



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOFÍSICA

PATRÍCIA DA TRINDADE SOARES

**TOMOGRAFIA APLICADA À MIGRAÇÃO EM TEMPO**

BELÉM  
2008

PATRÍCIA DA TRINDADE SOARES

**TOMOGRAFIA APLICADA À MIGRAÇÃO EM TEMPO**

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

Orientador: Jessé Carvalho Costa

BELÉM  
2008

PATRÍCIA DA TRINDADE SOARES

## TOMOGRAFIA APLICADA À MIGRAÇÃO EM TEMPO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de 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 - Orientador  
Doutor em Geofísica  
Universidade Federal do Pará

---

Profa. Dra. Ellen de Nazaré Souza Gomes - Membro  
Doutora em Geofísica  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. Dr. Cícero Roberto Teixeira Régis - Membro  
Doutor em Geofísica  
Universidade Federal do Pará

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela oportunidade de estudar e aprimorar meus conhecimentos.

Agradeço à minha família, especialmente meu pai, pelo constante apoio durante meus estudos.

Agradeço a todos os professores e funcionários do curso e do departamento de Geofísica da UFPA que me proporcionaram todo o suporte acadêmico necessário.

Agradeço especialmente ao meu orientador, prof<sup>o</sup> Jessé Costa, pelo apoio, orientação e pelos programas do processamento de dados.

Agradeço ao Leandro Sadala Valente pelo apoio e colaboração durante meu TCC e outras disciplinas do curso.

Agradeço aos colegas do curso pelo companheirismo e esclarecimento nos momentos de dificuldade.

Agradeço também aos alunos da pós-graduação Luiz André Veloso Melo e Lígia Naia de Matos pelo constante auxílio e compreensão durante meu TCC.

## RESUMO

O alinhamento horizontal de eventos de reflexão em seções de ponto imagem comum (CIG) é o critério básico de métodos de análise de velocidade através de algoritmos de migração. A função semblance diferencial, avaliada em seções CIG, tem valor mínimo quando os eventos estão horizontalmente alinhados. Utilizando esta função objetivo, a estimativa de modelos de velocidade para migração em tempo é formulada como um problema de otimização. O algoritmo *Simulated Annealing* permite estimar o modelo de velocidade em tempo que melhor horizontaliza os eventos nas seções CIG. Esta estratégia não apresenta as limitações da abordagem convencional para análise de velocidade em tempo, que utiliza iterações NMO/DMO. O algoritmo proposto foi aplicado com sucesso para a estimativa do modelo de velocidade para migração dos dados sintéticos Marmousoft.

**Palavras Chaves:** Tomografia. Migração. Análise de velocidade.

## ABSTRACT

The flatness of reflection events in common image gathers (CIG), when the migration velocity model is correct, is the basis of methods for migration velocity analysis. The differential semblance of CIG gathers is minimum when all events are flat. Using the differential semblance as objective function, the velocity estimation reduces to an optimization problem. The simulated annealing algorithm estimates time migration velocity model that better flattens the events in CIG. This strategy do not have the shortcomings of the conventional NMO/DMO loop for time velocity analysis. The algorithm was successfully applied to estimate the velocity model for pre-stack migration of the Marmousoft synthetic data set.

**Key words:** Tomography. Migration. Velocity analysis.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>ANÁLISE DE VELOCIDADE CONVENCIONAL</b>	<b>9</b>
2.1	ANÁLISE DE VELOCIDADE	9
2.1.1	Correções dinâmicas: NMO e DMO	10
<b>3</b>	<b>MIGRAÇÃO PRÉ-EMPILHAMENTO</b>	<b>18</b>
3.1	MIGRAÇÃO DE KIRCHHOF	18
3.1.1	Efeito <i>aliasing</i>	20
3.1.2	Modelo de velocidade de migração	22
<b>4</b>	<b>TOMOGRAFIA DE MIGRAÇÃO EM TEMPO</b>	<b>23</b>
4.1	SEÇÕES CIG	24
4.2	SEMBLANCE DIFERENCIAL	28
4.3	ALGORITMO DE TOMOGRAFIA	29
4.3.1	Otimização de funções multimodais	31
4.4	<i>SIMULATED ANNEALING</i>	32
<b>5</b>	<b>APLICAÇÃO A DADOS SINTÉTICOS</b>	<b>35</b>
5.1	OS MODELOS MARMOUSI E MARMOUSOFT	35
5.2	EXPERIMENTOS NUMÉRICOS	37
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>48</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A construção de imagens acústicas dos refletores em subsuperfície é um dos principais objetivos da utilização de métodos sísmicos de reflexão na exploração de hidrocarbonetos. Em meios em que a velocidade de propagação das ondas sísmicas apresentam variação lateral moderada, a migração em tempo pré-empilhamento é uma alternativa robusta para construir imagens da subsuperfície. (BIONDI, 2006) e (CLAERBOUT, 1985).

O fluxo de processamento rotineiramente utilizado na indústria para processar dados sísmicos consiste de uma aproximação a migração pré-empilhamento em tempo (YILMAZ, 1987). Os passos essenciais deste processo consistem de: a) análise de velocidade em famílias de ponto médio comum, b) aplicação da correção de sobretempo normal (NMO) aos dados, c) empilhamento dos dados para simular uma aquisição com afastamento nulo entre fonte e receptor, e finalmente, d) a migração dos dados empilhados com operadores de migração de afastamento nulo. Adicionalmente, o efeito do mergulho dos refletores no modelo de velocidade pode ser atenuado efetuando a correção DMO (YILMAZ, 1987).

Neste trabalho investiguei a análise de velocidade utilizando diretamente o operador de migração em tempo, chamada de tomografia de migração em tempo (LEGGOT, 2006). Como uma alternativa a implementação original, utilizei como algoritmo de otimização o *Simulated Annealing* (MA, 2001). Em consequência, não há a exigência de um modelo inicial de velocidade próximo à solução para garantir a convergência do algoritmo. Outra modificação foi o uso do semblance diferencial como medida de coerência (VERM; SYMES, 2006).

A monografia está organizada em cinco capítulos. No Capítulo 2, apresento uma revisão do fluxo convencional de processamento sísmico. No Capítulo 3, descrevo a formulação da migração pré-empilhamento em tempo. O Capítulo 4 apresenta o algoritmo de tomografia de migração em tempo. Finalmente, no Capítulo 5 apresento a validação do algoritmo utilizando o modelo Marmousoft (BILLETE et al., 2003).

## 2 ANÁLISE DE VELOCIDADE CONVENCIONAL

O processamento sísmico de reflexão consiste da aplicação encadeada de diversos algoritmos matemáticos aos dados registrados em superfície, visando obter uma imagem dos refletores na subsuperfície. Sua principal aplicação ocorre na indústria de prospecção de petróleo.

Conceitualmente é possível descrever cada uma das etapas do fluxo de processamento de forma unificada através do conceito de etapas convencionais de processamento sísmico. Entretanto, as implementações existentes no processamento sísmico raramente seguem um padrão, visto que sua aplicação assume meios homogêneos com suave variação lateral de velocidade e baixo ângulo de mergulho nos refletores sísmicos. Em áreas com estruturação geológica complexa, com a presença de mergulhos conflitantes e acentuados dos refletores sísmicos, torna-se necessário incorporar técnicas mais aprimoradas para corrigir as distorções providas pela heterogeneidade da subsuperfície durante a estimativa da velocidade.

### 2.1 ANÁLISE DE VELOCIDADE

O fluxo convencional de processamento de dados sísmicos assume meios homogêneos, com suave variação lateral de velocidade e baixo ângulo de mergulhos nos refletores em subsuperfície. Após a aquisição, os dados são organizados em família de Ponto Médio Comum (CMP) para serem processados a fim de gerar uma imagem da subsuperfície investigada.

Para alcançar uma imagem que corresponda exatamente ao meio investigado os traços correspondentes à mesma família CMP são amostrados com mesmo valor de velocidade e somados (empilhados) aumentando dessa maneira a relação sinal/ruído dos traços. Uma boa estimativa de velocidade é imprescindível para a etapa de empilhamento. Em meios com mergulhos acentuados nos refletores sísmicos adiciona-se a etapa de migração pós-empilhamento para colapsar os pontos difratores e reposicionar os eventos nas suas verdadeiras posições espaciais, uma vez que a presença de refletores inclinados promove perda na resolução na seção simplesmente empilhada (YILMAZ, 1987).

Em processamento sísmico a velocidade é um parâmetro extremamente importante para a qualidade do empilhamento dos traços. A velocidade proporciona uma correção NMO ótima que propicia uma etapa de empilhamento determinante para a migração.

Em meios homogêneos e estratificados esta estimativa é relativamente simples, porém em meios com interfaces inclinadas torna-se necessário a implementação da correção DMO para remover a influência do mergulho do refletor na estimativa da velocidade.

### 2.1.1 Correções dinâmicas: NMO e DMO

As correções dinâmicas NMO (*Normal Moveout*) e DMO (*Dip Moveout*) são realizadas para determinar a velocidade de empilhamento que melhor se ajuste a hipérbole de tempo de trânsito, em refletores planos e inclinados respectivamente.

Para um modelo de um simples refletor horizontal o fluxo padrão de processamento calcula o tempo de trânsito de acordo com a Equação 2.1 assumindo traços de arranjo CMP:

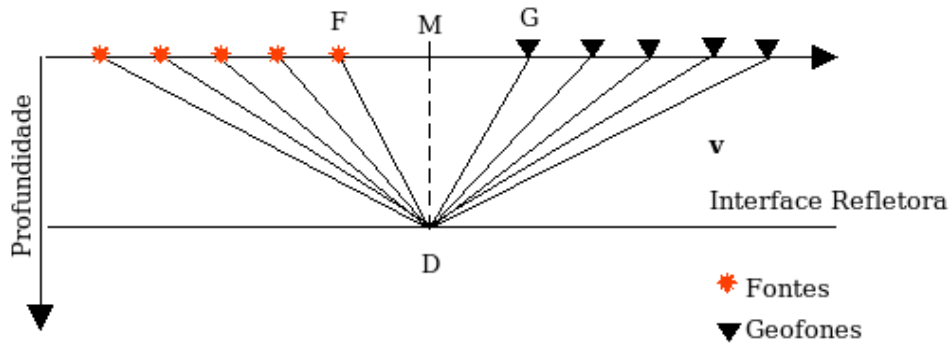


Figura 2.1: Figura de um simples refletor horizontal para o cálculo do tempo de trânsito.

$$t(x)^2 = \tau^2 + \frac{x^2}{V_{NMO}^2} \quad (2.1)$$

Em que:

$V_{NMO}$ : corresponde a velocidade que corrige o efeito NMO.

$\tau$ : tempo de trânsito para afastamento nulo.

$x$ : afastamento entre a fonte (F) e o geofone (G).

Em um modelo com geometria descrita na Figura 2.1 a velocidade que corrige o efeito NMO corresponde a velocidade  $v$  do meio a cima do refletor.

Durante a análise de velocidade, os traços de cada CMP são reorganizados para *offset* igual a zero, isto é, o afastamento entre fonte e geofone torna-se nulo. Os picos refletidos perdem a feição hiperbólica e se alinham. A partir do somatório dos traços alinhados os contrastes de velocidade entre os refletores são realçados e os ruídos são atenuados, o que determina um dos fatores decisivos para a resolução da seção migrada.

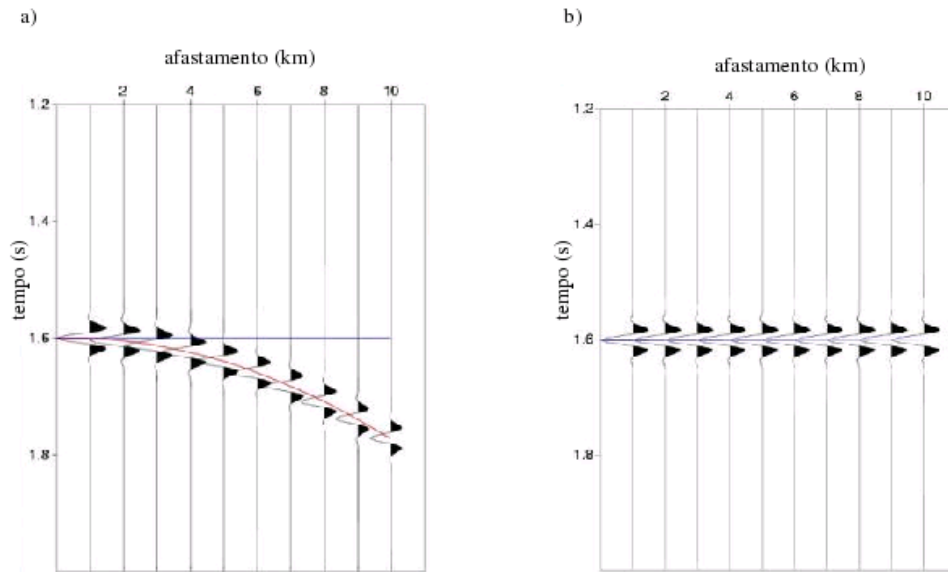


Figura 2.2: Efeito Normal Moveout: a) antes da correção NMO; b) depois da correção NMO.

Existe uma diferença entre as velocidades NMO e de empilhamento que frequentemente é ignorada na prática. A velocidade NMO é baseada no tempo de trânsito hiperbólico para pequenos afastamentos, enquanto que a velocidade de empilhamento é baseada na hipérbole que permite o melhor ajuste da curva tempo de trânsito na seção CMP. A hipérbole da velocidade de empilhamento não requer necessariamente o pequeno afastamento que é necessário para a velocidade NMO. A diferença torna-se significativa além de um determinado afastamento máximo. Apesar disso, a velocidade NMO e de empilhamento são geralmente consideradas como equivalentes (YILMAZ, 1987).

Em um modelo de um simples refletor horizontal a velocidade NMO corresponde à velocidade do meio acima do refletor. Para vários refletores planos, a velocidade usada para corrigir o efeito NMO equivale à Velocidade Média Quadrática, mais conhecida em inglês como *Root Mean Square Velocity* ( $V_{RMS}$ ), que representa a velocidade combinada de todas as camadas por onde a onda atravessa. Podemos dizer que a  $V_{RMS}$  é a média quadrática da soma das velocidades intervalares das camadas por onde a onda percorre, portanto de posse da  $V_{RMS}$  é possível obter a velocidade intervalar para cada camada.

Considerando a trajetória FDG da Figura 2.3 associado ao afastamento fonte-geofone  $x$  e ao ponto médio CMP obtém-se o tempo trânsito da onda através da Equação 2.2:

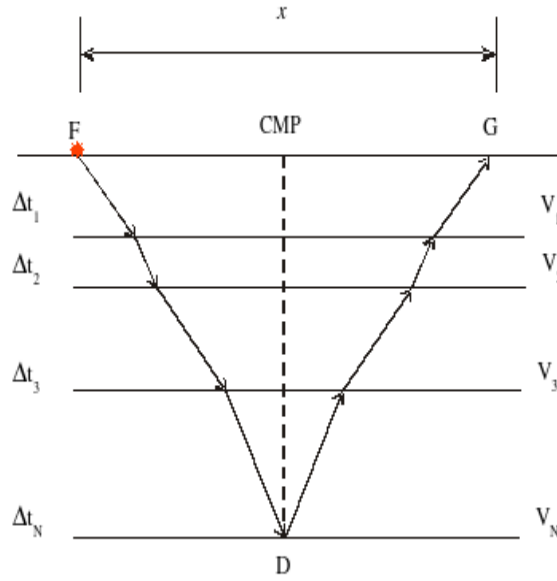


Figura 2.3: Para  $N$  camadas a  $V_{RMS}$  é calculada, considerando a trajetória FDG (YILMAZ, 1987).

$$t^2(x) = \tau^2 + \frac{x^2}{V_{RMS}^2}, \quad (2.2)$$

em que a velocidade  $V_{RMS}$  é definida por:

$$V_{RMS}^2 = \frac{1}{t(0)} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i(0) \quad (2.3)$$

Para meios com múltiplas interfaces horizontais a velocidade que corrige o efeito NMO equivale a velocidade RMS, ou seja, um valor constante de velocidade que corresponde aproximadamente à combinação de todas as velocidades intervalares das camadas. Portanto em meios com elevado grau de heterogeneidade torna-se mais complicada a estimativa de um único valor de velocidade que corresponda exatamente à toda a subsuperfície investigada.

Considerando um afastamento entre fonte e receptor pequeno comparado com a profundidade do refletor, a Equação 2.2 pode ser aproximada a uma equação para o tempo de trânsito em uma única camada horizontal (Equação 2.1)

Em meios onde os refletores são inclinados a estimativa de velocidade é influenciada pelo ângulo de mergulho das interface. O tempo de trânsito que descreve a propagação da onda em um único refletor inclinado, como mostrado na Figura 2.4, corresponde à Equação 2.4:

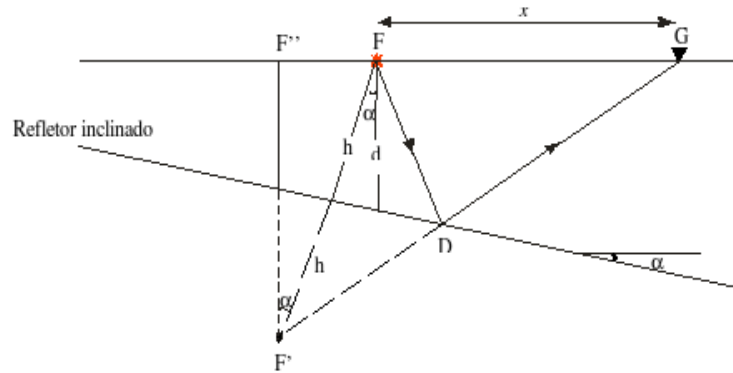


Figura 2.4: Geometria para o cálculo do tempo de trânsito em um único refletor inclinado (YILMAZ, 1987).

$$t(x)^2 = \tau^2 + \frac{x^2 \cos^2 \alpha}{V^2} \quad (2.4)$$

Em que a velocidade que corrige o efeito NMO corresponde a:

$$V_{NMO} = \frac{V}{\cos \alpha} \quad (2.5)$$

Sendo:

$V$ : velocidade do meio acima do refletor

$\alpha$ : ângulo de mergulho do refletor

A Equação 2.4 descreve o tempo de trânsito para um refletor inclinado. Sua representação gráfica corresponde a uma hipérbole, bem como a equação de tempo de trânsito para refletor horizontal (Equação 2.1).

A velocidade NMO de um refletor inclinado é sobrestimada devido à presença do ângulo de mergulho nos refletores (Equação 2.5).

Em meios com múltiplas interfaces inclinadas como mostrado na Figura 2.5 a velocidade que corrige o efeito NMO é dada pela Equação 2.7. Para calcular o tempo de trânsito da onda que sai da fonte F reflete do ponto D e volta para geofone G, que é associado ao ponto médio M consideraremos a Expressão 2.6 com a velocidade NMO descrita pela Equação 2.7 (HUBRAL; KREY, 1980):

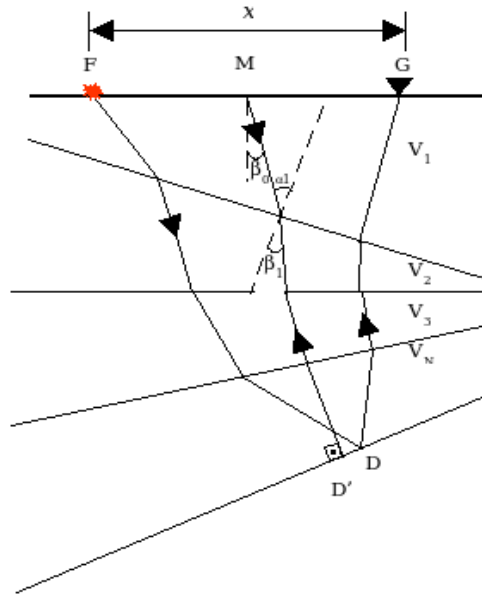


Figura 2.5: Geometria para o cálculo do tempo de trânsito em múltiplas interfaces inclinadas (YILMAZ, 1987).

$$t^2(x) = \tau^2 + \frac{x^2}{V_{NMO}^2}, \quad (2.6)$$

$$V_{NMO}^2 = \frac{1}{t(0) \cos^2 \beta_0} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i(0) \prod_{k=1}^{i-1} \left( \frac{\cos^2 \alpha_k}{\cos^2 \beta_k} \right), \quad (2.7)$$

em que os ângulos  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  estão indicados na Figura 2.5.

Considerando uma aproximação para pequeno afastamento e baixo ângulo de mergulho nos refletores sísmicos, podemos descrever o tempo de trânsito de forma genérica descrita pela Equação 2.1.

A velocidade NMO de um refletor inclinado é sobrestimada devido à presença do ângulo de mergulho no refletor. Na seção migrada a velocidade sobrestimada produz perda de resolução lateral. Para reduzir os efeitos provocados pelos mergulhos das interfaces durante a estimativa de velocidade introduz-se a correção dinâmica DMO nas etapas convencionais de processamento (YILMAZ; CLAERBOUT, 1980), e o tempo de trânsito  $t(x)$  é calculado considerando o ângulo de inclinação do refletor com afastamento não nulo entre fonte e geofone (LEVIN, 1971). O objetivo é determinar o tempo que a frente de onda leva para ir da fonte F até o geofone G sem a influência do mergulho.

Para corrigir a velocidade sobrestimada considere a seguinte relação trigonométrica:

$$\cos^2 \alpha = 1 - \sin^2 \alpha \quad (2.8)$$

que substituída na Equação 2.4 obtém-se :

$$t^2(x) = \left[ \tau^2 + \frac{x^2}{V^2} \right] - \frac{x^2 \sin^2 \alpha}{V^2} \quad (2.9)$$

Na Equação 2.9 a curva tempo-afastamento (*moveout*) foi dividida em dois termos, o primeiro está relacionado ao NMO, enquanto o segundo ao DMO. A equação acima implica dizer que, para refletores inclinados, primeiramente é realizado uma correção NMO (com os traços organizados em família de ponto médio comum) usando uma média quadrática da soma de todas as velocidades das camadas ( $V_{RMS}$ ), depois é aplicada a correção DMO (com os traços organizados em família de afastamento comum). Após realizadas as escolhas de velocidades avalia-se a resposta obtida, e se necessário, remove a primeira correção através do NMO inverso realizando em seguida uma segunda correção NMO sem a influência do mergulho dos refletores.

Através da Equação 2.9 podemos inferir algumas propriedades da correção DMO:

- 1) A correção DMO não responde para traços com afastamento nulo ( $x = 0$ );
- 2) Quanto mais inclinado se mostrar um refletor, maior será o efeito DMO corrigido, pois quanto maior o valor de  $\alpha$ , maior será o termo DMO;
- 3) Para baixos valores de velocidades, maior será a correção DMO. Isso implica dizer também que para eventos mais rasos, mais significativa será a correção DMO, uma vez que baixos valores de velocidades são encontrados geralmente em partes mais rasas do dado sísmico.

Dessa forma, temos que a primeira correção NMO será considerada apenas como parâmetro de referência para a correção DMO. Portanto para a obtenção da velocidade mais adequada torna-se necessário realizar várias correções até que se alcance a resposta desejada. O fluxograma a baixo mostra a seqüência do processamento:

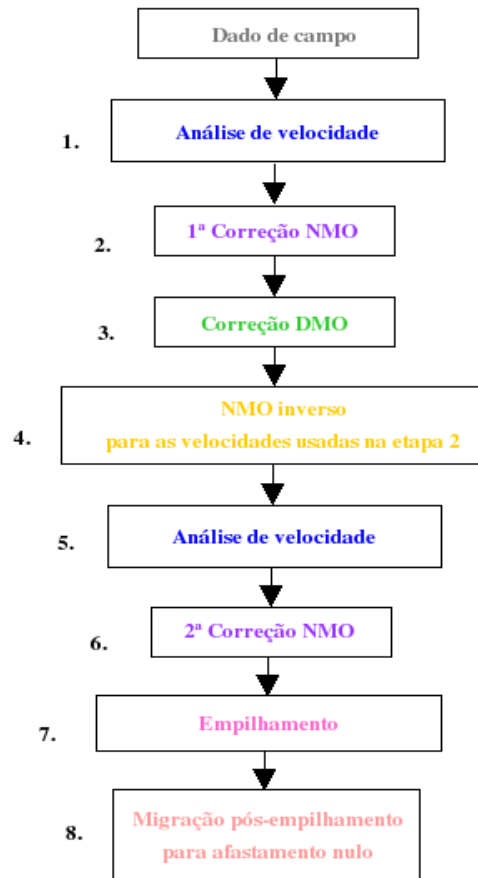


Figura 2.6: Seqüência do processamento sísmico convencional.

A presença do ângulo de mergulho nos refletores sobrestima o valor de velocidade que corrige o efeito NMO dos traços sísmicos. A técnica DMO corrige a velocidade sobrestimada quando os refletores se encontram com baixo ângulo de mergulho. Essa correção do mergulho é dependente da primeira correção NMO, que por sua vez depende da soma da média quadrática de todas as velocidades intervalares ( $V_{RMS}$ ). Como esse parâmetro é sujeito ao grau de complexidade da geologia estudada, subentende-se que a correção DMO em ambientes mais heterogêneos sempre corrompe o modelo de velocidade real que representa o meio investigado. Na tentativa de contornar as limitações relacionadas à análise convencional de velocidade despensei o fluxo padrão de processamento e adotei técnicas de construção de modelo de subsuperfície que não tenha influência do mergulho dos refletores sísmicos. A alternativa adotada no presente Trabalho de Conclusão de Curso consiste na realização da migração pré-empilhamento em tempo. O fluxograma da Figura 2.7 mostra as etapas de processamento realizadas.

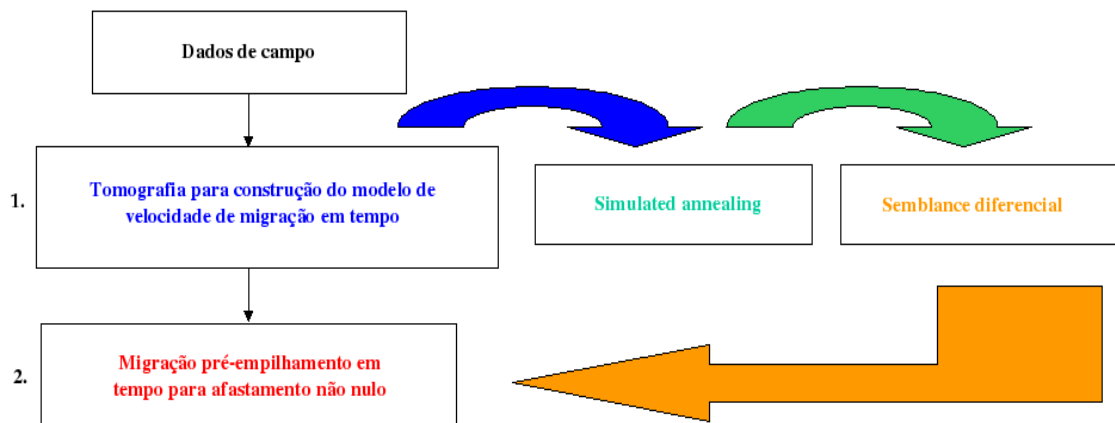


Figura 2.7: Seqüência do processamento sísmico adotada no presente trabalho.

### 3 MIGRAÇÃO PRÉ-EMPILHAMENTO

As etapas convencionais de processamento são adequadas em subsuperfícies compostas por camadas horizontais. Em meios com refletores inclinados introduz-se a migração pós-empilhamento para maior aproximação da geologia investigada. Essa técnica responde satisfatoriamente para meios caracterizados com uma geologia relativamente homogênea. No entanto as regiões de interesse para a exploração sísmica compreendem as reservas potenciais de petróleo, as quais são marcadas por uma estruturação geológica bem mais complexa, como: domos salinos, planos de falha e grandes dobramentos de rocha. Normalmente nesse tipo de geologia torna-se necessário implementar técnicas mais aprimoradas para construir modelos de subsuperfície sem os efeitos do mergulho do refletor. Neste sentido, a migração pré-empilhamento em tempo pode ser inserida no processamento contribuindo significativamente para a criação de tais modelos, uma vez que a migração pré-empilhamento em tempo não sofre a influência dos mergulhos dos refletores. Sua contribuição corresponde a uma alternativa para a criação de modelos sem as limitações das análises convencionais de velocidade, reduzindo os efeitos causados pelo ângulo de inclinação das camadas e estabelecendo um modelo de subsuperfície mais representativo. Para sua implementação é necessário estimar a velocidade de migração que melhor represente a geologia investigada.

#### 3.1 MIGRAÇÃO DE KIRCHHOF

A migração pré-empilhamento pode ser feita por meio da migração de Kirchhoff, baseada na equação de tempo de trânsito para afastamento não nulo de um ponto difrator. Essa técnica pode ser entendida por intermédio do princípio de Huygens, que diz que toda frente de onda se comporta como uma fonte secundária de onda. Na teoria de Kirchhoff as interfaces das camadas da subsuperfície são constituídas de pontos difratores que espalham a energia da onda incidente na interface refletora originando uma nova frente de onda. O objetivo da migração pré-empilhamento é colapsar toda a energia espalhada e reposicionar a imagem do refletor inclinado para sua real posição espacial (YILMAZ, 1987).

A migração de Kirchhoff determina o tempo de trânsito que a onda leva para percorrer a trajetória SPG da Figura 3.1. A equação utilizada para somar a amplitude ao longo da trajetória de tempo de trânsito para afastamento não nulo chama-se equação da raiz dupla - DSR (*Double Square Root*).

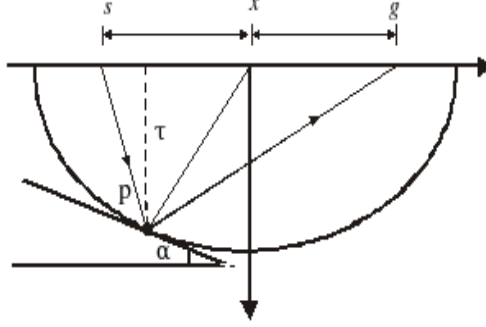


Figura 3.1: Geometria para o cálculo do tempo de trânsito determinado pela equação *DSR*.

O registro sísmico é uma função  $D(t, \mathbf{g}, \mathbf{s})$ , em que  $\mathbf{g}$  representa a posição do receptor,  $\mathbf{s}$  a posição da fonte e  $t$  o intervalo de tempo de registro. A migração pré-empilhamento em tempo pressupõe que um ponto difrator, na posição  $\mathbf{x}$ , espalhe o campo de onda em uma superfície de tempo:

$$T_d(\mathbf{g}, \mathbf{s}; \tau, \mathbf{x}) = \sqrt{\tau^2 + \frac{\|\mathbf{s} - \mathbf{x}\|^2}{V^2(\tau, \mathbf{x})}} + \sqrt{\tau^2 + \frac{\|\mathbf{g} - \mathbf{x}\|^2}{V^2(\tau, \mathbf{x})}}. \quad (3.1)$$

$\tau$  representa o tempo de afastamento nulo para evento de difração. A migração de Kirchhoff pré-empilhamento em tempo consiste em somar o campo registrado ao longo das superfícies de difração e posicionar o resultado nas coordenadas  $(\tau, \mathbf{x})$ . É conveniente representar esta soma no sistema de coordenadas do ponto médio e semi-afastamento:

$$\mathbf{m} \equiv \frac{1}{2}(\mathbf{g} + \mathbf{s}), \quad (3.2)$$

$$\mathbf{h} \equiv \frac{1}{2}(\mathbf{g} - \mathbf{s}). \quad (3.3)$$

Nestas coordenadas a migração em tempo pré-empilhamento é representada pela integral:

$$I(\tau, \mathbf{x}) = \int_{\Omega(\tau, \mathbf{x})} W(\mathbf{x}, \tau; \mathbf{m}, \mathbf{h}) \star D[t = T_d(\mathbf{m}, \mathbf{h}; \tau, \mathbf{x})] d\mathbf{m} d\mathbf{h}. \quad (3.4)$$

O operador de convolução contém o fator que corrige a amplitude e um filtro de derivada. Para dados 3D, operador é de primeira derivada; para dados 2D, o operador de derivada é de ordem meio. Neste trabalho utilizou-se um fator unitário para correção de amplitude, esta escolha é chamada de migração cinemática. O domínio de integração  $\Omega(\tau, \mathbf{x})$  determina a abertura do operador de migração, sua prescrição limita o mergulho máximo dos eventos migrados e o custo da migração.

A soma da energia espalhada é definida segundo a curva de espalhamento determinada pelo campo de velocidade. O valor somado de energia é atribuído a um único ponto difrator. A imagem  $I(\tau, \mathbf{x})$  refere-se à energia colapsada de todos os pontos que compõem

o refletor.

A Equação 3.1 funciona para afastamento não nulo. Essa característica é bastante relevante para a criação de modelos de subsuperfícies dominados por uma intensa heterogeneidade geológica, uma vez que, os traços organizados em afastamento comum reduzem os efeitos da variação lateral de velocidade, característica que compromete a eficiência da migração pré-empilhamento. Além de reduzir os efeitos da variação lateral de velocidade a migração pré-empilhamento em tempo não possui variável  $\alpha$  (Equação 3.1), e portanto não sofre a influência do ângulo de mergulho, demonstrando ser uma alternativa para a construção de modelos de subsuperfície que supera as limitações da análise convencional de velocidade, e dispensa as etapas consecutivas do processamento convencional (empilhamento e migração pós-empilhamento).

A Equação 3.1 colapsa a energia de difração considerando que  $\tau$  seja referente à trajetória da onda incidente no ponto  $p$ . Esse processo é repetido para todos os pontos difratores que compõem o refletor. A superposição destes pontos descreve a interface refletora das camadas da subsuperfície. O somatório da amplitude da energia para cada conjunto de pontos compõem a seção migrada com resolução definida pelo modelo de velocidade de migração. Portanto o parâmetro determinante para a eficiência da migração pré-empilhamento corresponde ao modelo de velocidade de migração  $V(\tau, \mathbf{x})$  inserido na Equação 3.1. Esse modelo é sensível à bruscas variações de velocidade. A velocidade *RMS* pode ser usada como uma constante  $V(\tau, \mathbf{x})$  em casos de pouca variação lateral.

### 3.1.1 Efeito *aliasing*

Um sinal sísmico corresponde a uma função contínua no domínio do tempo. O registro do conjunto de sinais sísmicos é realizado a intervalos de tempo  $\Delta t$  que permitem a discretização da função quando transformada para o domínio da frequência. Os intervalos de tempo ou intervalos de amostragem mais utilizados na sísmica de reflexão são de 1 à 4 ms. Em levantamentos de alta resolução podem ser usados valores da ordem de 0,25 ms.

A discretização da função no domínio da frequência representa uma técnica de suma importância para o processamento de dados sísmicos, uma vez que, permite a remoção das faixas de altas frequências ruidosas que prejudicam o sinal.

A determinação da faixa de frequência a ser removida é feita por meio do cálculo da Frequência de Nyquist, que corresponde ao máximo valor de frequência admitido para o dado.

$$\omega_D = \frac{1}{2\Delta t} \quad (3.5)$$

Quando um sinal é reamostrado com Frequência de Nyquist menor que sua frequência, acontece a característica de baixa amostragem no sinal, e os eventos de alta frequência são amostrados como um único só de baixa frequência, este fenômeno é conhecido por efeito *aliasing*.

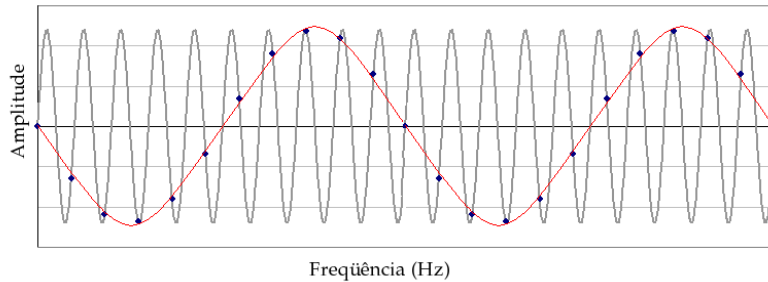


Figura 3.2: Um sinal (cinza) de alta frequência é amostrado em baixa frequência representado pelos pontos azuis. O sinal em vermelho com baixa frequência é a onda resultante do efeito de *aliasing*.

Para resolver o problema de efeito *aliasing* temos duas soluções: aumentar a taxa de amostragem, que em geral nem sempre é possível, ou suavizar a função contínua e remover as frequências mais altas que a taxa de amostragem através de um filtro passa-baixa.

A partir da máxima frequência  $k_{max}$  adimitida desenvolve-se um filtro com frequência de corte na frequência adimitida e o sinal passa a ser amostrado a uma taxa que permita fazer a distinção entre dois eventos adjacentes.

A implementação da integral de migração representada pela Equação 3.4, quando aplicado a dados amostrados apresenta efeitos de *aliasing* (BIONDI, 2001). Pressupondo dados regularmente amostrados, para que não ocorra *aliasing* na imagem migrada é necessário que o número de onda máximo associado ao operador de migração,  $k_{max}$ , seja menor que o número de onda de Nyquist:

$$k_{max} = \omega_D |p_m| < \frac{\pi}{\Delta m} ,$$

ou seja,

$$\omega_D < \frac{\pi}{\Delta m |p_m|} .$$

Portanto, quanto maior o valor de  $p_m = dT_D/dm$  menor deve ser a frequência no traço migrado. Neste trabalho implementei o filtro anti-*aliasing* aplicando um filtro triangular nos traços durante o processo de integração (LUMLEY et al., 1994).

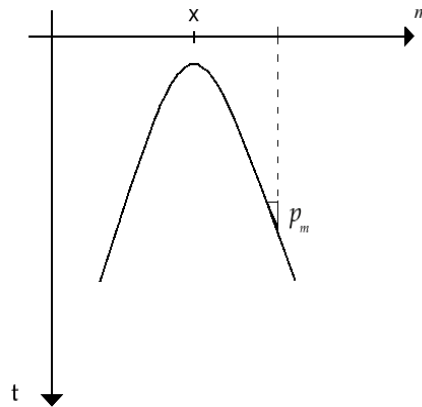


Figura 3.3: Curva de difração com corte na derivação  $p_m$

$p_m$  representa o valor de corte em função de  $dm$  do filtro anti-aliasing onde os traços adjacentes são distinguidos a uma taxa máxima de frequência adimita  $k_{max}$ .

### 3.1.2 Modelo de velocidade de migração

Na busca de maior resolução à seção produzida a migração pré-empilhamento certamente proporciona grande contribuição para o processamento sísmico. Além de realizar um modelo de subsuperfície sem a influência do mergulho dos refletores, a migração pré-empilhamento reduz os efeitos da variação lateral de velocidade, chamando atenção para um grande problema do processamento sísmicos, que é a estimativa da velocidade em ambientes geologicamente complexos. A principal inconveniência desta ferramenta consiste no procedimento manual para a estimativa da velocidade. Como a alternativa de se efetuar a escolha manual de velocidade (*picking* manual) é demasiadamente lento para se trabalhar com o grande volume de dados que é o usual em exploração sísmica, torna-se necessário introduzir alternativas que buscam sua automatização, aumentando com isso a velocidade do processamento.

Para tornar a estimativa de velocidade mais adequada e contornar os problemas relacionados à escolha manual de velocidade, algumas implementações podem ser incorporadas no processamento. Técnicas de otimização e automatização na estimativa de velocidade podem proporcionar uma melhor eficiência para a migração pré-empilhamento em tempo encontrando os valores de velocidade mais próximo dos valores corretos através de algoritmos de automatização e otimização.

O capítulo que segue trata da estimativa de velocidade de migração para ser inserida na migração pré-empilhamento em tempo. Os algoritmos implementados correspondem ao semblance diferencial e o *Simulated Annealing* (SA) na tomografia de migração em tempo.

## 4 TOMOGRAFIA DE MIGRAÇÃO EM TEMPO

O método de análise de velocidade convencional pressupõe uma dependência hiperbólica entre o tempo de chegada e o afastamento entre fonte e receptor para eventos de reflexão. Esta relação é válida para pequenos afastamentos em que a velocidade varia exclusivamente com a profundidade. O uso deste modelo em meios que apresentam refletores com mergulho, estima valores de velocidade acima do valor da velocidade *RMS* entre a superfície e o ponto de reflexão. Este modelo de velocidade, embora útil para o empilhamento dos dados, não é adequado para a migração em tempo.

O objetivo deste capítulo é apresentar um algoritmo de análise de velocidade que não apresente as limitações da análise de velocidade convencional. Para isso a estimativa de velocidade será feita utilizando a focalização das imagens migradas em tempo como critério para definir o modelo de velocidade.

A medida de focalização dos eventos é definida em seções de ponto imagem comum (*Common Image Gathers*). Estas seções são obtidas após a migração em tempo pré-empilhamento de diferentes seções de afastamento comum. Cada seção de ponto imagem comum (CIG) é construída com os traços migrados, em um mesmo CMP, ordenados segundo o afastamentos entre fonte e receptor. Se o o modelo de velocidade de migração estiver correto, o evento de reflexão deve estar alinhado horizontalmente nas seções CIG. Neste trabalho a medida de alinhamento dos eventos foi feita utilizando o semblance diferencial (VERM; SYMES, 2006).

O termo tomografia de migração em tempo consiste em estimar modelos de velocidade que melhor horizontalizem os eventos de reflexão. A busca do modelo ótimo é feita através de busca aleatória. Utilizo o método de *Simulated Annealing* (SA) para o processo de otimização.

Neste capítulo apresento os detalhes da implementação do algoritmo de tomografia de migração em tempo. Inicialmente, descrevo a construção das seções CIG e como o alinhamento de eventos de reflexão pode ser detectado através do semblance diferencial. A seguir apresento a descrição da implementação do algoritmo SA utilizada.

## 4.1 SEÇÕES CIG

Após a migração pré-empilhamento em tempo se obtém um volume de dados, e cada traço migrado é função do CMP e do afastamento. Para validar o modelo de velocidade reordenamos estes traços em painéis de ponto imagem comum (CIG). Cada CIG é uma seção do volume de dados migrados contendo os traços com o mesmo CMP e diferentes afastamentos, conforme ilustra a Figura 4.2.

A construção das seções de afastamento comum correspondem ao passo inicial para a construção das seções CIG's. Cada seção de afastamento comum é migrada em tempo através da migração pré-empilhamento. A partir da seção migrada cada CMP é amostrado em diferentes painéis de cada afastamento  $h$ . À essas seções amostrando um mesmo ponto migrado de diferentes seções de afastamento comum são denominadas de CIG's.

A Figura 4.1 mostra a migração das seções de afastamento comum, que corresponde ao passo inicial para a construção da CIG.

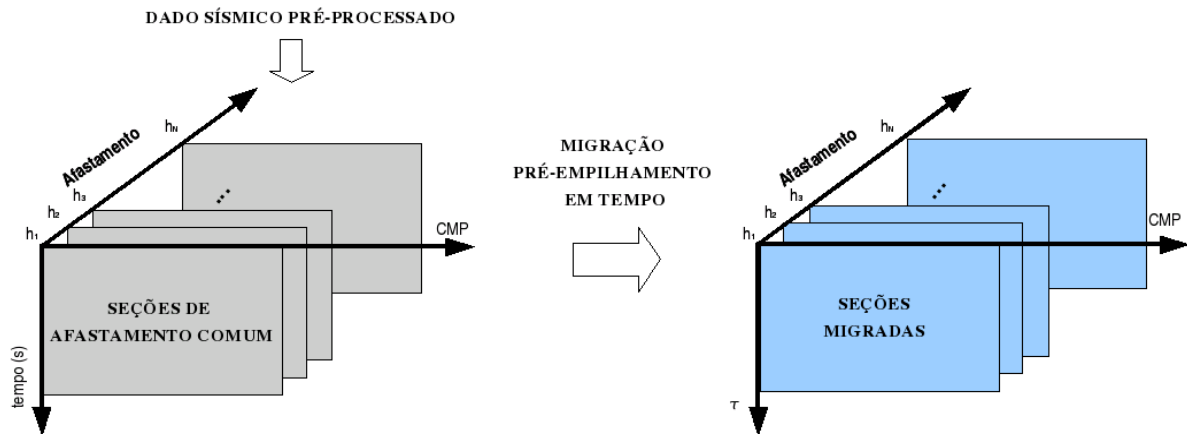


Figura 4.1: Representação esquemática da migração pré-empilhamento em tempo de cada seção de afastamento comum. Cada seção migrada corresponde a uma seção de afastamento comum com mesmo CMP e mesmo afastamento.

Para a construção das seções CIG's foram selecionados todos os traços de mesma família CMP das seções migradas. Se o modelo de velocidade de migração estiver correto, um mesmo evento deve ser imageado no mesmo tempo em todos os traços de uma seção CIG.

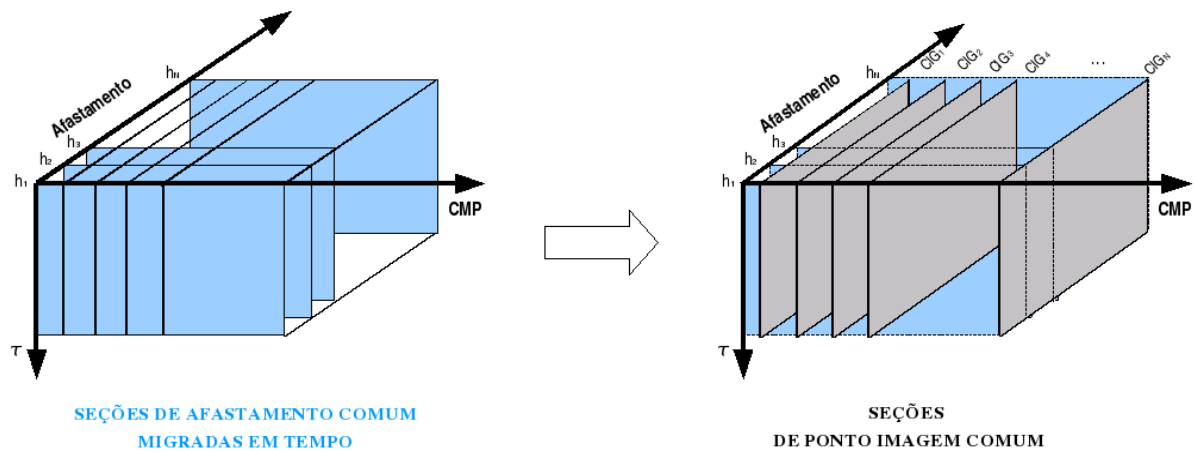


Figura 4.2: Representação esquemática da construção de seções CIG's a partir da migração em tempo.

Para valores de velocidade abaixo da velocidade de migração correta, o evento apresentará curvatura ascentente (Figura 4.3-(a)). Se a velocidade da migração estiver correta o evento apresentará curvatura nula, ou seja, estará alinhado horizontalmente (Figura 4.3-(b)). Finalmente, para velocidade de migração maior que o valor correto, o evento apresentará curvatura descendente (Figura 4.3-(c)).

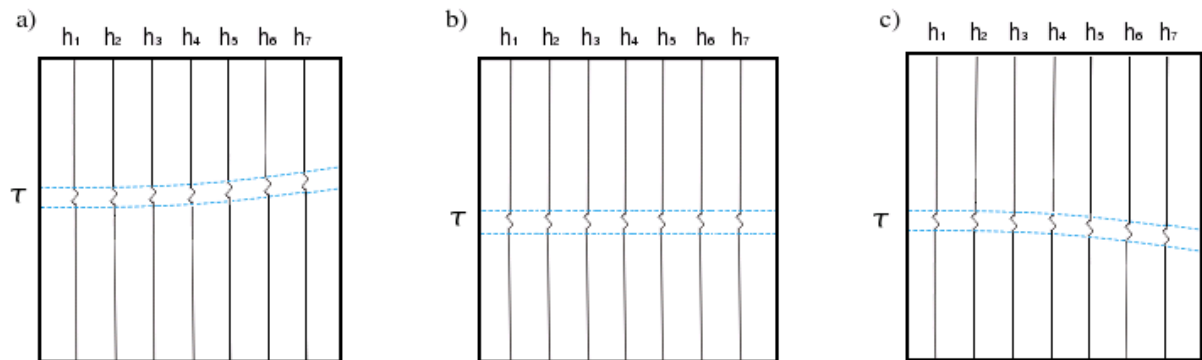


Figura 4.3: Seções CIG's com velocidade de migração: a) menor que o valor correto; b) com o valor correto; e c) valor maior que o correto.

O conjunto de figuras abaixo mostra alguns exemplos seções de afastamento comum nos CMP's localizados nas posições 100 m, 500 m, 1000 m e 1500 m.

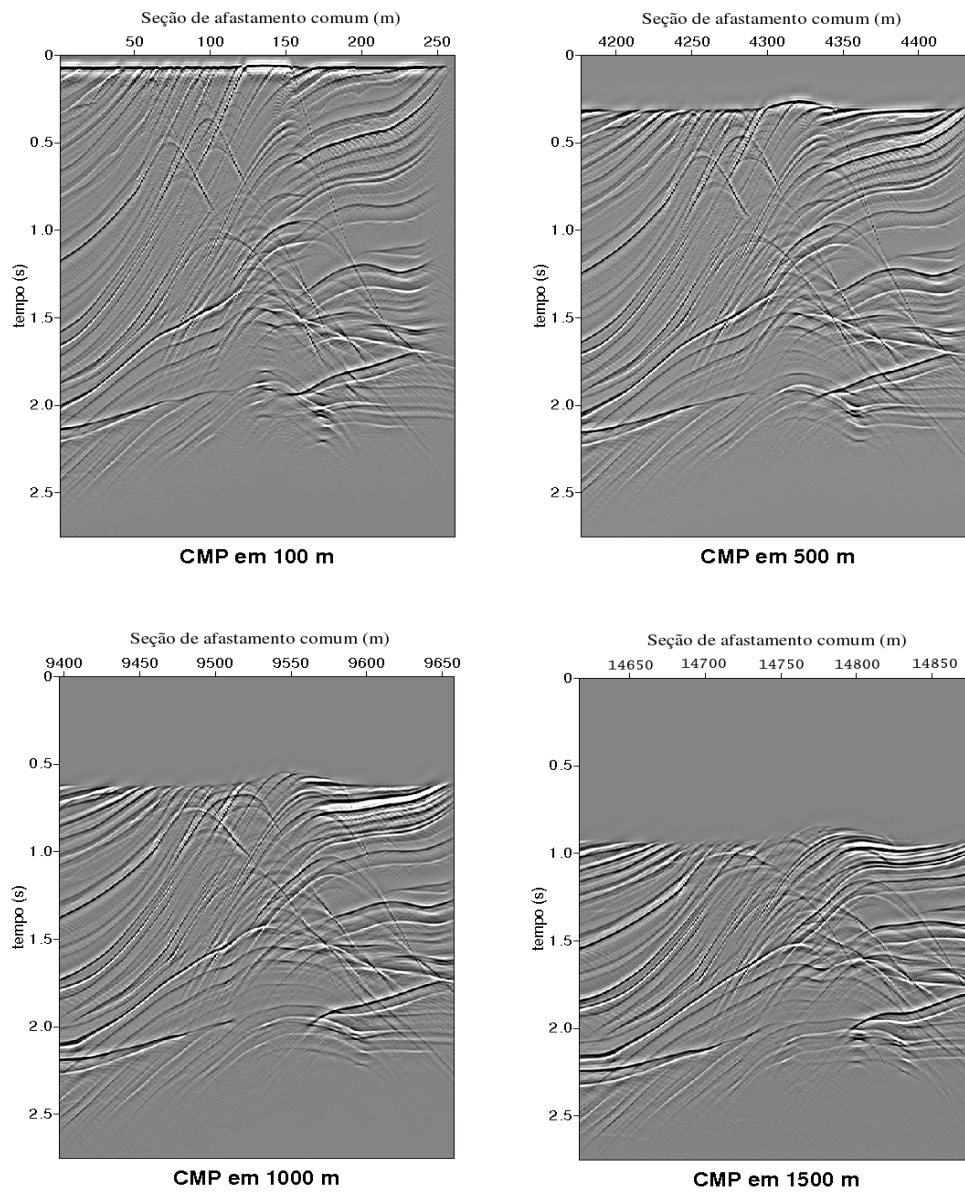


Figura 4.4: Exemplo de seções de afastamento comum nos CMP's localizados nas posições 100 m, 500 m, 1000 m e 1500 m.

A Figura 4.5 mostra um exemplo de seção CIG em uma amostra com 6 seções de ponto de imagem comum lado a lado. No topo encontra-se a seção CIG antes da otimização do modelo de velocidade, e a baixo, depois da otimização:

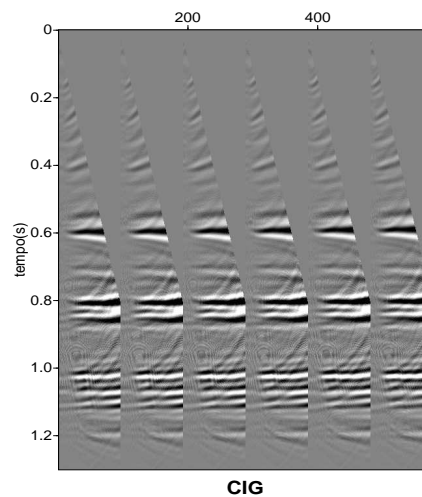
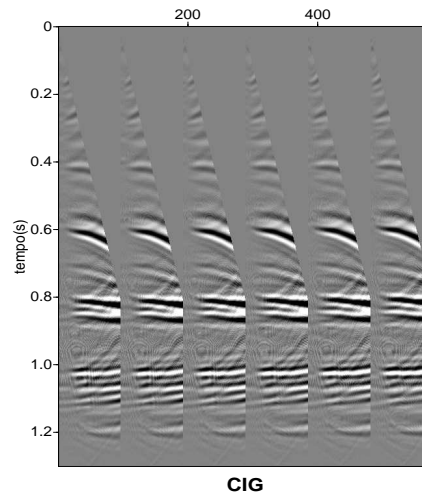


Figura 4.5: Exemplo de seções CIG's antes (no topo) e depois (abaixo) da otimização na velocidade. Os eventos localdos entre 0,4 e 0,6 s observam maior grau de alinhamento caracterizando uma boa otimização de velocidade nesta região.

O alinhamento dos eventos indica uma otimização do modelo de velocidade. Esse critério é utilizado para validar o modelo de velocidade construído para fazer a migração pré-empilhamento. Quanto mais otimizados, maior será o grau de coerência dos eventos.

## 4.2 SEMBLANCE DIFERENCIAL

A função semblance diferencial mede a energia da diferença entre traços adjacentes nas seções CIG's. A semblance diferencial de um cubo de dados migrados é definida pela seguinte expressão (VERM; SYMES, 2006),

$$J_{DS}[v_{mig}] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_h} \sum_{i=1}^N \left| \frac{p(\tau_i, h_{j+1}; m_k) - p(\tau_i, h_j; m_k)}{\Delta h} \right|^2. \quad (4.1)$$

Nesta definição,  $v_{mig}$  indica o modelo de velocidade utilizado na migração,  $p(\tau_i, h_j; m_k)$  representa as amostras de um traço migrado,  $N$  o número de amostras de cada traço,  $N_h$  o número de afastamentos,  $\Delta h$  o intervalo entre afastamentos de traços adjacentes nos CIG's e  $N_m$  o número de CMPs.

Se os eventos em cada uma das seções CIG estão alinhados horizontalmente, o valor do semblance será zero. Consequentemente, o semblance diferencial pode ser utilizado como função objetivo a ser minimizada para a estimativa do modelo de velocidade  $v_{mig}$ .

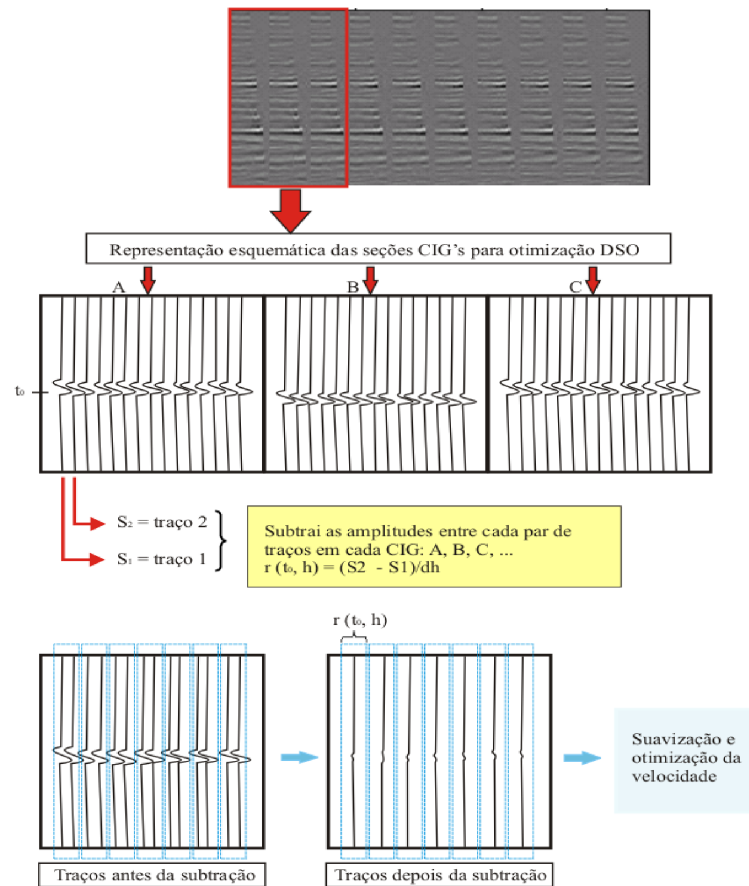


Figura 4.6: Coerência realizada pelo processo de otimização DSO. Cada seção CIG é selecionada para que a amplitude de seus traços possam ser subtraídos. Esta subtração faz com que seus efeitos sejam anulados quando perfeitamente alinhados. Este critério é utilizado para fazer a validação da velocidade de migração.

A aplicação desta estratégia para a estimativa do modelo de velocidade para migração pré-empilhamento em tempo requer que o dado seja pré-processado para eliminar ruídos coerentes, particularmente, atenuar mútiplas.

A estimativa do modelo de velocidade que minimiza o semblance diferencial é efetuada pelo algoritmo *Simulated Annealing*. Este método realiza uma busca aleatória de modelos velocidade dentro de um intervalo de velocidades pré-definido.

### 4.3 ALGORITMO DE TOMOGRAFIA

O algoritmo de tomografia de migração em tempo consiste em estimar um modelo de velocidade que minimize a curvatura de eventos de reflexão. Valores de velocidades são progressivamente gerados e alterados até que o valor do funcional (Equacao 4.1) seja minimizado. Uma implementação desta estratégia utilizando a semblance como medida de coerência e algoritmo de gradiente conjugado não linear foi efetuada por (LEGGOT, 2006).

Nesta implementação o modelo de velocidade é representado através de B-splines. O valor do campo de velocidade em um ponto do modelo de coordenadas  $(\tau, x)$  é função dos coeficientes da interpolação,

$$V_{mig}(\tau, x) = \sum_{I=1}^{N_I} \sum_{J=1}^{M_J} V_{IJ} B_I(\tau) B_J(x),$$

em que  $N_I$  indica o número de nós ao longo da coordenada  $\tau$  e  $M_J$  indica o número de nós ao longo da coordenada  $x$ . Fixadas as coordenadas dos nós em uma malha regular, o modelo de velocidade é completamente especificado pelos coeficientes  $V_{IJ}$  (LEGGOT, 2006). O algoritmo de otimização estima os valores destes coeficientes.

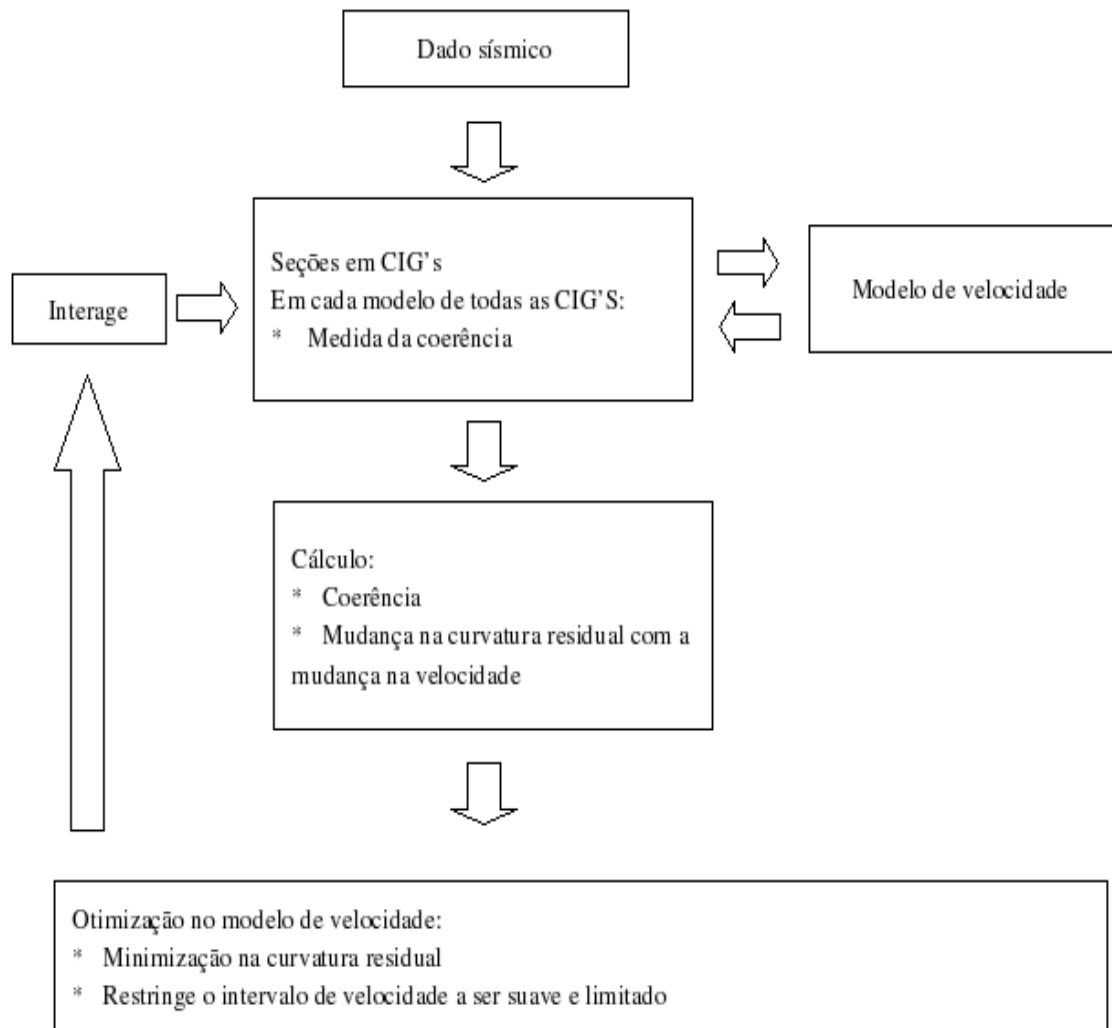


Figura 4.7: Descrição esquemática do processo de otimização obtida pela tomografia

Otimização pode ser definida como o processo de encontrar a melhor solução (ou solução ótima) de um conjunto de soluções para um determinado problema. Um procedimento iterativo de cálculos é realizado em um processo sistemático de busca melhorando progressivamente na seleção das soluções, até que o ótimo seja encontrado. O uso de uma variedade de computadores de alta velocidade impulsionou o aperfeiçoamento dos algoritmos de otimização.

As técnicas de otimização devem ser utilizadas quando não existe uma solução simples e diretamente calculável para um problema. Isso geralmente ocorre quando a estrutura do problema é complexa, ou existem várias soluções possíveis. Neste caso, raramente haverá um procedimento direto de solução, de forma que as técnicas de otimização podem ser utilizadas na busca pela solução ótima do problema.

Uma função  $f(x)$  a ser otimizada, denominada de função objetivo, em geral representa uma função contínua de  $n$  variáveis independentes  $x = (x_1, \dots, x_n)$  que definem um espaço

de busca de dimensão  $n$ . Maximizar  $f(x)$  em uma região qualquer do espaço de dimensão  $n$  é equivalente a minimizar  $-f(x)$  na mesma região.

Neste trabalho deseja-se encontrar um modelo de velocidade de migração em tempo que minimize a função objetivo semblance diferencial e horizontalize cada evento das seções CIG's, por esta razão a otimização a ser introduzida compreende ao sentido de minimização. A otimização encontra valores soluções  $x'$  que minimizem a função objetivo. Os valores  $x'$  são chamados de minimizadores (ou pontos ótimos) e os valores correspondentes  $f(x')$  são os mínimos do problema (ou valores ótimos).

### 4.3.1 Otimização de funções multimodais

Em algumas aplicações, a função objetivo pode ser caracterizada pela presença de vários máximos e mínimos. Esse tipo de funções são chamadas de multimodais, nas quais o mínimo de todos os mínimos é chamado de global e todos os outros são chamados mínimos locais. Um algoritmo de otimização local tenta encontrar um mínimo local nas proximidades do ponto de partida.

A otimização global encontra a melhor solução  $x'$  do conjunto de todas as soluções possíveis, ou seja, dada uma função contínua  $f(x)$ , encontrar  $x'$  tal que  $f(x') \leq f(x)$  para todo  $x$  próximo a  $x'$ , pois na otimização local, a solução encontrada depende do ponto de início do processo de busca. A Figura 4.8 ilustra os pontos de mínimos e máximo, globais e locais, para uma função contínua  $x$ , onde os pontos  $x_1$ ,  $x_5$  são pontos de máximos locais e os pontos  $x_4$ ,  $x_6$  são os pontos de mínimos locais, por outro lado os pontos  $x_2$  e  $x_3$  são os pontos de mínimo global e máximo global respectivamente.

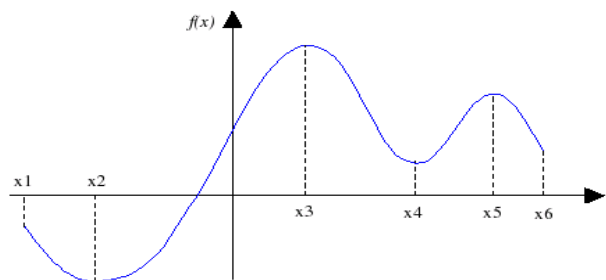


Figura 4.8: Pontos de mínimos e máximos, globais e locais para uma função  $f(x)$ .

Quase todos os métodos usam propriedades locais da função objetivo para calcular uma solução e procurar na direção descendente a solução final. Esse tipo de algoritmo pode não encontrar o mínimo global dependendo da solução inicial estar próximo de um mínimo local.

Os métodos de busca global usam informação global sobre a função objetivo para calcular e atualizar uma solução. Em geral, a convergência destes métodos a uma solução global ótima não é garantido por nenhum dos algoritmos globais; no entanto, os algoritmos quase sempre fornecem soluções ótimas sem precisar de uma boa solução inicial.

A otimização global pode encontrar a melhor solução possível, independentemente das condições de início do processo de busca, porém requisita grande custo computacional. O objetivo da otimização global consiste em encontrar os mínimos, ou máximos, de uma função. Em outras palavras, a tarefa de otimização é encontrar os vetores solução  $x'$  que minimizem a função objetivo  $f(x)$ . Os vetores  $x'$  são chamados de pontos ótimos e os valores correspondentes  $f(x')$  são chamados valores ótimos.

O algoritmo *Simulated Annealing* implementado para estimar do modelo de velocidade de migração pré-empilhamento em tempo no presente trabalho corresponde a um algoritmo de otimização global que realiza buscas aleatórias em uma região definida na tentativa de encontrar a solução ótima.

#### 4.4 SIMULATED ANNEALING

O algoritmo *Simulated Annealing* (SA) é um método de otimização global que imita o processo físico pelo qual um cristal se desenvolve (ou cristaliza) a partir do resfriamento lento de um cristal fundido, até atingir o estado de energia mínima (CORANA et al., 1987).

Dada uma função  $f(x)$  a ser minimizada em um intervalo finito definido por:  $a_1 \leq x_1 \leq b_1$ ,  $a_n \leq x_n \leq b_n$  com  $n$  variáveis, o algoritmo SA inicia um processo iterativo de busca da solução ótima a partir de um dado ponto  $x_0$  gerando uma sucessão de pontos testes  $x_1, x_2, \dots, x_i$ , tendendo ao mínimo global. Pontos testes são gerados em torno deste mesmo ponto atual  $x$  aplicando perturbações aleatórias ao longo de cada direção de  $x_i$  (CORANA et al., 1987), segundo a seguinte relação:

$$x'_i = x_i + rv_i \quad (4.2)$$

Em que  $r$  é um número aleatório uniformemente distribuído entre  $[-1, 1]$ , e  $v_i$  é o elemento do vetor dos comprimentos do passo  $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ . Se o ponto teste  $x'$  cair

fora dos limites do espaço de busca definido por  $a$  e  $b$ , um novo ponto teste é gerado pela Equação 4.3 até ficar dentro dos limites do espaço de busca.

$$x'_i = a_i + r(b_i - a_i), \quad (4.3)$$

A função  $f'$  é então computada. Se  $f'$  for menor do que  $f$ , o ponto  $x'$  é aceito incondicionalmente e o algoritmo tem um deslocamento descendente. Se  $f'$  tiver o menor valor registrado, então  $x'$  e  $f'$  serão registrados como os atuais valores ótimos da função. Por outro lado, se  $f'$  for maior ou igual à  $f$  o critério de Metrópolis decide sobre a aceitação ou não do ponto teste por meio da seguinte relação de probabilidade:

$$p = e^{\frac{-(f'-f)}{T}} \quad (4.4)$$

em que  $T$  é a temperatura e  $p$  é comparado com  $p'$ , que é um número aleatório dentro do intervalo  $[0,1]$ . Se  $p < p'$ , o novo ponto teste  $x'$  é aceito e o algoritmo tem um deslocamento ascendente, se não o ponto  $x'$  não é aceito. Um baixo valor de temperatura e uma grande diferença entre os valores  $f$  e  $f'$ , diminuem a probabilidade de um deslocamento ascendente ser aceito.

Após  $N_s$  ciclos de geração de pontos testes o vetor  $v$  dos comprimentos dos passos é ajustado objetivando um melhor mapeamento da função objetivo. A mudança nos comprimentos dos passos é realizada para manter a porcentagem média dos deslocamentos aceitos, em torno de 50% do número total de deslocamentos (CORANA et al., 1987). Para cada direção  $i$  o ajuste do novo vetor comprimento do passo  $v'_i$  é dado por (MA, 2001):

$$v'_i = \begin{cases} v_i \left(1 + c_i \frac{n_i/N_s - 0.6}{0.4}\right), & \text{se } n_i > 0.6N_s \\ \frac{v_i}{1 + c_i \frac{0.4 - n_i/N_s}{0.4}}, & \text{se } n_i < 0.4N_s \\ v_i, & \text{se } 0.4N_s \leq n_i \leq 0.6N_s \end{cases} \quad (4.5)$$

Em que  $v_i$  é o comprimento do passo atual,  $c_i$  é o parâmetro que controla a variação do passo da  $i$ -ésima componente,  $N_i$  é o número de deslocamentos aceitos na  $i$ -ésima direção após de  $N_s$  tentativas. A razão  $N_i/N_s$  é restrita ao intervalo  $[0,1]$ .

Se uma grande porcentagem de deslocamento são aceitos na  $i$ -ésima direção, então o vetor  $v$  é aumentado. Para uma dada temperatura isto aumenta o número de rejeições e diminui a porcentagem de aceitações. Do ponto de vista da otimização, um grande número de deslocamentos aceitos com respeito aqueles rejeitados significa que a função objetivo é explorada ou mapeada com passos muitos pequenos. Por outro lado um grande número de deslocamentos rejeitados significa que os pontos testes são gerados muito longe do ponto atual. Uma proporção de 1:1 entre deslocamentos aceitos e rejeitados assegura que o algoritmo faz um bom mapeamento da função objetivo.

Após  $N_t N_s$  ciclos de gerações de pontos testes numa dada temperatura  $T$  para um dado número  $N_t$ , que regula o número de ciclos,  $T$  é reduzida. O novo valor de  $T$  é dado por:

$$T_{j+1} = r_T T_j, \quad j = 1, 2, \dots \quad (4.6)$$

em que  $r_T$  é o fator de decaimento da temperatura compreendido no intervalo  $[0,1]$ . Com a diminuição da temperatura os deslocamentos ascendentes tem menor probabilidade de aceitação, assim o número de rejeições aumenta e o deslocamento declina. Sendo o ponto inicial numa dada temperatura, para valores pequenos dos comprimentos dos passos o algoritmo focaliza a sua atenção nas áreas mais promissoras.

Como critério de parada, é usado a comparação do valor final da função da temperatura atual com os  $N_\xi$  valores finais da função correspondente às  $N_\xi$  temperaturas e com o valor ótimo da função. Se todas as diferenças são menores do que um dado valor de tolerância de erro  $\xi$ , o processo de minimização termina. Quando as diferenças são maiores que  $\xi$ , a temperatura diminui e todo o processo de minimização descrito continua.

Além de uma boa escolha para o valor da temperatura inicial  $T = T_0$ , alguns valores para os parâmetros  $N_s$ ,  $N_t$ ,  $c_i$ ,  $N_\xi$  podem indicar uma boa eficiência para o algoritmo *Simulated Annealing* (CORANA et al., 1987):

$$\begin{aligned} N_s &= 20; \\ N_t &= \max(100, 5n); \\ c_i &= 2, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; \\ N_\xi &= 4; \\ r_T &= 0.85 \end{aligned}$$

## 5 APLICAÇÃO A DADOS SINTÉTICOS

A validação do algoritmo de análise de velocidade apresentado no capítulo anterior foi efetuada com dados sintéticos do modelo Marmousoft (BILLETE et al., 2003). Este modelo consiste de uma versão suavizada do modelo Marmousi (VERSTEEG; GRAU, 1990) em que os dados foram simulados sem a presença de múltiplas. A validação consistiu de três experimentos numéricos que diferem na escolha dos parâmetros do algoritmo de otimização.

### 5.1 OS MODELOS MARMOUSI E MARMOUSOFT

Os dados sintéticos Marmousi (VERSTEEG; GRAU, 1990) simulam um levantamento sísmico marinho e foram produzidos para avaliar a capacidade de imageamento sísmico em áreas complexas. O modelo de velocidade acústico 2D, Figura 5.1 (à cima), simula estruturas complexas baseadas na geologia da bacia de Cuanza em Angola. A descrição do ambiente geológico representado pelo modelo se encontra descrita em (VERSTEEG; GRAU, 1990). A aquisição foi simulada usando diferenças finitas.

A presença de múltiplas nos dados sintéticos gerados por diferenças finitas a partir do modelo Marmousi é um fator que dificulta a aplicação destes dados para validar algoritmos de análise de velocidade. Estes algoritmos pressupõem que a atenuação de múltiplas já foi aplicada aos dados. Para contornar esta dificuldade com os dados dos modelo Marmousi, uma versão suavizada foi realizada simulando dados de reflexão primária apenas efetuando a propagação através de traçamento de raios (BILLETE et al., 2003). O modelo sintético construído foi denominado de modelo Marmousoft, Figura 5.1 (à baixo).

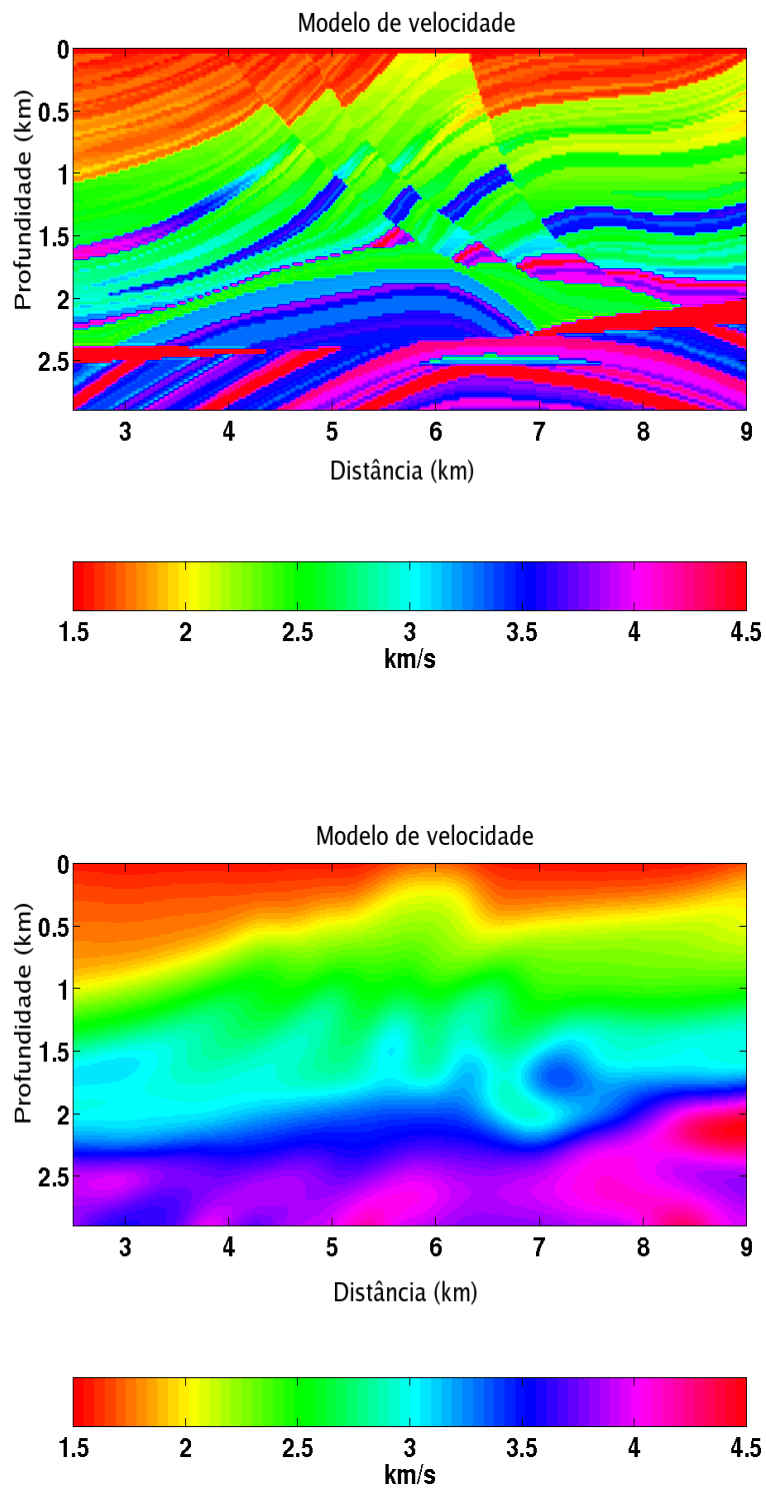


Figura 5.1: No topo, o modelo de velocidade Marmousi; abaixo, o modelo de velocidade Marmousoft utilizado para gerar os dados sintéticos utilizados nos experimentos numéricos.

## 5.2 EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

Para validar o algoritmo efetuei vários experimentos numéricos variando parâmetros do algoritmo de otimização. Especificamente avaliei a variação nos parâmetros: número de ciclos de geração ( $N_s$ ), Temperatura inicial ( $T_0$ ), e taxa de resfriamento ( $r_T$ ). O parâmetro temperatura final ( $T_f$ ) foi mantido constante. A seguir apresento os valores dos parâmetros do *Simulated Annealing* adotados nos três experimentos:

<b>Parâmetros</b>	<b>Experimento 1</b>	<b>Experimento 2</b>	<b>Experimento 3</b>
$T_0$	10	20	10
$T_f$	0.000001	0.000001	0.000001
$r_T$	0.15	0.20	0.20
$N_s$	5	10	5

Estes três experimentos apresentam escolhas de parâmetros que tentam equilibrar o número total de avaliações da função objetivo. No primeiro a temperatura inicial é menor que no segundo, mas a taxa de resfriamento é menor e o número de amostragens da função objetivo em cada nível de temperatura também é menor. Um maior valor da temperatura inicial contribuiu para aumentar a probabilidade do algoritmo atingir um ótimo global. Com temperatura mais alta, uma taxa de resfriamento menor, em uma maior número de amostragens da função objetivo torna-se mais densa a amostragem efetuada pelo algoritmo *Simulated Annealing*.

O algoritmo de análise de velocidade investigado é facilmente paralelizável. Para cada temperatura, as  $N_s$  avaliações da função objetivo podem ser feitas independentemente. A implementação serial do algoritmo que utilizo neste trabalho é computacionalmente ineficiente.

Apresentamos, a seguir, os resultados de três soluções produzidas durante a evolução do algoritmo. Estas soluções representam valores de temperatura alta, temperatura intermediária e baixa temperatura, em relação aos valores da temperatura inicial. Os resultados consistem da seção migrada, dos CIGs selecionados e o modelo de velocidade estimado.

As seções migradas de todos os experimentos apresentam um aumento da focalização de alguns eventos, indicando a eficácia do algoritmo na estimativa do campo de velocidade. As regiões selecionadas das seções migradas apontam as principais regiões de otimização e suavização alcançada. As seções CIG's e os modelos de velocidade em tempo também percebem grau de otimização evolutivo.

As seções CIG's destacadas nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 referem-se as zonas de baixo, médio e alto grau de variação de velocidade no modelo Marmousoft. As região selecionadas

correspondem aos CIG's locados nas posições 4000 m, 5008 m, 6004 m, 6508 m, 7000 m e 7504 m indicados na Figura 5.2 e referenciados, respectivamente, pela numeração 1, 2, 3, 4, 5 e 6 em cada CIG.

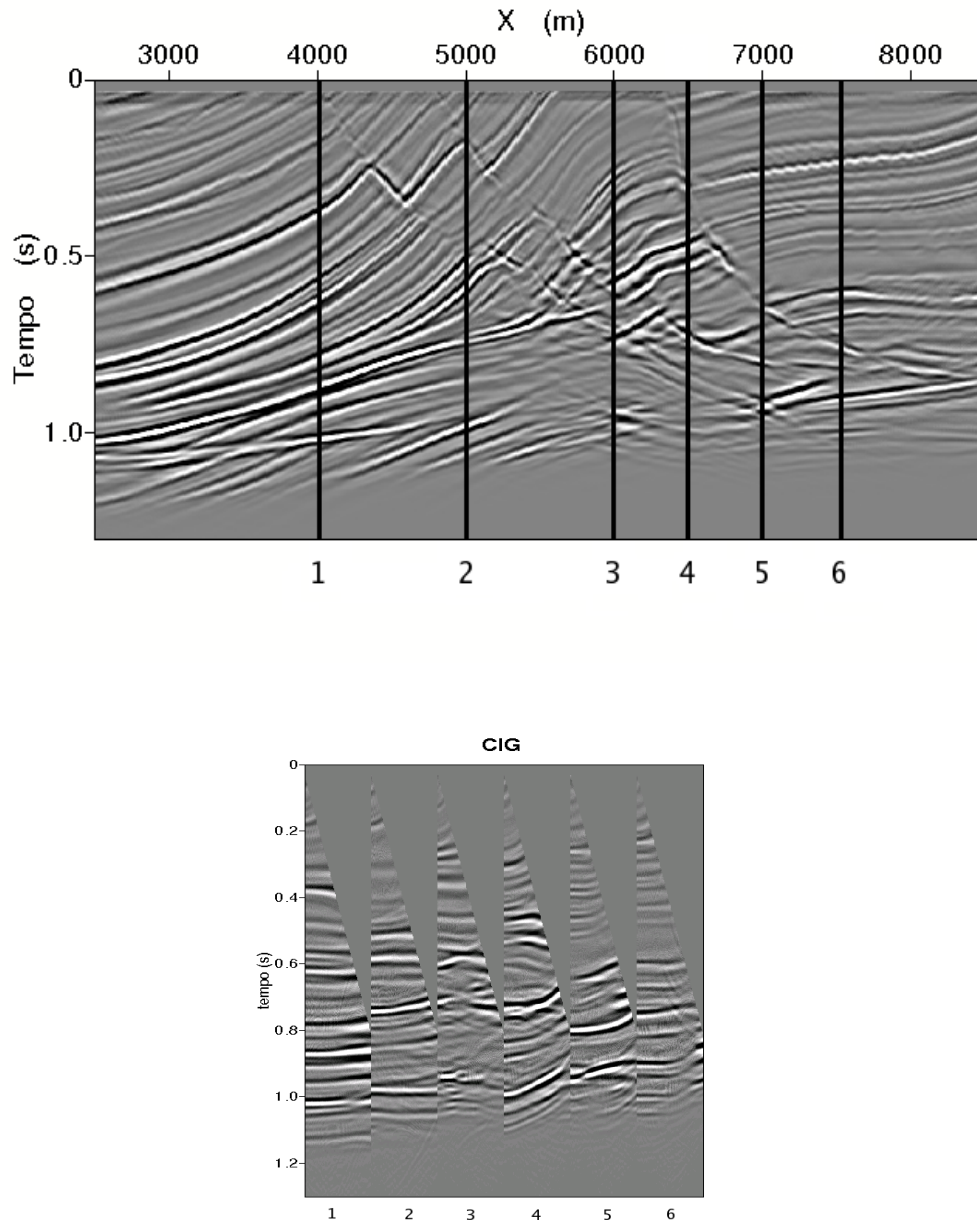


Figura 5.2: No topo estão indicadas as posições das CIG's nas seções migradas. A baixo estão as seções CIG's nos CMP's 4000 m, 5008 m, 6004 m, 6508 m, 7000 m e 7504 m referenciados, respectivamente, pela numeração 1, 2, 3, 4, 5 e 6 em cada CIG das Figuras 5.3, 5.4 e 5.5.

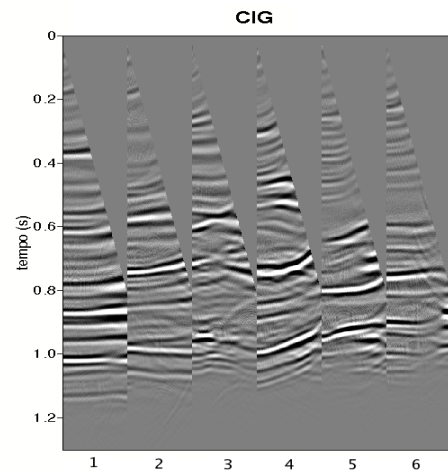
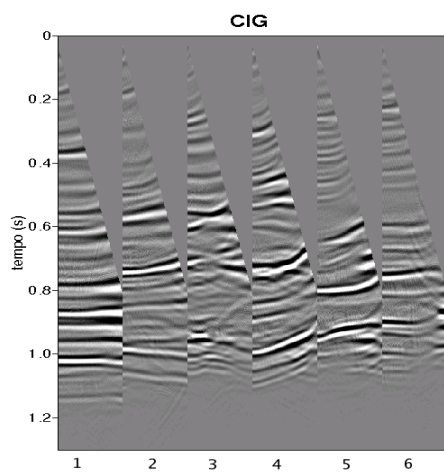
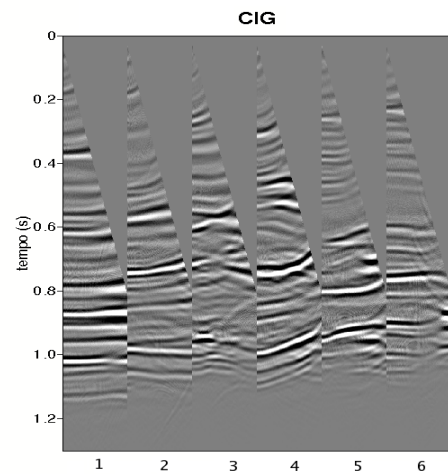
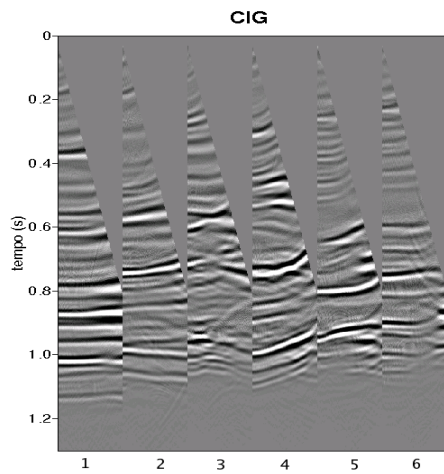
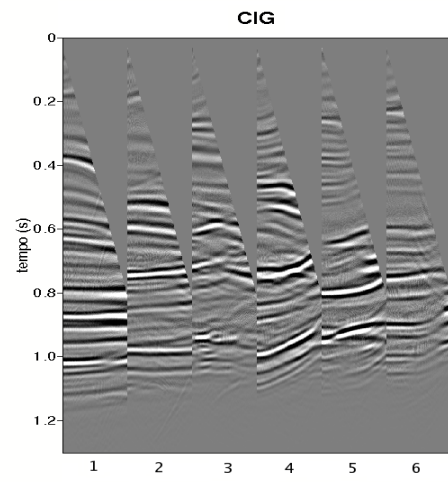
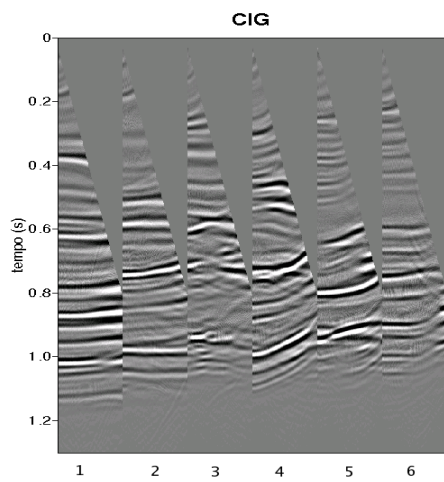


Figura 5.3: Famílias de imagem comum no experimento 1. No topo, para valor de temperatura elevada, no meio, com valor intermediário de temperatura e, abaixo, para baixa temperatura.

Figura 5.4: Famílias de imagem comum no experimento 2. No topo, para valor de temperatura elevada, no meio, com valor intermediário de temperatura e, abaixo, para baixa temperatura.

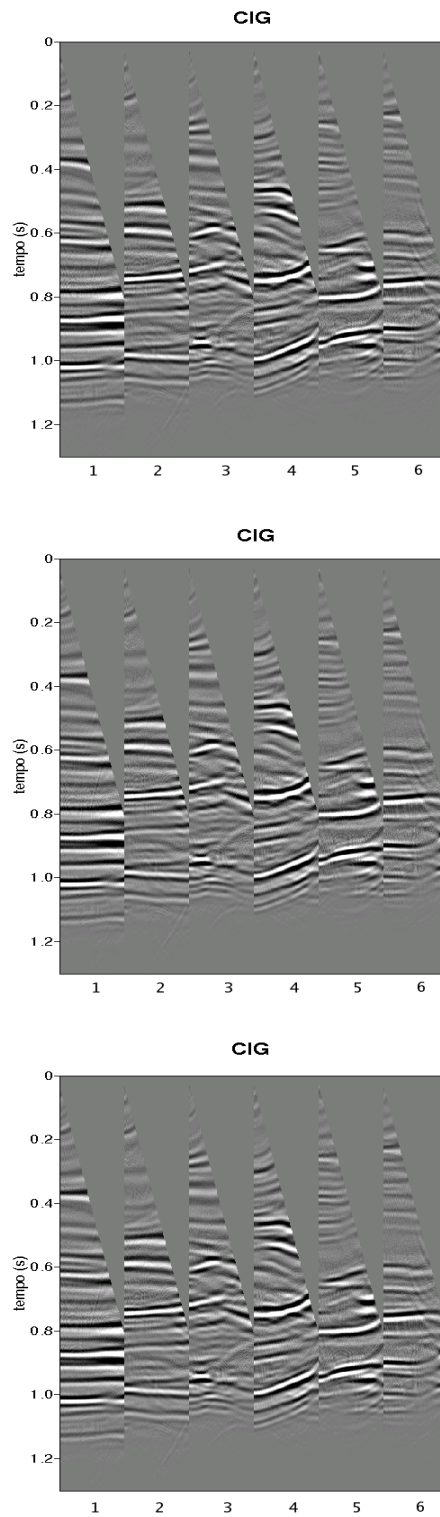


Figura 5.5: Famílias de imagem comum no experimento 3. No topo, para valor de temperatura elevada, no meio, com valor intermediário de temperatura e, abaixo, para baixa temperatura.

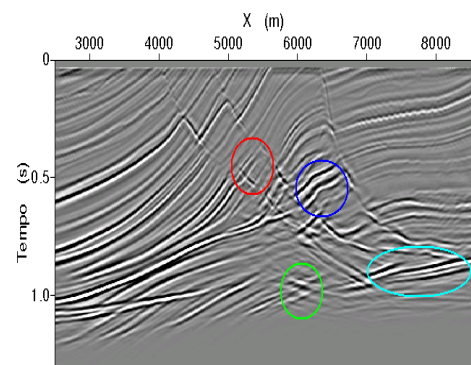
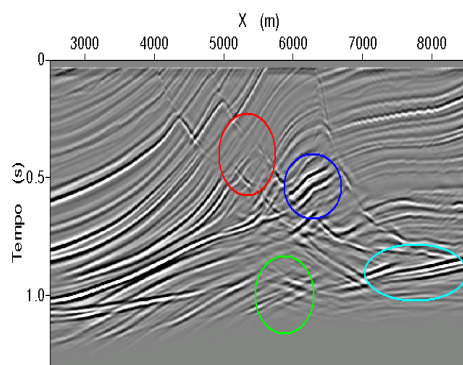
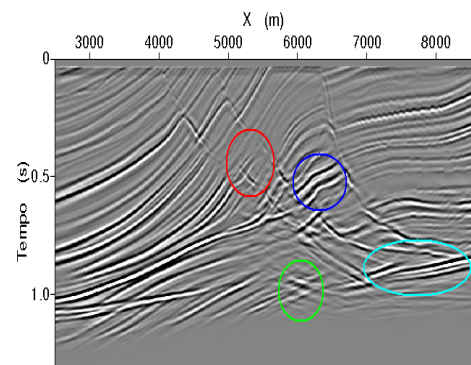
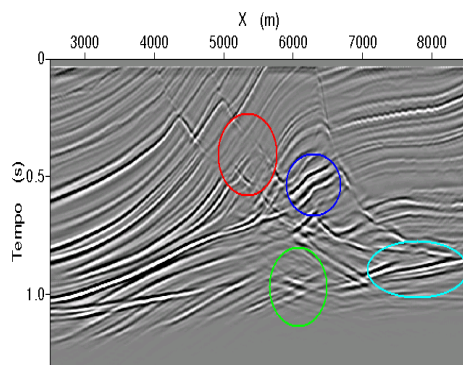
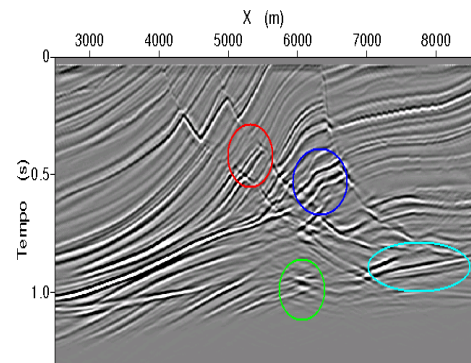
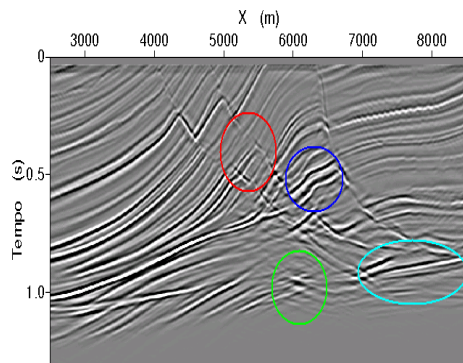


Figura 5.6: Migrações no experimento 1. No topo, com valor alto de temperatura, no meio, com valor intermediário e, abaixo, para temperatura baixa. As elipses destacam regiões com mudança na focalização dos eventos.

Figura 5.7: Migrações no experimento 2. No topo, com valor alto de temperatura, no meio, com valor intermediário e, abaixo, para temperatura baixa. As elipses destacam regiões com mudança na focalização dos eventos.

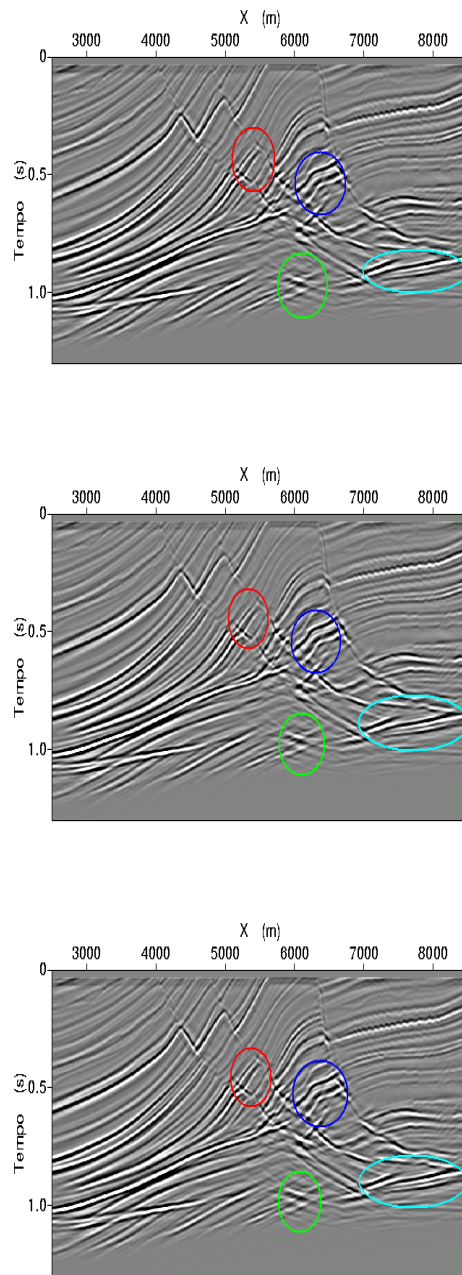


Figura 5.8: Migrações no experimento 3. No topo, com valor alto de temperatura, no meio, com valor intermediário e, abaixo, para temperatura baixa. As elipses destacam regiões com mudança na focalização dos eventos.

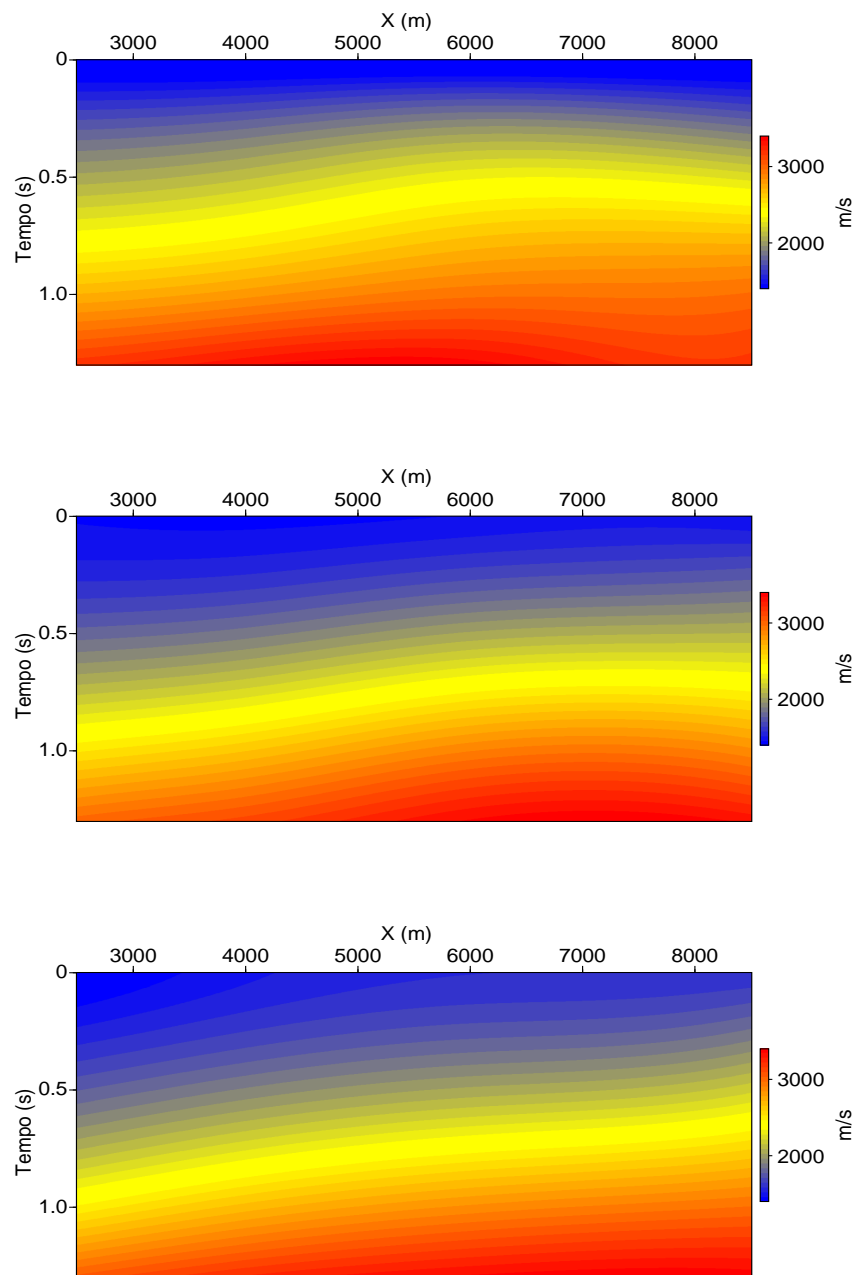


Figura 5.9: Modelos de velocidade estimados no experimento 1. No topo, com valor alto de temperatura, no meio, com valor intermediário e, abaixo, para temperatura baixa. Durante a evolução do processo de otimização observa-se uma redução no valor da velocidade média de acordo com o abaixamento das faixas de cores azul, amarelo e vermelho. Esta redução de velocidade média indica que a estimativa de velocidade converge para valores mais próximos dos valores corretos.

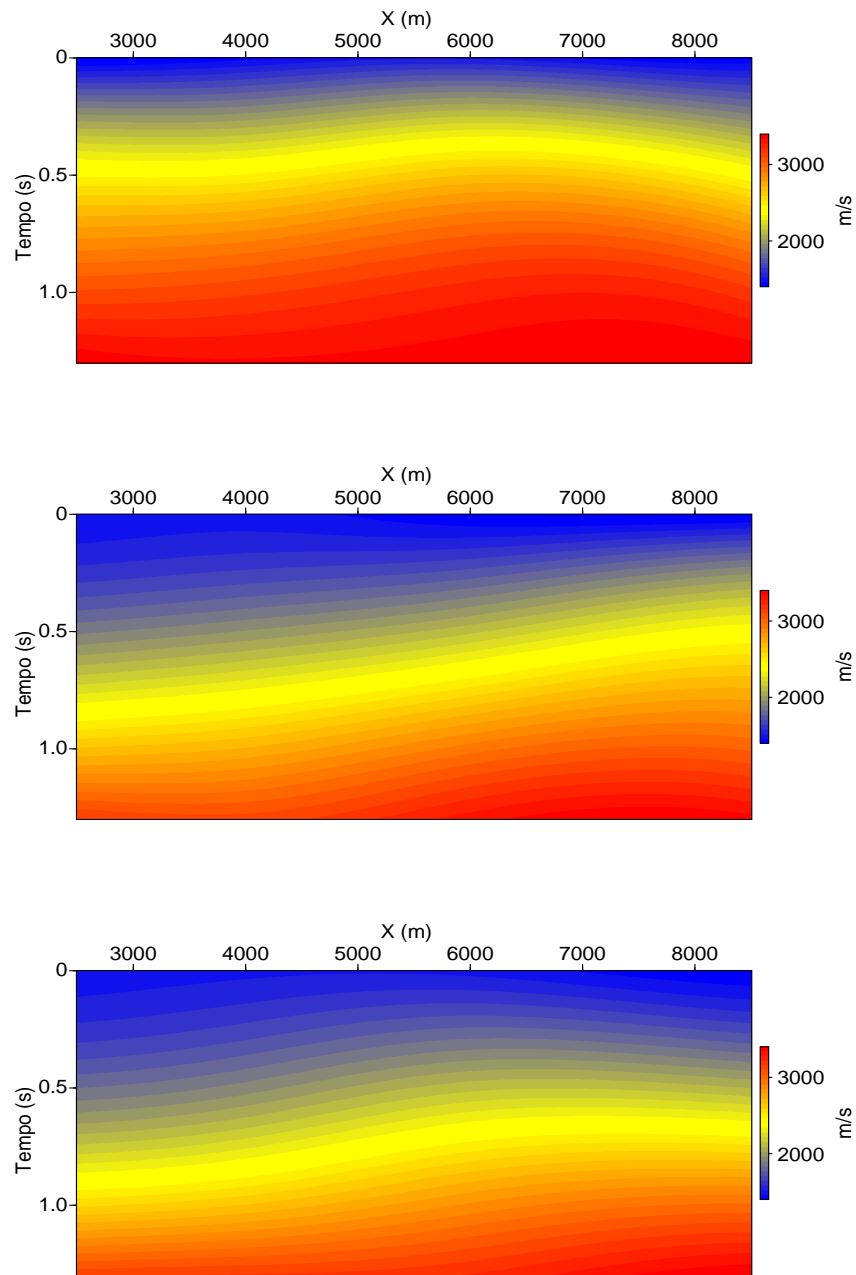


Figura 5.10: Modelos de velocidade estimados no experimento 2. No topo, com valor alto de temperatura, no meio, com valor intermediário e, abaixo, para temperatura baixa. Durante a evolução do processo de otimização observa-se uma redução no valor da velocidade média de acordo com o abaixamento das faixas de cores cores azul, amarelo e vermelho. Esta redução de velocidade média indica que a estimativa de velocidade converge para valores mais próximos dos valores corretos.

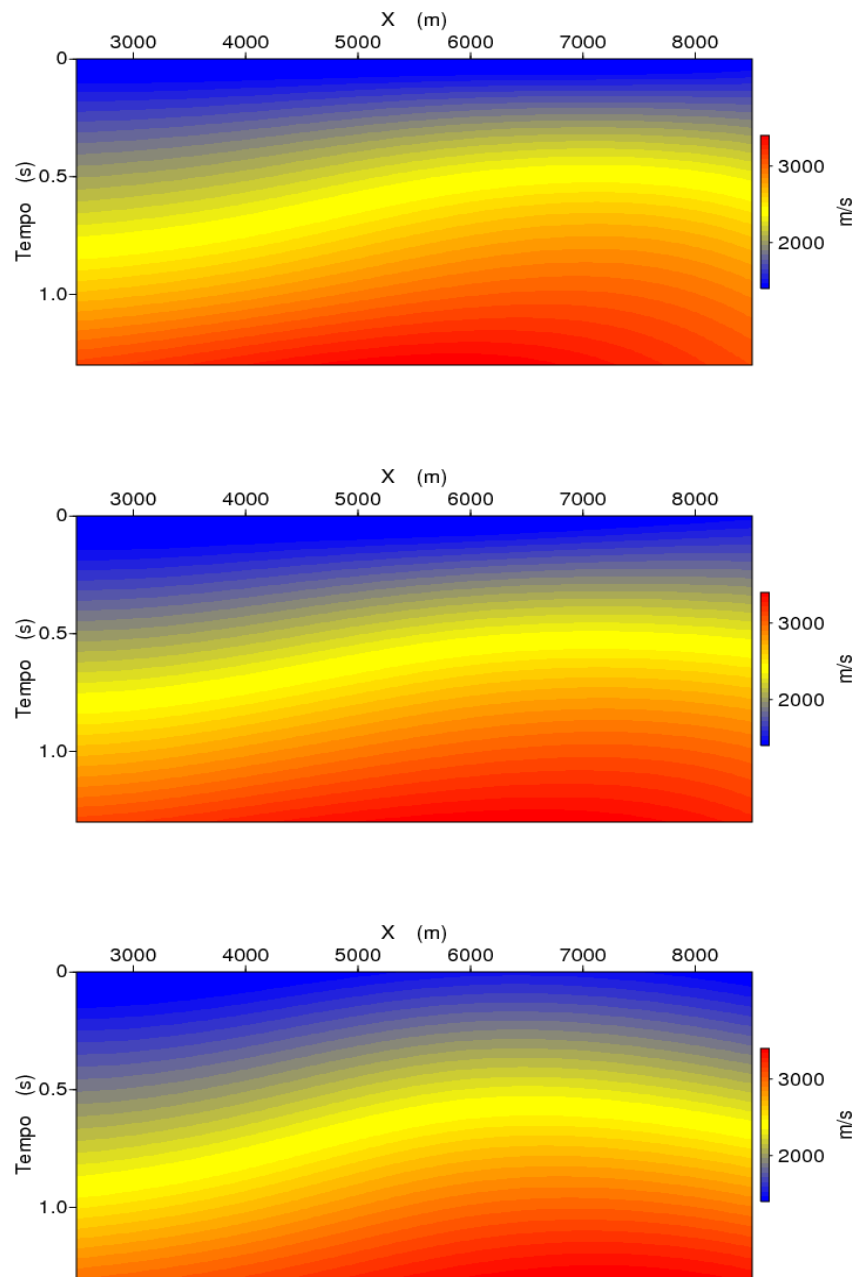


Figura 5.11: Modelos de velocidade estimados no experimento 3. No topo, com valor alto de temperatura, no meio, com valor intermediário e, abaixo, para temperatura baixa. Durante a evolução do processo de otimização observa-se uma redução no valor da velocidade média de acordo com o abaixamento das faixas de cores azul, amarelo e vermelho. Esta redução de velocidade média indica que a estimativa de velocidade converge para valores mais próximos dos valores corretos.

Os resultados dos três experimentos numéricos indicam que o algoritmo apresentou bons resultados nas regiões de menor variação lateral de velocidade. As Famílias de imagem comum nas coordenadas 6000 m, 6500 m e 7000 m apresentam, na parte inferior, eventos que não podem ser focalizados pela migração em tempo. Nas outras famílias de imagem comum houve maior horizontalização dos eventos. A adequação da migração em tornos destes CIGs pode ser confirmada pela boa focalização dos eventos na seção migrada. Nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8, as elipses também destacam alguns eventos com boa focalização mesmo em regiões de moderada variação lateral de velocidade. Os eventos mal focalizados são decorrentes das bruscas variações laterais de velocidades presentes. Outro fator que pode provocar mal focalização desses eventos é pela provável não exploração do algoritmo *Simulated Annealing* nestas regiões.

Os modelos de velocidades estimados apresentam umas variações significativas, apesar do alto grau de suavidade decorrente da malha esparsa utilizada para sua representação, como indicam as Figuras 5.9 e 5.10. No experimento 3 foi utilizada uma malha menos esparsa para a construção do modelo de velocidade (Figura 5.11). A redução no valor da velocidade média durante a evolução do processo de otimização indica que a estimativa de velocidade converge para valores mais próximos dos valores corretos. Esta característica indica que o algoritmo é eficiente, mais experimentos, com variação da malha de representação do modelo de velocidade são necessários para avaliar mais detalhadamente o algoritmo. A malha realizada para interpolar o modelo de velocidade dos experimentos é composta por 30 nós, sendo 6 ao longo da distância  $x$  espaçada em 2 km, e 5 na vertical correspondendo à 0.5 s do dado.

## 6 CONCLUSÃO

A tomografia usando migração pré-empilhamento em tempo é uma alternativa robusta para análise de velocidade em meios com moderada variação lateral de velocidade. Este trabalho investigou uma implementação alternativa da tomografia de migração em tempo. O algoritmo proposto utiliza o método de *Simulated Annealing* para estimar o modelo de velocidade e o semblance diferencial para medir a horizontalização dos eventos nas famílias de imagem comum.

O algoritmo de tomografia investigado apresenta as seguintes características:

- 1) permite a automatização da estimativa de um modelo de velocidade para migração pré-empilhamento em tempo;
- 2) não requer um modelo inicial de velocidade;
- 3) admite paralelização em cada nível de temperatura;
- 4) permite especificar vínculos do tipo caixa ao perfil de velocidade.

A validação do algoritmo nos dados Marmousoft, apresentou bons resultados de focalização nas regiões de moderada heterogeneidade. Nas regiões de maior complexidade, onde os pressupostos da migração em tempo são violados, não houve focalização dos eventos e as CIGs não apresentam eventos horizontalizados. Testes adicionais são necessários para investigar efeitos da escolha da malha de representação do modelo de velocidade na focalização dos eventos. Testes com outras funções objetivo também podem ser uma das alternativas para a validação do algoritmo. Uma estratégia interessante para uma melhor eficiência na otimização da estimativa do modelo de velocidade seria realizar a busca do mínimo global para cada seção de ponto imagem comum.

## REFERÊNCIAS

- BILLETE, F. et al. Practical aspects and applications of 2d stereotomography. *Geophysics*, v. 68, n. 3, p. 1008–1021, 2003.
- BIONDI, B. Kirchhoff imaging beyond aliasing. *Geophysics*, v. 66, n. 2, p. 654–666, 2001.
- BIONDI, B. *3D Seismic imaging*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2006. 383 p.
- CLAERBOUT, J. F. *Imaging the Earth's Interior*. [S.l.]: Blackwell Scientific Publications, 1985. 223 p.
- CORANA, A. M.; MARTINI, C.; RIDELA, S. Minimizing multimodal functions of continuous variables with simulated annealing algorithm. *ACM Transactions on Mathematical Software*, n. 13, p. 262–280, 1987.
- HUBRAL, P.; KREY, T. *Interval velocities from seismic reflection time measurements*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1980.
- LEGGOT, R. Time migration tomography. In: SOCIETY EXPLOARTION GEOPHYSICISTS, n. 25, 2006, New Orleans, *Expanded Abstracts*, New Orleans: SEG, 2006, p. 3393–3397, 2006.
- LEVIN, F. K. Apparent velocity from dipping interface reflections. *Geophysics*, n. 36, p. 6–510, 1971.
- LUMLEY, D. E.; CLAERBOUT, J. F.; BEVC, D. Anti-aliased kirchhoff 3d migration. *Geophysics*, v. 66, n. 2, p. 1282–1285, 1994.
- MA, X.-Q. A constrained global inversion method using an overparametrized scheme: Application to poststack seismic data. *Geophysics*, n. 66, p. 613–626, 2001.
- VERM, R. W.; SYMES, W. W. Practice and pitfalls in nmo-based differential semblance velocity analysis. In: SOCIETY EXPLOARTION GEOPHYSICISTS, n. 25, 2006, New Orleans, *Expanded Abstracts*, New Orleans: SEG, 2006, p. 2112–2115, 2006.
- VERSTEEG, R.; GRAU, G. Practical aspects of seismic data inversion, the marmousi experience. In: 52° EAGE MEETING, 1990, Europa, *Society Exploration Geophysicists*, Europa, 1990, p. 1–194, 1990.
- YILMAZ, O. *Seismic data processing*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, USA, 1987. 523 p.
- YILMAZ, O.; CLAERBOUT, J. F. Pre-stack partial migration geophysics. *Geophysics*, n. 45, p. 753–779, 1980.