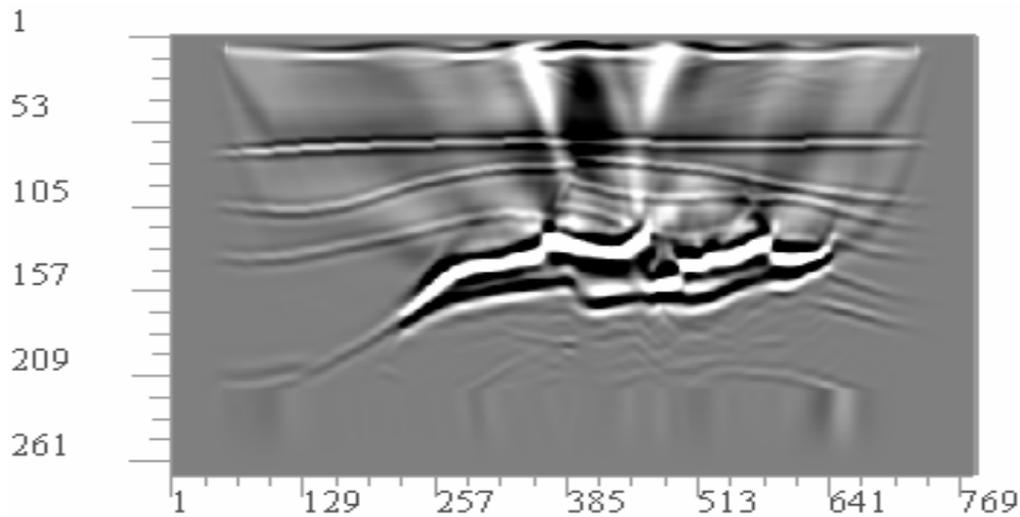


Figura 4.11 – Seção migrada empilhada fornecida com a aplicação da condição de imagem com correlação cruzada.

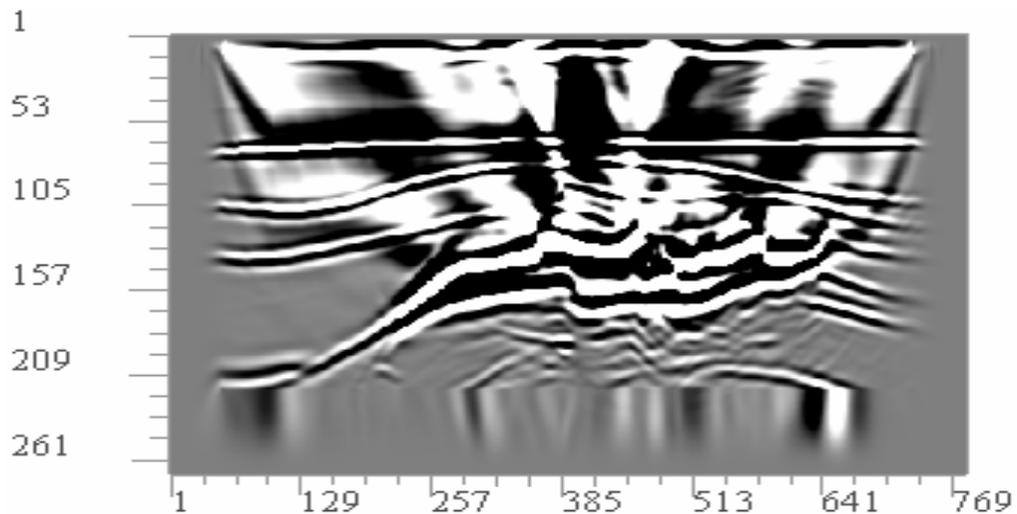


Figura 4.12 – Seção migrada empilhada fornecida com a aplicação da condição de imagem com correlação cruzada, em outra escala de amplitudes.

Percebe-se na figura 4.11, que a região pré-sal da seção migrada empilhada não obteve resultado satisfatório. A parte inferior do modelo foi prejudicada devido à aplicação das bordas atenuadoras de Cerjan (Apêndice 1).

A figura 4.12 mostra que os refletores foram realçados, inclusive na região pré-sal, com a mudança na escala de amplitudes, mas a qualidade da imagem diminuiu, pois, a mudança na escala também realçou os artefatos existentes na seção migrada.

A próxima seção migrada empilhada mostra o resultado da aplicação da **condição de imagem com correlação cruzada normalizada** entre os campos de ondas incidentes e refletidos. Os dados sísmicos sintéticos foram obtidos nas mesmas condições citadas para a condição de imagem com tempo de excitação.

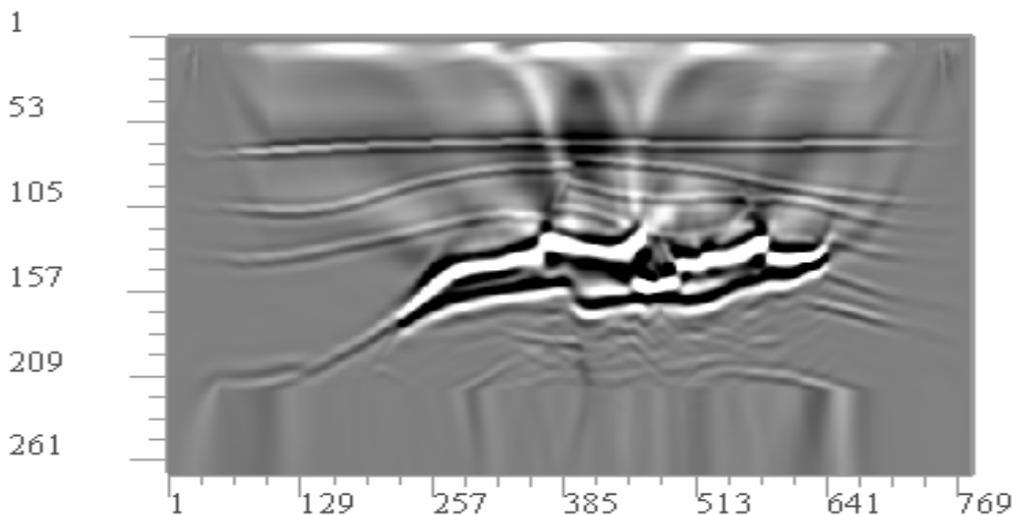


Figura 4.13 – Seção migrada empilhada obtida com a aplicação da condição de imagem com correlação cruzada normalizada.

Após uma análise realizada nas figuras 4.13 e 4.14, percebe-se, que os artefatos foram realçados com a mudança na escala de amplitudes.

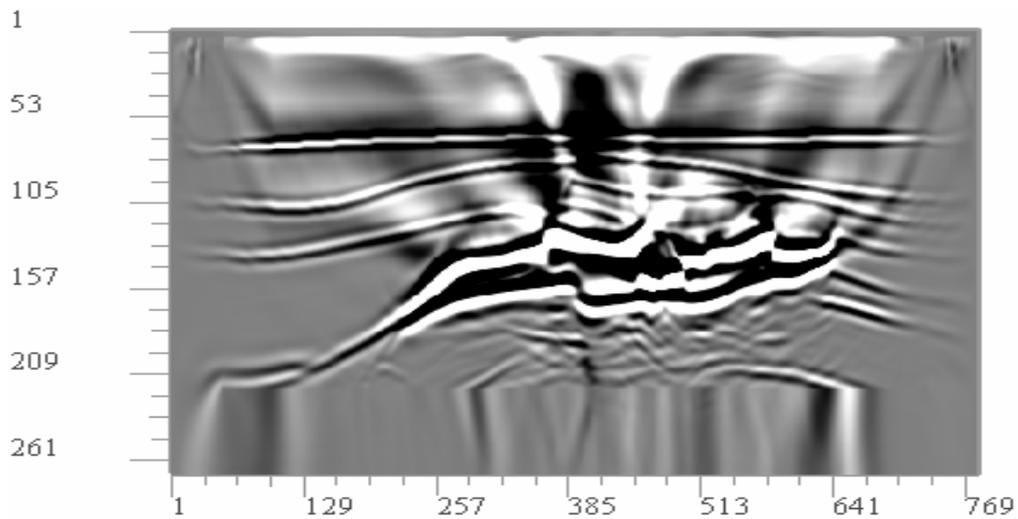


Figura 4.14 – Seção migrada empilhada obtida com a aplicação da condição de imagem com correlação cruzada normalizada, em outra escala de amplitudes.

As próximas imagens apresentadas são o resultado da aplicação da *condição de imagem proposta em Bulcão 2004* (equação 4.1-1). A modelagem foi realizada nas mesmas condições das anteriores.

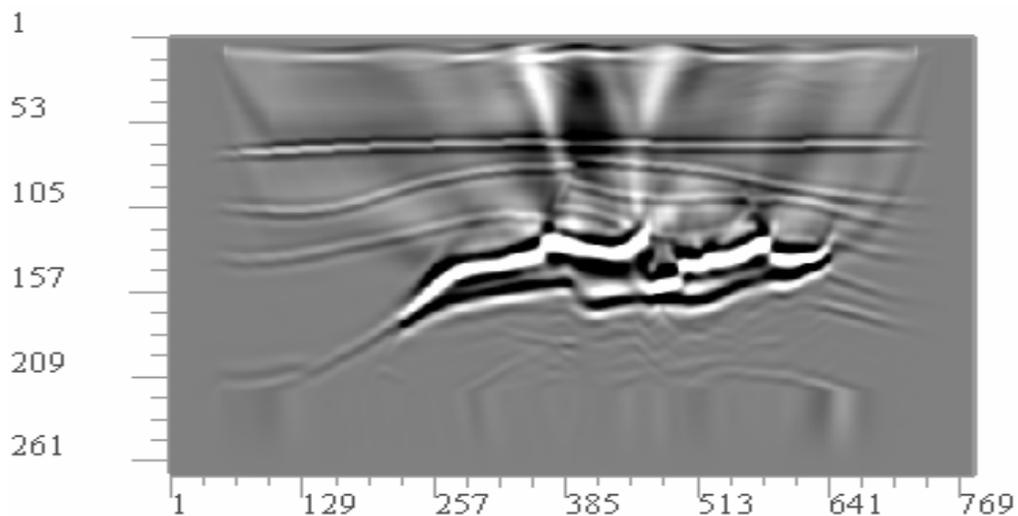


Figura 4.15 – Seção migrada empilhada obtida com a aplicação da condição de imagem proposta em Bulcão 2004.

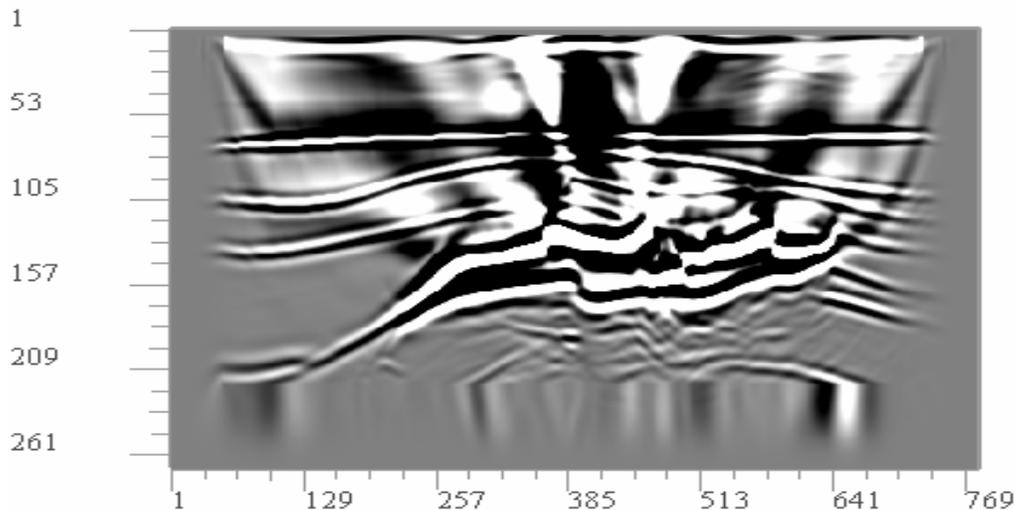
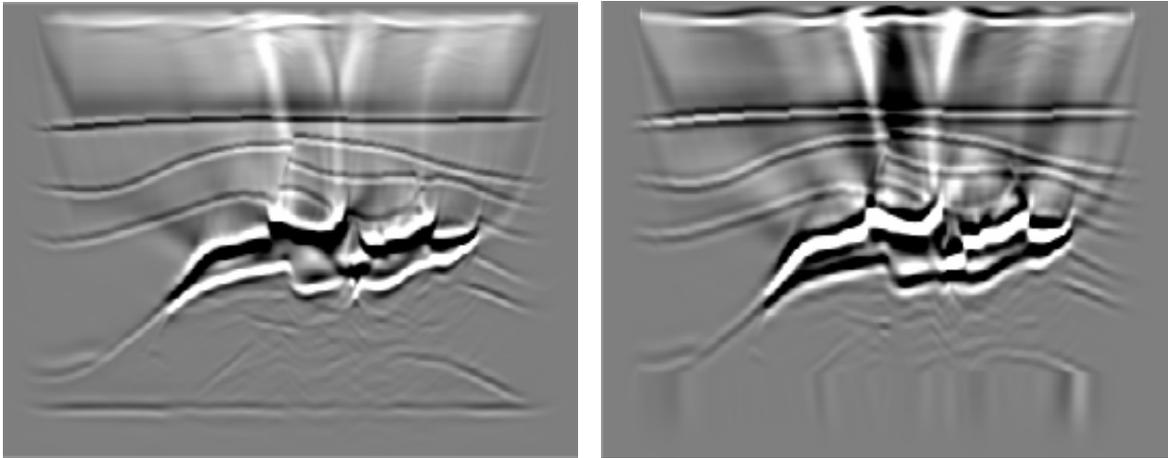


Figura 4.16 – Seção migrada empilhada fornecida pela condição de imagem proposita em Bulcão 2004, em outra escala de amplitudes.

A figura 4.16 é a mesma seção migrada empilhada apresentada na figura 4.15, mas em outra escala de amplitudes.

Analisando as figuras 4.15 e 4.16, percebe-se que os refletores foram realçados, bem como, os artefatos existentes na imagem, com a mudança na escala de amplitudes. Esta mudança na escala, não foi suficiente para tornar mais eficiente o resultado na região pré-sal da seção migrada empilhada.

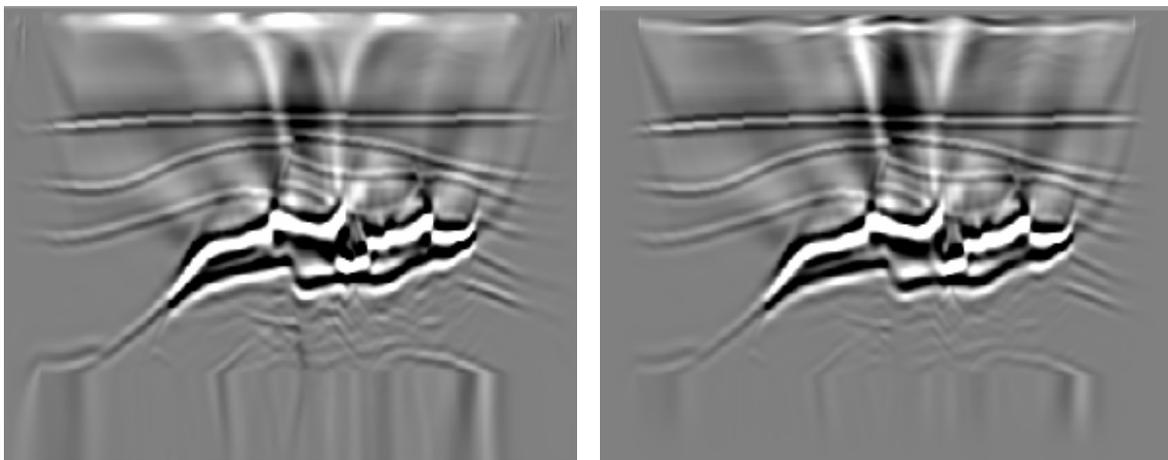
Para efeito de comparação, as quatro seções migradas empilhadas, apresentadas anteriormente, foram colocadas na página seguinte:



(a)

(b)

Figura 4.17 – Seção migrada com a condição de imagem: (a) *Tempo de Excitação*. (b) *Correlação Cruzada*.



(a)

(b)

Figura 4.18 – Seção migrada com a condição de imagem: (a) *Correlação Cruzada Normalizada*. (b) *Condição proposta em Bulcão 2004*.

Nestas escalas de amplitudes, consideradas as melhores em cada seção migrada empilhada, a região pré-sal não foi imageada com eficiência. A condição de imagem com tempo de excitação apresentou artefatos mais suaves.

Nesta página, podem ser comparadas as seções migradas empilhadas referente à aplicação de cada condição de imagem, em outra escala de amplitudes, como mostram as figuras 4.10, 4.12, 4.14 e 4.16:



Figura 4.19 – Seção migrada com a condição de imagem: (a) *Tempo de excitação*, (b) *Correlação cruzada*, em outra escala de amplitudes.



Figura 4.20 – Seção migrada com a condição de imagem: (a) *Correlação Cruzada Normalizada*, (b) *Condição prosposta em Bulcão 2004*, em outra escala de amplitudes.

A mudança na escala de amplitudes realçou com mais eficiência a região pré-sal na seção migrada empilhada referente à condição de imagem com tempo de excitação.

A tabela abaixo mostra o tempo de processamento referente à aplicação de cada condição de imagem com apenas dez posições da fonte sísmica:

<i>Condição de Imagem</i>	<i>Matriz tempo de trânsito</i>	<i>Migração</i>	<i>Total</i>
<i>Tempo de Excitação</i>	4min e 35s	4min e 33s	9min e 8s
<i>Correlação Cruzada</i>	Não tem	12min e 57s	12min e 57s
<i>Correlação Cruzada Normalizada</i>	Não tem	14min e 53s	14min e 53s
<i>Correlação Cruzada Bulcão</i>	Não tem	17min e 11s	17min e 11s

Tabela 4.4 – Tempo de processamento com cada condição de imagem.

Analisando a tabela 4.4, percebe-se que a condição de imagem que forneceu menor tempo de cpu, em termos qualitativos, foi a condição de imagem com tempo de excitação.

Devido ao não imageamento da parte inferior de cada seção migrada, com a aplicação da condição de imagem com correlação cruzada, o que prejudicou a interpretação desta região, o modelo de velocidades foi aumentado e, os resultados da migração RTM implementando as diferentes condições de imagem encontram-se na seção (4.2.1).

#### 4.2.1 – Modelo com Camada Pré-Sal Aumentado

Como mencionado anteriormente, o modelo com camada salina, apresentado na seção anterior, foi aumentado na vertical, em exatamente vinte e seis pontos, para que a parte inferior de cada seção migrada empilhada forneça melhor resultado na aplicação da

condição de imagem com correlação cruzada entre os campos de ondas incidente e refletido.

Os dados referentes a modelagem e a migração foram alterados apenas na quantidade de pontos na vertical e na quantidade de intervalos de tempo ( $nt = 8000$ ).

Abaixo, encontra-se o modelo aumentado:

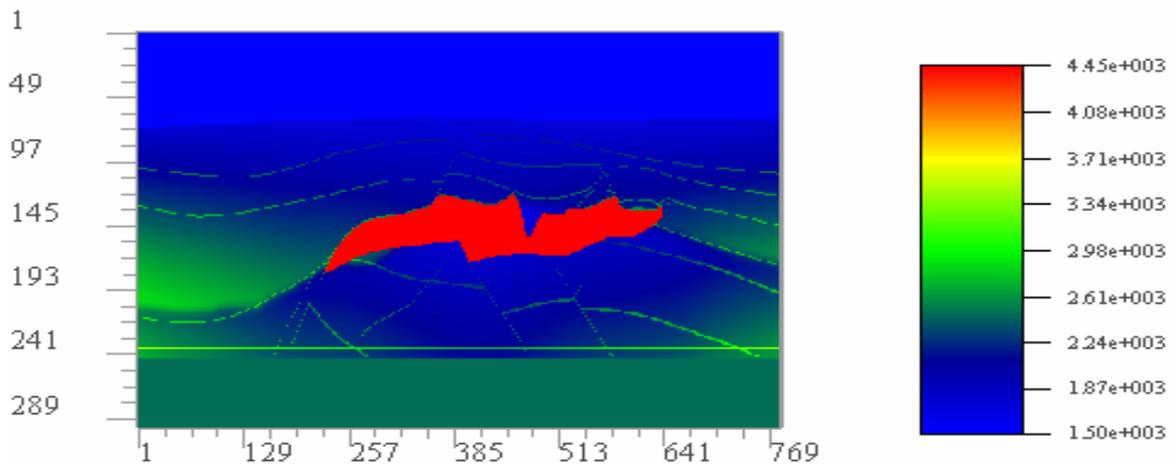


Figura 4.21 – Modelo de velocidades aumentado ( $N_z = 295$ ).

A próxima figura é o modelo de velocidades com camada salina apresentado na seção anterior. Nas figuras 4.21 e 4.22, mostram a diferença na parte inferior do modelo.

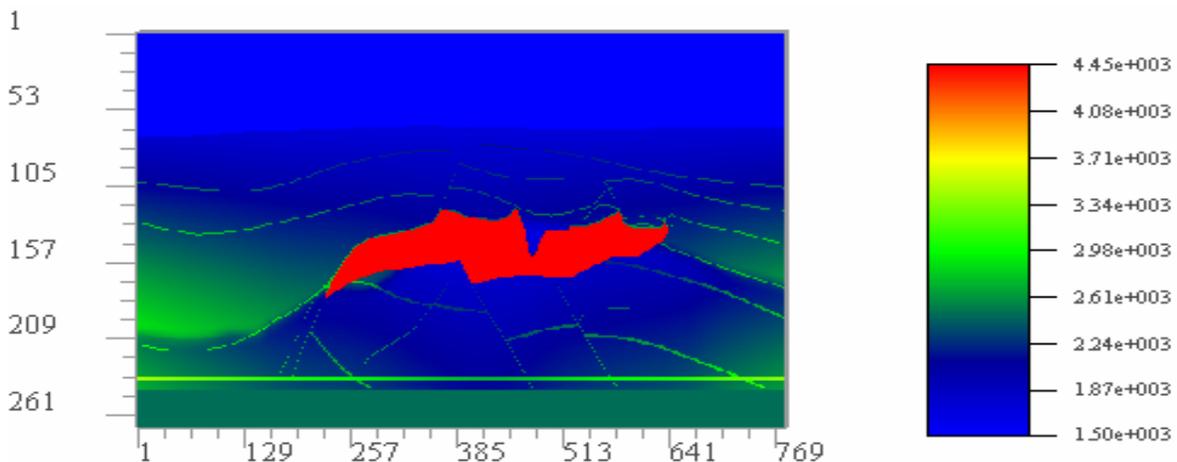


Figura 4.22 – Modelo de velocidades com  $N_z = 269$ .

As seções migradas empilhadas fornecidas com a aplicação das quatro condições de imagem comparadas, com dados sintéticos obtidos nas mesmas condições da seção anterior, encontram-se abaixo:

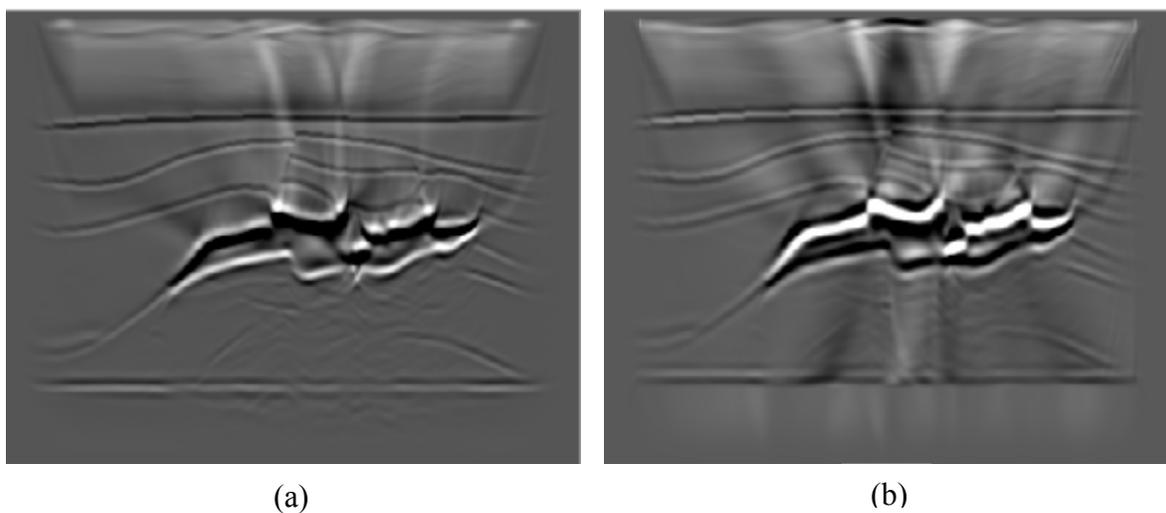


Figura 4.32 – Seção migrada com a condição de imagem: (a) *Tempo de Excitação*, (b) *Correlação Cruzada*.

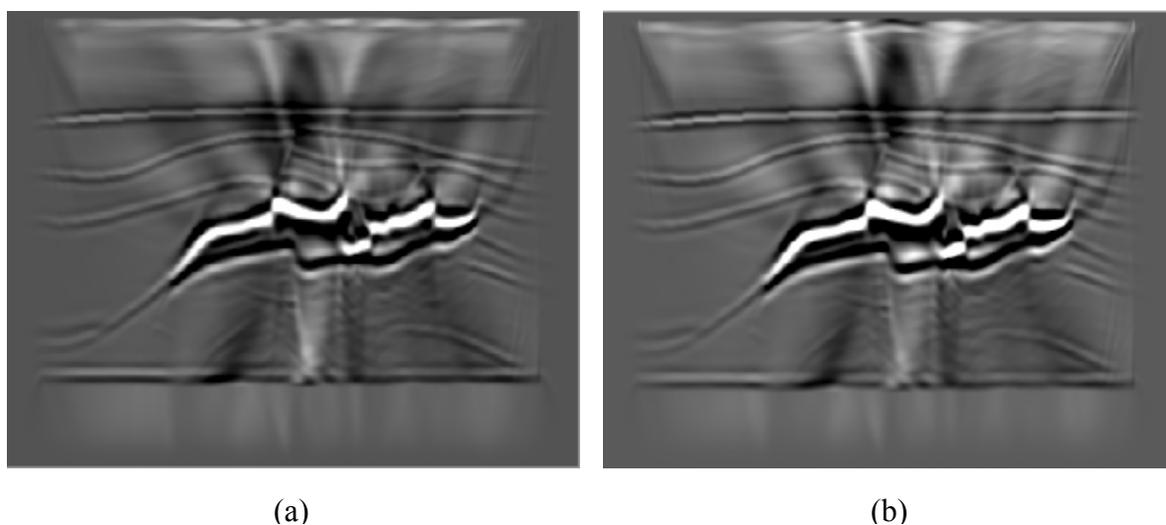


Figura 4.33 – Seção migrada com a condição de imagem: (a) *Correlação Cruzada Normalizada*, (b) *Condição proposta em Bulcão 2004*.

Comparando os resultados obtidos nas figuras 4.32 e 4.33, percebe-se que a condição de imagem com tempo de excitação forneceu melhor resultado.

Os resultados abaixo, iguais aos das figuras 4.32 e 4.33, mas em outra escala de amplitude, foram apresentados com a finalidade de realçar os refletores na região pré-sal de cada seção migrada empilhada.

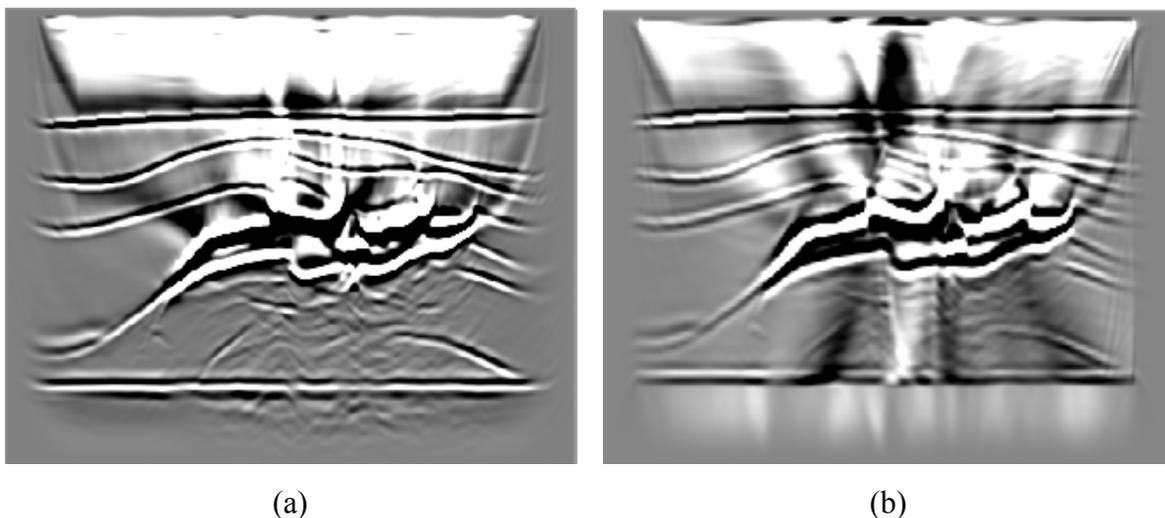


Figura 4.34 – Seção migrada com a condição de imagem: (a) *Tempo de Excitação*, (b) *Correlação Cruzada*, em outra escala de amplitudes.

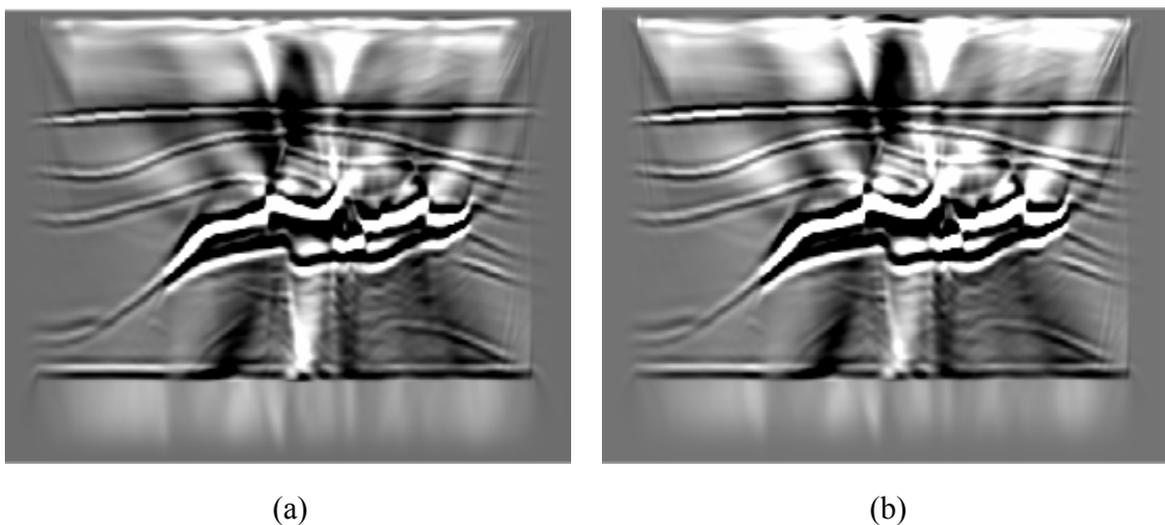


Figura 4.35 – Seção migrada com a condição de imagem: (a) *Correlação Cruzada Normalizada*, (b) *Condição proposta em Bulcão 2004*, em outra escala de amplitudes.

Percebe-se na figura 4.34(a), que a seção migrada empilhada fornecida pela condição de imagem com tempo de excitação, imageou melhor a região pré-sal do modelo, mas não o suficiente para realizar uma interpretação com eficiência desta camada. A mudança na escala de amplitudes, considerando as outras condições de imagem, realçou os artefatos na região abaixo da camada salina, dificultando a interpretação.

É importante salientar, que outra técnica de filtragem de dados pode ser aplicada, com o intuito de reduzir a quantidade de artefatos em cada seção migrada, assim, pode-se melhorar a qualidade das seções migradas empilhadas e, conseqüentemente, os refletores podem ser identificados com mais facilidade. Nesta dissertação, como mencionado anteriormente, foi aplicada a técnica de filtragem de dados conhecida como *mute* (silenciamento), a mesma encontra-se detalhada no apêndice 2.

### 4.3 – Modelo Overthrust

Os próximos resultados da migração RTM com aplicação das diferentes condições de imagem comparadas nesta dissertação, são referentes ao modelo de velocidades conhecido como Overthrust. Este modelo é considerado complexo devido às altas variações de velocidades e as inúmeras interfaces existentes no mesmo, mas sua complexidade é inferior a do modelo apresentado na seção anterior, por este último possuir bruscas variações de velocidades.

Na página seguinte, será apresentado o modelo de velocidades Overthrust (figura 4.36), onde pode ser observado as interfaces entre as camadas de rochas e a escala de velocidades deste modelo:

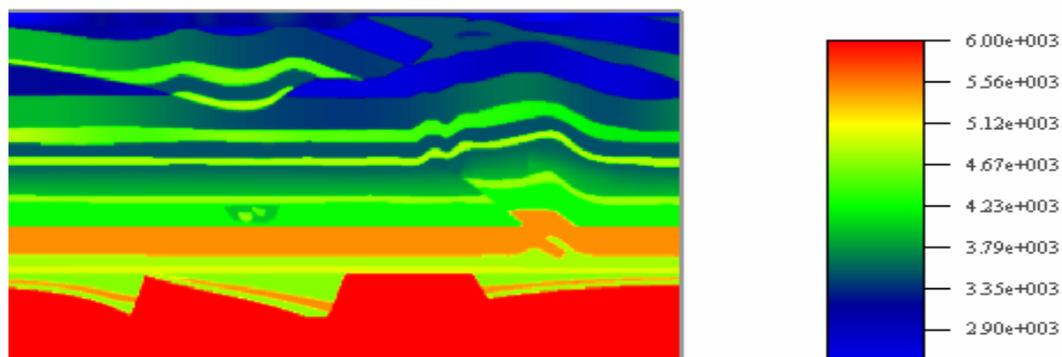


Figura 4.36 – Modelo de velocidades Overthrust.

Analisando a figura anterior, percebe-se que o modelo de velocidades overthrust possui altas variações de velocidades e inúmeras interfaces entre as camadas de rochas.

A tabela a seguir, mostra alguns dados referentes a modelagem e a migração, tais como, número total de passos de tempo e espaçamento entre pontos consecutivos da malha:

<i>Total de passos de tempo</i>	7000
<i>Passo de tempo (dt)</i>	0,00041s
<i>Número de pontos na horizontal</i>	1600
<i>Número de pontos na vertical</i>	372
<i>Espaçamento entre pontos da malha</i>	12,3m
<i>Velocidade mínima do modelo</i>	2460m/s.
<i>Velocidade máxima do modelo</i>	6000m/s

Tabela 4.5 – Dados sobre a modelagem e a migração referentes ao modelo overthrust.

A seção migrada empilhada apresentada na figura 4.37, mostra o resultado da migração reversa no tempo com a aplicação da *condição de imagem com tempo de excitação*. Os dados sísmicos sintéticos foram obtidos com tiros a partir da coordenada horizontal cinquenta e um e até a posição horizontal mil quinhentos e quarenta e nove (as fontes foram posicionadas fora das regiões onde se aplicam as bordas atenuadoras de Cerjan – Apêndice 1), de cinco em cinco pontos e, com coordenada vertical da malha igual a três ( $3h = 3 \times (12,3) = 36,9$  metros de profundidade). Os sismogramas foram gerados com registro de dados em todos os pontos da malha com mesma profundidade das fontes sísmicas.

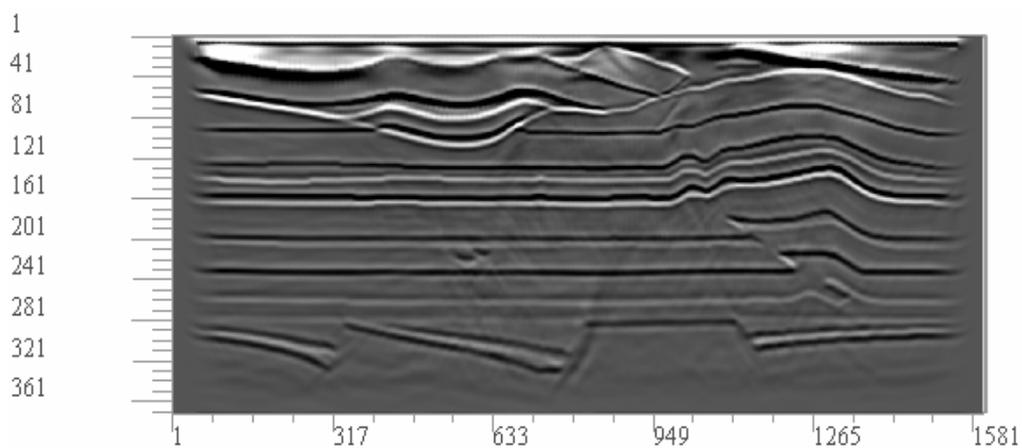


Figura 4.37 – Seção migrada empilhada obtida com a condição de imagem com tempo de excitação.

Percebe-se que a seção migrada empilhada fornecida com a aplicação desta condição de imagem obteve excelente resultado.

A seção migrada empilhada apresentada na figura 4.38, mostra o resultado da migração RTM com a aplicação da *condição de imagem com correlação cruzada* entre os campos incidentes e refletidos. Os dados sísmicos sintéticos foram obtidos nas mesmas condições citadas na seção migrada anterior.

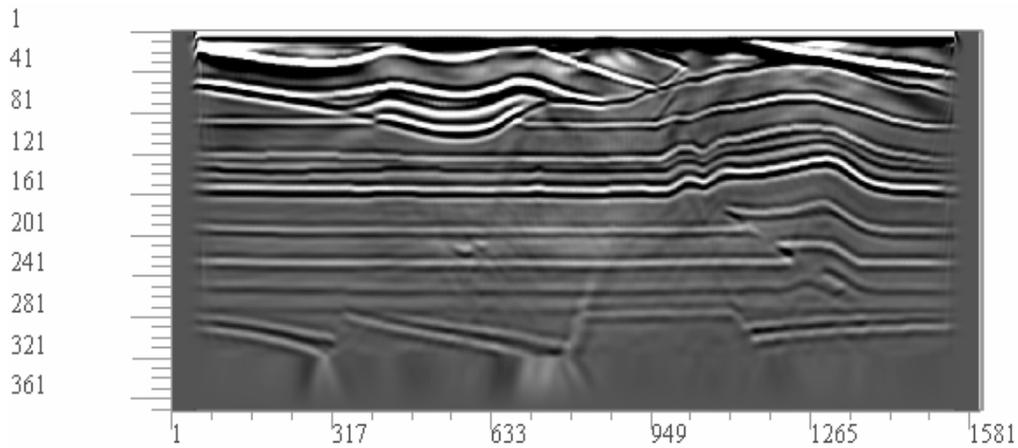


Figura 4.38 – Seção migrada empilhada obtida com a condição de imagem com correlação cruzada.

Analisando a figura 4.38, percebe que a seção migrada empilhada fornecida com esta condição de imagem obteve excelente resultado. Como apenas uma pequena parte do modelo foi prejudicada devido a aplicação das bordas atenuadoras de Cerjan (Apêndice 1), não foi necessário aumentá-lo para realizar nova modelagem.

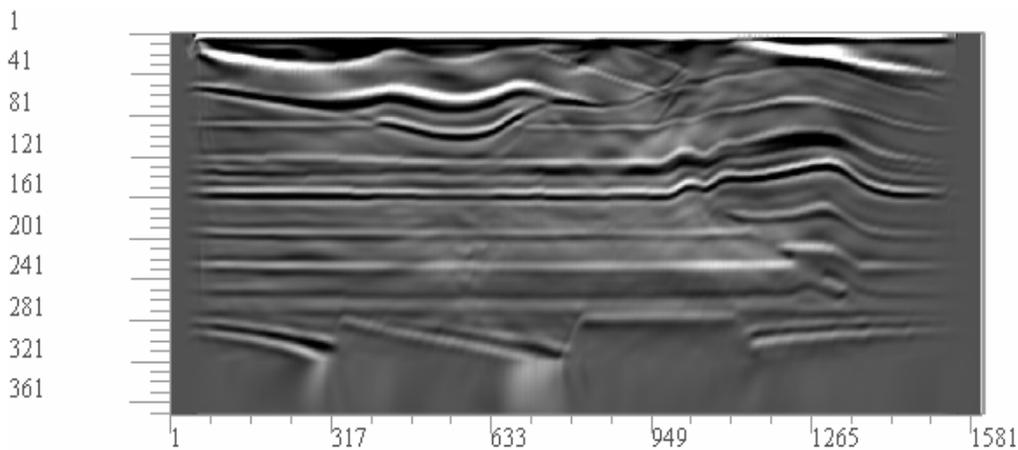


Figura 4.39 – Seção migrada empilhada obtida com a condição de imagem com correlação cruzada normalizada.

A seção migrada empilhada apresentada na figura 4.39 foi obtida com a aplicação da *condição de imagem com correlação cruzada normalizada* entre os campos de ondas incidentes e refletidos. Os canais receptores e as fontes sísmicas foram posicionados nos

mesmos locais das seções migradas apresentadas anteriormente para obtenção dos dados sísmicos sintéticos.

Analisando a figura 4.39, percebe-se que o resultado fornecido pela condição de imagem com correlação cruzada normalizada não foi tão satisfatório quanto os anteriores, devido a grande quantidade de artefatos na imagem.

A seção migrada empilhada apresentada na figura 4.40 foi obtida com a aplicação da *condição de imagem proposta em Bulcão 2004* (equação 4.1-1). Os dados sísmicos sintéticos foram obtidos nas mesmas condições das imagens anteriores.

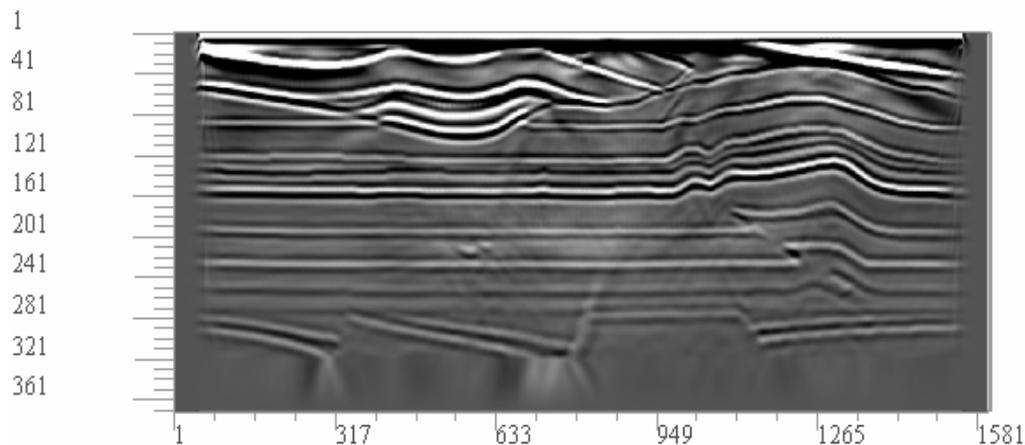


Figura 4.40 – Seção migrada empilhada obtida com a condição de imagem com correlação cruzada proposta em Bulcão 2004.

Analisando o resultado na figura 4.40, percebe-se que esta condição de imagem forneceu excelente resultado.

Para efeito de comparação, as quatro seções migradas empilhadas apresentadas anteriormente foram colocadas na página seguinte:

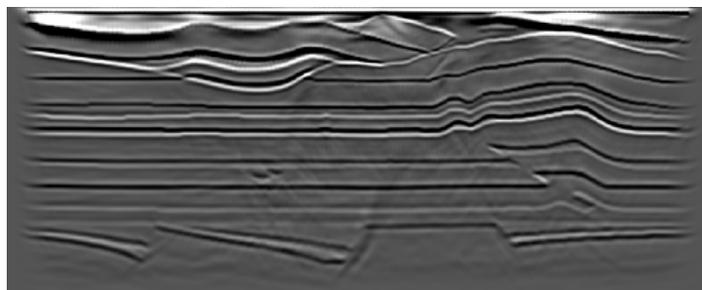


Figura 4.41 – Seção migrada empilhada obtida com a condição de imagem com *tempo de excitação*.

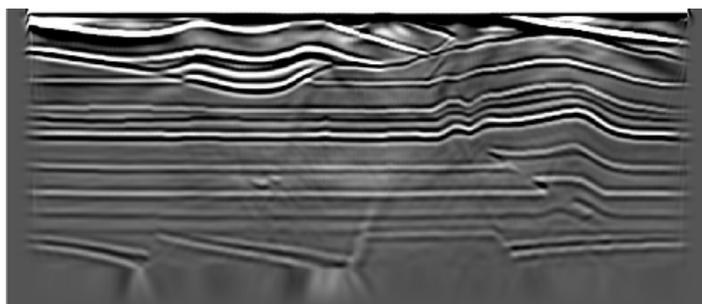


Figura 4.41 – Seção migrada empilhada obtida com a condição de imagem com *correlação cruzada*.

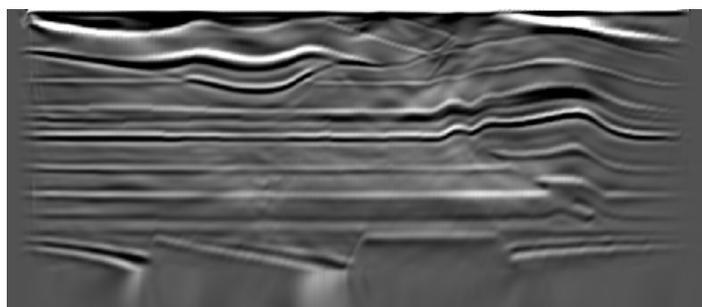


Figura 4.42 – Seção migrada empilhada obtida com a condição de imagem com *correlação cruzada normalizada*.

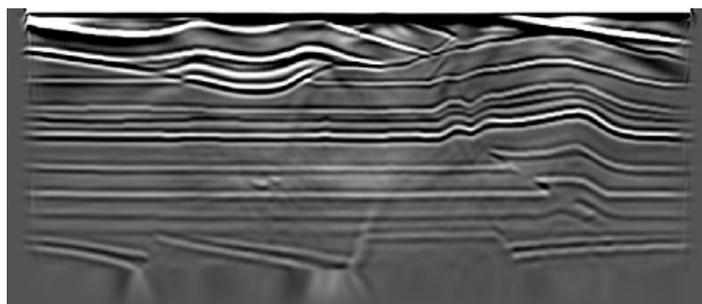


Figura 4.43 – Seção migrada empilhada obtida com a condição de imagem proposta em *Bulcão 2004*.

Analisando as figuras apresentadas na página anterior, percebe-se que a condição de imagem que forneceu melhor resultado, foi a condição de imagem com tempo de excitação, seguida, respectivamente, pela condição com correlação cruzada, condição com correlação cruzada proposta em Bulcão 2004, com resultados semelhantes e, finalmente, a condição de imagem com correlação cruzada normalizada.

É importante salientar, que a escala de amplitudes escolhida para cada seção migrada, foi aquela que forneceu melhor relação sinal / ruído aos olhos do autor desta dissertação, assim, na concepção de outro intérprete, a escala de amplitudes escolhida poderia ser levemente alterada.

Na página seguinte, foram exibidas as mesmas seções migradas apresentadas anteriormente, em outra escala de amplitudes, com o intuito de realçar os refletores existentes em cada seção migrada empilhada:

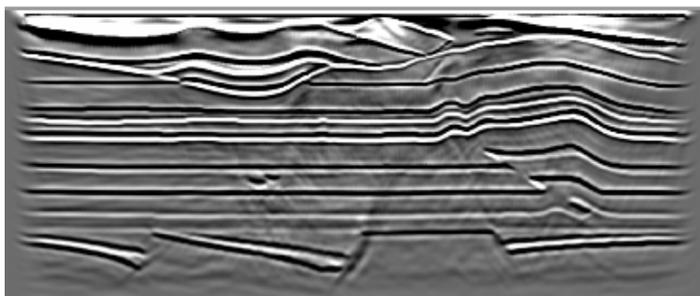


Figura 4.44 – Seção migrada empilhada obtida com a condição de imagem com *tempo de excitação*.

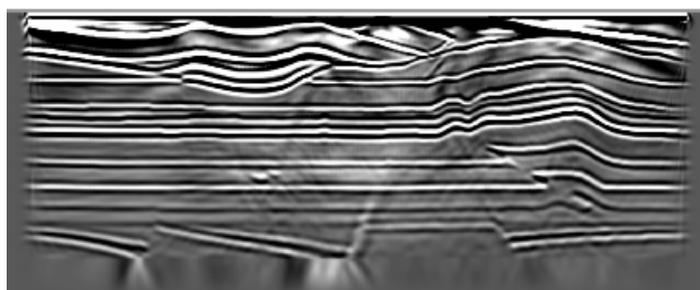


Figura 4.45 – Seção migrada empilhada obtida com a condição de imagem com *correlação cruzada*.

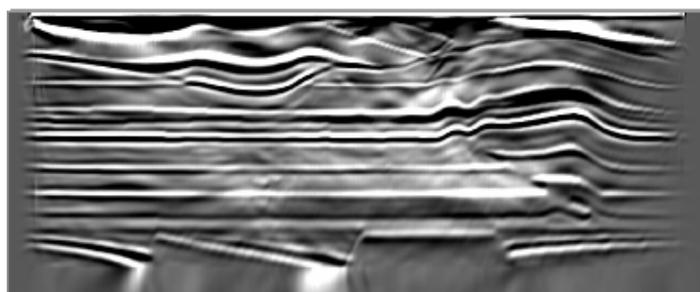


Figura 4.42 – Seção migrada empilhada obtida com a condição de imagem com *correlação cruzada normalizada*.

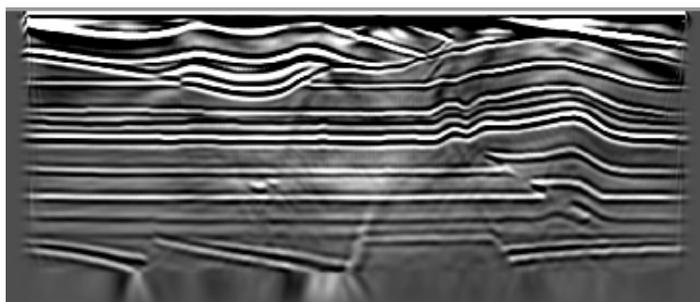


Figura 4.43 – Seção migrada empilhada obtida com a condição de imagem proposta *Bulcão 2004*.

Comparando as imagens da página anterior, percebe-se que a seção migrada empilhada fornecida pela aplicação da condição de imagem com tempo de excitação, continuou com melhor resultado em relação às outras condições, mesmo com a mudança na escala de amplitudes. As condições de imagem com correlação cruzada e correlação cruzada proposta em Bulcão 2004, obtiveram resultados semelhantes e, melhor, que o resultado apresentado na seção migrada empilhada fornecida pela condição de imagem com normalização.

A tabela abaixo mostra o tempo de processamento referente a cada condição de imagem com apenas dez posições da fonte sísmica:

<i>Condição de Imagem</i>	<i>Matriz tempo de trânsito</i>	<i>Migração</i>	<i>Total</i>
<i>Tempo de Excitação</i>	11 min e 21s	15min e 38s	26min e 59s
<i>Correlação Cruzada</i>	Não tem	37min e 20s	37min e 20s
<i>Correlação Cruzada Normalizada</i>	Não tem	40min e 52s	40min e 52s
<i>Correlação Cruzada Bulcão</i>	Não tem	41min e 17s	41min e 17s

Tabela 4.5 – Tempo de processamento do modelo overthrust com cada condição de imagem.

Analisando a tabela 4.5, percebe-se que a condição de imagem que forneceu menor tempo de cpu, em termos qualitativos, foi a condição de imagem com tempo de excitação.

É importante salientar, que os resultados apresentados, para os três modelos de velocidades, referentes à condição de imagem com correlação cruzada normalizada, foram obtidos com a normalização através do campo de ondas incidentes.

# Capítulo 5

## Conclusões, Comentários e Trabalhos

### Futuros.

A modelagem sísmica tem grande importância na indústria do petróleo, pois, utilizando os dados sísmicos sintéticos, podem ser testados novos métodos de migração e de filtragem de dados, por exemplo, com a finalidade de avaliar a eficiência destes métodos para, posteriormente, utilizá-los em dados sísmicos reais na indústria petrolífera. Os resultados obtidos nesta dissertação exemplificam a importância da modelagem, pois, a qualidade das seções migradas empilhadas e o custo computacional variaram com a alteração da condição de imagem implementada, assim, a empresa ou o pesquisador, pode escolher a condição de imagem a ser utilizada, considerando a complexidade do modelo geológico e o prazo que o trabalho deve ser realizado.

Excelentes resultados foram fornecidos pela migração RTM com a aplicação das diferentes condições de imagem no primeiro modelo de velocidades utilizado. A condição de imagem com correlação cruzada e a condição proposta em BULCÃO (2004) foram as mais eficientes, pois, imagearam com nitidez os refletores e obtiveram menos artefatos. A condição de imagem com correlação cruzada normalizada forneceu excelente resultado no imageamento dos refletores, mas a quantidade de artefatos obtidos na imagem foi significativa e, a condição de imagem com tempo de excitação, também, imageou os refletores com eficiência.

Considerando os resultados obtidos com a utilização do modelo simples, a condição de imagem que forneceu melhor resultado, à interpretação do autor desta dissertação, foi a condição proposta em BULCÃO (2004), seguida, respectivamente, pela condição de imagem com correlação cruzada, condição com tempo de excitação e, por último, a condição com correlação cruzada normalizada entre os campos de ondas incidentes e refletidos.

Os resultados obtidos com a utilização do segundo modelo de velocidades também foram satisfatórios, mas a região pré-sal não foi imageada com eficiência, devido, ao alto contraste de impedância acústica. A condição de imagem com tempo de excitação foi a que forneceu melhor resultado, pois, a mesma imageou com nitidez os refletores e obteve menos artefatos na seção migrada empilhada. As outras condições de imagem forneceram muitos artefatos na parte superior e na região pré-sal da imagem, o que limitou o realce dado aos refletores com a mudança na escala de amplitudes, uma vez que, os artefatos aumentavam consideravelmente na região pré-sal com a mudança na mesma.

Como mencionado anteriormente, a condição de imagem que forneceu melhor resultado, à interpretação do autor desta dissertação, na utilização do modelo SEG/EAGE modificado, foi a condição de imagem com tempo de excitação, seguida, respectivamente, pela condição com correlação cruzada normalizada, correlação cruzada proposta em BULCÃO 2004 e, por último, a condição com correlação cruzada entre os campos incidentes e refletidos.

A aplicação das diferentes condições de imagem na migração RTM forneceu excelentes resultados para o modelo de velocidades overthrust. A melhor seção migrada empilhada foi fornecida pela condição de imagem com tempo de excitação, seguida, respectivamente, pela condição com correlação cruzada, condição proposta em BULCÃO

(2004), com resultados semelhantes e, por último, devido a maior quantidade de artefatos, pela condição de imagem com correlação cruzada normalizada.

As bruscas variações de velocidades existentes no modelo SEG/EAGE modificado dificultaram o imageamento na região pré-sal, assim, os resultados obtidos nas seções migradas empilhadas, não foram tão satisfatórios quanto para o modelo overthrust.

É importante ressaltar, como mencionado anteriormente, que outras técnicas de filtragem de dados podem ser implementadas, a fim de diminuir a quantidade de artefatos nas seções migradas empilhadas, com o intuito de melhorar o resultado obtido com a aplicação de cada condição de imagem.

Em relação ao custo computacional, a condição de imagem com tempo de excitação forneceu o menor tempo de processamento para os três modelos de velocidades, seguida, respectivamente, pela condição de imagem com correlação cruzada, condição de imagem com correlação cruzada normalizada e, finalmente, a condição de imagem proposta em BULCÃO (2004).

Analisando os resultados obtidos nesta dissertação, concluiu-se que:

- 1- Se o modelo for simples, é suficiente utilizar a *condição de imagem com tempo de excitação*, uma vez que, forneceu excelentes resultados em menos tempo de processamento.
- 2- Se o modelo for complexo, sem variações bruscas de velocidades, é conveniente utilizar a *condição de imagem com tempo de excitação* ou a *condição de imagem com correlação cruzada*, uma vez que, ambas forneceram excelentes resultados e foram menos custosas computacionalmente.
- 3- Se o modelo for complexo, com variações bruscas de velocidades, como o modelo SEG/EAGE modificado, é preferível utilizar a *condição de imagem com tempo de*

*excitação*, uma vez que, forneceu resultados satisfatórios em menos tempo de processamento. Mas a *condição de imagem proposta em BULCÃO (2004)* ou a *condição de imagem com correlação cruzada normalizada*, também, podem fornecer resultados satisfatórios, mas com qualidade inferior ao obtido com a condição de imagem com tempo de excitação.

Como sugestão para trabalhos futuros, outras condições de imagem podem ser implementadas na migração RTM, com o intuito de comparar a qualidade das imagens e o custo computacional associado. As seções migradas podem receber outro tipo de filtragem de dados e, não somente o *mute* (silenciamento), como realizado nesta dissertação.

Outra sugestão de trabalho futuro seria variar os valores das constantes existentes no denominador de algumas condições de imagem, impedindo que o mesmo se anule, para observar a ordem de grandeza necessária para obter melhores resultados.

# Referências Bibliográficas

BAYSAL, E., KOSLOFF, D. D., SHERWOOD, J. W. C., 1983, “Reverse Time Migration”, *Geophysics*, v. 48, pp. 1514-1524.

BERKHOUT, A.J., 1984. “Seismic Migration, Imaging of Acoustic Energy by Wave Field Extrapolation”, 1 ed., New York, Elsevier.

BULCÃO, ANDRÉ, 2004. “Modelagem e Migração Reversa no Tempo Empregando Operadores Elásticos e Acústicos”. Tese de Doutorado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

CERJAN, C., KOSLOFF, D., KOSLOFF, R., e RESHEF, M., 1985. “A *Nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equation*”. *Geophysics*, 50, p. 705-708.

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

CLAERBOUT, J. F., 1985, “Imaging the earth’s interior”, Brackwell Scientific Publications, Inc.

DUARTE, O. O., 1997, Dicionário enciclopédico inglês – português de geofísica e geologia: 1ª. Ed. Rio de Janeiro, PETROBRAS.

GAZDAG, J., 1978, “Wave equation migration with the phase-shift method”, *Geophysics*, 43, 1342-1351.

GAZDAG, J e SGUAZZERO, P., 1984, “Migration of seismic data by phase shift plus interpolation”, *Geophysics*, 49, 124-131.

KAELIN, B. , GUITTON, A. , 2006, “ Imaging Condition for Reverse Time Migration”, SEG, 2594-2598.

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

LIU, F., ZHANG, G., MORTON, S. A. & LEVEILLE, J. P., 2007. “Reverse-time Migration Using One-way Wavefield Imaging Condition”. Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2170-2174.

POQUECHOQUE, GARY COREY ALDUNATE; PESTANA, R. C. ; STOFFA, Paul Louis . “Migração Sísmica 2-D Pré-empilhamento em Profundidade com Operadores de Extrapolação Split-Step (publicado em julho de 2005)”. Revista Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, Brasil, v. 22, n. 2, p. 153-161, 2004.

RANGEL, H. D. & MARTINS, C. C., 1998. “Principais compartimentos exploratórios, Bacia de Campos”. In: (ed.) Searching For Oil and Gas in the Land of Giants. Rio de Janeiro, Schlumberger 32-40.

REYNOLDS, A. C., 1978, “Boundary conditions for the numerical solution of wave propagation problems”, *Geophysics*, 43, 1099-1110.

SCHLEICHER, J. , COSTA, J. , NOVAIS, A. , 2007 , “A Comparison of Imaging Conditions for Wave-Equation Shot-Profile Migration”, SEG, 2393-2397.

SILVA, BRUNO MENDES, 2006. “Migração RTM, PSPI e SPLIT-STEP de Registros de Múltiplas Fontes: Imageamento Sísmico em Meios com Altos Contrastes de Velocidade”. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

SILVA, MITCHEL WAGNER XAVIER, 2008. “Estudo da Variação de Parâmetros de Aquisição de Dados Sísmicos Associado ao Imageamento de Falhas Utilizando Migração Reversa no Tempo”. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

SILVA, JOSIAS JOSÉ, 2002. “Migração Reversa no Tempo: Resolução em Levantamentos Sísmicos Interpoços”. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

STOFFA, P. L., FOKKEMA, J. T., FREIRE, R. M. L. e KESSINGER, W.P., 1990, “Split-step Fourier Migration”, *Geophysics*, 55, 410-421.

THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2001.

VALENCIANO, A., 2002, “Damped imaging condition for reverse time migration”, Stanford Exploration Project, Report 112, pp. 117-123.

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

WWW.FOLHA.COM.BR, 17/03/2009.

WWW.MAXWELL.LAMBDA.ELE.PUC-RIO.BR, 17/03/2009.

YILMAZ, Ö; Seismic Data Processing, Society of Exploration Geophysicists Tulsa, 1987.

YOON, K., C. SHIN, S. SUH, L. LINES, S.H., KIGAM, 2003, “3D reverse-time migration using the acoustic wave equation: An experience with the SEG/EAGE data set”. *The Leading Edge*, 22, 38-41.

YOON, K., K.J. MARFURT, and W. STARR, 2004, "Challenges in reverse-time migration". 74th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1057-1060.

# Apêndice 1

## Modelagem

A modelagem é utilizada em diversas áreas da ciência, tais como, medicina, geofísica, engenharia e outras. O objetivo de simular situações reais torna a modelagem muito importante, uma vez que, técnicas e procedimentos podem ser avaliados antes de serem utilizados em uma situação real.

A modelagem pode ser definida da seguinte forma (DUARTE 1997):

*“Ato de simular os efeitos a partir de um modelo físico ou matemático...”*

A modelagem sísmica, aplicada na geofísica, tem como objetivo, segundo BERKHOUT (1984), otimizar os parâmetros de aquisição, avaliar as possibilidades, limitações e armadilhas do método sísmico, fornecer os dados sísmicos de entrada para avaliar os programas de processamento sísmico e, verificar a resposta sísmica. Nesta dissertação, a modelagem sísmica foi utilizada com a finalidade de fornecer os dados sísmicos de entrada para os programas de migração RTM com aplicação de diferentes condições de imagem.

Na seção seguinte, encontra-se detalhado a modelagem acústica 2D, pois, a mesma foi utilizada nesta dissertação.

### A.1.1– Modelagem Acústica 2D.

A aquisição de dados sísmicos pode ser devidamente simulada pela modelagem, ou seja, a fonte sísmica, a propagação do campo de ondas em subsuperfície, as reflexões nas interfaces entre as camadas de rochas e o registro da energia que retorna à superfície com a utilização de receptores, geofones em terra e hidrofones no mar, são simulados pela modelagem, que pode ser implementada com a utilização de operadores acústicos ou elásticos. Nesta dissertação, a modelagem foi implementada com a aplicação de operadores acústicos, considerando apenas duas dimensões (modelagem acústica 2D).

Para simular a fonte sísmica na aquisição de dados sísmicos utiliza-se a seguinte equação:

$$f(t) = [1 - 2\pi(\pi \cdot f_c \cdot t)^2] e^{-(\pi \cdot f_c \cdot t)^2} \quad (\text{A1-1})$$

A equação (A.1-1) é conhecida como a derivada segunda da função Gaussiana, onde  $f_c$  é a frequência de corte da fonte.

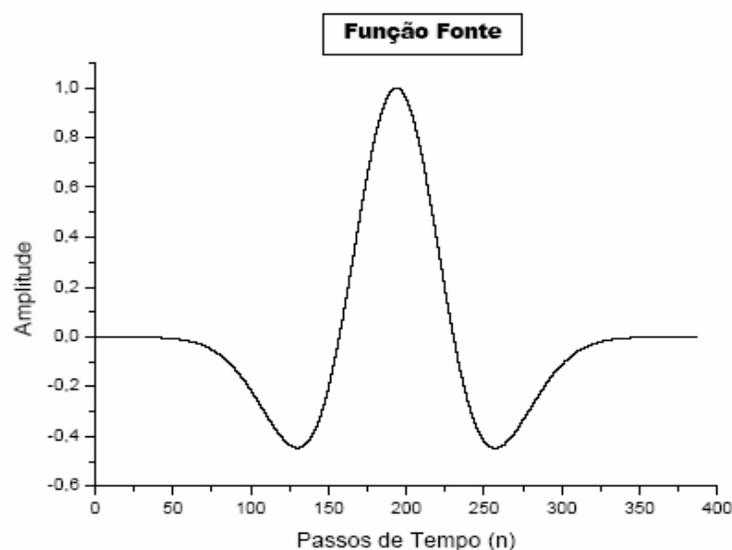


Figura A1.1 - Gráfico de amplitudes da função fonte.

Na figura (A.1-1), pode-se ver o gráfico de amplitudes da função fonte.

Após a detonação da fonte sísmica, simula-se a propagação de ondas em subsuperfície, que pode ser realizada, considerando o ambiente acústico, com a utilização da equação acústica da onda e, a mesma, encontra-se abaixo:

$$\frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial t^2} = f(t) \delta(x - x_f) \delta(z - z_f) \quad (\text{A1-2})$$

Note que a equação anterior possui derivadas parciais de segunda ordem em relação aos eixos x e z e, também, em relação ao tempo t.

Na equação (A.1-2), tem-se:

$$\frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial z^2} \text{ e } \frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial t^2} \text{ são as derivadas parciais de segunda ordem}$$

em relação as variáveis x, z, e t, respectivamente, no ponto de coordenadas x horizontal e z vertical em um determinado tempo t.

$f(t)$  é fonte sísmica impulsiva.

$\delta(x - x_f)$  e  $\delta(z - z_f)$ , são funções delta de Dirac.

c é a velocidade de propagação do campo de ondas.

Para resolver a equação acústica da onda (A.1-2), fazendo os campos se propagarem em subsuperfície, utiliza-se o método numérico das diferenças finitas (MDF). Este método é baseado na expansão em série de Taylor, desta forma, consegue-se aproximações para as derivadas parciais, assim, os campos de ondas são obtidos em todos os pontos da malha e em todos os tempos.

Considere uma função  $f(x)$ , então, a série de Taylor para o ponto  $x + \Delta x$  é a seguinte:

$$F(x + \Delta x) = F(x) + \frac{\Delta x}{1!} \frac{dF(x)}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{d^2 F(x)}{dx^2} + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \frac{d^3 F(x)}{dx^3} + \frac{(\Delta x)^4}{4!} \frac{d^4 F(x)}{dx^4} + O[(\Delta x)^5] \quad (\text{A1-3})$$

Considerando apenas o eixo  $x$ , será necessário para realizar os cálculos dos seguintes valores:

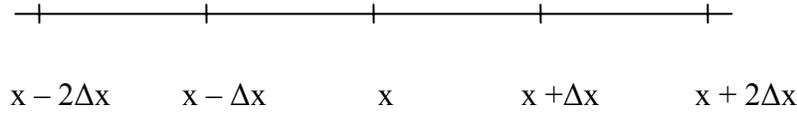


Figura A1.2 – Valores utilizados na expansão em série de Taylor.

Assim, para calcular o valor do campo de ondas no ponto  $x$ , são utilizados dois pontos anteriores e dois posteriores.

Desenvolvendo a série de Taylor nestes pontos tem-se:

$$F(x - 2\Delta x) = F(x) - \frac{2\Delta x}{1!} \frac{dF(x)}{dx} + \frac{(2\Delta x)^2}{2!} \frac{d^2 F(x)}{dx^2} - \frac{(2\Delta x)^3}{3!} \frac{d^3 F(x)}{dx^3} + \frac{(2\Delta x)^4}{4!} \frac{d^4 F(x)}{dx^4} - O[(\Delta x)^5] \quad (\text{A1-4})$$

$$F(x - \Delta x) = F(x) - \frac{\Delta x}{1!} \frac{dF(x)}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{d^2 F(x)}{dx^2} - \frac{(\Delta x)^3}{3!} \frac{d^3 F(x)}{dx^3} + \frac{(\Delta x)^4}{4!} \frac{d^4 F(x)}{dx^4} - O[(\Delta x)^5] \quad (\text{A1-5})$$

$$F(x + \Delta x) = F(x) + \frac{\Delta x}{1!} \frac{dF(x)}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{d^2 F(x)}{dx^2} + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \frac{d^3 F(x)}{dx^3} + \frac{(\Delta x)^4}{4!} \frac{d^4 F(x)}{dx^4} + O[(\Delta x)^5] \quad (\text{A1-6})$$

$$F(x+2\Delta x) = F(x) + \frac{2\Delta x}{1!} \frac{dF(x)}{dx} + \frac{(2\Delta x)^2}{2!} \frac{d^2F(x)}{dx^2} + \frac{(2\Delta x)^3}{3!} \frac{d^3F(x)}{dx^3} + \frac{(2\Delta x)^4}{4!} \frac{d^4F(x)}{dx^4} + O[(\Delta x)^5] \quad (\text{A.1-7})$$

Considerando aproximação de quarta ordem e realizando a operação abaixo, obtém-se:

$$16[F(x+\Delta x) + F(x-\Delta x)] - F(x+2\Delta x) - F(x-2\Delta x) = 30F(x) + 12(\Delta x)^2 \frac{d^2F(x)}{dx^2} \quad (\text{A1-8})$$

Ou seja, multiplica-se a soma das equações (A.1-5) e (A.1-6) por 16 e, subtrai-se, deste resultado, os valores das equações (A.1-4) e (A.1-7).

Isola-se a derivada parcial de segunda ordem e, posteriormente, o resultado obtido na equação (A.1-9) é substituído na equação acústica da onda.

$$\frac{d^2F(x)}{dx^2} = \left[ \frac{-F(x-2\Delta x) + 16F(x-\Delta x) - 30F(x) + 16F(x+\Delta x) - F(x+2\Delta x)}{12(\Delta x)^2} \right] \quad (\text{A1-9})$$

É importante ressaltar, que a aproximação escolhida para a derivada espacial foi de quarta ordem, uma vez que, as expansões foram truncadas no termo de ordem quatro.

Utilizando idéias similares as apresentadas anteriormente e, a mesma ordem de aproximação, tem-se a seguinte derivada parcial em relação ao eixo z:

$$\frac{d^2F(z)}{dz^2} = \left[ \frac{-F(z-2\Delta z) + 16F(z-\Delta z) - 30F(z) + 16F(z+\Delta z) - F(z+2\Delta z)}{12(\Delta z)^2} \right] \quad (\text{A1-10})$$

Abaixo, encontram se os pontos para o desenvolvimento da série de Taylor em relação ao eixo z:

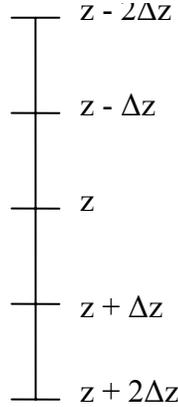


Figura A1.3 - Ilustração dos pontos utilizados para a discretização no eixo z.

Assim, substituindo as aproximações de quarta ordem no espaço e segunda no tempo, obtidas com a utilização da série de Taylor, na equação acústica da onda, obtém-se:

$$P_{i,j}^{n+1} = -\frac{1}{12} A(i, j) \left[ P_{i-2,j}^n + P_{i+2,j}^n + P_{i,j-2}^n + P_{i,j+2}^n - 16(P_{i-1,j}^n + P_{i+1,j}^n + P_{i,j-1}^n + P_{i,j+1}^n) + 60P_{i,j}^n \right] - P_{i,j}^{n-1} + 2P_{i,j}^n + f(n)\delta(x - x_f)\delta(z - z_f) \quad (A1-11)$$

$$\text{tal que, } A(i, j) = \left( \frac{c(i, j)\Delta t}{h} \right)^2. \quad (A1-12)$$

Na equação (A.1-11), tem-se:

$P_{i,j}^n$  representa o valor do campo de ondas no ponto ( i, j ) em um determinado tempo t.

$$x = i\Delta x, \quad z = j\Delta z \quad e \quad t = n\Delta t.$$

$h = \Delta x = \Delta z$  é o espaçamento da malha.

$c(i, j)$  é a velocidade de propagação do campo de ondas.

$\Delta t$  é o intervalo de tempo.

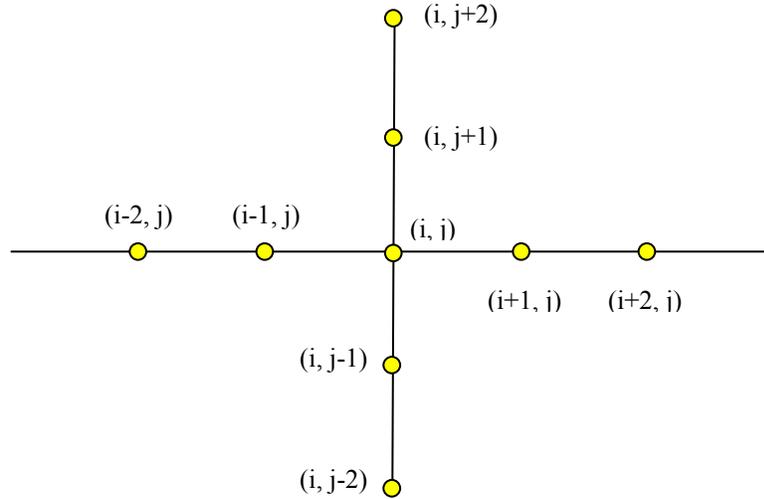


Figura A1.4 – Ilustração dos pontos utilizados para os cálculos do campo de ondas para um ponto  $(i, j)$ .

Na equação (A.1-11), percebe-se que para obter o valor do campo de ondas em um determinado tempo  $n + 1$ , precisa-se dos valores dos campos nos tempos  $n$  e  $n + 1$ , desta forma, os valores dos campos são obtidos até o tempo final de registro e, conseqüentemente, há propagação dos campos de ondas em subsuperfície.

Durante as fases de propagação e depropagação dos campos de ondas, com o método numérico das diferenças finitas, é necessário que o espaçamento entre pontos consecutivos da malha e o intervalo de tempo  $\Delta t$  respeitem certas condições, para que não ocorra dispersão e haja estabilidade numérica. Estas condições estão listadas abaixo:

$$h \leq \frac{V_{MIN}}{\alpha \cdot f} \quad (A1-13)$$

Na inequação (A.1-13), tem-se:

$V_{MIN}$  é a velocidade mínima do modelo de velocidades.

$f$  é a frequência de corte.

$\alpha$  é uma constante que determina quantos pontos da malha representam o menor comprimento de onda.

$$\Delta t \leq \frac{h}{\beta \cdot V_{MAX}} \quad (A1-14)$$

Na inequação anterior, tem-se:

$\Delta t$  é o intervalo de tempo.

$V_{MAX}$  é a velocidade máxima do modelo de velocidades.

$\beta$  é uma constante que representa quantos passos de tempo são necessários para o campo de onda percorrer a distância entre dois pontos consecutivos da malha ( $h$ ).

$h$  é o espaçamento entre pontos consecutivos da malha.

Portanto, estas inequações devem ser respeitadas para reduzir a dispersão numérica e garantir estabilidade.

### A.1.2– Cálculo nas Bordas e Fator Atenuador de Cerjan.

Na aquisição de dados sísmicos, simulados pela modelagem, os dados registrados no sismograma podem ser prejudicados por reflexões indesejadas nas bordas do modelo, devido a sua limitação e, conseqüentemente, após a migração, o resultado obtido na seção

migrada não será satisfatório. Uma maneira de reduzir estas reflexões indesejadas é calcular o campo de ondas nas bordas da forma proposta por Reynolds.

As equações abaixo foram propostas por REYNOLDS (1978) para calcular os valores dos campos de ondas nas bordas do modelo:

$$\text{Borda Esquerda:} \quad \frac{1}{c} \frac{\partial u(-a, t)}{\partial t} - \frac{\partial u(-a, t)}{\partial x} = 0 \quad (\text{A1-15})$$

$$\text{Discretização com o MDF:} \quad u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n + c(i, j) \cdot \Delta t \left( \frac{u_{i+1,j}^n - u_{i,j}^n}{\Delta x} \right) \quad (\text{A1-16})$$

$$\text{Borda Direta:} \quad \frac{1}{c} \frac{\partial u(a, t)}{\partial t} + \frac{\partial u(a, t)}{\partial x} = 0 \quad (\text{A1-17})$$

$$\text{Discretização com o MDF:} \quad u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n - c(i, j) \cdot \Delta t \left( \frac{u_{i,j}^n - u_{i-1,j}^n}{\Delta x} \right) \quad (\text{A1-18})$$

$$\text{Borda Superior:} \quad \frac{1}{c} \frac{\partial u(0, t)}{\partial t} - \frac{\partial u(0, t)}{\partial z} = 0 \quad (\text{A1-19})$$

$$\text{Discretização com o MDF:} \quad u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n + c(i, j) \cdot \Delta t \left( \frac{u_{i,j+1}^n - u_{i,j}^n}{\Delta x} \right) \quad (\text{A1-20})$$

$$\text{Borda Inferior:} \quad \frac{1}{c} \frac{\partial u(b, t)}{\partial t} + \frac{\partial u(b, t)}{\partial z} = 0 \quad (\text{A1-21})$$

$$\text{Discretização com o MDF:} \quad u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n - c(i, j) \cdot \Delta t \left( \frac{u_{i,j}^n - u_{i,j-1}^n}{\Delta x} \right) \quad (\text{A1-22})$$

Nas equações anteriores, tem-se:

$c(i,j)$  é a velocidade de propagação do campo de ondas,  $u_{i,j}^n$  é o valor do campo de ondas no ponto  $(i,j)$  e no tempo  $n$ ,  $\Delta t$  é o intervalo de tempo e,  $\Delta x$  é o espaçamento entre pontos consecutivos da malha referente ao eixo  $x$ .

Outro método para reduzir as reflexões nas bordas do modelo proposto por CERJAN (1985) é multiplicar o valor dos campos de ondas pela função exponencial abaixo:

$$G(i) = e^{-[fat(Na-i)]^2} \quad (A1-23)$$

Sendo  $fat$  um parâmetro relacionado com  $Na$ .

Esta multiplicação é realizada apenas para pontos da malha que estão próximos às bordas, como mostra a figura abaixo:

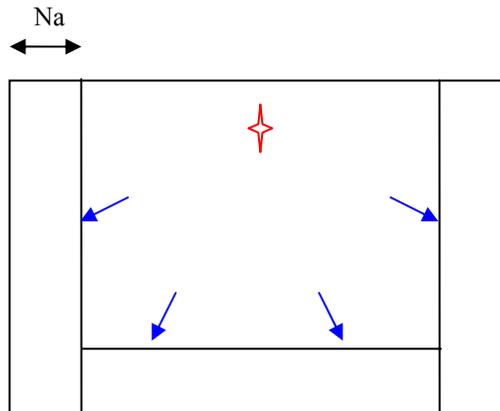


Figura A1.5 – Ilustração das regiões onde se aplicam as bordas atenuadoras de Cerjan.

Então, quando o campo de ondas “atinge” estes retângulos próximos às bordas, seus valores são multiplicados pela função exponencial mostrada anteriormente, o que reduz

consideravelmente a amplitude de ondas artificialmente refletidas, uma vez que, a função  $G(i)$  contém expoente negativo.

Analisando a figura (A.1.6), percebe-se a importância da aplicação das condições de bordas citadas anteriormente. Na coluna esquerda, há reflexões bruscas nas bordas pela não aplicação das condições propostas por Reynolds e Cerjan, já na coluna direita, as reflexões são imperceptíveis, devido à aplicação das duas condições.

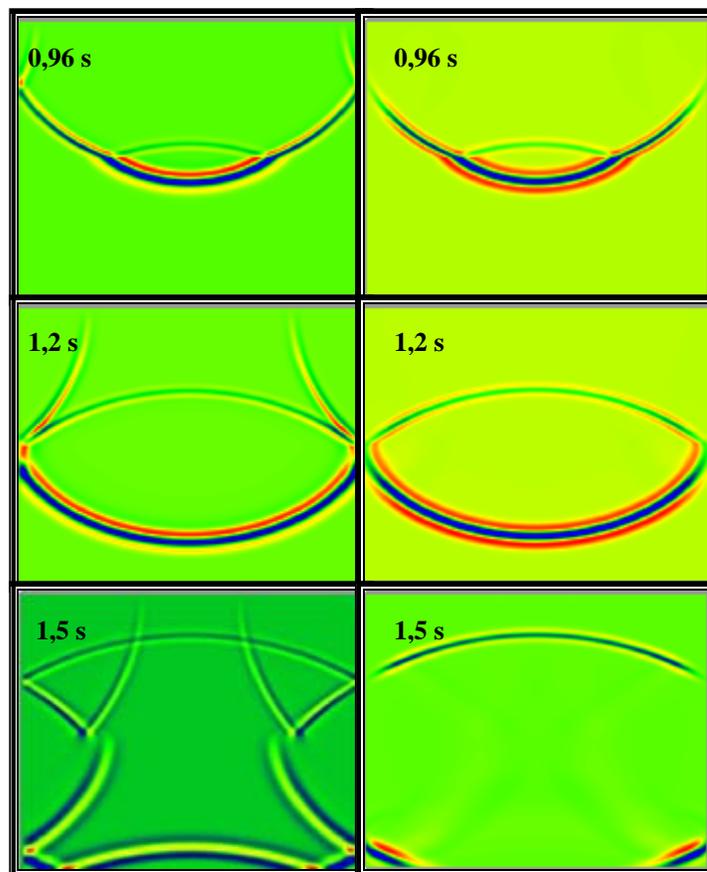


Figura A1.6 – Propagação do campo de ondas com e sem aplicação das condições de bordas nos tempos 0,96, 1,2 e 1,5 segundos.

Na figura A.1.7, percebe-se os artefatos na parte inferior do sismograma, referentes às reflexões nas bordas do modelo, devido, a não aplicação das condições de bordas citadas anteriormente:

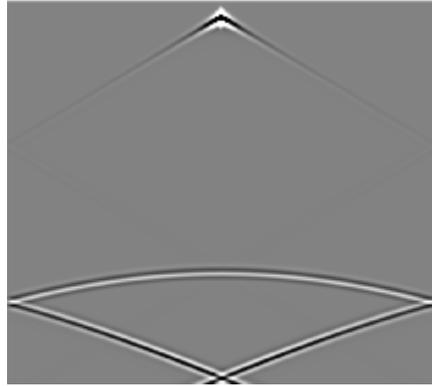


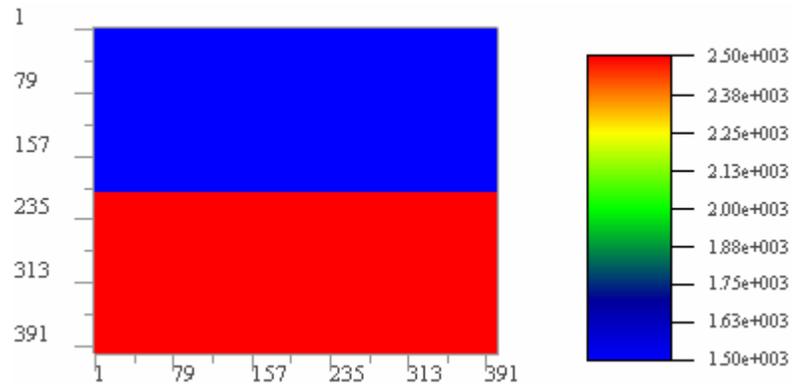
Figura A1.7 – Sismograma obtido sem aplicação das condições de bordas.

Comparando as figuras (A.1.7) e (A.1.8), percebe-se a diferença na parte inferior dos sismogramas quando as condições de bordas são aplicadas.



Figura A1.8 – Sismograma obtido com aplicação das condições de borda.

O modelo de velocidades abaixo, com duas camadas, foi utilizado para obter os sismogramas das figuras (A.1.7) e (A.1.8) e, as imagens de propagação com e sem aplicação das condições de bordas (figura A.1.6).



Portanto, percebe-se a importância da aplicação das condições de bordas analisando as figuras (A.1.6), (A.1.7) e (A.1.8).

# Apêndice 2

## Filtragem de Dados

Após a migração dos dados registrados no sismograma, a seção migrada, pode conter dados que prejudicam a interpretação do resultado, conhecidos como artefatos. Estes, podem ser “descartados”, uma vez que, não são dados referentes a interfaces ou camadas de rochas do modelo geológico, no caso da modelagem. Uma maneira de reduzir os artefatos na imagem e, conseqüentemente, melhorar o resultado, para que os intérpretes identifiquem estruturas geológicas com características semelhantes a uma armadilha, é através de técnicas de filtragem de dados. Existem inúmeras maneiras de filtrar os dados contidos na seção migrada, mas, nesta dissertação, foi apresentado apenas a técnica de filtragem de dados conhecida como *mute* (silenciamento), proposta em SILVA (2008), uma vez que, foi a única utilizada neste trabalho.

### A.2.1– Técnica de Filtragem *Mute*

A técnica de filtragem de dados *mute* consiste basicamente em eliminar parte dos dados obtidos em cada seção migrada (migração pré-stack) da seguinte forma:

1- Dois pontos são fixados na superfície do modelo com mesma coordenada vertical e equidistantes do ponto de tiro.

2- A partir destes dois pontos, traçam-se duas retas que formem um ângulo  $\theta$  com a vertical baixada destes pontos e que sejam simétricas a vertical baixada do ponto de tiro.

3- Aproveita-se apenas o que está entre estas retas.

Em SILVA 2008, foram feitos alguns testes e constatou-se que, a distância ideal entre os dois pontos equidistantes da fonte fixados na superfície é cem vezes o valor do espaçamento horizontal  $\Delta x$  e, o valor do ângulo  $\theta$  que forneceu melhores resultados foi zero ( $\theta = 0$ ).

A figura abaixo, ilustra o processo de filtragem de dados *mute*:

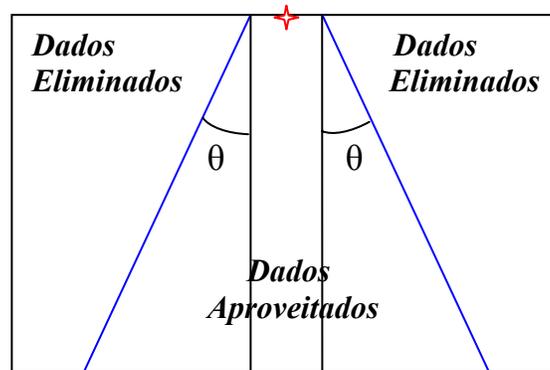


Figura A2.1 – Ilustração da técnica *mute*.

Portanto, aproveita-se apenas os dados que estão entre as retas traçadas dos pontos equidistantes da fonte sísmica.

Na figura (A2.2), encontra-se uma seção migrada referente ao modelo overthrust, com a fonte posicionada na superfície e com coordenada horizontal cinco mil.

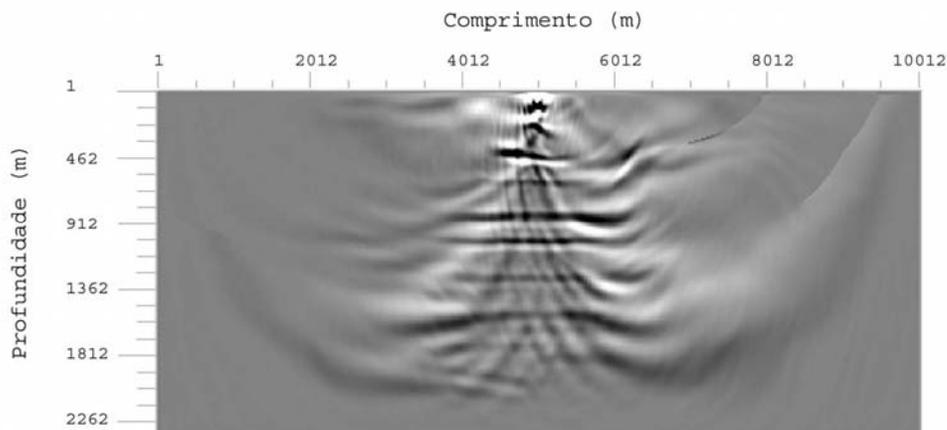


Figura A2.2 – Seção migrada retirada de SILVA (2008).

Na figura abaixo (retirada de SILVA 2008), encontra-se o resultado da aplicação do *mute* com  $\theta = 60^\circ$  na seção migrada apresentada na figura (A2.2).

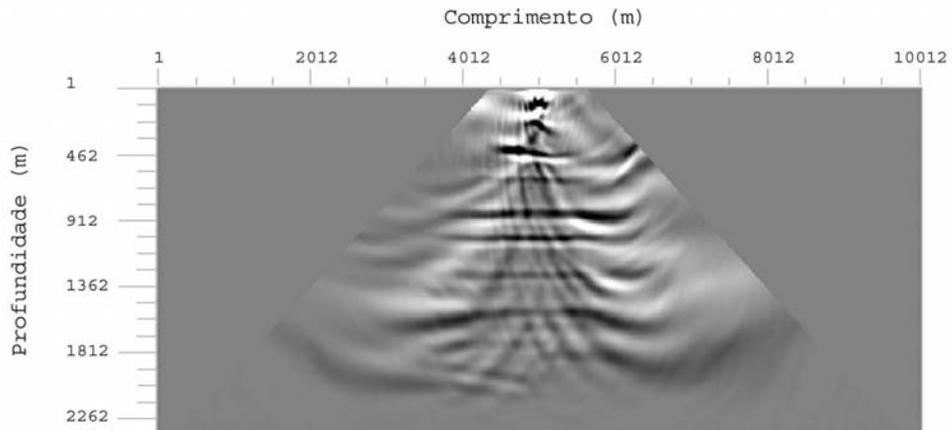


Figura A2.3 – Seção migrada com aplicação do *mute*.

Na figura A2.4 (retirada de SILVA 2008), encontra-se o resultado da aplicação do *mute* com  $\theta = 0^\circ$  na seção migrada apresentada na figura (A2.2).

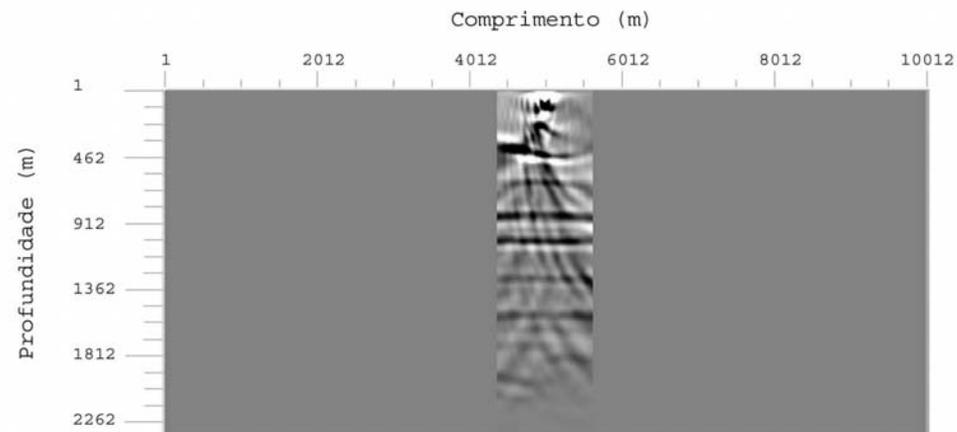


Figura A2.4 – Seção migrada com mute zero grau aplicado.

Desta forma, aplica-se a técnica *mute* em cada seção migrada, para, posteriormente, somá-las, obtendo como resultado a seção empilhada. Assim, os artefatos existentes na seção empilhada são reduzidos.

Como mencionado anteriormente, segundo SILVA (2008), melhores resultados foram obtidos com a aplicação do *mute* zero grau ( $\theta = 0^\circ$ ). Portanto, nesta dissertação, foi utilizado este valor para filtrar cada seção migrada.

Nas figuras (A2.5) e (A2.6), encontram-se os resultados do empilhamento das seções migradas com e sem a aplicação da técnica de filtragem de dados *mute*:

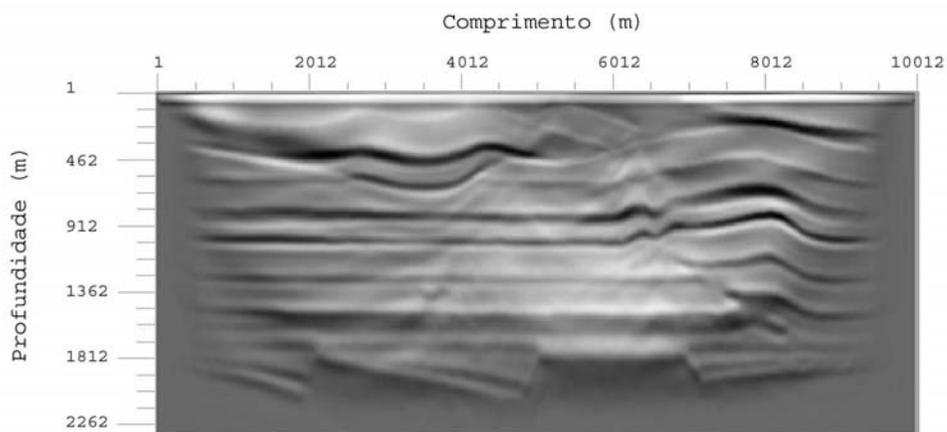


Figura A2.5 – Seção empilhada *sem* aplicação da técnica de filtragem *mute*.

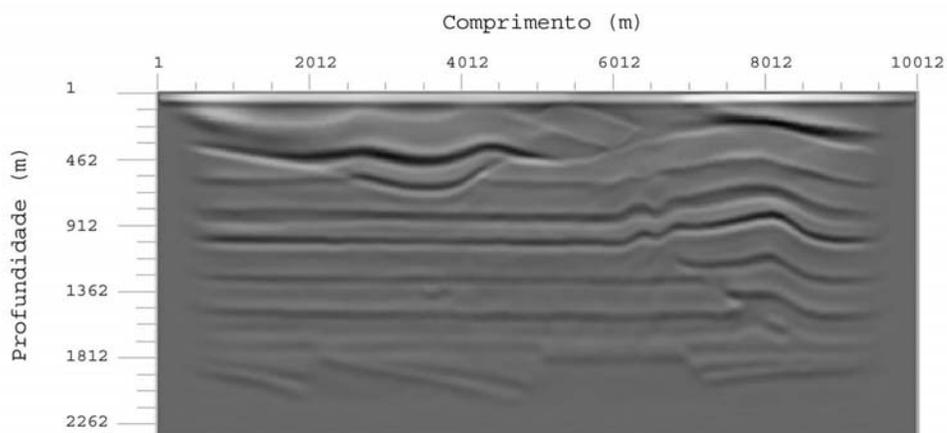


Figura A2.6 – Seção empilhada *com* aplicação da técnica de filtragem *mute* ( $\theta = 0^\circ$ ).

Comparando as figuras anteriores, percebe-se a eficiência desta técnica, uma vez que, os artefatos foram consideravelmente reduzidos com a aplicação do *mute* zero grau.

Como mencionado anteriormente, existem outras técnicas de filtragem de dados, entre estas, encontra-se uma técnica conhecida por *Bandpass filter* (filtro Passa Banda). A mesma, trabalha em uma região definida por quatro valores de frequência, que num gráfico frequência por amplitude forma um trapézio, assim, os valores de frequência que estão no interior deste trapézio são mantidos e, os valores que se encontram fora são atenuados.

Outra maneira de filtrar a imagem trabalha com atenuação de ruído aleatório. Este método altera o domínio dos dados de espaço-tempo para frequência-espaço, onde eventos coerentes podem ser representados por senos e cossenos. Assim, a configuração destes eventos pode ser prevista no futuro, pois as funções seno e cosseno são periódicas. As informações fornecidas pelos ruídos aleatórios são incoerentes a esta previsão, portanto, estes dados são eliminados. Então, há uma previsão de eventos baseada nas funções seno e cosseno e, posteriormente, compara-se os dados com esta previsão, assim, os dados incoerentes (ruídos aleatórios) são eliminados, reduzindo a quantidade de artefatos na seção empilhada.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)