


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

FRANCISCO JOSA COUTINHO DA SILVA

# ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA MIGRAÇÃO AO MODELO DE VELOCIDADES

BELÉM
2007




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

FRANCISCO JOSA COUTINHO DA SILVA

# ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA MIGRAÇÃO AO MODELO DE VELOCIDADES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Jessé Carvalho Costa

BELÉM
2007

FRANCISCO JOSA COUTINHO DA SILVA

# ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA MIGRAÇÃO AO MODELO DE VELOCIDADES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Data de aprovação em _____/_____/_____,

Banca examinadora:

_____

Prof. Dr. Jessé Carvalho Costa - UFPA (Orientador)

_____

Profa. Dra. Ellen de Nazaré Souza Gomes - UFPA (Membro)

_____

Prof. Dr. Cícero Roberto Teixeira Régis - UFPA (Membro)

Aos meus pais Zezinho e Oneide

# RESUMO

Técnicas baseadas no traçamento de raios e técnicas baseadas na equação da onda são mecanismos diferentes usados na migração sísmica. Em ambos os casos, é de suma importância que se tenha um modelo de velocidade condizente com a distribuição de velocidades em subsuperfície. Logo, quando a geologia local apresenta-se de forma complexa, é necessário o uso de técnicas cada vez mais robustas para estimar o modelo de velocidade em profundidade. A validação do modelo de velocidade usado na migração pode ser feita utilizando famílias de imagem comum produzidas pela própria migração. Estes critérios de validação podem ser usados posteriormente em algorítimos de inversão com o objetivo de atualizar o modelo de velocidade para uma nova etapa de migração. A construção de famílias de imagem comum é discutida e analizada em situações 2D. Utilizamos o dado sintético Marmousi para avaliar algorítimos de construção da famílias de imagem comum usando migração Kirchhoff e migração por continuação para baixo do campo de ondas.

**Palavras Chaves**: Geofísica. Processamento sísmico. Análise de velocidade. Familias de imagem comum.

# ABSTRACT

Migration algorithms are based on ray theory aproximations or wave equation. Whatever the case, the migration velocity model must be kinematically equivalent to the velocity distribution in the subsurface. The estimation of such a velocity model in depth requires robust algorithm, mainly when the medium presents strong lateral velocity variations. In this case, the migration algorithms themselves can be used to validate the velocity model. This work explores this approach using two migration algorithms. The Kirchhoff migration and downward continuation migration. The theory of common image gathers is discussed and applyed to the Marmousi synthetic data set.

**keyworks**: Geophysics. Seismic processing. Velocity analysis. Common imaging gathers.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 Esquema das trajetórias de empilhamento sobre a Pirâmide de Quéops. 16

Figura 3.1 (a) Afastamento na superfície para um meio homogêneo ; (b) Afastamento na subsuperfície obtido proximo ao refletor. ..... 19

Figura 3.2 (a) SODCIG obtida usando um modelo de velocidade 20% menor que o exato; (b) SODCIG obtida usando um modelo de velocidade exato; (c) SODCIG obtida usando um modelo de velocidade 20% maior que o exato. ..... 20

Figura 3.3 Esquema geométrico de ADCIG, mostrando os ângulos formados pela propagação dos raios associados às ondas planas. ..... 21

Figura 4.1 Esquema utilizado para produzir Famílias de imagem comum no domínio do afastamento. ..... 26

Figura 4.2 (a) Afastamento na superfície para um meio homogêneo ; (b) Esquema padrão de ODCIGs obtidas utilizando modelo de velocidade exato; (c) Exemplo de ODCIG. 27

Figura 4.3 (a) Afastamento na subsuperfície; (b) Esquema padrão de SODCIGs obtidas utilizando modelo de velocidades exato; (c) Exemplo de SODCIG. ..... 28

Figura 4.4 Esquema da produção de ADCIGs. ..... 28

Figura 5.1 (a) Modelo de velocidades exato do dado Marmousi. (b) Modelo de velocidades suavizado 100 vezes. ..... 29

Figura 5.2 (a) Modelo de velocidades suavizado 300 vezes. (b) Modelo de velocidades suavizado 600 vezes. ..... 29

Figura 5.3 (a) Resultado da migração Kirchhoff (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidade exato. (b) Resultado da migração FFD complexa (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidade exato. 30

Figura 5.4 (a) Resultado da migração Kirchhoff (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidades suavizado 100 vezes. (b) Resultado da migração FFD complexa (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidades suavizado 100 vezes. ..... 31

Figura 5.5 (a) Resultado da migração Kirchhoff (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidades suavizado 300 vezes. (b) Resultado da migração

FFD complexa (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidades suavizado 300 vezes. ..... 31

Figura 5.6 (a) Resultado da migração Kirchhoff (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidades suavizado 600 vezes. (b) Resultado da migração FFD complexa (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidades suavizado 300 vezes. ..... 32

Figura 5.7 Campo de velocidades exato do dado Marmousi com destaque em vermelho nos locais de onde foram extraídos os dados para produzir as famílias de imagem comum. ..... 32

Figura 5.8 ODCIGs geradas por migração Kirchhoff no modelo Marmousina (a) na região X=4000m (b) na região X=6000m. ..... 33

Figura 5.9 (a) ODCIGs geradas por migração Kirchhoff no modelo Marmousi com campo de velocidade suavizado 100 vezes (a) na região X=4000m (b) na região X=6000m. 34

Figura 5.10 ADCIG gerada por migração FFD complexa usando modelo Marmousi com campo de velocidades exato. (a) Na região X=4000m. (b) Na região X=6000m. .. 35

Figura 5.11 ADCIG gerada por migração FFD complexa usando modelo Marmousi com campo de velocidades 20% menor que os exato. (a) Na região X=4000m. (b) Na região X=6000m. ..... 36

Figura 5.12 ADCIG gerada por migração FFD complexa usando modelo Marmousi com campo de velocidades 20% maior que os exato. (a) Na região X=4000m. (b) Na região X=6000m. ..... 36

Figura 5.13 Imagem gerada pelo conjunto de traços produzidos pelo empilhamento de cada ADCIGs independentemente. ..... 37

Figura 5.14 Resultado da migração FFD complexa utilizando o modelo de velocidades exato. ..... 37

# LISTA DE ABREVIATURAS

| ABREVIATURA | DESCRIÇÃO |
|---|---|
| ADCIG | Família de Imagem Comum no Domínio do Ângulo de Reflexão |
| AVO | Amplitude versus Afastamento |
| CIG | Família de Imagem Comum |
| CMP | Ponto Médio Comum |
| FFD | Diferenças Finitas e Fourier |
| ODCIG | Família de Imagem Comum com Afastamento na Superfície |
| SODCIG | Família de Imagem Comum com Afastamento na Subsuperfície |
| TF | Transformada de Fourier |

# LISTA DE SÍMBOLOS

| SÍMBOLO | DESCRIÇÃO |
|---|---|
| $A$ | Famílias de imagem comum no domínio do ângulo |
| $c$ | Velocidade de referência |
| $D$ | Valores do dado |
| $H$ | Famílias de imagem comum no domínio do afastamento |
| $h$ | Afastamento |
| $m$ | Ponto médio |
| $P(x, z)$ | Campo de onda |
| $p_{x_h}$ | Parâmetro do raio de afastamento |
| $p_{x_r}$ | Parâmetro do raio do receptor |
| $p_{x_s}$ | Parâmetro do raio da fonte |
| $r$ | Raio |
| $t$ | Tempo |
| $p$ | Razão entre a velocidade de referência e a velocidade do meio |
| $u_r$ | Vetor vagarosidade no receptor |
| $u_s$ | Vetor vagarosidade na fonte |
| $u_{x_m}$ | Componente horizontal do vetor vagarosidade no ponto médio |
| $u_{x_r}$ | Componente horizontal do vetor vagarosidade no receptor |
| $u_{x_s}$ | Componente horizontal do vetor vagarosidade na fonte |
| $v(z, x)$ | Velocidade no refletor |
| $\mathrm{v_{rms}}$ | Velocidade *root mean square* |
| $W$ | Fator de ponderação para correção da amplitude |
| $\alpha_x$ | Ângulo de mergulho do refletor em relação a horizontal |
| $\beta_r$ | Ângulo dos raios de propagação do refletor com relação à vertical |
| $\beta_s$ | Ângulo dos raios de propagação da fonte com relação à vertical |
| $\gamma$ | Ângulo de abertura da reflexão |
| $\Omega_{\xi,\gamma}$ | Subdomínio de integração como função do ângulo de abertura $\gamma$ |

# SUMÁRIO


**1 INTRODUÇÃO . . . . . 13**

**2 MIGRAÇÃO SÍSMICA 2D PRÉ-EMPILHAMENTO . . . . . 15**

2.1 MIGRAÇÃO BASEADA NA TEORIA DO RAIO . . . . . 15

2.2 MIGRAÇÃO BASEADA NA CONTINUAÇÃO DO CAMPO DE ONDAS 16

**3 FAMÍLIA DE IMAGEM COMUM . . . . . 18**

3.1 FAMÍLIA DE IMAGEM COMUM NO DOMÍNIO DO AFASTAMENTO . 18

**3.1.1 Família de imagem comum no domínio do afastamento produzida por migração Kirchhoff . . . . . 19**

**3.1.2 Família de imagem comum no domínio do afastamento produzida por migração baseada na teoria da equação da onda . . . . . 20**

3.2 FAMÍLIAS DE IMAGEM COMUM NO DOMÍNIO DO ÂNGULO DE REFLEXÃO . . . . . 21

**3.2.1 Família de imagem comum no domínio do ângulo de reflexão produzida por migração Kirchhoff . . . . . 21**

**3.2.2 Família de imagem comum no domínio do ângulo de incidência produzida por migração baseada na continuação do campo de ondas** 22

3.2.2.1 ADCIGs produzidas por migração baseada na continuação do campo de ondas antes do imageamento ou método espaço-dados . . . . . 23

3.2.2.2 ADCIGs produzidas por migração baseada na continuação do campo de ondas após o imageamento ou método espaço-imagem . . . . . 24

**4 METODOLOGIA UTILIZADA . . . . . 26**

**5 RESULTADOS . . . . . 29**

5.1 AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE MIGRAÇÃO UTILIZADOS . . . . . 29

5.2 ANÁLISE DAS FAMÍLIAS DE IMAGEM COMUM . . . . . 32

**5.2.1 Análise das famílias de imagem comum produzidas por migração Kirchhoff . . . . . 33**

**5.2.2 Análise das famílias de imagem comum produzidas por migração baseada na equação da onda** . . . . . 34

**6 CONCLUSÃO** . . . . . **38**

**REFERÊNCIAS** . . . . . **39**

**APÊNDICE A – MIGRAÇÃO FFD COM APROXIMAÇÃO DE PADÉ COMPLEXA** . . . . . **41**

A.1 EQUAÇÃO DA ONDA UNIDIRECIONAL . . . . . 41

A.2 FFD COM APROXIMAÇÃO DE PADÉ COMPLEXA . . . . . 42

# 1 INTRODUÇÃO

Quanto mais complexas são as estruturas geológicas da região investigada mais importante é o imageamento sísmico em profundidade. Entretanto, esse tipo de imageamento é completamente dependente da estimativa de modelos de velocidades em profundidade. Por exemplo, onde há forte variação lateral de velocidade, é necessário migração pré-empilhamento utilizando um modelo de velocidade em profundidade o mais detalhado possível. Para estimar esse modelo, utilizam-se métodos cada vez mais sofisticados de análise de velocidade como conversão tempo-profundidade e tomografia. Infelizmente, nem sempre o primeiro modelo de velocidade estimado é o que melhor descreve a variação de velocidade em subsuperfície. Portanto, é necessário ajustar o modelo estimado até que se obtenha uma boa representação da distribuição de velocidade em subsuperfície. Nesse trabalho avaliamos a validação do modelo de velocidades através de famílias de imagem comum geradas a partir da própria migração.

Famílias de imagem comum (CIG) podem ser produzidas tanto por migração baseada no traçamento de raios como por migração baseada na propagação do campo de ondas, também conhecida por migração usando equação da onda. Em ambos os caso, CIGs podem ser produzidas no domínio do afastamento em superfície (ODCIG), no domínio do afastamento em subsuperfície (SODCIG) e convertidas para o domínio do ângulo de incidência (ADCIG).

ODCIGs são geradas por migração baseada no traçamento de raios e envolvem o conceito de eventos planos, enquanto SODCIGs são geradas por migração baseda na equação de ondas e envolvem o conceito de eventos focados. ODCIGs são obtidas no domínio do afastamento na superfície, enquanto SODCIGs são obtidas no domínio do afastamento na subsuperfície. Devido à ambiguidades nas posições dos refletores causadas por múltiplas trajetórias dos raios, as SODCIGs falham em áreas complexas dificultando a análise de velocidade da migração e, consequentemente, a interpretação (SAVA; FOMEL, 2003). Tais problemas podem ser parcialmente contornados quando utilizamos ADCIGs. ADCIGs produzidas tanto por migração baseada no traçamento de raios quanto por migração baseada na equação da onda têm caracteríticas similares. Estas descrevem a refletividade como função do ângulo de incidência no refletor. Todavia, ADCIGs geradas por Kirchhoff são afetadas por artefatos causados pelas limitações no traçamento de raios (SAVA; FOMEL, 2003).

No capítulo seguinte, apresentamos uma discussão sobre as técnicas de migração base-

adas na teoria do raio e técnicas baseadas na equação da onda, assim como, dos métodos escolhidos para representar cada grupo, são eles: migração Kirchhoff e migração por diferenças finitas e Fourier com aproximação de Padé complexa, respectivamente.

Fazemos ainda, no capítulo 3, uma revisão sobre ODCIG/SODCIG e ADCIG, enfatizando suas características e restrições quando produzidas pelos métodos de migração tratados neste trabalho.

Em seguida, mostramos a metodologia utilizada para produzir famílias de imagem comum e por fim, apresentamos uma breve comparação entre os resultados de ambos os métodos de migração utilizados, seguidos de exemplos de CIGs produzidos pelos métodos de migração utilizados a partir dos dados Marmousi como forma de avaliar a sensibilidade e o desempenho da migração.

# 2 MIGRAÇÃO SÍSMICA 2D PRÉ-EMPILHAMENTO

No processamento de dados sísmico uma etapa se destaca em virtude de sua enorme contribuição para a obtenção de uma imagem da subsuperfície condizente com a geologia local. Estamos nos referindo a migração sísmica, a qual tem o objetivo de posicionar corretamente os refletores em subsuperfície, buscando corrigir os efeitos indesejáveis que aparecem durante a propagação do sinal sísmico, colapsando as difrações e assim produzindo uma imagem sísmica que possibilite uma melhor interpretação dos dados sísmicos migrados (MOREIRA NETO, 2004).

Entretanto, situações complexas onde há, principalmente, forte variação lateral de velocidade e incoerência dos dados, a etapa de migração antes do empilhamento ou migração pré-empilhamento é necessária. A migração sísmica pré-empilhamento pode ser efetuada usando tanto métodos basedos na teoria dos raios quanto métodos baseados na equação da onda.

## 2.1 MIGRAÇÃO BASEADA NA TEORIA DO RAIO

Migrações baseadas no traçamento de raios podem valer-se do somatório de amplitudes ao longo das hipérboles formadas pelos diferentes tempos do sinal.

Esse esquema também é conhecido como migração baseada no somatório de amplitudes e consiste em somar a energia dos dados de entrada $(x, t)$ que teríam resultado se a fonte difratora (fonte secundária de Huygens) fosse localizada em um ponto particular na saída espacial $(x, z)$. Tal soma é efetuada ao longo da curva de difração correspondente a fonte de Huygens em cada ponto $(x, z)$.

A curvatura da trajetória hiperbólica é governada pela função velocidade. No caso de um modelo constituído de camadas horizontais a velocidade usada para calcular o tempo de trânsito para a trajetória é a velocidade *Root Mean Squarer* ($\mathrm{v_{rms}}$).

Antes do somatório deve ser considerada a dependência angular da amplitude dada pelo cosseno do ângulo de propagação formado pela direção de propagação e o eixo $z$ e realizar a chamada correção do fator oblíquo, além de considerar o fator de espalhamento esférico que é proporcional à $\left(\frac{1}{vr}\right)^{\frac{1}{2}}$ e à forma do pulso, que por sua vez, possuem amplitude proporcional à raiz quadrada da frequência usada para migração e fase constante de $45^{\mathrm{O}}$ (YILMAZ, 1987).

O método de migração por somatório de difração que incorpora os fatores discutidos anteriormente é chamado migração de Kirchhoff.

Em um meio homogêneo, o tempo de trânsito para calcular a trajetória é dado por

$$t_D = \frac{1}{c}\sqrt{(m-h-x)^2+z^2} + \frac{1}{c}\sqrt{(m+h-x)^2+z^2} \tag{2.1}$$

em que, $m$ é o ponto médio, $h$ é o meio afastamento e $c$ é a velocidade.

Podemos imaginar as trajetórias de empilhamento como sendo as curvas sobre a "Pirâmide de Quéops"mostrada na Figura seguinte.

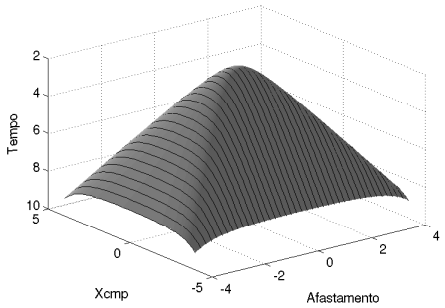



Figura 2.1: Esquema das trajetórias de empilhamento sobre a Pirâmide de Quéops.

A integral de migração é então

$$I(\xi) = \int_{\Omega_\xi} W_h(\xi, m, h) D[t = t_D(\xi, m, h), m, h]\ dm\, dh \tag{2.2}$$

em que $\Omega$ é o domínio de integração na superfície, $\xi = (x, z)$ é o ponto imagem cujo tamanho depende da geometria de aquisição, $D$ são os valores do dado, $t_D$ são as trajetórias de empilhamento dos eventos de difração e $W$ é o fator de ponderação para corrigir a amplitude (BIONDI, 2006).

## 2.2 MIGRAÇÃO BASEADA NA CONTINUAÇÃO DO CAMPO DE ONDAS

Os métodos baseados na equação da onda caracterizam-se por partir do princípio da continuação do campo de ondas para um nível logo abaixo. Para essa tarefa utilizamos a equação da onda unidirecional (Apêndice A) que é dada por:

$$\frac{\partial P(x,\omega)}{\partial z} = \frac{(-i\omega)}{v(x)}\sqrt{1 + \frac{v^2(x)}{\omega^2}\frac{\partial^2}{\partial x^2}}P(x,\omega) \tag{2.3}$$

em que $v(x)$ é a velocidade do meio e $P(x,t)$ é o campo de ondas. Para meios sem variação lateral de velocidade, o operador de raiz quadrada pode ser representado exatamente no domínio de Fourier (GAZDAG, 1978). Para meios com variação lateral de velocidade o

operador admite aproximações, as quais, definem os diferentes métodos de migração, por exemplo, *Split-Step* (STOFFA et al., 1990), Diferênças Finitas (CLAERBOUT, 1985) e Diferênças Finitas e Fourier (RISTOW; RÜHL, 1994).

Nesse trabalho usamos o método de migração por diferênças finitas e Fourier usando aproximação de Padé complexa (FFD complexo) (AMAZONAS, 2007), que tem por característica a utilização da série de Padé complexa (MILLINAZZO; ZALA; BROOKE, 1997) para aproximar o operador de raiz quadrada da equação (2.3). Esse método de migração é capaz de tratar ondas evanescentes e imagear refletores com ângulos superiores a $45^{\mathrm{o}}$.

# 3 FAMÍLIA DE IMAGEM COMUM

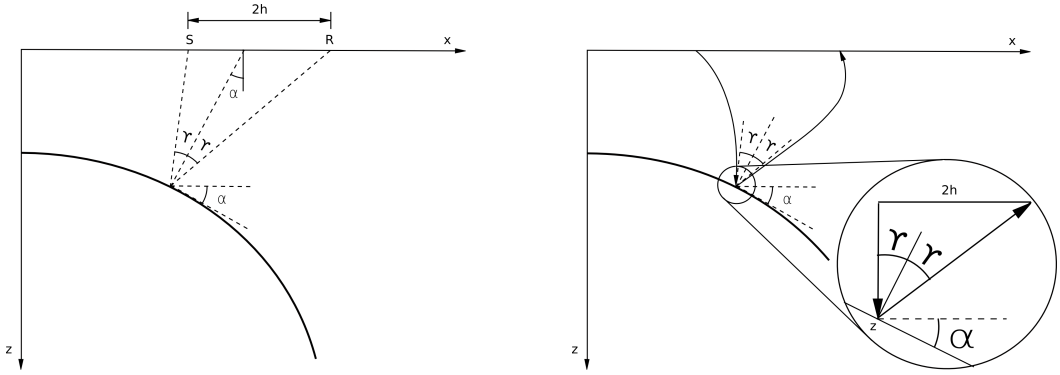
Técnicas de estimativa do modelo de velocidade como conversão tempo-profundidade, tomografia e estereotomografia são necessárias quando precisamos de um modelo de velocidade em profundidade condizente com a disposição das estruturas em subsuperfície.

Em contrapartida, uma das maneiras de validar o modelo de velocidade estimado usando a própria migração, é a utilização de famílias de imagem comum (CIG). Estas são subconjuntos de todas as imagens com localização em um mesmo ponto em subsuperfície. Se as imagens parciais referentes aos subconjuntos são funções do afastamento, estamos falando de família de imagem comum no domínio do afastamento (ODCIG/SODCIG). Já no caso em que as imagens parciais dos subconjuntos são funções dos ângulos de reflexões, estamos nos referindo às famílias de imagem comum no domínio do ângulo de reflexão (ADCIG) (BIONDI, 2006). As ADCIGs são produzidas a partir de ODCIGs/SODCIGs, apenas por transformações geométricas.

## 3.1 FAMÍLIA DE IMAGEM COMUM NO DOMÍNIO DO AFASTAMENTO

Famílias de imagem comum no domínio do afastamento podem ser produzidas tanto por migração baseada na teoria dos raios (ODCIG) quanto por migração baseada na equação de ondas (SODCIG).

Para um modelo de velocidade exato, as ODCIGs geradas por migração Kirchhoff, produzem eventos planos, enquanto que, SODCIGs geradas por migração baseada na equação da onda produzem eventos focados no afastamento nulo (SAVA; FOMEL, 2003). Precisamos diferir também o afastamento usado nas ODCIGs do usado nas SODCIGs, em que, no primeiro caso, estamos tratando do afastamento na superfície chamado parâmetro do dado (Figura (3.1(a))), já no segundo caso, o afastamento é obtido numa região próxima ao refletor onde a velocidade é considerada constante e é chamado parâmetro do modelo (Figura (3.1(b))).




(a) (b)

Figura 3.1: (a) Afastamento na superfície para um meio homogêneo ; (b) Afastamento na subsuperfície obtido proximo ao refletor.

### 3.1.1 Família de imagem comum no domínio do afastamento produzida por migração Kirchhoff

ODCIGs geradas por migração Kirchhoff são simples de calcular, visto que, é a própria integral de migração (equação (2.2)) agindo em subconjuntos de dados separados, onde o afastamento $h$ define cada traço. Assim a equação(2.2) transforma-se na equação (3.1):

$$I(\xi, h) = \int_{\Omega_{\xi,h}} W_h(\xi, m, h) D[t = t_D(\xi, m, h), m, h] \; dm \tag{3.1}$$

em que $\Omega_{\xi,h}$ é o subdomínio de integração para $\xi = (x, z)$ e $h$ (BIONDI, 2006).

Entretanto, a migração a partir de dados com afastamento comum produz artefatos devido as direções de propagação das reflexões não poderem ser determinadas a partir do tempo de transito, uma vez que, podem ocorrer ambiguidades na trajetória dos raios (BIONDI, 2006). Para conhecermos essas direções de propagação precisamos determinar todas as componentes do vetor vagarosidade na localização da fonte $u_s$ e do receptor $u_r$. Se assumirmos que a velocidade é conhecida, tais componentes são determinadas apenas pelas componentes horizontais $u_{x_s}$ e $u_{x_r}$.

Essas componentes são relacionadas no domínio ponto médio afastamento da seguinte forma:

$$u_{x_s} = \frac{u_{x_m} - u_{x_h}}{2} \qquad u_{x_r} = \frac{u_{x_m} + u_{x_h}}{2} \; .$$

Todavia, conhecendo somente $u_{x_m}$, não é suficiente para determinar $u_{x_s}$ e $u_{x_r}$, mas quando não ocorrem triplicações da frente de onda, a migração afastamento constante produz bons resultados, pois a ambiguidade é resolvida automaticamente pela diferença nos tempos de chegada das reflexões.

### 3.1.2 Família de imagem comum no domínio do afastamento produzida por migração baseada na teoria da equação da onda

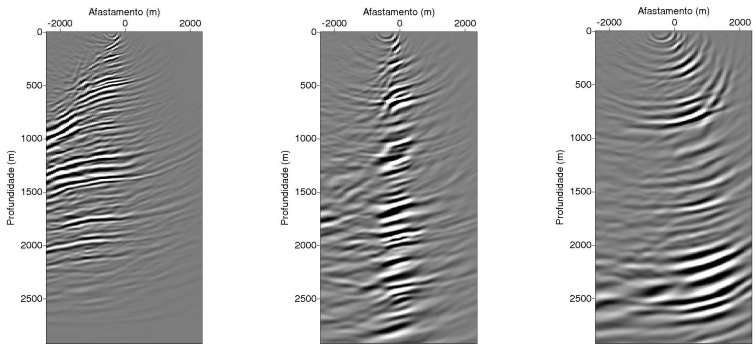
Diferente das ODGICs produzidas por Kirchhoff, as SODCIGs produzidas por continuação do campo de ondas apresentam, para um campo de velocidades exato, eventos focados no afastamento nulo. Não é simples estabelecer algum tipo de comparação entre ODGICs e SODCIGs, visto que, as formas de construção de ambas as famílias são completamente diferentes, já que o afastamento tratado nas ODCIGs é parâmetro do dado e corresponde a distância entre fonte e receptor na superfície, enquanto que, o afastamento tratado nas SODCIGs é um parâmetro do modelo e é calculado nas proximidades do refletor onde podemos assumir a velocidade constante.

SODCIGs podem ser produzidas a partir da condição de imagem descrita na expressão (SAVA; FOMEL, 2005)

$$I(\xi, \mathbf{h}) = \sum_{\omega} P_s(x - \mathbf{h}, z, \omega) P_r^*(x + \mathbf{h}, z, \omega) \ , \tag{3.2}$$

em que, $P_s$ é o campo de ondas da fonte, $P_r^*$ é o campo de ondas do receptor, $\omega$ são as frequências usadas, $\xi$ é o ponto imagem, $\mathbf{h} = [h_1, h_3]$ é um vetor que descreve a posição de separação entre fonte e receptor em subsuperfície e $(^*)$ representa o complexo conjugado.

Pela própria forma de construção das SODCIGs, estas produzem eventos focados quanto mais adequado for o campo de velocidade. Quando os valores de velocidades estimados ultrapassam os valores de velocidades exatos, a energia é melhor focalizada para afastamentos positivos, já quando os valores de velocidades estimados são menores que os valores exatos, a focalização é melhor para afastamentos negativos, como podemos observar nas Figuras (3.2(a), 3.2(b) e 3.2(c)).




(a) (b) (c)

Figura 3.2: (a) SODCIG obtida usando um modelo de velocidade 20% menor que o exato; (b) SODCIG obtida usando um modelo de velocidade exato; (c) SODCIG obtida usando um modelo de velocidade 20% maior que o exato.

Todavia, SODCIGs são afetadas por artefatos quando existe forte variação lateral

de velocidade, tendo em vista que as múltiplas reflexões causam ambiguidade no que diz respeito a posição dos refletores. Por essa razão, para métodos baseados na equação da onda, a escolha mais natural para validar modelos de velocidades são as familias de imagem comum no domíno do ângulo de incidência (ADCIG).

## 3.2 FAMÍLIAS DE IMAGEM COMUM NO DOMÍNIO DO ÂNGULO DE REFLEXÃO

Problemas observados para ODCIGs podem ser aliviados usando ADCIGs, que são representações das imagens sísmicas organizadas em função do ângulo de incidência no ponto de reflexão. ADCIGs podem ser produzidas por migração Kirchhoff ou por migração baseada na continuação do campo de ondas. Em ambos os casos apresentam caracteríticas similares, pois descrevem apenas a refletividade como função do ângulo de incidência no refletor.

### 3.2.1 Família de imagem comum no domínio do ângulo de reflexão produzida por migração Kirchhoff

O imageamento Kirchhoff convencional no domínio do afastamento está baseado numa parametrização em função do ponto médio e afastamento dos dados. O imageamento no domínio do ângulo de incidência é uma parametrização das superfícies isócronas da migração, em função do ângulo no ponto de reflexão. Tais ângulos são mostrados na Figura (3.2.1).

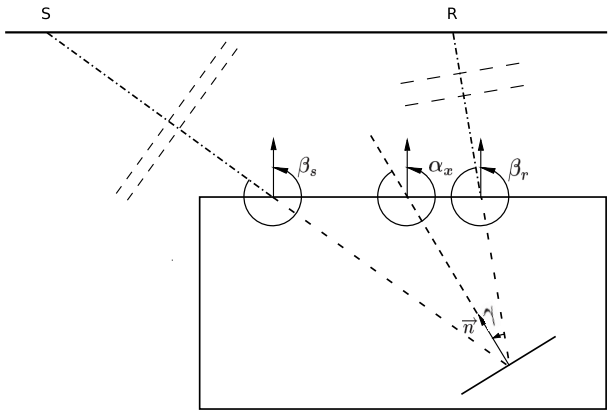



Figura 3.3: Esquema geométrico de ADCIG, mostrando os ângulos formados pela propagação dos raios associados às ondas planas.

O ângulo de mergulho do refletor $\alpha_x$ e o ângulo de incidência $\gamma$ estão relacionados com os ângulos dos raios de propagação da fonte $\beta_s$ e do receptor $\beta_r$ da seguinte forma:

$$\gamma = \frac{\beta_r - \beta_s}{2} \qquad \alpha_x = \frac{\beta_s + \beta_r}{2}$$

O imageamento kirchhoff no domínio do ângulo de incidência é dado pela integral da equação (3.1) sobre $\alpha_x$ na constante $\gamma$

$$I(\xi,\gamma) = \int_{\Omega_{\xi,\gamma}} W_\gamma(\xi,\alpha_x,\gamma) D[t = t_D(\xi,\alpha_x,\gamma), X_m(\xi,\alpha_x,\gamma), X_h(\xi,\alpha_x,\gamma)]\ d\alpha_x \qquad (3.3)$$

em que $\Omega_{\xi,\gamma}$ são os subdomínios de integração como função do ângulo de incidência $\gamma$ (BIONDI, 2006).

As ADCIGs calculadas pela migração Kirchhoff podem ser afetadas por artefatos quando ocorrem múltiplas trajetórias dos raios, enquanto que o cálculo delas por migração baseada na continuação do campo de ondas é imune a esses artefatos (BIONDI, 2006).

### 3.2.2 Família de imagem comum no domínio do ângulo de incidência produzida por migração baseada na continuação do campo de ondas

Usando a idéia de propagar o campo de ondas a partir de fonte e receptor até a camada logo abaixo, é possível produzir SODCIGs. Neste caso, as informações nas direções de propagação, tanto da onda incidente quanto da onda refletida, estão disponíveis a partir do campo de ondas para todos os níveis em profundidade. Logo, é possível gerar ADCIGs a partir de migração baseada na equação da onda. Estas são obtidas mediante transformações geométricas aplicadas sobre SODCIGs.

No entanto, quando os mergulhos geológicos são íngrimes, o cálculo das ADCIGs usando afastamento horizontal em subsuperfície não reproduzem famílias úteis, pois as SODCIGs degeneram-se e borram seu foco para afastamento nulo. Nessa situação, para obter melhores resultados na presença de estruturas complexas, precisamos calcular SODCIGs como função do afastamento vertical (BIONDI, 2006), entretanto, essa proposta não foi avaliada neste trabalho.

ADCIGs podem ser produzidas antes do imageamento, também conhecido como método espaço-dados ou após o imageamento, também conhecido como método espaço-imagem. Como ambos os métodos dependem da decomposição do campo de ondas em componentes de ondas planas, essa decomposição antes ou depois do imageamento é a principal diferença entre os dois métodos.

#### 3.2.2.1 ADCIGs produzidas por migração baseada na continuação do campo de ondas antes do imageamento ou método espaço-dados

O campo de ondas pode ser decomposto em ondas planas antes do imageamento de acordo com os parâmetros do raio de afastamento $p_{x_h}$, aplicando empilhamento oblíquo ao

longo do eixo de afastamento, produzindo componentes de ondas planas chamadas ondas planas de afastamento. Uma onda plana de afastamento pode ser propagada independentemente, desde que não haja variação lateral de velocidade. Cada imagem produzida por tal procedimento corresponde a um parâmetro do raio de afastamento e assim as funções $ADCIG(p_{x_h})$ podem ser extraídas de todo o cubo de dados antes do empilhamento.

Mesmo quando ocorre certa variação lateral de velocidade, ao ponto de tornar a propagação de ondas planas independentes imprecisa, a decomposição do campo de ondas planas de afastamento é útil, desde que seja empilhado obliquamente e repetindo o processo para cada nível em profundidade em vez de somente na superfície como nos métodos convencionais.

O cálculo das ADCIGs antes do imageamento usando migração por continuação do campo de ondas a partir de fonte e receptor é simples. Todo o campo de ondas pré-empilhado está disponível em todos os níveis em profundidade usando a raiz quadrada da equação (A.6). A imagem é obtida extraindo valores do campo de ondas para o tempo-zero.

O processo de migração usado para produzir ADCIGs pode ser visto esquematicamente assim

$$P(\omega, m, h; z = 0) \stackrel{Raiz}{\Longrightarrow} P(\omega, m, h; z)$$
$$P(\omega, m, h; z) \stackrel{Emp.obliquo}{\Longrightarrow} P(\tau, m, p_h; z)$$
$$P(\tau, m, p_h; z) \stackrel{Imageamento}{\Longrightarrow} P(\tau = 0, m, p_h; z)$$

em que a continuação para baixo foca o campo de ondas na direção afastamento nulo e caso a velocidade esteja correta, a imagem é extraída do valor do campo de ondas no tempo zero. Continuação para baixo, empilhamento oblíquo e imageamento são passos repetidos para todos os níveis em profundidade.

Para um campo de velocidades exato, os refletores são imageados como eventos planos devido o empilhamento oblíquo transformar impulsos de banda limitada, localizados onde há afastamento nulo, em eventos planos. Se a função velocidade é mais baixa que a correta, as reflexões curvarão para cima, se a velocidade é maior que a correta, as reflexões curvarão para baixo. Estas características são a base para a validação do modelo de velocidade.

Quando usamos migração perfil de tiro comum, raramente calculamos ADCIGs antes do imageamento, visto que, é necessário obter a decomposição do campo de ondas para cada tiro independentemente.

ADCIGs calculadas antes do imageamento são funções do parâmetro de raio de afastamento $p_{x_h}$, facilmente relacionado com o ângulo de reflexão $\gamma$ e com o ângulo de mergulho do refletor $\alpha_x$. Parâmetros do raio de afastamento podem ser expressados como funções

dos parâmetros do raio da fonte e do receptor $p_{x_s}$ e $p_{x_r}$, respectivamente:

$$p_{x_h} = p_{x_r} - p_{x_s} \ , \tag{3.4}$$

por sua vez, os parâmetros da fonte e do receptor são funções dos ângulos de propagação dos raios da fonte $\beta_s$, do receptor $\beta_r$ e da velocidade do refletor $v(z,x)$ como segue:

$$p_{x_s} = \frac{\text{sen}\beta_s}{v(z,x)} \qquad \text{e} \qquad p_{x_r} = \frac{\text{sen}\beta_r}{v(z,x)} \ . \tag{3.5}$$

Substituindo a equação (3.5) na equação (3.4) e aplicando algumas identidades trigonométricas, temos:

$$p_{x_h} = \frac{2\text{sen}\gamma \cos\alpha_x}{v(z,x)} \ , \tag{3.6}$$

que liga o parâmetro do raio de afastamento ao ângulo de incidência $\gamma$ e ao mergulho do refletor $\alpha_x$. No entanto, quando as variações espaciais de velocidade são significantes e a estrutura geológica é complexa, torna-se difícil conhecer mergulhos com precisão, em locais onde tais mergulhos mudam rapidamente.

#### 3.2.2.2 ADCIGs produzidas por migração baseada na continuação do campo de ondas após o imageamento ou método espaço-imagem

O cálculo de ADCIGs após o imageamento é conveniente tanto para migração fonte-receptor quanto para migração perfil de tiro comum. Sava e Fomel (2003) reconheceram que para migração fonte-receptor, a decomposição em ondas planas pode ser realizada depois do imageamento tão bem quanto antes do imageamento. Rickett e Sava (2002) aplicaram a mesma idéia para migração perfil de tiro comum, onde era possível calcular ADCIGs depois da continuação do campo de ondas para baixo e do imageamento.

Os métodos para calcular ADCIGs após o imageamento estão baseados na decomposição em ondas planas usando empilhamento oblíquo ao longo do eixo de afastamento igual como o método espaço-dados, a diferença é que os mergulhos ao longo do afastamento são afetados pela transformação tempo-profundidade ocorrida no imageamento. Portanto, o parâmetro mergulho-afastamento está relacionado ao ângulo de incidência $\gamma$ diferentemente do caso anterior. Com a aplicação da condição de imagem, a transformação de tempo para profundidade depende dos mergulhos locais e da velocidade de propagação local.

No domínio $f-k$, a transformação é dada pela raiz quadrada (equação A.6) que pode ser ainda expressa em função dos ângulos $\beta_s$ e $\beta_r$ substituindo $k_z$ por:

$$k_z = -\frac{\omega}{v(z,x)}(\cos\beta_r + \cos\beta_s) \tag{3.7}$$

Lembrando que $k_{x_h} = p_{x_h}\omega$ e substituindo na equação (3.7) e na equação (3.6), temos então que:

$$k_{x_h} = -k_z \tan\gamma \ , \tag{3.8}$$

mostrando a ligação entre o mergulho no domínio afastamento-profundidade ($k_{x_h}/k_z$) e o ângulo de incidência ($\tan\gamma$). Note que o ângulo de mergulho $\alpha_x$ e a velocidade $v(z,x)$ não aparecem na equação (3.8). Isso permite que a transformação de afastamento para ângulo possa ser realizada precisamente no domínio do número de onda. Note também que a ausência da velocidade local $v(z,x)$ não produz resultados independentes da velocidade local da migração, visto que, essa dependência é dada pelo número de onda vertical $k_z$.

A sensibilidade da estimativa de $\gamma$ é a mesma da velocidade local, independente de $\gamma$ ser estimado atravéz de $p_{x_h}$ usando a equação (3.6) ou diretamente pela equação (3.8) (BIONDI, 2006).

# 4 METODOLOGIA UTILIZADA

Utilizando Famílias de imagem comum no domínio do afastamento em superfície, no domínio do afastamento em subsuperfície e no domíno do ângulo de incidência podemos validar o modelo de velocidade usado na migração. Para nos certificarmos disso, usando migração Kirchhoff, produzimos ODCIGs a partir da expressão

$$I(\xi, h) = \int_{\Omega_{\xi,h}} W_h(\xi, m, h) D[t = t_D(\xi, m, h), m, h] \, dm \,, \tag{4.1}$$

em que $W$ é o fator de ponderação da amplitude, $D$ é o dado registrado, $t_D$ é o tempo da superfície de empilhamento dos eventos de difração, $h$ é o afastamento, $m$ é o ponto médio e $\xi = (z, x)$ é a posição em profundidade. Os procedimentos executados pela equação (4.1) podem ser mostrados esquematicamente na Figura (4)

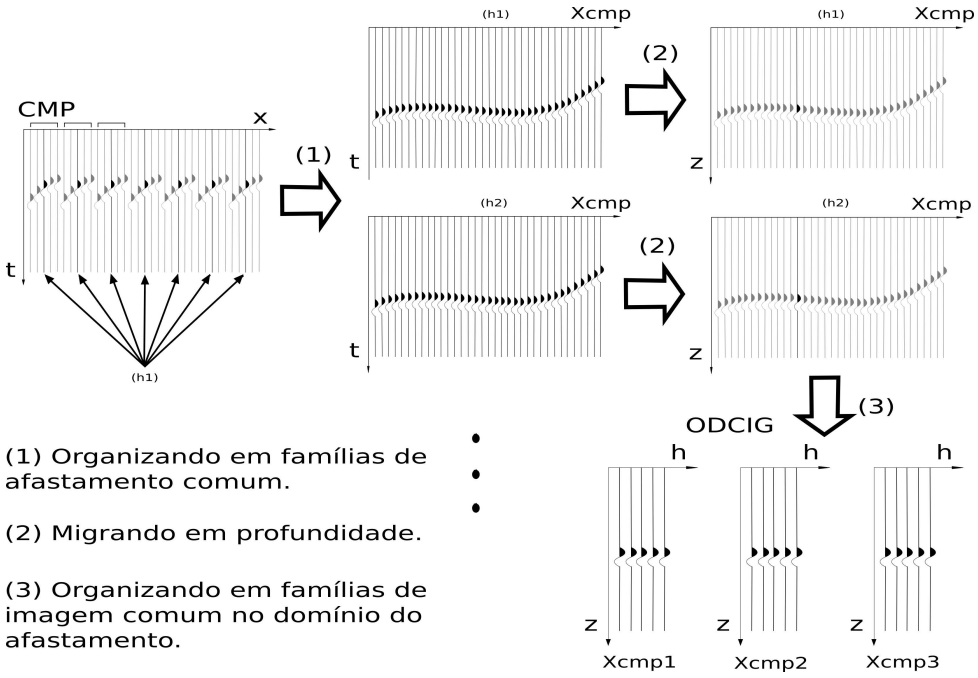
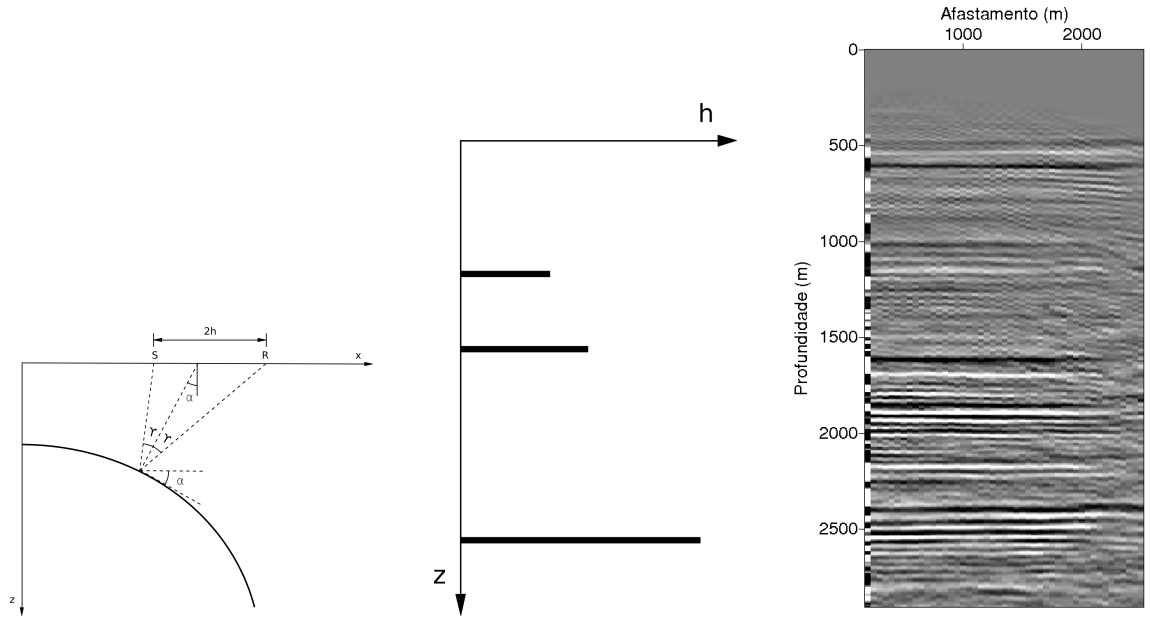



Figura 4.1: Esquema utilizado para produzir Famílias de imagem comum no domínio do afastamento.

Em um meio homogêneo, o parâmetro afastamento que corresponde as ODCIGs é mostrado na Figura (4.2(a)) e nessas circunstâncias, o resultado da migração usando a condição de imagem mostrada na equação (4.1), com um modelo de velocidade exato,

seria equivalente ao mostrado no esquema da Figura (4.2(b)). Na Figura (4.2(c)) podemos observar um exemplo característico de ODCIG, calculado com dados do modelo Marmousi.




(a) (b) (c)

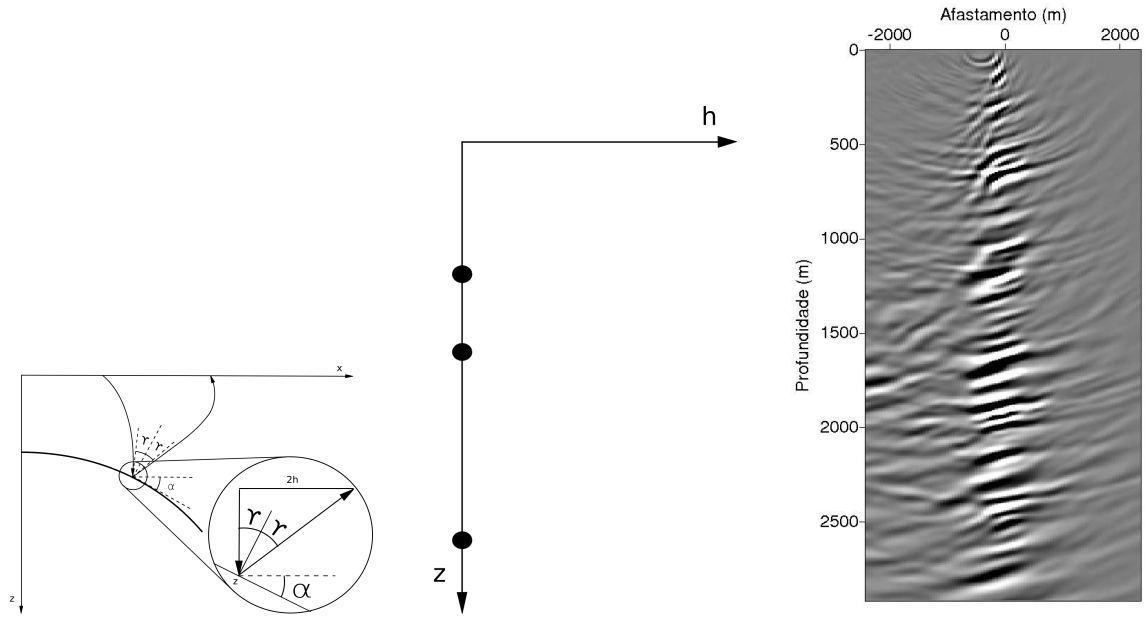
Figura 4.2: (a) Afastamento na superfície para um meio homogêneo ; (b) Esquema padrão de ODCIGs obtidas utilizando modelo de velocidade exato; (c) Exemplo de ODCIG.

Fazendo uso de migrações baseadas na equação da onda, produzimos famílias de imagem comum no domínio do afastamento em subsuperfície, usando a condição de imagem descrita pela expressão

$$I(\xi, \mathbf{h}) = \sum_{\omega} P_s(x - \mathbf{h}, z, \omega) P_r^*(x + \mathbf{h}, z, \omega) \ , \tag{4.2}$$

em que $P_s$ é o campo de ondas da fonte, $P_r^*$ é o campo de ondas do receptor, $\omega$ são as frequências usadas, $\xi$ é o ponto imagem, $\mathbf{h}$ é o afastamento em subsuperfície e $(^*)$ representa o complexo conjugado (SAVA; FOMEL, 2005).

Neste caso, os campos da fonte e do receptor são propagados para baixo e então, a condição de imagem em função dos afastamentos em cada nível em profundidade gera painéis de imagem comum com eventos focados no afastamento $h$ em subsuperfície, SODCIG. Esse mecanismo é repetido para todos os pares fonte-receptor. Em seguida, a Figura (4.3(a)) mostra um esquema para famílias de imagem comum no domínio do afastamento em subsuperfície (SODCIG). A Figura (4.3(b)) mostra o comportamento padrão das SODCIGs para um campo de velocidade exato caracterizado por eventos focados no ponto imagem. A Figura (4.3(c)) mostra um exemplo de SODCIG calculada para o dado Marmousi na mesma posição em superfície, em que foi calculado o exemplo mostrado na Figura (4.2(c)).




(a) (b) (c)

Figura 4.3: (a) Afastamento na subsuperfície; (b) Esquema padrão de SODCIGs obtidas utilizando modelo de velocidades exato; (c) Exemplo de SODCIG.

A partir das famílias de imagens comuns no domínio do afastamento em subsuperfície (SODCIGs), podem ser produzidas famílias de imagem comum no domínio do ângulo de incidência da onda. Uma forma de gerar ADCIGs é atraves do empilhamento oblíquo, ou seja, atraves da soma ao longo de retas oblíquas mostrada na seguinte expressão (SAVA; FOMEL, 2003)

$$A(z, \tan\theta) = \int\int H(z + \tan\theta.\mathbf{h}, \mathbf{h})\ d\mathbf{h}\ , \tag{4.3}$$

em que $(H)$ representa as SODCIGs e $(A)$ representa as ADCIGs.

Um esquema dessa soma pode ser visto na Figura (4), onde a soma ao longo de reta com diferentes ângulos no painel à esquerda produzem eventos horizontalizados ou não no painel à direita. Quanto mais focados forem o eventos à esquerda mais horizontalizados estarão os eventos à direita.

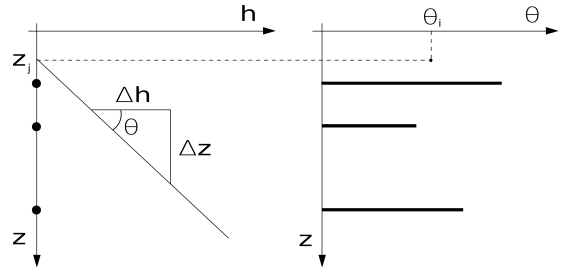


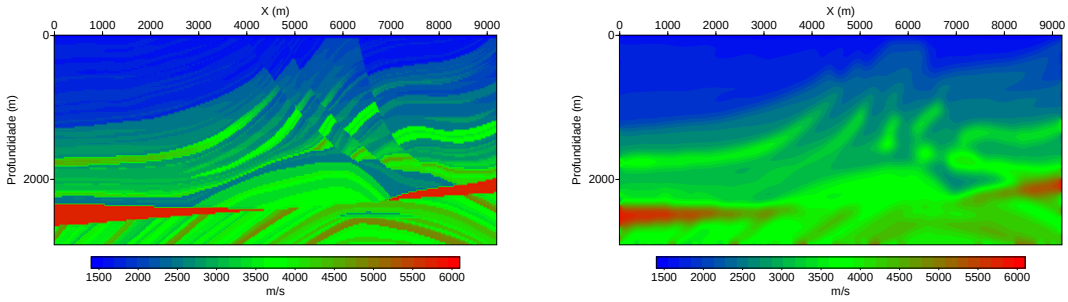

Figura 4.4: Esquema da produção de ADCIGs.

# 5 RESULTADOS

A princípio fazemos uma comparação entre o método Kirchhoff e o método FFD com aproximação de Padé complexa enfatizando as vantagens e desvantagens de ambos os métodos. Para realização dos testes comparativos utilizamos o conjunto de dados sintéticos Marmousi que tem por característica principal uma forte variação de velociade, além da presença de falhas e estruturas anticlinais.

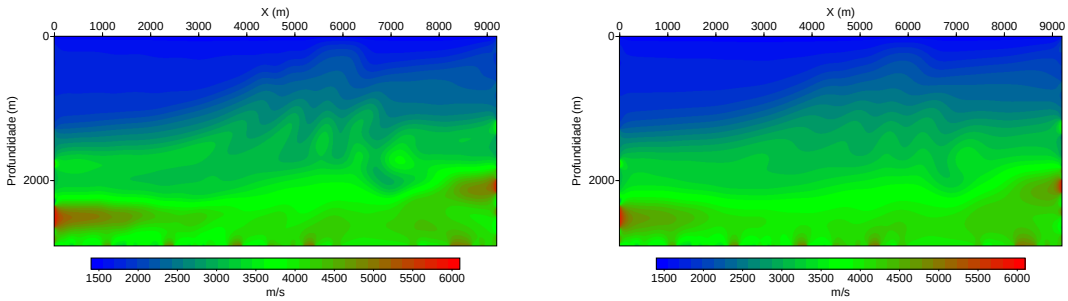
## 5.1 AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE MIGRAÇÃO UTILIZADOS

Comparamos, primeiramente, os resultados dos dois tipos de migração obtidos utilizando o campo de velocidade exato, mostrado na Figura (5.1(a)). A Figura (5.3(a)) mostra o resultado da migração Kirchhoff, enquanto a Figura (5.3(b)) mostra o resultado da migração FFD com aproximação de Padé complexa.



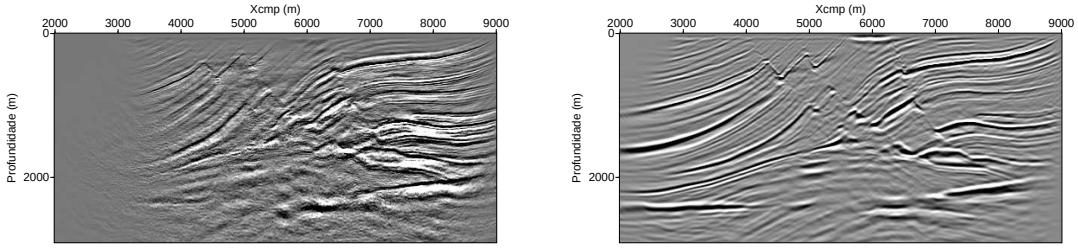

(a) (b)

Figura 5.1: (a) Modelo de velocidades exato do dado Marmousi. (b) Modelo de velocidades suavizado 100 vezes.




(a) (b)

Figura 5.2: (a) Modelo de velocidades suavizado 300 vezes. (b) Modelo de velocidades suavizado 600 vezes.




(a) (b)

Figura 5.3: (a) Resultado da migração Kirchhoff (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidade exato. (b) Resultado da migração FFD complexa (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidade exato.

Podemos observar que a migração Kirchhoff (Figura (5.3(a))), apesar de mostrar as três falhas geológicas, as intrusões de sal e a possível rocha reservatório, característicos do modelo Marmousi, apresenta uma imagem mal definida, isso ocorre devido ao fato do algoritmo de migração Kirchhoff ter dificuldade em tratar meios com forte variação de velocidade.

No caso da migração FFD complexa, ao contrário da migração Kirchhoff, o algoritmo é capaz de acomodar fortes variações laterais de velocidade, como mostrado na Figura (5.3(b)), uma vez que a imagem é formada a partir da depropagação do campo de ondas da fonte e do receptor para cada nível em profundidade $(z + \Delta z)$ até o ponto de encontro dos dois campos, onde a imagem é produzida a partir da correlação de ambos. Dessa forma, há uma correção da velocidade para cada nível em profundidade.

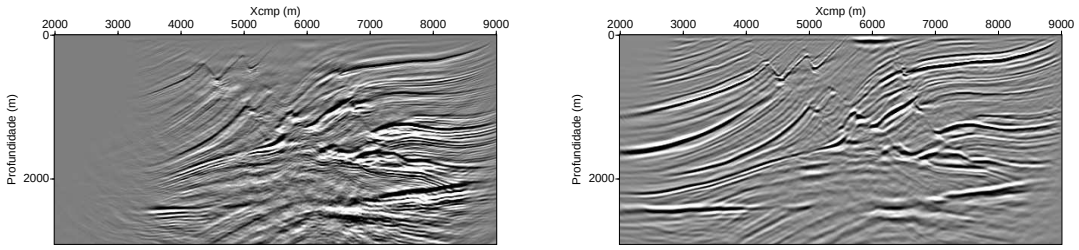
Na prática, é muito complicado e honeroso obter informações a cerca da distribuição de velocidade em subsuperfície com precisão, ou seja, por melhor que seja o método usado para estimar os valores de velocidade, esses valores ainda terão uma variação suave. Partindo desse princípio, suavizamos o campo de velocidade 100 vezes, com o intuito de simular uma situação real, usando o seguinte algorítimo:

$$\begin{aligned} V(i,j) &= \frac{1}{16}\left(V(i-1,j-1)+V(i+1,j+1)+V(i-1,j+1)+V(i+1,j-1)\right) \\ &+ \frac{1}{8}\left(V(i+1,j)+V(i,j+1)+V(i-1,j)+V(i,j-1)\right) + \frac{1}{4}V(i,j)\ . \end{aligned}$$

O resultado dessa suavização, mostrado na Figura (5.1(b)), apresenta uma distorção bem acentuada dos valores de velocidade, o que certamente implicará em mudanças nos resultados das migrações.

A Figura (5.4(a)) mostra o resultado da migração Kirchhoff usando o campo de velocidade suavizado 100 vezes. Neste caso, a migração apresenta um desempenho bem melhor do que quando usamos o campo de velocidade exato, ou seja, podemos observar uma melhor focalização dos alvos estratigráficos, além de definir melhor o contorno do

anticlinal inserido na base do modelo e das estruturas salinas. Para o mesmo campo de velocidade, aplicamos a migração FFD complexa, Figura (5.3(b)), e quase não percebemos modificações no resultado, o que prova a estabilidade da método de migração frente a uma ligeira pertubação dos valores de velocidades, além de uma melhor definição das estruturas geológicas.

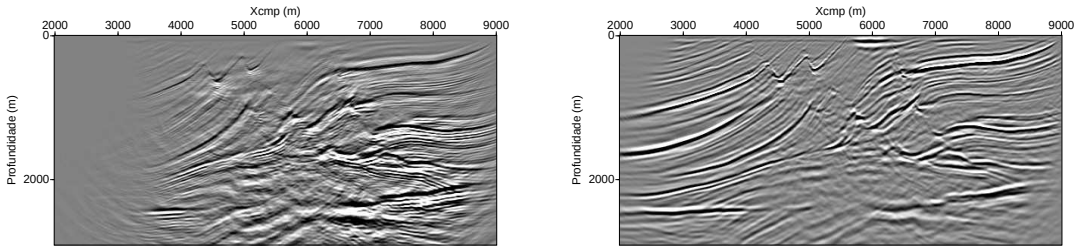



(a) (b)

Figura 5.4: (a) Resultado da migração Kirchhoff (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidades suavizado 100 vezes. (b) Resultado da migração FFD complexa (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidades suavizado 100 vezes.

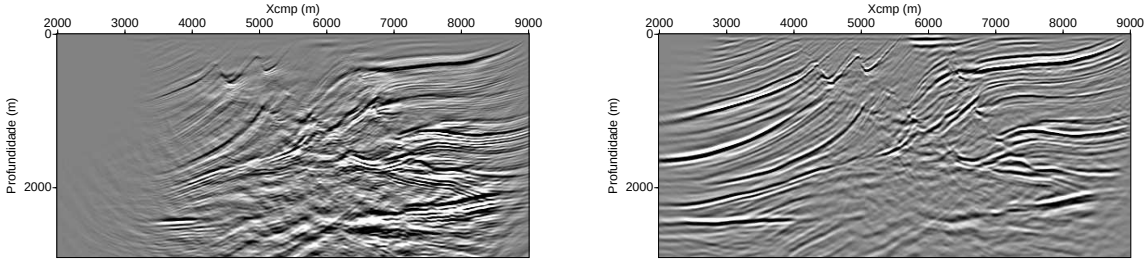
De posse desses resultados, resolvemos aplicar ambos os métodos de migrações usando campos de velocidades cada vez mais suavizados (Figuras (5.2(a)) e (5.2(b))).

Podemos perceber nas Figuras (5.5(a)) e (5.6(a)) que a migração Kirchhoff também é comprometida quando o campo de velocidade é bastante suavizado, principalmente nos locais de maior complexidade geológica. Já no caso da migração FFD complexa (Figuras (5.5(b)) e (5.6(b))), poucas são as alterações geradas na imagem, para campos cada vez mais suavizados, confirmando a estabilidade do algoritmo de migração.




(a) (b)

Figura 5.5: (a) Resultado da migração Kirchhoff (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidades suavizado 300 vezes. (b) Resultado da migração FFD complexa (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidades suavizado 300 vezes.




(a) (b)

Figura 5.6: (a) Resultado da migração Kirchhoff (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidades suavizado 600 vezes. (b) Resultado da migração FFD complexa (seção de afastamento nulo) do dado Marmousi com o modelo de velocidades suavizado 300 vezes.

## 5.2 ANÁLISE DAS FAMÍLIAS DE IMAGEM COMUM

Diante desses resultados, continuamos nossa avaliação fazendo uso de famílias de imagem comum, que partem do princípio da redundância dos dados, ou seja, se algumas informações são obtidas de um mesmo local em subsuperfície, estas devem mostrar um padrão de comportamento. Nesse caso o padrão é caracterizado por eventos alinhados construídos a partir de CIGs nas formas descritas no Capítulo (3).

Para essa avaliação, destacamos duas regiões diferentes do modelo Marmousi que estão representadas em vermelho na Figura (5.2). A primeira linha localizada na posição $X = 4000m$ onde o modelo é geologicamente mais simples e a segunda linha em $X = 6000m$ onde o modelo é mais complexo, uma vez que nessa região são representadas duas falhas e um anticlinal.

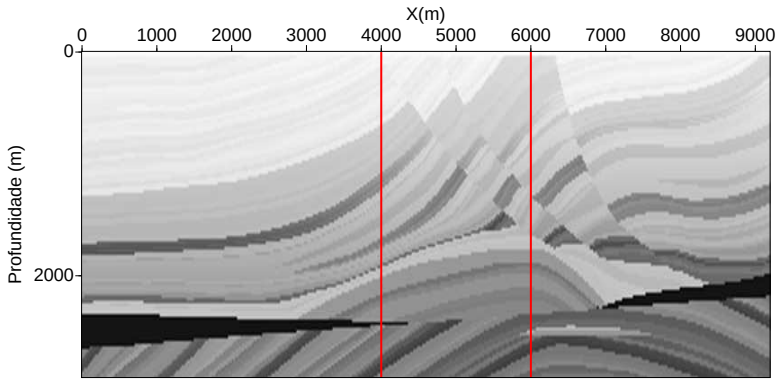
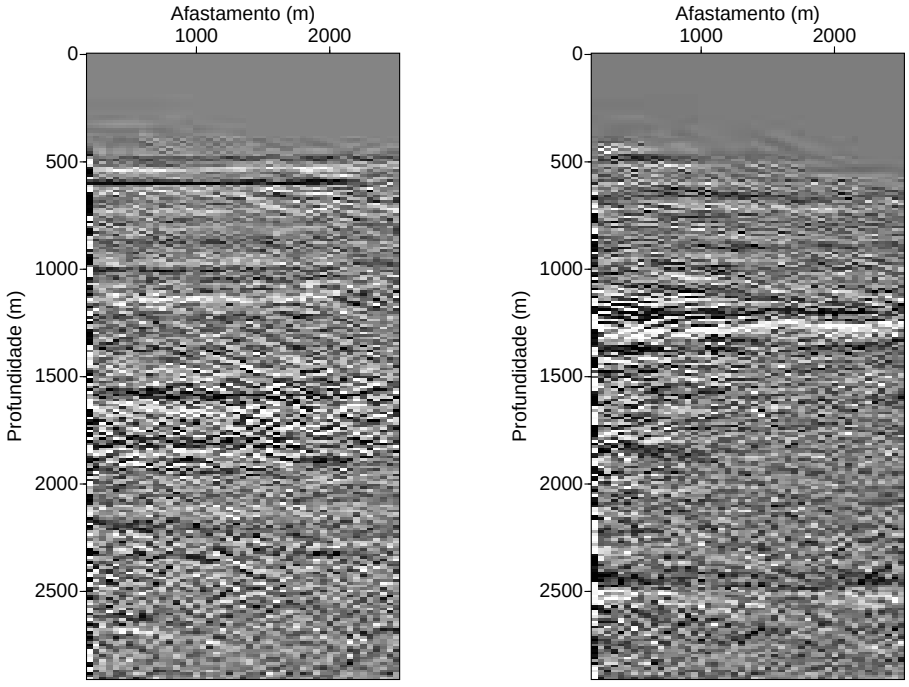



Figura 5.7: Campo de velocidades exato do dado Marmousi com destaque em vermelho nos locais de onde foram extraídos os dados para produzir as famílias de imagem comum.

### 5.2.1 Análise das famílias de imagem comum produzidas por migração Kirchhoff

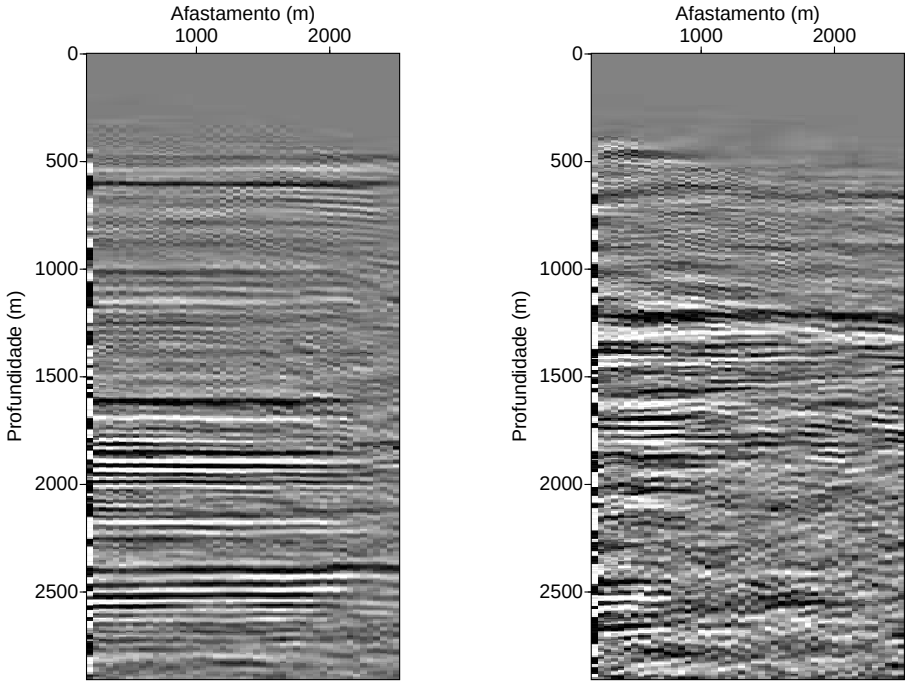
Utilizando valores do campo de velocidade exato, apresentamos os resultados das ODCIGs produzidas pela migração Kirchhoff, Figuras (5.8(a)) e (5.8(b)). Como podemos observar, é pouco visível a linearidade nas ODCIGs, comprovando que a migração Kirchhoff é pouco eficiente com modelos que apresentam forte variação de velocidade.

Então, produzimos ODCIGs (Figuras (5.9(a)) e (5.9(b))) usando o modelo de velocidade suavizado 100 vezes. Aqui podemos observar um padrão de linearidade mais acentuado, corroborando a hipótese anterior de que a migração Kirchhoff apresenta melhores resultados para modelos de velocidade suaves.




(a) (b)

Figura 5.8: ODCIGs geradas por migração Kirchhoff no modelo Marmousina (a) na região X=4000m (b) na região X=6000m.




(a) (b)

Figura 5.9: (a) ODCIGs geradas por migração Kirchhoff no modelo Marmousi com campo de velocidade suavizado 100 vezes (a) na região X=4000m (b) na região X=6000m.

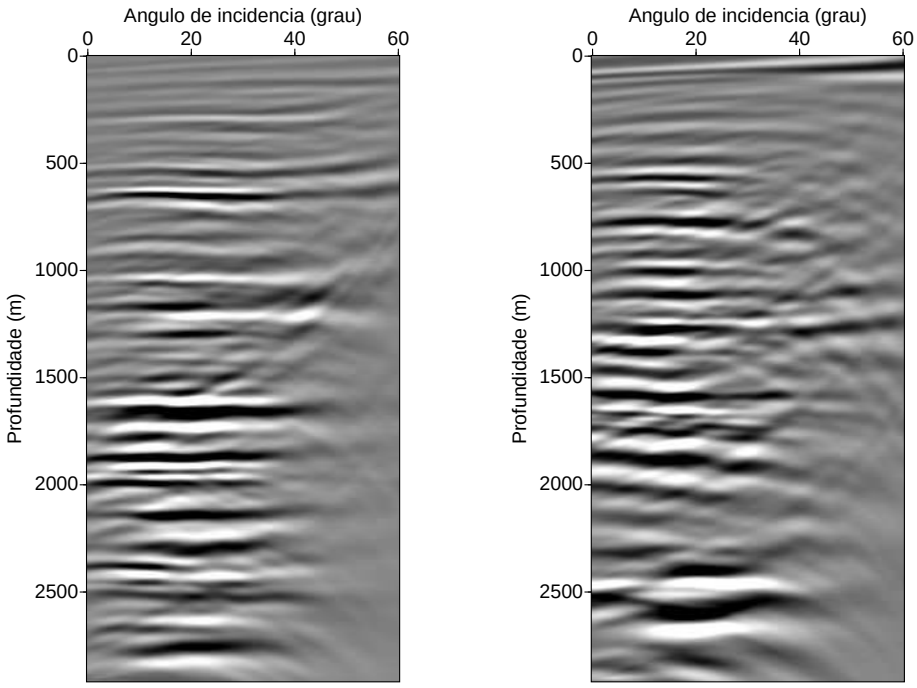
### 5.2.2 Análise das famílias de imagem comum produzidas por migração baseada na equação da onda

Para avaliar a sensibilidade do método FFD complexo produzimos ADCIGs do modelo Marmousi usando a equação (4.3) nas mesmas regiões que escolhemos para testar a migração Kirchhoff. Primeiramente, utilizamos o campo de velocidade exato, gerando os resultados mostrados nas Figuras (5.10(a)) e (5.10(b)). Em seguida, nas Figuras (5.11(a)) e (5.11(b)), mostramos ADCIGs geradas com campo de velocidades com valores 20% menores, e ainda, nas Figuras (5.12(a)) e (5.12(b)) mostramos ADCIGs geradas com campo de velocidade com valores 20% maiores. Diante desses resultados, podemos observar que a medida que aumentamos os valores de velocidade usados na migração os eventos nas ADCIGs tendem a curvar-se para baixo, enquanto que, quando diminuímos os valores das velocidades os eventos tendem a curvar-se para cima. Essa perturbação nos eventos das ADCIGs para campos de velocidades alterados também mostra a sensibilidade do método de migração FFD complexo.

Levando em consideração que, para cada $Xcmp$, podemos produzir uma ADCIG e que os eventos mostrados nas ADCIGs estarão mais alinhados quanto melhor for o campo de velocidades (mais próximo do exato), então, podemos somar os traços ao longo dos ângulos para cada ADCIG recuperando a imagem afastamento-nulo. Neste caso se a

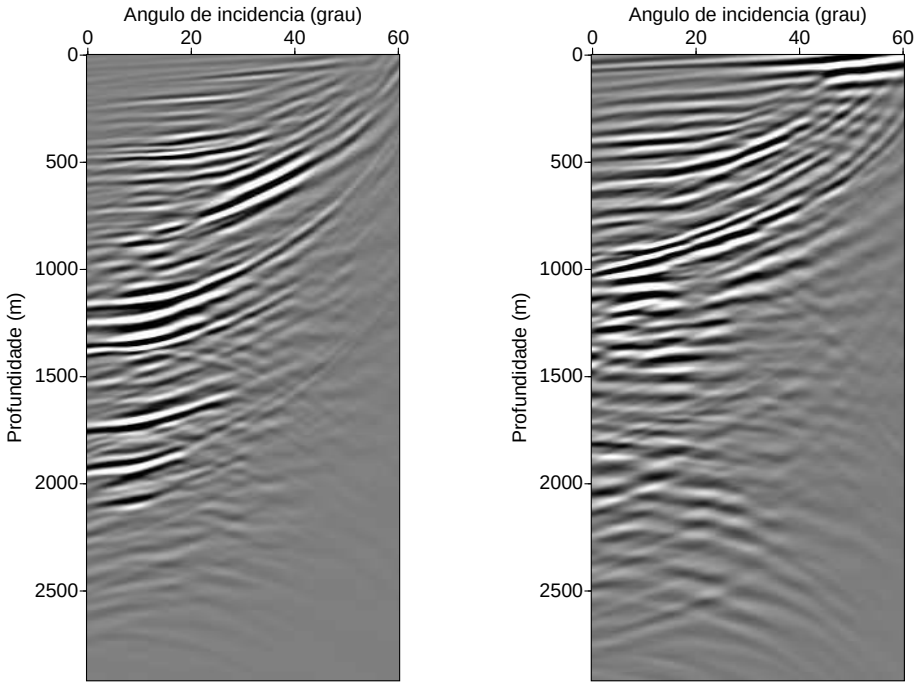
velocidade estiver correta, a resolução da imagem gerada será tão boa quanto da imagem migrada para afastamento-nulo.

Aqui, fazemos então uma comparação entre o resultado da migração afastamento-nulo com campo de velocidades exato mostrado na Figura (5.14) e o resultado do empilhamento das ADCIGs mostrado na Figura (5.13). Podemos observar que a imagem produzida por empilhamento mostra as estruturas referentes ao modelo tão bem ou melhor que a imagem resultante da migração afastamento-nulo, isso se deve ao fato da soma dos traços relacionados às ADCIGs aumentarem a relação sinal-ruído. A inviabilidade em utilizar o resultado desse empilhamento como imagem migrada no processamento sísmico vem do fato de que o custo computacional empregado é muito maior, uma vez que, na produção de ADCIGs, cada traço é migrado independentemente.



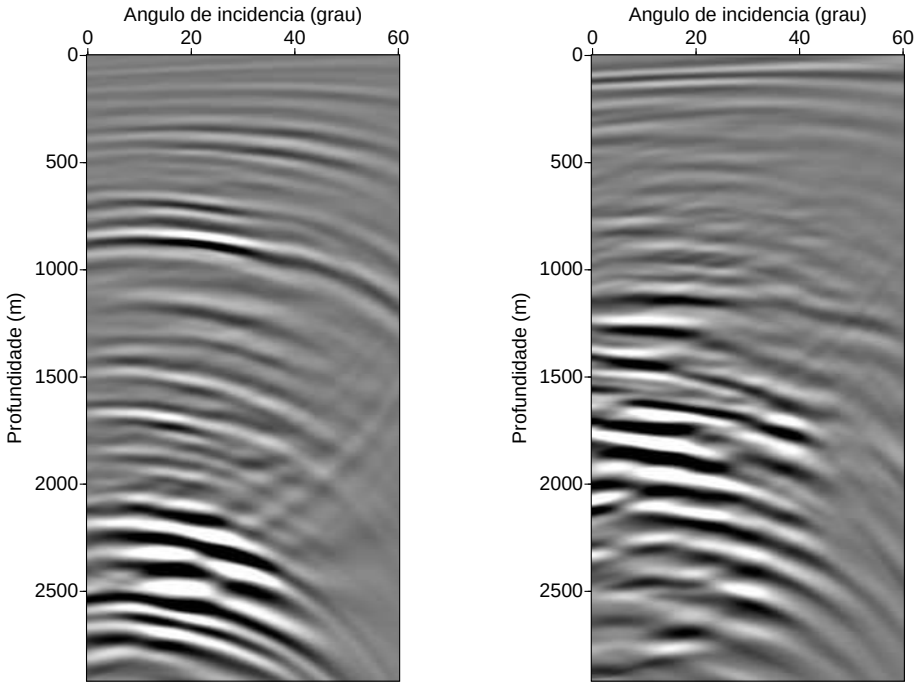

(a) (b)

Figura 5.10: ADCIG gerada por migração FFD complexa usando modelo Marmousi com campo de velocidades exato. (a) Na região X=4000m. (b) Na região X=6000m.




(a) (b)

Figura 5.11: ADCIG gerada por migração FFD complexa usando modelo Marmousi com campo de velocidades 20% menor que os exato. (a) Na região X=4000m. (b) Na região X=6000m.




(a) (b)

Figura 5.12: ADCIG gerada por migração FFD complexa usando modelo Marmousi com campo de velocidades 20% maior que os exato. (a) Na região X=4000m. (b) Na região X=6000m.

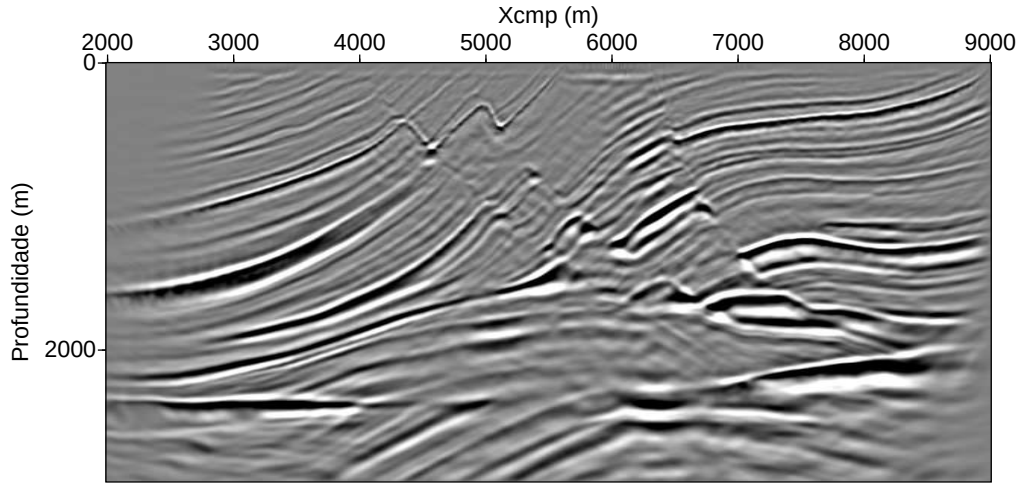



Figura 5.13: Imagem gerada pelo conjunto de traços produzidos pelo empilhamento de cada ADCIGs independentemente.

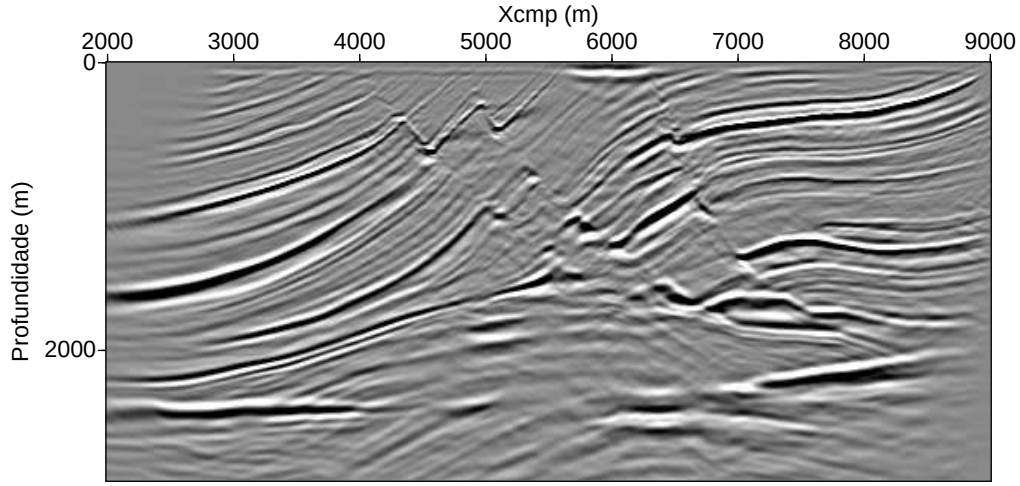



Figura 5.14: Resultado da migração FFD complexa utilizando o modelo de velocidades exato.

# 6 CONCLUSÃO

Apresentamos uma comparação entre os métodos de migração baseados na teoria da propagação de raios e na continuação do campo de ondas, mais especificamente, o método Kirchhoff e FFD complexo, respectivamente. Aplicamos ambos os métodos para migrar os dados sintéticos Marmousi usando o campo de velocidade exato e campos de velocidades modificados. Diante de tais testes, ressaltamos algumas restrições da migração Kirchhoff, como a dificuldade do método em tratar fortes variações de velocidade e sua perda de focalização quando o campo de velocidade é muito suave, embora seu custo computacional seja baixo. Já o método FFD complexo, apresenta estabilidade quanto a perturbações no campo de velocidade, além de focalizar estruturas geológicas de grande mergulho, tratar ondas evanescentes e atenuar melhor as difrações, mas possui maior custo computacional.

Fizemos, uma revisão sobre o uso de Famílias de imagem comum, que são arranjos alternativos que podem ser usados como método para validar um determinado modelo de velocidade usado na migração. Fazendo uso das CIGs, também verificamos a sensibilidade dos métodos de migração quando alteramos os valores das velocidades usados e o desempenho das ADCIGs com relação às ODCIGs. Por fim, mostramos uma forma de obter uma imagem migrada com uma boa relação sinal-ruído comparada ao resultado da migração, utilizando o resultado do empilhamento das ADCIGs.

As ADCIGs além de serem usadas para diagnosticar a sensibilidade dos métodos de migração em relação à modificações no modelo de velocidade, também podem vir a ser usadas para fazer uma análise quantitativa, com o objetivo de promover automaticamente um ajuste do modelo de velocidade usado.

# REFERÊNCIAS

AMAZONAS, D. R. **Migração FD e FFD com aproximações de grande abertura angular**. 2007. 69f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

BIONDI, B. L. **3-D seismic imaging**. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2006.

CLAERBOUT, J. F. **Imaging the earth's interior**. [S.l.]: Blackwell Scientific Publications, 1985.

GAZDAG, J. Wave equation migration with the phase-shift method. **Geophysics**, v. 73, p. 1342–1351, 1978.

MILLINAZZO, F. A.; ZALA, C. A.; BROOKE, G. H. Square-root approximations for parabolic equation algorithms. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 101, p. 760–766, 1997.

MOREIRA NETO, C. A. **Migração pré-empilhamento em profundidade utilizando ondas planas**. 2004. 125f. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

RICKETT, J.; SAVA, P. Offset and angle-domain common image-point gathers for shot-profile migration. **Geophysics**, v. 67, p. 883–889, 2002.

RISTOW, D.; RÜHL, T. Fourier finite-difference migration. **Geophysics**, v. 59, p. 1882–1893, 1994.

SAVA, P. C.; FOMEL, S. Angle-domain common-image gathers by wavefield continuation methods. **Geophysics**, v. 68, p. 1065—1074, 2003.

SAVA, P. C.; FOMEL, S. Coordinate-independent angle-gathers for wave equation migration. **75th Ann. Internat. Mtg. Soc. of Expl. Geophys.**, p. 2052–2055, 2005.

STOFFA, P. L. et al. Split-step fourier migration. **Geophysics**, v. 55, p. 410–421, 1990.

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

# APÊNDICE

# APÊNDICE A – MIGRAÇÃO FFD COM APROXIMAÇÃO DE PADÉ COMPLEXA

A idéia de migrar dados sísmicos baseando-se na equação da onda é seguir propagando o campo de ondas de volta por onde ele passou até chegar na estrutura refletora, para isso, precisamos trabalhar a parte da equação da onda que se propaga para baixo.

## A.1 EQUAÇÃO DA ONDA UNIDIRECIONAL

A equação da onda bidirecional pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 P(\mathbf{x},t)}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 P(\mathbf{x},t)}{\partial x_3^2} - \frac{1}{c^2(\mathbf{x})}\frac{\partial^2 P(\mathbf{x},t)}{\partial t^2} = 0, \tag{A.1}$$

em que $P(x,t)$ é o campo e $c(x)$ é a velocidade do meio.

Aplicando a Transformada de Fourier

$$P(\mathbf{x},t) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(\mathbf{x},\omega)e^{-i\omega t}d\omega, \tag{A.2}$$

em que $\omega$ é a frequência. Temos então a equação no domínio da frequência

$$\frac{\partial^2 P(\mathbf{x},t)}{\partial x_3^2} + \frac{(i\omega)^2}{c^2(\mathbf{x})}\left(1 + \frac{c^2(\mathbf{x})}{\omega^2}\frac{\partial^2}{\partial x_1^2}\right)P(\mathbf{x},\omega) = 0 \tag{A.3}$$

fatorando a equação (A.3), temos

$$\left[\frac{\partial P(\mathbf{x},\omega)}{\partial x_3} - \frac{(-i\omega)}{c(\mathbf{x})}\sqrt{1 + \frac{c^2(\mathbf{x})}{\omega^2}\frac{\partial^2}{\partial x_1^2}}\right]\left[\frac{\partial P(\mathbf{x},\omega)}{\partial x_3} + \frac{(-i\omega)}{c(\mathbf{x})}\sqrt{1 + \frac{c^2(\mathbf{x})}{\omega^2}\frac{\partial^2}{\partial x_1^2}}\right]P(\mathbf{x},\omega) = 0. \tag{A.4}$$

A fatoração acima permite representar duas ondas unidirecionais em relação a profundidade: uma que governa a propagação para cima

$$\frac{\partial P(\mathbf{x},\omega)}{\partial x_3} = \frac{(-i\omega)}{c(\mathbf{x})}\sqrt{1 + \frac{c^2(\mathbf{x})}{\omega^2}\frac{\partial^2}{\partial x_1^2}}P(\mathbf{x},\omega)\ , \tag{A.5}$$

e outra que governa a propagação para baixo

$$\frac{\partial P(\mathbf{x},\omega)}{\partial x_3} = -\frac{(-i\omega)}{c(\mathbf{x})}\sqrt{1 + \frac{c^2(\mathbf{x})}{\omega^2}\frac{\partial^2}{\partial x_1^2}}P(\mathbf{x},\omega). \tag{A.6}$$

## A.2 FFD COM APROXIMAÇÃO DE PADÉ COMPLEXA

O método FFD (RISTOW; RÜHL, 1994) está baseado da diferença entre o operador de raiz quadrada da equação (A.6) usando a velocidade do meio $c(\mathbf{x})$ e o mesmo operador usando uma velocidade de referência $c_r(x_3)$

$$d = \frac{i\omega}{c}\sqrt{1+\left(\frac{c}{\omega}\right)^2\frac{\partial^2}{\partial x_1^2}} - \frac{i\omega}{c_r}\sqrt{1+\left(\frac{c_r}{\omega}\right)^2\frac{\partial^2}{\partial x_1^2}}, \tag{A.7}$$

definindo $k \equiv \frac{\omega}{c}$, $k_r \equiv \frac{\omega}{c_r}$, $p \equiv \frac{k}{k_r} = \frac{c_r}{c}$ e $X^2 \equiv \left(\frac{c}{\omega}\right)^2 \frac{\partial^2}{\partial x_1^2}$ temos então

$$d = ik_r\left\{p\sqrt{1+X^2} - \sqrt{1+p^2X^2}\right\} \tag{A.8}$$

Na equação (A.8), as raizes são geralmente aproximadas ou por Série de Taylor ou por expansão em funções contínuas (RISTOW; RÜHL, 1994). No caso da FFD complexa (AMAZONAS, 2007), a aproximação do operador de raiz quadrada da onda unidirecional utiliza expansão de Padé complexa (MILLINAZZO; ZALA; BROOKE, 1997). A equação (A.8) então torna-se

$$d = ik_r\left\{p\left[C_0 + \sum_{n=1}^{N}\frac{A_nX^2}{1+B_nX^2}\right] - \left[C_0 + \sum_{n=1}^{N}\frac{A_np^2X^2}{1+B_np^2X^2}\right]\right\}, \tag{A.9}$$

em que $A_n$ e $B_n$ são os coeficientes de Padé complexos, dados por

$$\begin{aligned} A_n &\equiv \frac{a_ne^{-i\alpha/2}}{[1+b_n(e^{-i\alpha}-1)]^2} \qquad a_n = \frac{2}{2N+1}sen^2\left(\frac{n\pi}{2N+1}\right) \\ B_n &\equiv \frac{b_ne^{-i\alpha}}{1+b_n(e_{-i\alpha}-1)} \qquad b_n = cos^2\left(\frac{n\pi}{2N+1}\right), \end{aligned}$$

e $a_n$ e $b_n$ são os coeficientes de Padé reais.

Atraves de manipulações algébricas, podemos escrever a partir da equação (A.8)

$$ik_r\left\{p\sqrt{1+X^2} - \sqrt{1+p^2X^2}\right\} \approx ik_r\left\{C_0(p-1) + \sum_{n=1}^{N}\frac{A_np(1-p)X^2}{1+(1+p+p^2)B_nX^2}\right\} \tag{A.10}$$

ou rearrumando

$$p\sqrt{1+X^2} \approx \sqrt{1+p^2X^2} + C_0(p-1) + \sum_{n=1}^{N}\frac{A_np(1-p)X^2}{1+(1+p+p^2)B_nX^2}. \tag{A.11}$$

Experimentos numéricos (AMAZONAS, 2007) mostraram que a aproximação

$$p\sqrt{1+X^2} \approx \sqrt{1+p^2X^2} + C_0(p-1) + \sum_{n=1}^{N}\frac{A_np(1-p)X^2}{1+(1+p^3)B_nX^2} \tag{A.12}$$

está sendo usada por ajustar a curva de vagarosidade para abertura angular maior que a aproximação de (RISTOW; RÜHL, 1994).