



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA

MANOEL BENEDITO LEÃO LISBOA

ANÁLISE DE VELOCIDADES EM TEMPO

BELÉM
2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA

MANOEL BENEDITO LEÃO LISBOA

ANÁLISE DE VELOCIDADES EM TEMPO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de graduação em Geofísica.
Área de concentração: Métodos Sísmicos
Orientador: Jessé Carvalho Costa

BELÉM
2011

MANOEL BENEDITO LEÃO LISBOA

ANÁLISE DE VELOCIDADES EM TEMPO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de graduação em Geofísica.

Data de Aprovação: / /

Banca Examinadora:

Prof. Jessé Carvalho Costa - Orientador
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

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

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pela ajuda e compreensão na dedicação do tempo para a elaboração deste trabalho. Ao meu orientador Prof. Jessé Carvalho Costa, pela orientação, ajuda e paciência, durante todo o andamento da elaboração deste trabalho. A Prof^a Ellen Gomes pelas suas orientações e contribuições na geração das seções, aos examinadores da banca por suas importantes correções, revisões e contribuições para a elaboração do documento final. A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. A Deus por tudo na minha vida.

RESUMO

A determinação de velocidades das ondas sísmicas, a partir de dados gerados em subsuperfície é fundamental para o imageamento sísmico. Os campos de velocidade gerados servirão de suporte para o imageamento do arcabouço estrutural em subsuperfície.

Para um bom imageamento, os dados precisam ser empilhados e migrados com velocidades de empilhamento e de migração adequadas. A estimativa do modelo de velocidade é feita através da análise de velocidades.

Este trabalho apresenta a revisão de alguns métodos de análise de velocidade em tempo. A apresentação é feita em 03 etapas.

No segundo capítulo é feita uma descrição do método CMP, suas características e limitações, seguido da análise de velocidade. No terceiro capítulo, visando corrigir as limitações do método CMP é abordada a correção DMO, suas vantagens e limitações, seguida da análise de velocidades. No quarto capítulo é feita uma abordagem da migração, com ênfase para a migração pré-empilhamento em tempo. Neste capítulo, a análise de velocidades é feita utilizando o operador de migração do tipo Kirchhoff. Finalmente apresentamos as discussões dos resultados e conclusões.

Palavras Chaves: Análise de velocidade. Empilhamento. Migração pré-empilhamento. Campo de velocidade de empilhamento.

ABSTRACT

The determination of the velocities of seismic waves from the data generated in the subsurface is essential for seismic imaging. The velocity fields generated will support for imaging for subsurface structural framework.

For a good imaging, data must be stacked and migrated with velocities appropriated stacking and migration. The estimates of the velocity model is made by velocity analysis.

This paper presents a review of some methods of velocity analysis in time. The presentation is done in three steps. The second chapter is a description of the CMP method, its characteristics and limitations, followed by velocity analysis. In the third chapter, to correct the limitations of the CMP method is discussed of DMO correction, with its advantages and limitations, then the velocity analysis. In the fourth chapter is made an approach to migration, with emphasis on the prestack migration time. In this chapter we make the velocity analysis using the operator time KIRCHHOFF migration. Finally, present the discussions of the results and conclusions.

Key words: Velocity Analysis. Stacking. prestack migration. Velocity Field Stacking.

LISTA DE SIGLAS

SIGLA	DESCRIÇÃO
AVO	Amplitude Versus Afastamento.
CIG	Família de Ponto Imagem Comum (Do inglês <i>Common Image Gather</i>).
CMP	Ponto médio comum (Do inglês <i>Common Midpoint</i>).
CVP	Painel de Velocidade Constante (Do inglês <i>Constant Velocity Panels</i>).
CVS	Empilhado a Velocidade Constante (Do inglês <i>Constant Velocity stack</i>).
DMO	Sobre tempo de mergulho (Do inglês <i>Dip Moveout</i>).
DSR	Dupla Raiz Quadrada (Do inglês <i>Double Square root</i>).
VFS	Função Velocidade Constante (Do inglês <i>Stacking Function Velocity</i>).
NMO	Sobre tempo Normal (Do inglês <i>Normal Moveout</i>).
PSTM	Migração Pré Empilhamento em Tempo (Do inglês <i>Pré Stacking Time Migration</i>).
RMO	Do inglês <i>Residuo Moveout</i> .
RMS	Do inglês <i>Root Mean Square</i> .
V_{RMS}	Velocidade RMS (Do inglês <i>Velocity Root Mean Square</i>).
V_{NMO}	Velocidade Normal Moveout (Do inglês <i>Velocity Normal Moveout</i>).
V_{stck}	Velocidade de Empilhamento (Do inglês <i>Stacking Velocity</i>).
V_{mig}	Velocidade de Migração.
ZO	Afastamento Nulo (Do inglês <i>Zero Offset</i>).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 Representação esquemática da geometria de gravação (a) e de processamento (b).	17
Figura 2.2 (a) Geometria NMO para um refletor plano horizontal. O tempo de trânsito é descrito pela equação 2.4. (b) Moveout de reflexão associado com a geometria da Figura (2.4-a). A curva de tempo de trânsito para o refletor plano é uma hipérbole com seu ápice no traço de afastamento nulo. Fonte:(YILMAZ, 1978)	19
Figura 2.3 Geometria para o cálculo do tempo de trânsito em um único refletor inclinado. Fonte:(YILMAZ, 1987).	20
Figura 2.4 Geometria para o cálculo do tempo de trânsito em múltiplas interfaces inclinadas.	20
Figura 2.5 Propagação das ondas refletidas em n camadas horizontais	21
Figura 2.6 Painéis utilizados na análise de velocidade em famílias CMP.	24
Figura 2.7 Análise de velocidade no CMP 251.	25
Figura 2.8 Análise de velocidade no CMP 291.	25
Figura 2.9 Análise de velocidade no CMP 531.	26
Figura 2.10 Família CMP com um único refletor (a), onde foi aplicada a correção NMO para eliminar o efeito do afastamento (b). O caso de sobrecorreção (c) e da subcorreção (d) respectivamente. Fonte:(Yilmaz, 1978).	27
Figura 2.11 a) seção CMP 251; b) corrigido de NMO e c) painel de velocidade de empilhamento constante.	28
Figura 2.12 Um sinal com período T (a) é estirado para um sinal (b) de período $T' > T$ após a correção NMO.	29
Figura 2.13 (a) Sismograma sintético, com os traços organizados em família CMP. (b) após a correção NMO usando a velocidade RMS (c) e (d) são resultados após a aplicação do silenciamento usando percentual de estiramento de 50% e 100% respectivamente. Fonte: (Yilmaz, 1987.)	29

Figura 2.14 a) Espectro de velocidade; b) painel de velocidade constante (CVP) e c) Função velocidade de empilhamento(FVS).	32
Figura 2.15 Fluxograma do processo CMP.	35
Figura 2.16 Seção empilhada dos dados marmousi resultante da análise de velocidade em famílias CMP.	36
Figura 3.1 (a) Eventos com mergulhos conflitantes (refletor plano e mergulhante) (b) move-out para o refletor plano $V_{nmo} = V$ e para o refletor mergulhante $V_{nmo} = V/\cos\theta$	38
Figura 3.2 Resposta impulsiva do operador de migração em um meio homogêneo. Um evento em uma seção de afastamento comum, indicado pelo X vermelho na figura acima, pode ter sido originado pelo espalhamento do campo de onda incidente por qualquer distribuição de pontos difratores sobre a isócrina elíptica em azul.	40
Figura 3.3 Demigração para afastamento nulo para um refletor com mergulho.	40
Figura 3.4 Resposta impulsiva do operador DMO, em vermelho, e hipérboles de difração na configuração de afastamento nulo, em azul. A resposta do operador DMO é o envelope das hipérboles de difração e sua abertura é menor do que indica a análise puramente cinemática da equação (3.11).	43
Figura 3.5 A pirâmide de Queops acima é a superfície de tempo de trânsito associada a um ponto difrator em função da coordenada do CMP y e do semi-afastamento h . A correção DMO move um evento sobre esta superfície para a curva de tempo de afastamento nulo que passa pelo ápice da pirâmide. Fonte: (Clearbout, 1983)	43
Figura 3.6 Análise de velocidade no CMP 251.	45
Figura 3.7 Análise de velocidade no CMP 291.	45
Figura 3.8 Análise de velocidade no CMP 531.	46
Figura 3.9 Fluxo melhorado com a correção DMO.	47
Figura 3.10 Espectro de Velocidade (a) sem e (b) com a correção DMO. Os picos no espectro de aparência em (a) denotado por "A" representam os eventos de forte mergulhos que conflitam com os eventos planos denotado por "B".	48
Figura 3.11 (a) Seção empilhada do modelo Marmousi, resultante da análise de velocidade: (a) sem correção DMO e (b) após a correção DMO.	49
Figura 4.1 a) Seção de afastamento nulo e b) Modelo do refletor explosivo. Fonte:(Clearbout,	

1978)	51
Figura 4.2 Seções do modelo sintético Marmousi. a) empilhada com DMO; e b) migrada após a correção DMO. As difrações na Figura "a", foram colapsadas na Figura "b"(elipse vermelha). Os eventos com mergulhos da Figura "a", ficaram melhor focalizados na Figura "b"(elipse azul).	52
Figura 4.3 Princípio de Huygens para propagação de uma frente de onda. Cada ponto de uma frente de onda se comporta como uma fonte virtual de onda.	54
Figura 4.4 Hipérbole de difração produzida por um ponto difrator.	55
Figura 4.5 Geometria para o cálculo do tempo de trânsito para cada evento de difração determinado pela equação DSR.	55
Figura 4.6 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 o mesmo CMP e diferente afastamento.	59
Figura 4.7 representação esquemática da construção das seções CIG a partir das seções de afastamentos comum migradas em tempo.	59
Figura 4.8 Seções CIG com velocidade de migração: a) menor que o valor correto; b) com o valor igual ao correto e c) com o valor maior que o correto.	60
Figura 4.9 Seções migradas obtidas através da PSTM. A variação de amplitude entre estas imagens é devido a análise de velocidade e as funções peso utilizadas.	61
Figura 4.10 Regiões selecionadas correspondem as CIG locadas nas posições 4000m, 5000m, 6000m, 6500m, 7000m e 7500m, e referenciadas respectivamente pelos números de 1 a 6 em cada CIG.	62
Figura 4.11 representação esquemática das seções CIG nos CMP 4000, 5000 e 6000, 6500, 7000 e 7500.	62
Figura 4.12 Seções CIG no CMP 4000 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5 .	65
Figura 4.13 Seções CIG no CMP 5000 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5 .	65
Figura 4.14 Seções CIG no CMP 6000 m.(a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5 .	66

Figura 4.15 Seções CIG no CMP 6500 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5 66

Figura 4.16 Seções CIG no CMP 7000 m.(a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5 67

Figura 4.17 Seções CIG no CMP 7500 m.(a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5 67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	ANÁLISE DE VELOCIDADE EM FAMÍLIAS CMP	16
2.1	O MÉTODO CMP	16
2.1.1	Ordenação por ponto Médio Comum	17
2.1.2	Técnica de Gravação CMP	18
2.2	MOVEOUT DE REFLEXÕES EM FAMÍLIAS CMP	18
2.3	ANÁLISE DE VELOCIDADE	22
2.3.1	Correção do Sobretempo Normal (NMO)	26
2.3.2	O Problema do Estiramento pela Correção NMO	29
2.4	O ESPECTRO DE VELOCIDADES	31
2.4.1	Medida de Coerência - Semblance	32
2.4.2	Escolha de Velocidade de Empilhamento	33
2.4.3	Empilhamento CMP	34
2.4.4	Vantagens e Desvantagens do Método CMP	35
2.4.5	Aplicação a Dados Sintéticos	35
3	CORREÇÃO DMO PARA EVENTOS COM MERGULHOS CONFLITANTES	37
3.1	EVENTOS CONFLITANTES	37
3.2	O OPERADOR DE DMO	39
3.3	DMO NO DOMÍNIO $t - X$	42
3.4	ANÁLISE DE VELOCIDADE APÓS A CORREÇÃO DMO	44
3.4.1	ANÁLISE DE VELOCIDADE	45

3.4.2	Vantagens e desvantagens da Correção DMO	46
4	MIGRAÇÃO EM TEMPO	50
4.1	MIGRAÇÃO PÓS-EMPILHAMENTO	51
4.2	MIGRAÇÃO PRÉ-EMPILHAMENTO	53
4.2.1	Princípio de Huygens	53
4.2.2	Hipérboles de Difração	53
4.3	MIGRAÇÃO DE KIRCHHOFF	54
4.4	ANÁLISE DE VELOCIDADE USANDO A PSTM	56
4.4.1	Seções CIG	57
4.5	ANÁLISE DE VELOCIDADE	57
4.5.1	Experimentos Numéricos	60
4.6	ANÁLISE DE VELOCIDADE UTILIZANDO A PSTM KIRCHHOFF COM- PLETA	62
4.6.1	Experimentos Numéricos	64
5	CONCLUSÃO	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	69

1 INTRODUÇÃO

A análise de velocidade é uma das etapas fundamentais do processamento sísmico, para a determinação de velocidades das ondas sísmicas, a partir de dados gerados em subsuperfície. Nesta etapa são estimados os campos de velocidade que servirão de suporte para o imageamento sísmico do arcabouço estrutural em subsuperfície.

A análise de velocidade convencional, realizadas em famílias CMP, fornece a velocidade de empilhamento, que tomada como a velocidade RMS, (AL-CHALABI, 1974) permite determinar o modelo de velocidade. A técnica tem limitação de ser exata apenas em modelos de refletores planos e horizontais.

Na presença de mergulho conflitantes, a análise de velocidade na forma convencional dos dados corrigidos de DMO ("Dip Moveout") fornece valores de velocidades independentes de mergulho dos refletores. Nessa técnica, (HALE, 1984), o fluxo de processamento compreende a correção NMO, organização dos dados em famílias de afastamento comum, aplicação da correção DMO, a remoção da NMO, organização em famílias CMP e análise de velocidade.

Esta análise de velocidade fornece dados empilhados que são mais apropriados para a migração. A técnica no entanto, é condicionada ao uso de velocidade constantes para o meio em questão.

Para a realização da análise de velocidade em modelos com refletores de geometria arbitrária e velocidade variável, a utilização da migração torna-se eficiente na estimativa de velocidade RMS.

(AL-YAHYA, 1989) foi o pioneiro na análise de velocidade por migração medindo o sobretempo residual. A migração com velocidade correta produz uma imagem alinhada horizontalmente em CRG e o erro na velocidade introduz um sobretempo residual. A medida deste sobretempo é usada para estimar o erro na velocidade usada para migração e determinar um novo valor, mais correto, a partir dessa variável conhecida.

Neste trabalho faremos uma revisão dos métodos de análise de velocidade em tempo, utilizando a técnica CMP, posteriormente a técnica CMP com DMO e finalmente utilizando a própria migração, dando ênfase para a migração pré-empilhamento em tempo.

A monografia está organizada em cinco capítulos. No Capítulo 2, apresento o método

de análise de velocidade tradicional, realizada em dados organizados em famílias "Common Midpoint" (CMP). No Capítulo 3, abordarei os aspectos da correção DMO seguida da análise de velocidade. No Capítulo 4 descreverei a análise de velocidade utilizando a migração pré-empilhamento KIRCHHOFF. Finalmente apresentamos as discussões dos resultados e conclusões.

2 ANÁLISE DE VELOCIDADE EM FAMÍLIAS CMP

2.1 O MÉTODO CMP

O método CMP (Common Midpoint) foi desenvolvido no início da década de 60 (MAYNE, 1962) para áreas de baixa razão Sinal/Ruído. Trabalha colecionando sinais de diferentes tiros e receptores, de modo que tenham em comum o mesmo ponto refletor em profundidade.

Esta técnica utiliza a redundância dos dados sísmicos para aumentar a razão Sinal/Ruído, efetuar análise de velocidade e gerar traços empilhados que simulam uma seção de afastamento nulo e que atenua múltiplas. Nestas famílias o moveout das reflexões é hiperbólico, o que não acontece com outras famílias.

Neste capítulo será discutido como o método CMP é usado para fazer análise de velocidade e gerar seções empilhadas que simulam seções afastamento nulo e que refletem no dado sísmico.

As limitações deste método estão associadas as variações laterais de velocidade e refletores com mergulhos conflitantes, sendo nestes casos necessário o uso de outros métodos alternativos para contornar essas limitações.

2.1.1 Ordenação por ponto Médio Comum

Após o pré-processamento inicial, (supressão de ruídos, remoção de múltiplas, correção de amplitude), os dados são adquiridos em famílias de fonte comum, em seguida são organizados para a correspondente configuração de ponto médio comum, designado ordenação por CMP. Este processo requer a informação da geometria de campo Figura (2.1).

A aquisição de dados sísmicos com múltipla cobertura é feita nas coordenadas fonte-receptor (x_s, x_g). A Figura (2.1-b) é uma representação esquemática da geometria de gravação. Por outro lado, o procesamento de dados sísmicos é convencionalmente feito em coordenadas de ponto médio - meio afastamento (x_m, h), definidas pela relações,

$$x_m = \frac{x_s + x_g}{2} \quad (2.1)$$

$$h = \frac{x_s - x_g}{2} \quad (2.2)$$

Em que x_s é a coordenada da fonte e x_g e coordenada do receptor

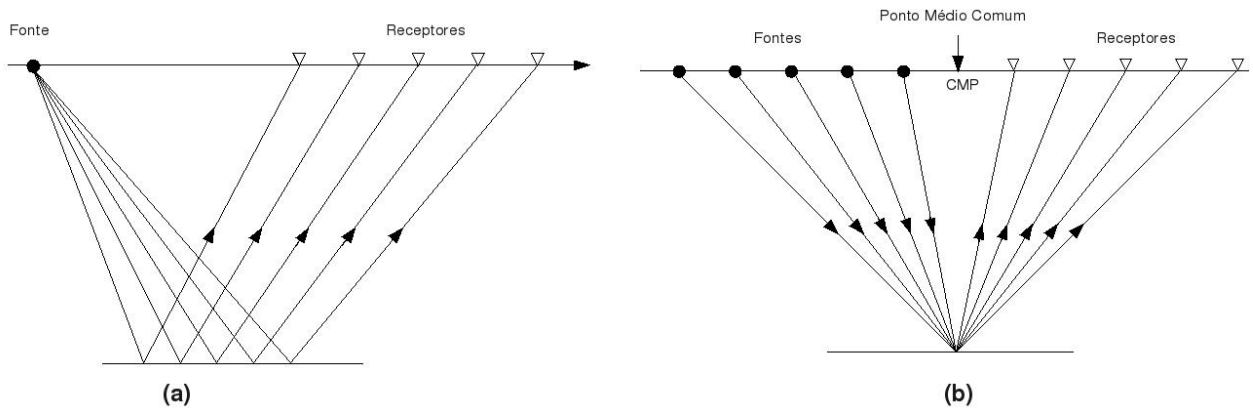


Figura 2.1: Representação esquemática da geometria de gravação (a) e de processamento (b).

A transformação de coordenadas requerida é conseguida classificando-se os dados em famílias CMP. Cada traço individual é atribuído ao ponto médio entre as posições da fonte e do receptor associado a esse traço. Os traços com a mesma posição de ponto médio são agrupados, constituindo assim uma família CMP.

2.1.2 Técnica de Gravação CMP

A técnica consiste da gravação redundante da informação para melhorar a relação S/R (razão sinal/ruído) (MAYNE, 1962). Para conseguir a redundância, múltiplas fontes, n_s , com espaçamento Δ_g , são usadas no campo. Cada fonte é registrada por múltiplos receptores, n_g , cada qual com afastamento diferente a intervalos de Δ_g . Desta forma, cada ponto em subsuperfície é iluminado várias vezes.

A equação (2.3) fornece o número total de vezes, N , que um ponto é iluminado. A relação S/R é melhorada, (teoricamente) por um fator $\sqrt{N}$. Este fator de melhoria é baseado na suposição de que o sinal da reflexão nos traços da família CMP é idêntico e o ruído é aleatório traço a traço (SENGBUSH, 1983). Dado que estas suposições não são estritamente mantidas na prática, a melhoria da relação S/R obtida pelo empilhamento é um tanto menor que $\sqrt{N}$. Em que N é dado por,

$$N = \frac{n_g \Delta_g}{2 \Delta_s} \quad (2.3)$$

Em que n_g , é o número de geofones, Δ_g é o espaçamento entre os geofones, Δ_s o espaçamento entre as fonte e N é o número de cobertura.

2.2 MOVEOUT DE REFLEXÕES EM FAMÍLIAS CMP

Para uma única camada horizontal de velocidade constante, (Figura 2.2) a curva de tempo de trânsito em função do afastamento fonte-receptor é uma hipérbole (YILMAZ, 1987), dada pela equação.

$$t^2(h) = t_0^2 + \left(\frac{x}{v}\right)^2 \quad (2.4)$$

Em que x é o afastamento, t_0 é o tempo duplo para afastamento nulo (tempo de trânsito ao longo da vertical MD e v é a velocidade do meio acima do refletor).

É importante notar que a projeção vertical do ponto em profundidade D ao longo da normal ao refletor coincide com o ponto médio M , isto acontece somente porque o refletor é horizontal. Na Figura (2.2-b) é mostrado o moveout da reflexão do evento da Figura (2.2-a). As trajetórias associadas a cada par fonte-receptor são refletidas no mesmo ponto em subsuperfície de profundidade D .

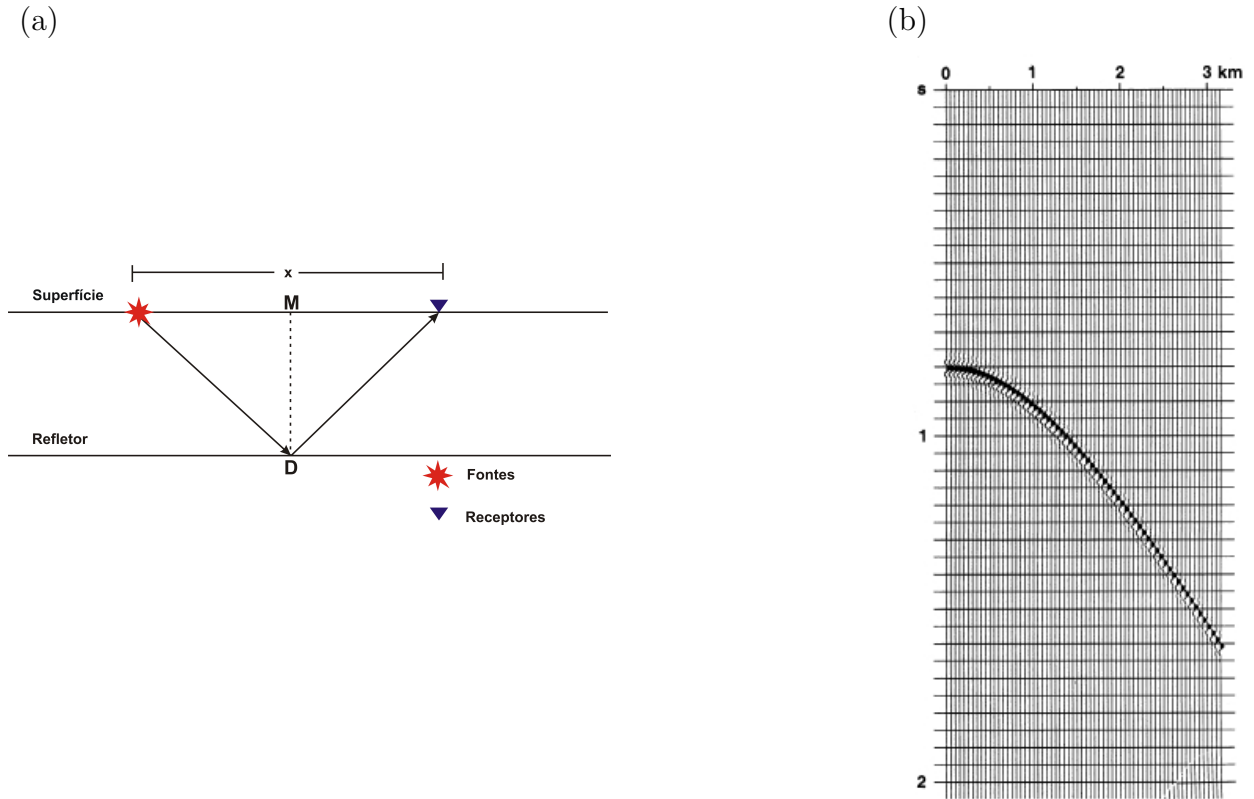


Figura 2.2: (a) Geometria NMO para um refletor plano horizontal. O tempo de trânsito é descrito pela equação 2.4. (b) Moveout de reflexão associado com a geometria da Figura (2.4-a). A curva de tempo de trânsito para o refletor plano é uma hipérbole com seu ápice no traço de afastamento nulo. Fonte:(YILMAZ, 1978)

Em meios onde os refletores são inclinados a estimativa de velocidade é influenciada pelo ângulo de mergulho das interfaces. O tempo de trânsito que descreve a propagação da onda em um único refletor inclinado, é dado por:

$$t^2(x) = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2} \cos^2 \theta \quad (2.5)$$

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

$$V_{NMO} = \frac{V}{\cos^2 \theta} \quad (2.6)$$

Sendo V a velocidade do meio acima do refletor e θ o ângulo de mergulho.

A Equação (2.5) descreve o tempo de trânsito para um refletor inclinado. A Velocidade

NMO de um refletor inclinado é dependente do ângulo de mergulho (Equação 2.6).

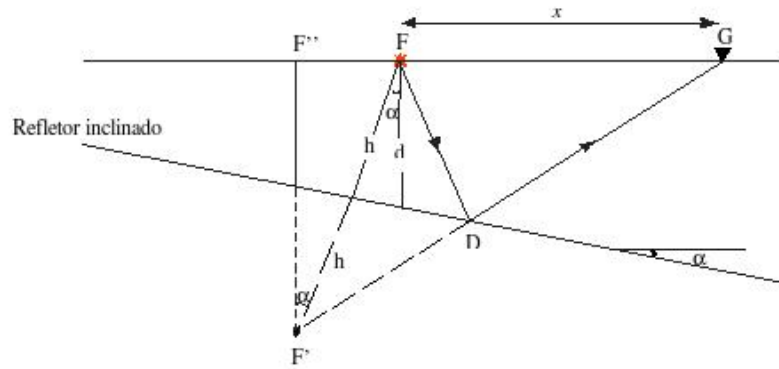


Figura 2.3: Geometria para o cálculo do tempo de trânsito em um único refletor inclinado. Fonte:(YILMAZ, 1987).

Em meios com múltiplas interfaces inclinadas como mostrado na Figura (2.4) a velocidade que corrige o feito NMO é dada pela Equação (2.8). Para calcular o tempo de trânsito da onda que sai da fonte F, reflete no ponto D e volta para o geofone G, que é associado ao ponto médio M, consideraremos a Equação (2.7) com a velocidade NMO descrita pela equação (2.8) (HUBRAL; KREY, 1980):

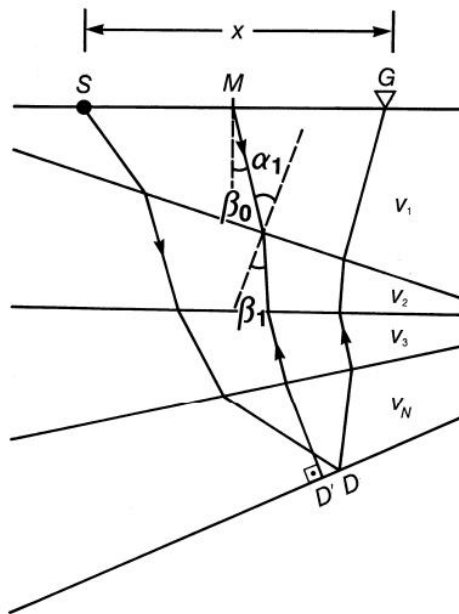


Figura 2.4: Geometria para o cálculo do tempo de trânsito em múltiplas interfaces inclinadas.

$$t^2(x) = \tau^2 + \frac{x^2}{V_{NMO}^2} \quad (2.7)$$

$$V_{NMO}^2 = \frac{1}{t(0) \cos^2 \beta_0} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i(0) \prod_{k=1}^{i-1} \left(\frac{\cos^2 \alpha_k}{\cos^2 \beta_k} \right), \quad (2.8)$$

Considerando um meio formado por camadas planas horizontais (Figura 2.5). Cada camada tem uma espessura que pode ser definida em termos do dobro do tempo de afastamento nulo. As camadas tem velocidades intervalares $(v_1, v_2, \dots, v_n)$, em que n é o número de camadas. A trajetória partindo da fonte F até a profundidade D e seguindo até o receptor R, tem tempo de trânsito dado por (TANER N.T; ALHILALI, 1974):

$$t^2 = C_0 + C_1 x^2 + C_2 x^4 + C_3 x^6 + \dots, \quad (2.9)$$

em que $C_0 = t_0^2$, $C_1 = 1/v_{rms}^2$ e $C_2, C_3, \dots$ são funções que dependem da espessura e velocidade intervalar das camadas.

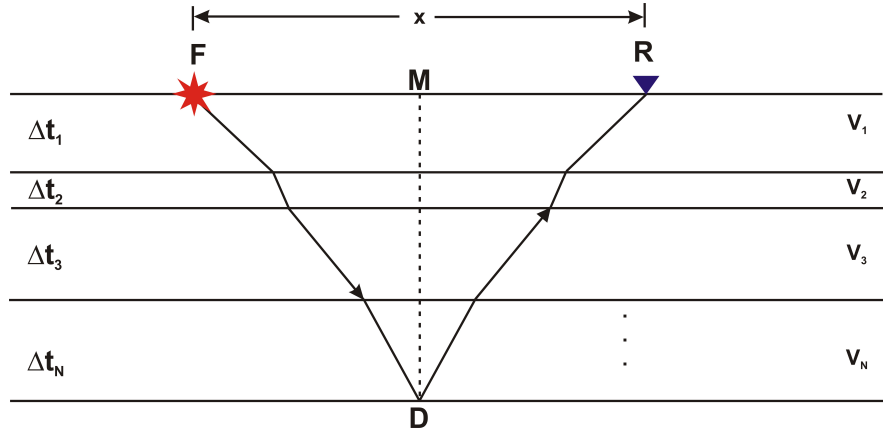


Figura 2.5: Propagação das ondas refletidas em n camadas horizontais

A velocidade *RMS* no ponto de profundidade *D* é definida por:

$$v_{rms}^2 = \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^n v_i^2 \Delta t_i, \quad (2.10)$$

em que Δt_i é o tempo de trânsito na *i*-ésima camada, v_i é a velocidade na *i*-ésima camada e $t_0 = 1 / \sum_{i=1}^n \Delta t_i$. Considerando pequenos afastamentos comparados com a profundidade a equação (2.10) pode ser escrita na forma aproximada:

$$t = \sqrt{\frac{x^2}{v_{rms}^2} + t^2}. \quad (2.11)$$

2.3 ANÁLISE DE VELOCIDADE

A análise de velocidade é uma etapa que está diretamente ligada ao sucesso do processamento sísmico, pois a qualidade da seção sísmica empilhada obtida dependerá do grau de precisão alcançado na determinação das velocidades das camadas em subsuperfície.

Existem diferentes tipos de velocidades: intervalar, aparente, RMS, instantânea, NMO, empilhamento, de migração, entre outras. Entretanto a velocidade que pode ser obtida dos dados sísmicos é a velocidade que gera o melhor empilhamento.

Assumindo um meio formadas por camadas, a velocidade de empilhamento está relacionada com a velocidade NMO. Esta por sua vez está relacionada com a velocidade RMS, que é a velocidade média das camadas.

A análise de velocidade foi feita utilizando o Software ProMax da empresa Landmark, que consiste em programas de fácil manipulação, e que permitem realizar a análise de velocidade de forma rápida e interativa.

Para auxiliar na escolha das velocidades são gerados os seguintes painéis: Espectro de velocidade (semblance), painel de velocidade constante (CVP) e função de velocidade de empilhamento (FVS). Os dados para gerar essas funções são carregados no Software "Velocity análise precompute".

Este software tem as seguintes funções:

- Prepara os dados para a análise de velocidade;
- Soma os traços dos CMP para gerar a super família;

- Calcula os valores do espectro de velocidade (Função Semblance);
- Cria a função velocidade de empilhamento (FVS)

Estes painéis gerados fornecem as seguintes informações:

- 1) Espectro de velocidades: Fornece a velocidade de empilhamento
- 2) Painel de velocidade constante (CVP): Gera as superfamílias CMP
- 3) Painel de empilhamento de velocidade constante (FVS): Mostra lado a lado os CMP empilhados, escolhidos para gerar a superfamília

O critério utilizado para a análise de velocidade é a escolha das hipérboles que melhor se ajustam aos eventos de reflexão. Para a escolhas destas hipérboles, são feitos *picking* em cada CMP, montando uma tabela a ser usada nas etapas seguinte do processamento.

Esta tabela representa a função velocidade contra o tempo de trânsito em afastamento nulo. Os pares velocidade-tempo são selecionados através do espectro de velocidades. Nesse método a idéia é indicar alguma medida de coerencia do sinal baseado no mapa de coerência de velocidade - Semblance.

O resultado da análise de velocidade é um campo de velocidades que será usado para a correção NMO e posteriormente no empilhamento, para obter a seção sísmica empilhada. Quando há pouca precisão na escolha das velocidades a qualidade da seção empilhada será comprometida.

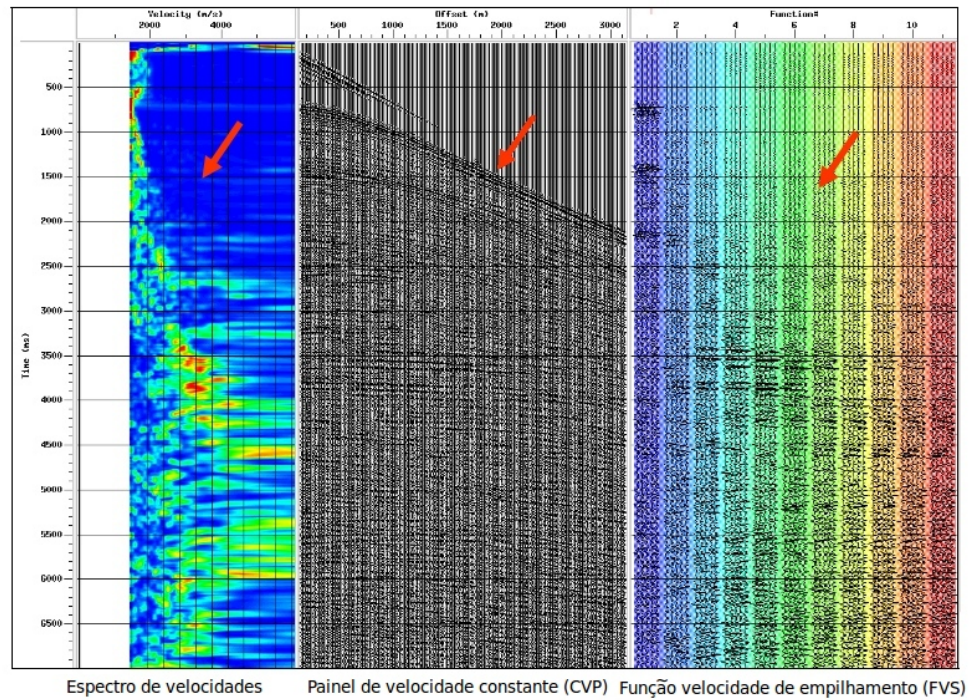


Figura 2.6: Painéis utilizados na análise de velocidade em famílias CMP.

O algoritmo para a análise de velocidade em famílias CMP partindo de dados já pré-processados é o seguinte:

- 1) Organizar os dados em família CMP
- 2) Efetuar a análise de velocidade
- 3) Aplicar a correção NMO
- 4) Efetuar o empilhamento dos dados.

A análise de velocidade foi feita em famílias CMPs em 03 painéis. As Figuras (2.7), (2.8) e (2.9) mostram a análise de velocidade nos CMP 251, 291 e 351 respectivamente.

Nestes painéis foram selecionadas as hipérboles que melhor se ajustaram aos eventos de reflexão. Após os *picking*, as hipérboles destacadas em amarelo, foram as que melhor se ajustaram aos eventos de reflexão. Estas velocidades serão armazenadas para a correção NMO e o empilhamento.

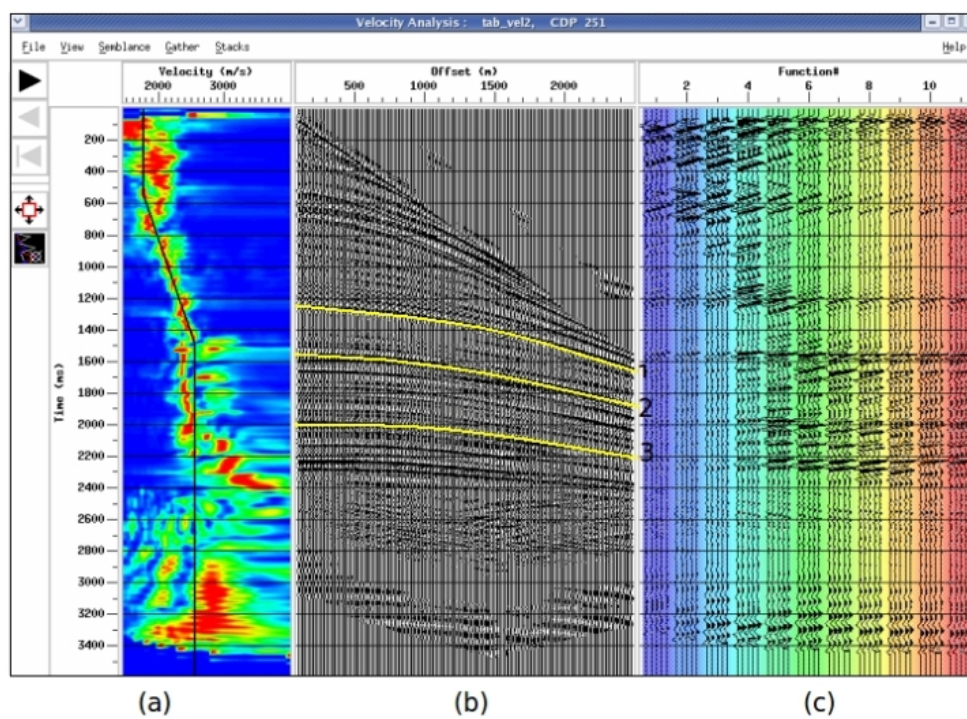


Figura 2.7: Análise de velocidade no CMP 251.

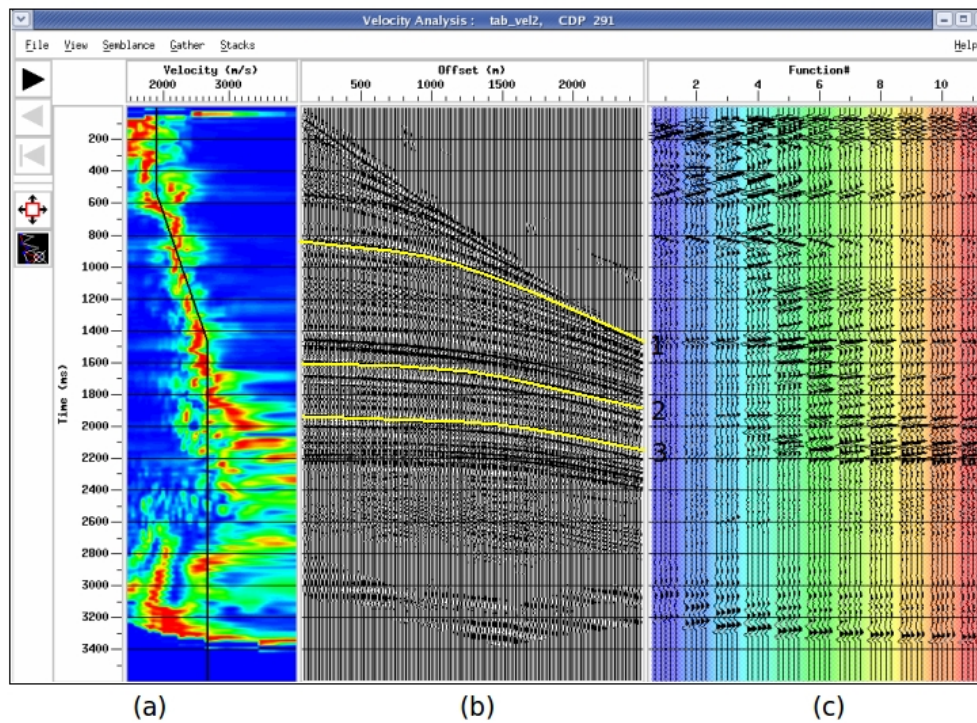


Figura 2.8: Análise de velocidade no CMP 291.

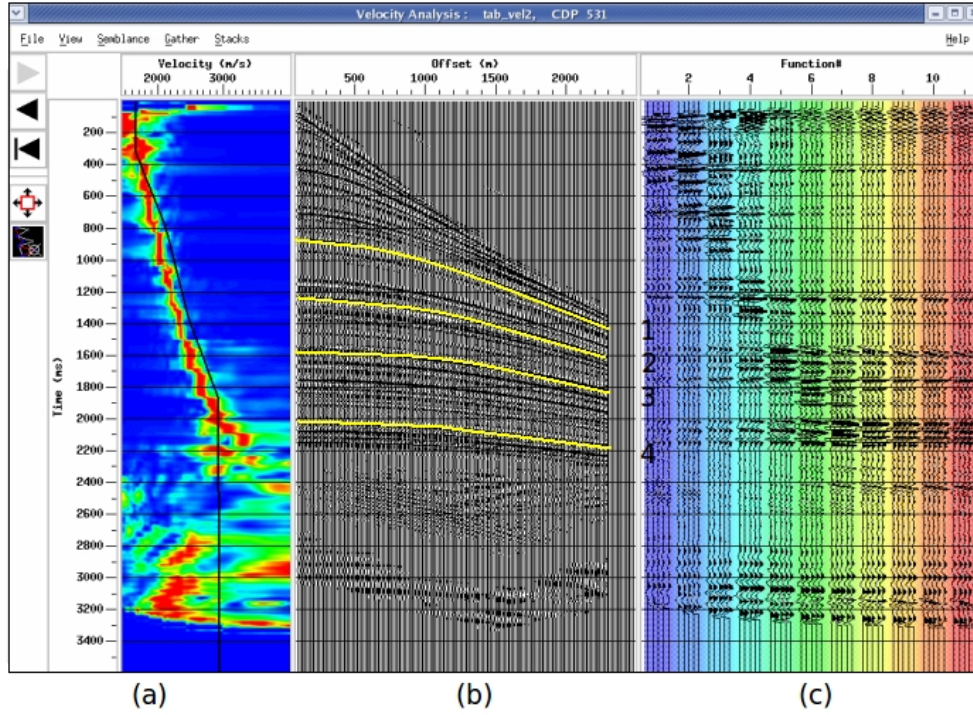


Figura 2.9: Análise de velocidade no CMP 531.

2.3.1 Correção do Sobretempo Normal (NMO)

Para uma única camada horizontal de velocidade constante, a curva de tempo de trânsito em função do afastamento fonte-receptor é uma hipérbole (YILMAZ, 1978). A diferença entre o tempo de trânsito em um afastamento dado e aquele afastamento nulo é chamada de Sobretempo Normal (NMO). A velocidade requerida para corrigir o sobretempo normal é denominada velocidade NMO (V_{NMO}). Estimada a velocidade NMO, o tempo de trânsito pode ser corrigido removendo o efeito do afastamento, Figura (2.11).

A correção NMO é dada pela diferença entre $t(h)$ e t_0 de acordo com a equação,

$$\Delta t_{NMO} = t(h) - t_0 \quad (2.12)$$

$$\Delta t_{NMO} = t_0 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{x}{v_{NMO}} \right)^2} - 1 \right] \quad (2.13)$$

Em que Δt_{NMO} o tempo de correção NMO, $t(h)$ é o tempo no afastamento h e t_0 é o tempo zero offset.

Note que o NMO aumenta com o afastamento e diminui com a profundidade. O NMO também é menor para grandes valores da velocidade.

Para um refletor plano que separa dois meios homogêneos, a hipérbole de reflexão pode ser corrigida de forma exata, isto é, a dependência do afastamento pode ser eliminada, se for usada a velocidade correta do meio acima do refletor na equação (2.7). Se for usada uma velocidade maior que a do meio, então a hipérbole não é completamente horizontalizada. Isto é chamado de subcorreção. Por outro lado se for usado uma velocidade menor que a do meio, então ocorre a Sobrecorreção. Na Figura (2.11-b) é mostrada a velocidade ótima aplicada na equação (2.7) e a hipérbole é horizontalizada completamente.

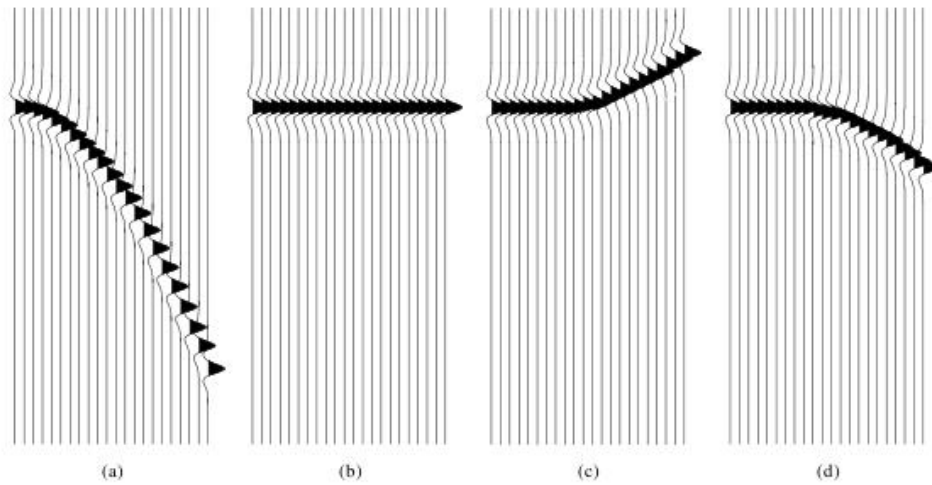


Figura 2.10: Família CMP com um único refletor (a), onde foi aplicada a correção NMO para eliminar o efeito do afastamento (b). O caso de sobrecorreção (c) e da subcorreção (d) respectivamente. Fonte: (Yilmaz, 1978).

O campo de velocidades é usado na correção de sobretempo normal (NMO) nas famílias CMP. Após a correção NMO, os eventos são virtualmente horizontalizados ao longo do eixo dos afastamentos. Em outras palavras, o efeito do afastamento é removido do tempo de trânsito. Porém, em consequência da correção NMO, os traços são estirados. Em contraste com a correção estática, que é constante em todo o traço, o deslocamento produzido pelo estiramento do pulso varia no tempo.

A correção NMO, denominada de correção dinâmica, faz com que o conteúdo da frequência caia. O estiramento aumenta nos tempos rasos e em afastamentos grandes. Para suprir a área estirada é feito um silenciamento, ou seja os dados são descartados. Finalmente, o empilhamento CMP é obtido somando os traços ao longo do eixo dos afastamentos.

Matematicamente, a velocidade NMO está relacionada com a curvatura da curva de sobretempo NMO no traço de afastamento nulo. Desta forma, para afastamentos curtos, a velocidade de empilhamento, V_{stk} aproxima convenientemente a velocidade NMO. Isto não acontece nos afastamentos grandes, para os quais a velocidade de empilhamento representa uma curvatura efetiva da curva de sobretempo NMO ao longo de todo o traço, diferindo, portanto da velocidade V_{NMO} . Embora exista essa diferença conceitual, a velocidade de empilhamento e a velocidade NMO são geralmente considerada equivalentes.

A equação de sobretempo normal usada para definir a melhor curva de empilhamento é dada pela equação:

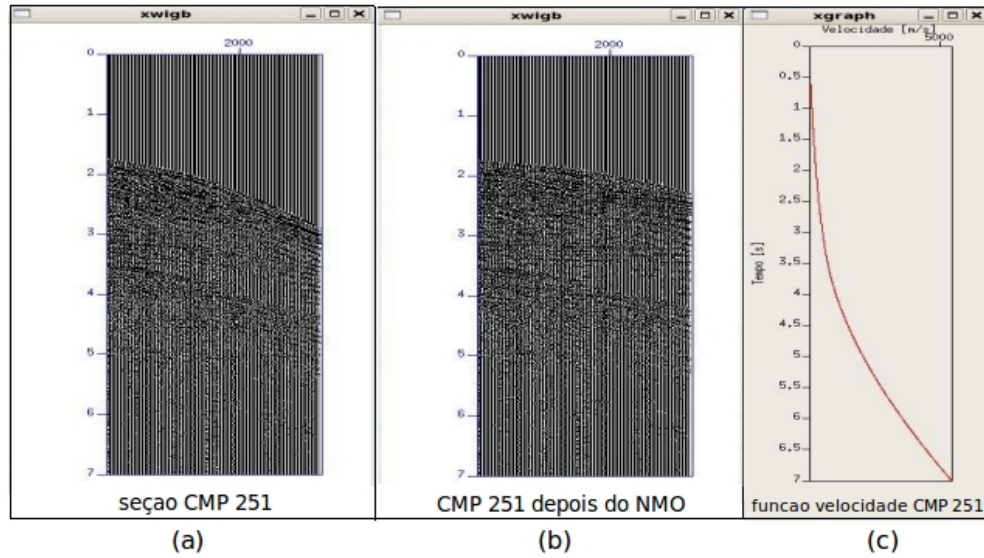


Figura 2.11: a) seção CMP 251; b) corrigido de NMO e c) painel de velocidade de empilhamento constante.

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{V_{stk}^2} \quad (2.14)$$

Em que t_0 é tempo de trânsito para afastamento nulo, h é o meio afastamento e V_{stk} é a velocidade de empilhamento.

Uma forma de estimar a velocidade NMO consiste em aplicar diferentes correções NMO a uma família CMP, considerando uma série de valores V_{stk} na equação de empilhamento (2.14), e plotando lado a lado as correspondentes correções (isto é, diferenças entre o tempo de trânsito observado e o sobretempo correspondente a cada uma das curvas). A velocidade que melhor "horizontalize" cada evento é escolhida como sua velocidade NMO.

2.3.2 O Problema do Estiramento pela Correção NMO

Como um resultado da correção NMO, ocorre uma distorção da frequência, particularmente para eventos rasos e grandes afastamentos. Este fenômeno é chamado de *estiramento NMO*, (ver Figura 2.12). A forma de onda com um período dominante T é estirado tal que seu período T' , após a correção NMO, é tal que $T' > T$. O estiramento é uma distorção na frequência no qual os eventos são deslocados para baixas frequências.

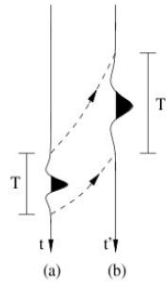


Figura 2.12: Um sinal com período T (a) é estirado para um sinal (b) de período $T' > T$ após a correção NMO.

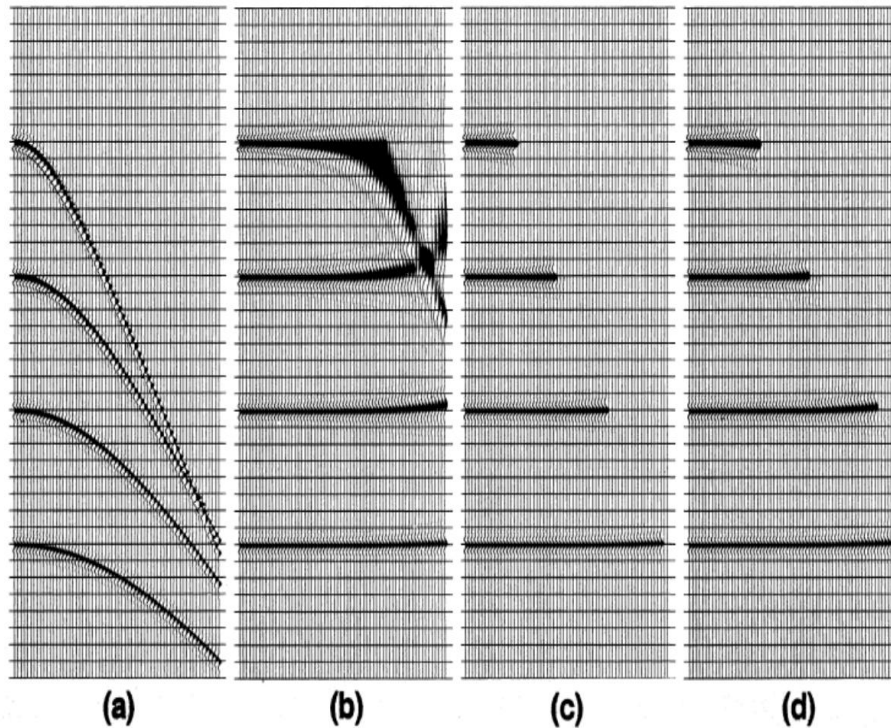


Figura 2.13: (a) Sismograma sintético, com os traços organizados em família CMP. (b) após a correção NMO usando a velocidade RMS (c) e (d) são resultados após a aplicação do silenciamento usando percentual de estiramento de 50% e 100% respectivamente. Fonte: (Yilmaz, 1987.)

O estiramento é quantificado por (YILMAZ, 1987):

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t_{NMO}}{t_{(0)}} \quad (2.15)$$

Em que: f é a frequência dominante, Δf é a mudança da frequência e Δt_{NMO} é o tempo NMO. Este problema pode ser resolvido através do silenciamento da área estirada. Um silenciamento automático pode ser realizado usando a definição de estiramento dada pela Equação (2.15).

Na Figura (2.13) são mostradas dois exemplos de silenciamento aplicado a família CMP. No primeiro exemplo, Figura (2.13-c), foi aplicado o silenciamento com a porcentagem de estiramento de 50%, não se verifica distorções significantes na frequência. No segundo exemplo, Figura (2.13-d), o limite da porcentagem de estiramento foi de 100%, já se verifica algumas distorções. É utilizado uma porcentagem de estiramento maior, quando se quer incluir o máximo possível de traços da família CMP no empilhamento sem que haja degradação.

Existe uma dependência entre a relação Sinal/Ruído (S/R) e o silenciamento. Se relação S/R é boa então é recomendado silenciar mais do que a área estirada requerida para preservar a largura do sinal. Por outro lado, se a relação S/R é pobre, pode ser necessário aceitar um maior aumento no estiramento para obter uma maior quantidade de traços a ser somados no empilhamento.

Na Tabela 2.1 abaixo, são mostrados alguns exemplos de velocidade NMO de acordo com o refletor.

Tabela 2.1: Velocidade NMO para vários tipos de refletores.

Modelo	Velocidade NMO
Um camada horizontal	Velocidade acima da interface refletora
Várias camadas planas horizontais	Velocidade RMS considerando afastamentos menores que a profundidade das camadas
Uma camada com mergulho	Velocidade do meio acima da superfície refletora dividida pelo cosseno do ângulo de mergulho
Várias camadas com mergulhos arbitrários	Velocidade RMS considerando afastamentos menores que a profundidade das camadas e pequenos ângulos de mergulho

A Tabela 2.1 resume a velocidade NMO necessária para vários modelos de refletores. Pré-supondo pequenas aberturas e pequenos ângulos o sobretempo hiperbólico para todos os casos é dado por:

$$t^2(x) = t^2(0) + \frac{x^2}{v_{NMO}^2}. \quad (2.16)$$

A velocidade NMO é diferente da velocidade de empilhamento para afastamentos longos. Esta é dada pelo valor ótimo que permite o empilhamento dos traços em uma família CMP. A forma hiperbólica é usada para definir a melhor trajetória de empilhamento T_{stk} como:

$$t_{stk}^2(x) = + \frac{x^2}{v_{stk}^2}, \quad (2.17)$$

Em que v_{stk} é a velocidade que permite o melhor ajuste da trajetória do tempo de trânsito de uma família CMP e uma hipérbole dentro do comprimento do lançamento, $t_{stk}^2(x)$ é o tempo de trânsito para grandes afastamentos x e $t_{stk}^2(0)$ é o tempo zero offset.

2.4 O ESPECTRO DE VELOCIDADES

O espectro de velocidade é obtido quando os resultados do empilhamento para um intervalo de velocidades são dispostos num painel para cada uma das velocidades, cada em-

empilhamento ao lado do outro. Nesta disposição têm-se a velocidade no eixo horizontal e o tempo de trânsito no eixo vertical. Para um conjunto de velocidades teste ($V_1, V_2, \dots, V_j$) são calculadas J hipérboles. Cada hipérbole é dada pela equação (2.17).

O espectro de velocidade (semblance) não somente pode fornecer a função velocidade de empilhamento, mas também permite distinguir entre as reflexões primárias e múltiplas.

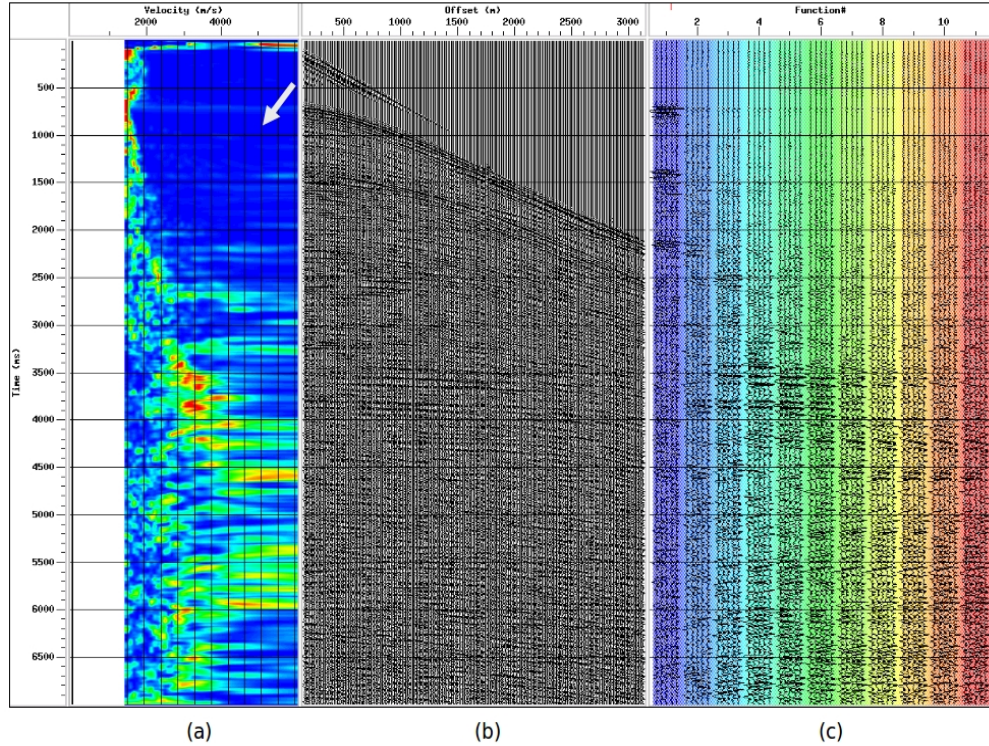


Figura 2.14: a) Espectro de velocidade; b) painel de velocidade constante (CVP) e c) Função velocidade de empilhamento(FVS).

2.4.1 Medida de Coerência - Semblance

O Semblance é uma medida de coerência multicanal (Sheriff,1984), que mede a razão da energia total dos N traços empilhados, em uma janela de tempo de comprimento Δt por N vezes a soma da energia de todos os traços de uma família CMP, na mesma janela de tempo.

Para se obter o semblance para uma velocidade específica, todos os traços de um CMP são corrigidos pelo seu "tempo de chegada" assumindo a velocidade fornecida. A correção para o tempo de chegada tem objetivo de compensar as diferenças do sobretempo normal (NMO). A extrapolação dos traços que são somados é calculada por,

$$S_t = \frac{\sum_t^{\Delta t+t} \left[\sum_{i=1}^N f_{i,t} \right]^2}{N \sum_t^{\Delta t+t} \sum_{i=1}^N f_{i,t}^2}, \quad (2.18)$$

em que: $f_{i,t}(i)$ é a amplitude do i -ésimo traço para o tempo t ; $\sum_{i=1}^N f_{i,t}$ é a amplitude dos N traços de uma família CMP e $\left[\sum_{i=1}^N f_{i,t} \right]^2$ é a energia dos traços empilhados.

No semblance procuramos os eventos cuja a coerência do par tempo - velocidade seja maior, pois quando há coerência no evento, a magnitude do semblance será compatível com a amplitude do evento. Logo, os eventos cuja coerência é pequena terão menos ênfase no mapa de velocidades. Quanto maior o semblance, melhor será o alinhamento dos eventos para a velocidade aplicada.

O princípio fundamental é computar a coerência do sinal numa família CMP dentro da janela de tempo, seguindo uma trajetória hiperbólica Equação (2.19). Os picos de máxima coerência indicam pares ótimos. A função velocidade obtida é denominada de campo de velocidade de empilhamento.

2.4.2 Escolha de Velocidade de Empilhamento

Embora o princípio de escolha da velocidade de empilhamento seja muito simples, a implementação mostra-se muito mais complicada, por diversas razões. As maiores dificuldades encontradas estão associadas a:

- 1) presença de múltiplas;
- 2) baixa razão sinal-ruído;
- 3) complexidade geológica divergindo do modelo hiperbólico dado pela equação (3.3);
- 4) estiramento do pulso; e
- 5) a presença da anisotropia).

Velocidades de empilhamento são escolhidas tanto por meio de marcadores característicos da família CMP ou, preferencialmente, ao longo de horizontes pré-definidos (horizontes consistentes escolhidos). O t_0 e V_{stack} são pares conhecidos coletivamente como o tempo zero

offset e a velocidade de empilhamento. Uma seleção de famílias CMP em seguida, é feita, normalmente a cada 500 m, ou seja, em média, cada 20 a 40 famílias (e em duas direções de dados 3D) e funções semelhantes são deduzidas. O conjunto de funções de velocidade de empilhamento assim criado é conhecido como o campo de velocidade de empilhamento.

A operação de escolha da velocidade ideal não é totalmente automatizada, pois envolve a participação do interprete. No entanto, uma série de ajudas interativas estão disponíveis para o processador para facilitar a tarefa, além de um grande número de diferentes critérios de seleção possíveis. Alguns deles são mostrados nos exemplos das Figuras (2.7), (2.8) e (2.9), ou seja a velocidade que produziu a hipérbole que melhor se ajustou ao evento de reflexão.

2.4.3 Empilhamento CMP

Na etapa do empilhamento é realizada a soma aritmética das amplitudes dos traços das famílias CMP, após a correção NMO. O resultado é uma aproximação da seção de afastamento nulo onde as reflexões são supostas abaixo da posição do CMP. A melhoria da razão sinal-ruído dos dados, nesse caso, dependerá do grau de coerência alcançada nos eventos de interesse (reflexões).

Esta situação em princípio só é atingida em interfaces horizontais e modelos sem variação lateral de velocidade. Vale lembrar que, para uma interface com fortes mergulhos, as reflexões não provêm de pontos de reflexão exatamente abaixo do CMP.

O empilhamento CMP também pode minimizar a influência de chegadas contaminantes, tais como ondas diretas ou ondas superficiais. Em consequência, esses eventos não são somados coerentemente no processo de empilhamento.

A equação para o empilhamento normalizado é dada por:

$$A_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n a_i(t), \quad (2.19)$$

em que A_t é a amplitude do traço empilhado no tempo t ; N -número de traços ou cobertura da família CMP; i -índice indicador do traço; $a_i(t)$ -valor da amplitude do traço i no tempo t .

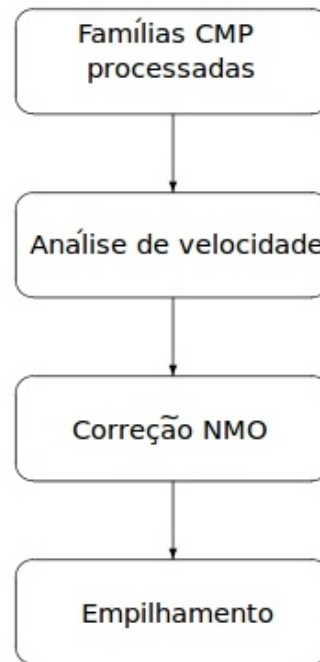


Figura 2.15: Fluxograma do processo CMP.

2.4.4 Vantagens e Desvantagens do Método CMP

As vantagens do método CMP como foi dito é a de efetuar análise de velocidade, gerar traços empilhados, atenuar as reflexões múltiplas, entre outras, porém, o método não é eficaz para eventos com variações laterais de velocidades e forte mergulhos.

Uma alternativa para resolver estes problemas é aplicação da correção DMO que veremos nas próximas seções.

2.4.5 Aplicação a Dados Sintéticos

Para a geração de seções sísmicas foram utilizados dados sintéticos do modelo Marmousi (VERSTEEG; GRAU, 1990), sem a presença de múltiplas.

Os dados sintéticos Marmousi é um conjunto de dados acústicos 2D, modelados a partir de uma estrutura complexa, com forte variação lateral de velocidade. Os dados simulam um levantamento sísmico marinho, baseados na geologia da bacia de Cuanza em Angola, convertendo-se em um teste bastante popular de algoritmos de migração.

Os dados apresentam 240 famílias de tiro, com espaçamento de 25 m. Os sismogramas de tiros começam na posição inicial de 3000 m indo até 9000 m. Cada família de tiros é composta de 96 traços, com intervalo de 25 m. O traço de afastamento mais próximo é de 200 m e o mais longo é de 2750 m. Cada traço sísmico possui 750 amostras a 4 ms de intervalo, assim cada traço contém 3 s de dados registrados.

O resultado da análise de velocidade convencional é mostrado na Figura (2.16). Observa-se difrações na seção empilhada (elipses vermelhas), que não puderam ser colapsadas pelo processo CMP, bem como evento mergulhante, mal focalizado (elipse azul).

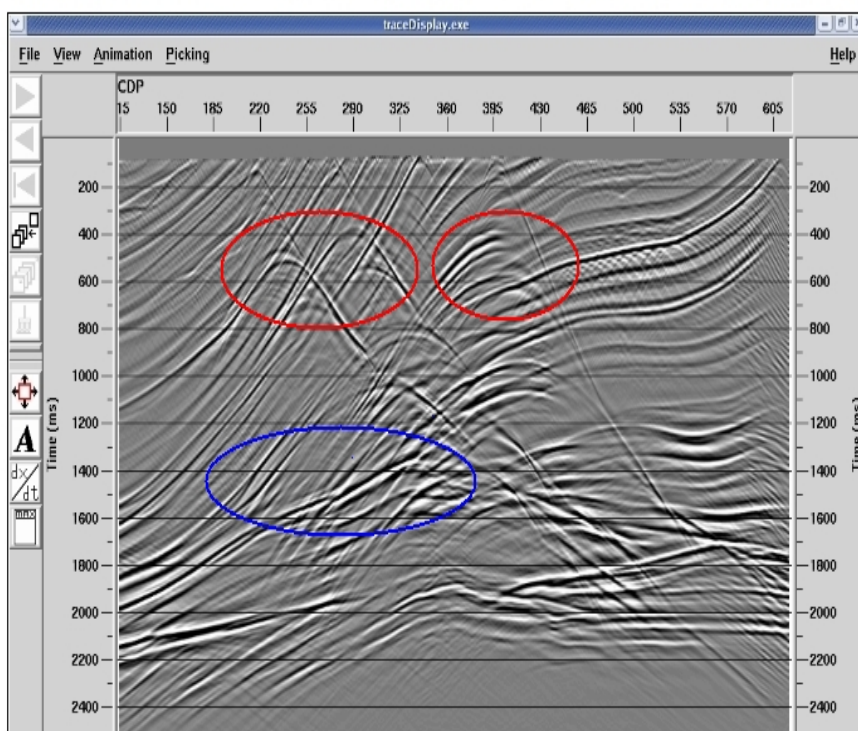


Figura 2.16: Seção empilhada dos dados marmousi resultante da análise de velocidade em famílias CMP.

3 CORREÇÃO DMO PARA EVENTOS COM MERGULHOS CONFLITANTES

3.1 EVENTOS CONFLITANTES

Os eventos conflitantes são observados nos registros provenientes de áreas estruturalmente complexas, tais como plano de falhas, flancos de domo de sal, etc... Onde os mergulhos são conflitantes, somente os eventos mergulhantes com a mesma velocidade V_{nmo} serão corretamente empilhados. O restante será degradado. Este problema será tanto maior quanto maior for a diferença nos mergulhos dos diferentes eventos.

Para esses refletores, os traços de uma família CMP têm pontos diferentes de reflexão (fenômeno conhecido como dispersão do ponto de reflexão). Como consequência, o ápice da hipérbole de reflexão é deslocado horizontalmente. Para melhorar o processamento convencional, de modo a obter uma melhor seção empilhada, mantendo os mergulhos preservados, utilizaremos um processo chamado de DMO.

O processo de DMO tem por objetivo a correção dos erros de empilhamento NMO devido a mergulhos dos refletores, visto que os problemas com o empilhamento convencional são os mergulhos conflitantes. Ele é um filtro linear que transforma uma seção de afastamento não nulo em seção de afastamento nulo, independentemente do mergulho dos eventos, sendo normalmente aplicado em dados corrigidos de NMO e ordenados em afastamento comum.

A correção DMO pode ser visto como uma migração parcial pré-empilhamento (DEREGOWSKI, 1986). Ao contrário da correção do NMO, que necessita ser aplicada no domínio CMP, o termo do DMO é aplicado em um domínio no qual os mergulhos possam ser reconhecidos, como por exemplo, o domínio do afastamento comum.

A correção para o efeito do mergulho do refletor na curva tempo afastamento objetiva resolver os seguintes problemas:

- 1) Empilhar eventos com mergulhos conflitantes;

2) Estimar um modelo de velocidade para migração em tempo.

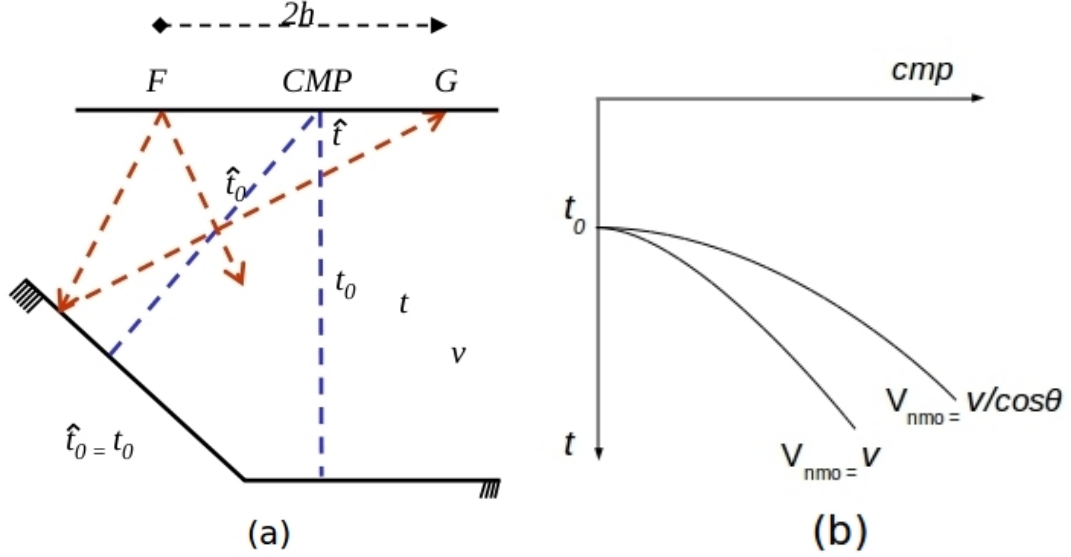


Figura 3.1: (a) Eventos com mergulhos conflitantes (refletor plano e mergulhante) (b) moveout para o refletor plano $V_{nmo} = V$ e para o refletor mergulhante $V_{nmo} = V/\cos\theta$

Em situações em que o imageamento de refletores com forte mergulho, como ocorre na presença de falhas ou flancos de domos de sal, a correção DMO é uma alternativa para melhorar a estimativa de uma seção de afastamento nulo e de um modelo de velocidade conveniente para migração pós-empilhamento.

Pode-se estudar o problema reconsiderando a equação para o tempo de trânsito NMO para um único refletor mergulhante (LEVIN, 1971):

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v^2} \cos^2(\phi) \quad (3.1)$$

Em que, ϕ denota o mergulho do refletor, v e a velocidade do meio acima do refletor, h é o meio-afastamento fonte-receptor e t_0 é o tempo zero offset. Podemos dividir a equação do sobretempo (3.1) em duas partes, fazendo $\cos^2(\phi) = 1 - \sin^2(\phi)$, teremos,

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v^2} - \frac{4h^2}{v^2} \sin^2(\phi) \quad (3.2)$$

A primeira parte da equação (3.2), constituída pelos dois primeiros termos da equação (3.1), representa o sobretempo normal de reflexões correspondentes a refletores sem mergulho

(NMO). A segunda parte, constituída pelos termos restante, representa um sobretempo adicional relativo a reflexões correspondentes a refletores com mergulho. Por este motivo, este sobretempo é denominado sobretempo de mergulho, ou simplesmente, DMO.

A equação (3.2) implica que pode-se aplicar primeiramente a correção NMO usando a velocidade do meio, seguida da aplicação da correção DMO.

Da equação (3.2), pode-se facilmente avaliar as propriedades da correção DMO.

- 1) Primeiramente, esta correção não tem nenhum efeito para os dados em afastamento nulo ($h = 0$);
- 2) Em segundo lugar, a correção é tanto maior quanto maior for o mergulho;
- 3) Em terceiro lugar, quanto menor a velocidade, maior é a correção. Isto também implica que para os eventos mais rasos, este termo é mais significativo, uma vez que as velocidades mais baixas são encontradas geralmente nas partes rasas dos dados sísmicos.

3.2 O OPERADOR DE DMO

Para construir a cinemática do operador de DMO, considere a resposta impulsiva do operador de migração em um meio homogêneo para um registro em um instante t , com semi-afastamento h . Sem perda de generalidade, considere que o ponto médio é $y = 0$. Este registro pode ter origem no espalhamento do campo de onda da fonte em quaisquer dos pontos, (x, z) , sobre a elipse:

$$\frac{(x)^2}{(Vt/2)^2} + \frac{(z)^2}{(Vt/2)^2 - h^2} = 1 \quad (3.3)$$

Para um refletor plano com mergulho ϕ , conforme citado anteriormente, o tempo de reflexão obedece a equação:

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v^2} \cos^2(\phi) = t_0^2 - \frac{4h^2}{v^2} \sin^2(\phi) + t_n^2 + \frac{4h^2}{v^2} \quad (3.4)$$

Nesta expressão, t_0 representa o tempo de afastamento nulo, t_n o tempo do evento após a correção NMO, com velocidade v acima do refletor e h o meio afastamento. A partir desta relação, podemos reescrever a resposta ao impulso na forma:

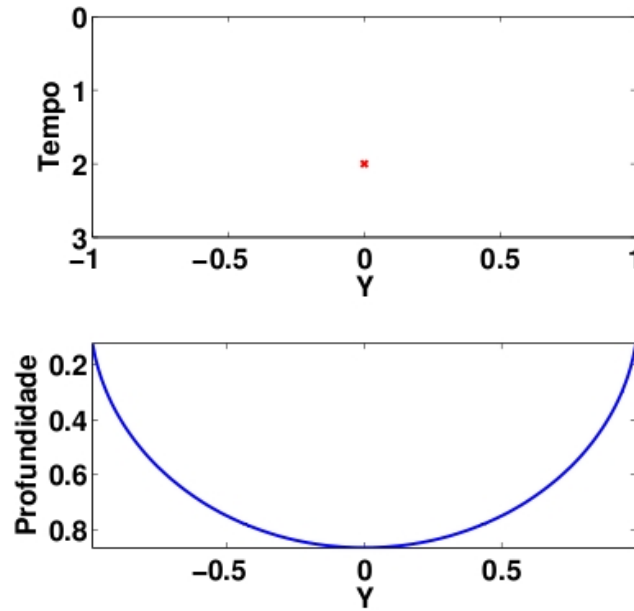


Figura 3.2: Resposta impulsiva do operador de migração em um meio homogêneo. Um evento em uma seção de afastamento comum, indicado pelo X vermelho na figura acima, pode ter sido originado pelo espalhamento do campo de onda incidente por qualquer distribuição de pontos difratores sobre a isócrina elíptica em azul.

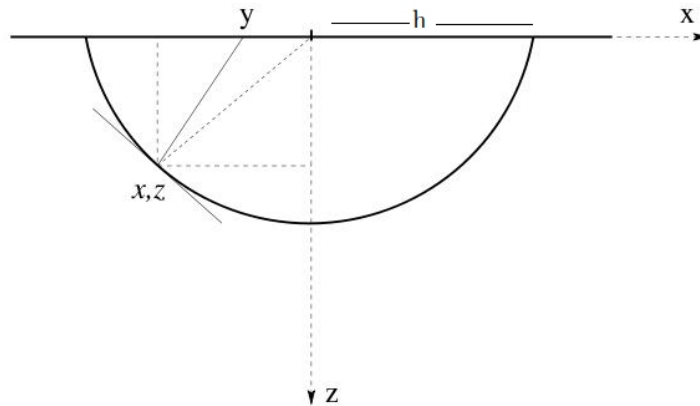


Figura 3.3: Demigração para afastamento nulo para um refletor com mergulho.

$$\phi(x, z) = \frac{(x)^2}{(Vt/2)^2} + \frac{(z)^2}{(Vt_n/2)^2 - h^2} = 1 \quad (3.5)$$

O mapeamento efetuado pelo DMO consiste em migrar os eventos sobre a elipse para a posição de afastamento nulo. Para um refletor tangente a esta elipse, no ponto (x, z) , a direção do raio de afastamento nulo é perpendicular à elipse neste ponto. Portanto, esta

direção coincide com a direção do gradiente de $\theta(x, z)$,

$$\nabla_{\phi}(x, z) = \frac{2x}{(Vt/2)^2}e_x + \frac{2z}{(Vt_n/2)^2}e_z \quad (3.6)$$

O ângulo que esta direção forma com a direção vertical é

$$\tan \phi = \frac{(x - y)}{z} = \frac{x(t)_n^2}{z(t)^2} \quad (3.7)$$

Esta relação permite determinar a posição do CMP em que emerge o raio normal.

$$y = x(1 - \frac{t_n^2}{t^2}) \quad (3.8)$$

O tempo de trânsito ao longo do raio de afastamento nulo satisfaz a relação

$$(x - y)^2 + z^2 = (V\tau/2)^2, \quad (3.9)$$

em que τ é o tempo de trânsito ao longo do raio de afastamento nulo para o refletor tangente no ponto (x, z) .

Para obter a resposta impulsiva do operador de DMO basta substituir na equação (4.12) na equação,

$$(z)^2 = (Vt_n/2)^2(1 - \frac{(x)^2}{(Vt/2)^2}) \quad (3.10)$$

O resultado desta operação é

$$\frac{(y)^2}{(h)^2} + \frac{(\tau)^2}{(t)_n^2} = 1 \quad (3.11)$$

Esta elipse representa a resposta ao impulso da correção DMO. Cada ponto desta elipse indica o CMP e o tempo de trânsito de um evento de reflexão com um mergulho diferente na seção de afastamento nulo. Todos os eventos na seção de afastamento nulo correspondem a um mesmo evento com tempo de trânsito $t = \sqrt{t_n^2 + (2h/V)^2}$ na configuração de afastamento comum $2h$ e CMP $y_0 = 0$.

Para um CMP central y_0 , diferente de zero, esta equação tem a forma,

$$\frac{(y - y_0)^2}{(h)^2} + \frac{(\tau)^2}{(t)_n^2} = 1 \quad (3.12)$$

Em que y é o ponto médio na posição $y = 0$, y_0 um CMP central diferente de zero, τ é o tempo de trânsito ao longo do raio de afastamento nulo, h o meio afastamento e t_n o tempo do evento após a correção *NMO*.

A concepção mais geral para a correção DMO é o encadeamento de duas operações: a migração de uma seção de afastamento comum seguida da demigração para uma seção de afastamento nulo. Neste caso, a resposta ao impulso do operador DMO é a superposição dos eventos sobre as curvas de difração associadas a cada ponto sobre a isócrina do evento na seção de afastamento comum.

A Figura (3.4) mostra hipérboles de difração calculadas para uma amostragem regular de difratores sobre a elipse (em azul) indicada na Figura (3.2) e a resposta ao impulso do operador DMO (em vermelho).

3.3 DMO NO DOMÍNIO $t - X$

A correção DMO pode ser aplicada no domínio do tempo e espaço, com preservação de amplitude, através do operador de empilhamento (BLACK et al. 1993), dado pela integral:

$$p_{DMO}(\tau, y_0, h = 0) = \frac{\tau}{2\pi} \int_{y_0 - \Delta y}^{y_0 + \Delta y} d\xi \frac{2a^2(\xi, h) - 1}{h} D^{1/2} p_{NMO}[a(\xi, h)\tau, y_0 + \xi, h] \quad (3.13)$$

em que a é a amplitude do sinal, e h o meio afastamento.

$$a(\xi, h) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\xi}{h}\right)^2}} \quad (3.14)$$

e o tempo após a correção NMO é

$$tn = a(\xi, h)\tau \quad (3.15)$$

Esta integral efetua a superposição (soma) dos eventos sobre a resposta impulsiva do operador DMO, equação (3.12) para determinar os eventos na seção de afastamento nulo. A preservação de amplitude significa que a amplitude dos dados na seção corrigida de NMO não é modificada pela integral de DMO (3.13). A correção de espalhamento geométrico deve ser aplicada antes da DMO para que as amplitudes verdadeiras sejam obtidas (TYGEL et

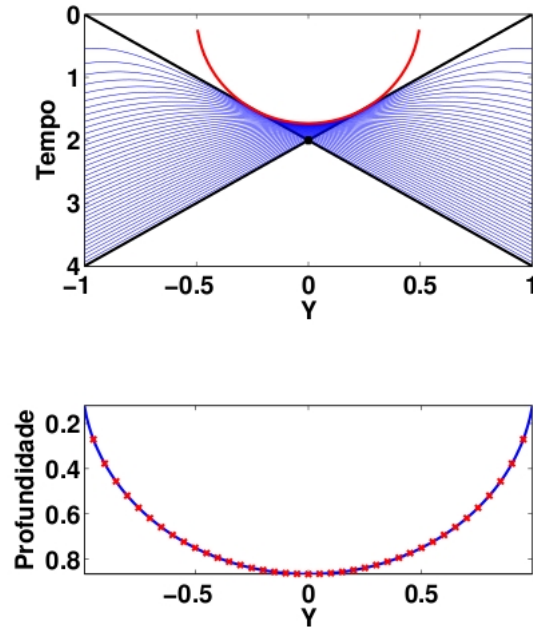


Figura 3.4: Resposta impulsiva do operador DMO, em vermelho, e hipérboles de difração na configuração de afastamento nulo, em azul. A resposta do operador DMO é o envelope das hipérboles de difração e sua abertura é menor do que indica a análise puramente cinemática da equação (3.11).

al, 1998). Como todo este desenvolvimento presuppõe um modelo de velocidade constante, a amplitude dos dados precisa ser multiplicada por Vt antes da correção DMO.

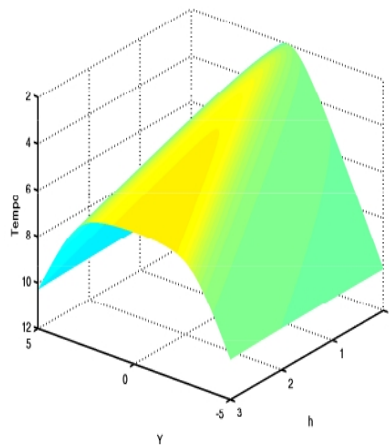


Figura 3.5: A pirâmide de Queops acima é a superfície de tempo de trânsito associada a um ponto difrator em função da coordenada do CMP y e do semi-afastamento h . A correção DMO move um evento sobre esta superfície para a curva de tempo de afastamento nulo que passa pelo ápice da pirâmide. Fonte: (Clearbout, 1983)

3.4 ANÁLISE DE VELOCIDADE APÓS A CORREÇÃO DMO

Para aplicar a correção DMO com o modelo de velocidade constante é necessário estimar uma velocidade representativa V . Na prática a correção NMO é aplicada estimando a velocidade em regiões sem a influência do mergulho. Pode ser utilizada inicialmente um valor único de velocidade para a primeira correção NMO.

Uma vez aplicado esta primeira correção NMO, os dados são reorganizados em famílias de afastamento comum. Em cada uma dessas famílias é aplicada a correção DMO com uma velocidade média prescrita pelo usuário. A seguir os dados são novamente organizados em famílias CMP e a correção NMO é removida dos eventos. Posteriormente efetua-se uma nova análise de velocidade, em geral em uma maior quantidade de CMPs. Se espera que esta nova análise de velocidade sofra pouca ou nenhuma influência do mergulho dos refletores. A seguir é efetuada a nova correção NMO seguida de empilhamento. Neste algoritmo, o laço NMO, DMO, NMO^{-1} pode ser repetido com o objetivo de refinar o modelo de velocidade, caso haja muita variação no campo de velocidade entre as iterações. Finalmente é aplicada a migração pós-empilhamento em tempo.

Conceitualmente, o algoritmo para aplicação da correção DMO é o seguinte:

- 1) Aplicar a correção NMO em dados organizados em famílias CMP
- 2) Reorganizar os traços corrigidos em família de afastamento comum
- 3) Aplicar a correção DMO em cada família de afastamento comum
- 4) Reorganizar os dados em família CMP
- 5) Remover a correção NMO
- 6) Efetuar a análise de velocidade
- 7) Caso o modelo de velocidade varie consideravelmente em relação ao modelo inicial, repetir o passos 1-5. Caso contrário parar.
- 8) Utilizar o modelo de velocidade estimado pelas iterações acima para efetuar o empilhamento dos dados e para a migração pós-empilhamento, em que ($V_{stack} = V_{mig}$).

3.4.1 ANÁLISE DE VELOCIDADE

A análise de velocidade foi feita em 03 painéis. As Figuras (3.6), (3.7) e (3.8) mostram a análise de velocidade nos CMP 251, 291 e 351 respectivamente. Esta análise foi feita após a correção DMO.

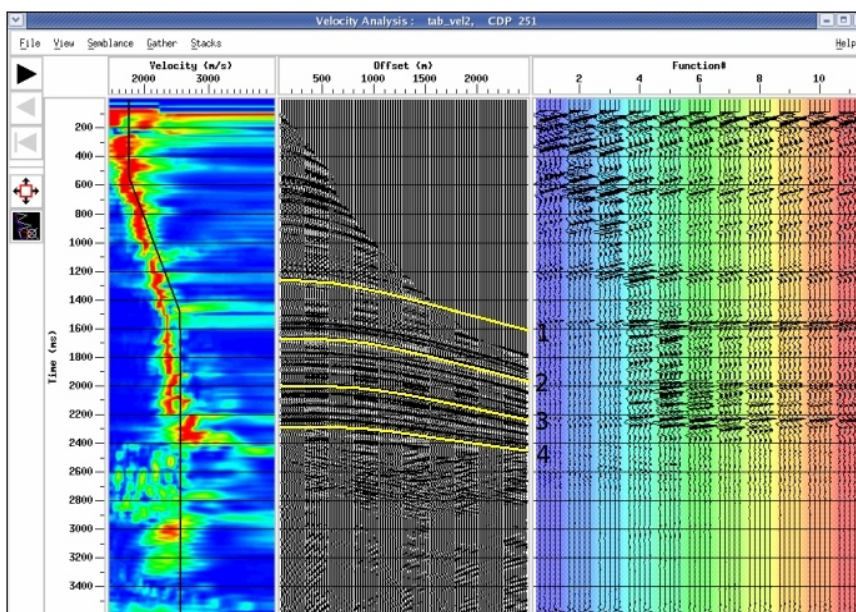


Figura 3.6: Análise de velocidade no CMP 251.

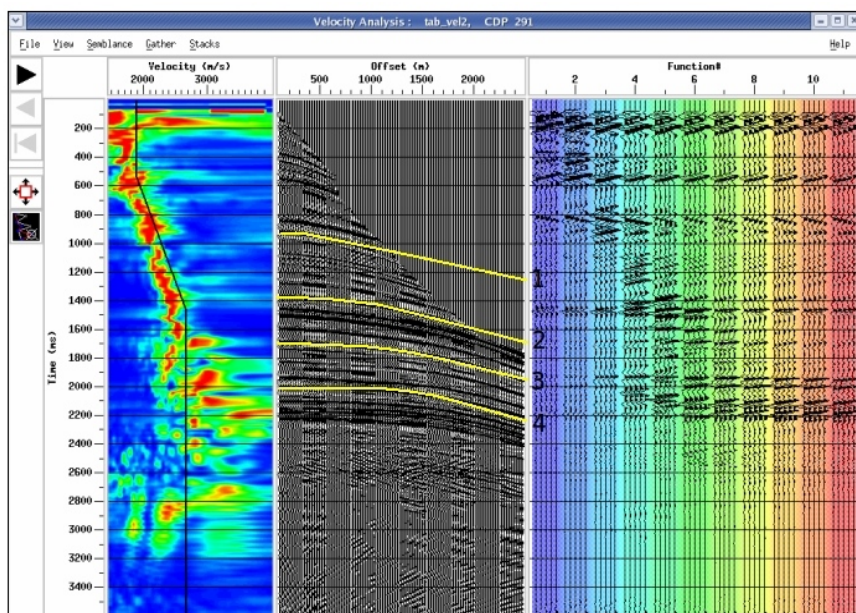


Figura 3.7: Análise de velocidade no CMP 291.

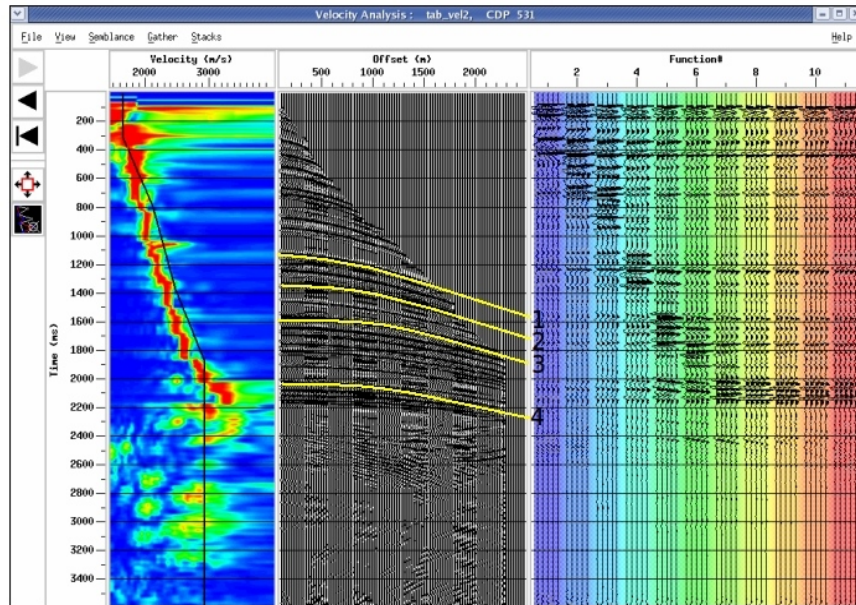


Figura 3.8: Análise de velocidade no CMP 531.

Nestes painéis foram selecionadas as hipérboles que melhor se ajustaram aos eventos de reflexão. Após os *picking*, as hipérboles destacadas em amarelo, foram as que melhor se ajustaram aos eventos de reflexão.

As velocidades obtidas são usadas para a correção NMO e empilhamento dos dados. Nesta fase, espera-se que as velocidades sejam melhores para o empilhamento, uma vez que os dados foram corrigidos de DMO, portanto a análise de velocidade foi feita sem a influência do mergulho dos refletores, resultando em um melhor empilhamento.

3.4.2 Vantagens e desvantagens da Correção DMO

DEREGOWSKY (1986) apresenta algumas vantagens da correção DMO:

1. Migra cada traço para a configuração de afastamento nulo. Após a correção DMO cada seção de afastamento comum fica idêntica a seção de afastamento nulo.
2. Após a correção DMO, mas antes do empilhamento, um evento de reflexão em uma família CMP está associado a um mesmo ponto comum de reflexão em profundidade, ou seja, a dispersão do ponto de reflexão é removida.
3. Ruído coerente com mergulhos fisicamente impossível é removido, ao mesmo tempo, eventos com forte mergulhos, como plano de falhas são melhores definidos na imagem.

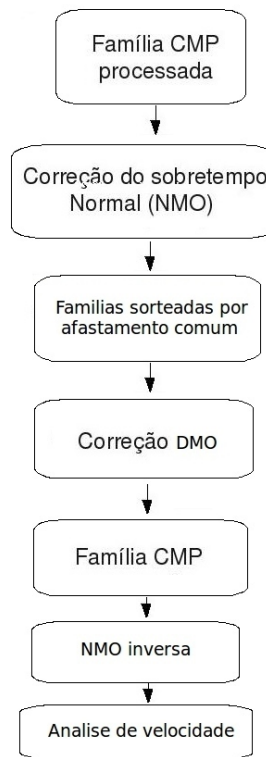


Figura 3.9: Fluxo melhorado com a correção DMO.

4. A relação sinal-ruído melhora, particularmente para grandes afastamentos.
5. As velocidades de empilhamento se tornam independentes do mergulho dos refletores, desta forma é possível o empilhamento correto de eventos com diferentes mergulhos .
6. A análise de velocidade melhora e resulta em velocidades que são mais apropriadas para o empilhamento e migração em tempo.
7. A migração pós-empilhamento fica equivalente a migração pré-empilhamento.

Algumas das desvantagens do processo de DMO são as seguintes: As reflexões múltiplas podem ser realçadas e o uso de velocidade constante no processo pode até suprimir eventos mergulhantes.

Para tentar solucionar esses problemas, devemos lançar mão de outros métodos alternativos. O método que visa corrigir esses problemas é a migração, que veremos na próxima seção.

Observando o espectro de velocidade na Figura (3.10), vemos que após a correção DMO, os eventos conflitantes denotados por "A" e "B", na Figura (3.10-a) foram preservados, veja a

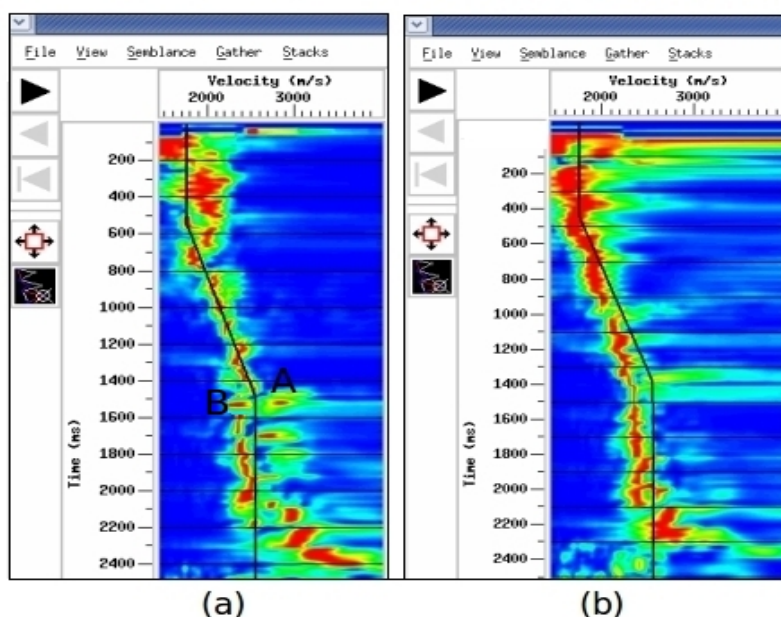


Figura 3.10: Espectro de Velocidade (a) sem e (b) com a correção DMO. Os picos no espectro de aparência em (a) denotado por "A" representam os eventos de forte mergulhos que conflitam com os eventos planos denotado por "B".

Figura (3.10-b). Os eventos coerentes ficaram na mesma direção do espectro de velocidades, (em vermelho), que ficou melhor construído após a DMO.

Na Figura (3.11) observamos a preservação dos eventos mergulhantes, destacados na Figura (3.11-b), (elipses amarelas), o que não acontece na seção empilhada sem a correção DMO, Figura (3.11-a). Nota-se uma melhora significativa na seção empilhada pós DMO. Os eventos com fortes mergulhos (elipses amarelas da Figura (3.11-a)) são melhores focalizados na Figura (3.11-b). As difrações, porém ainda permanecem nos dados (elipses azuis).

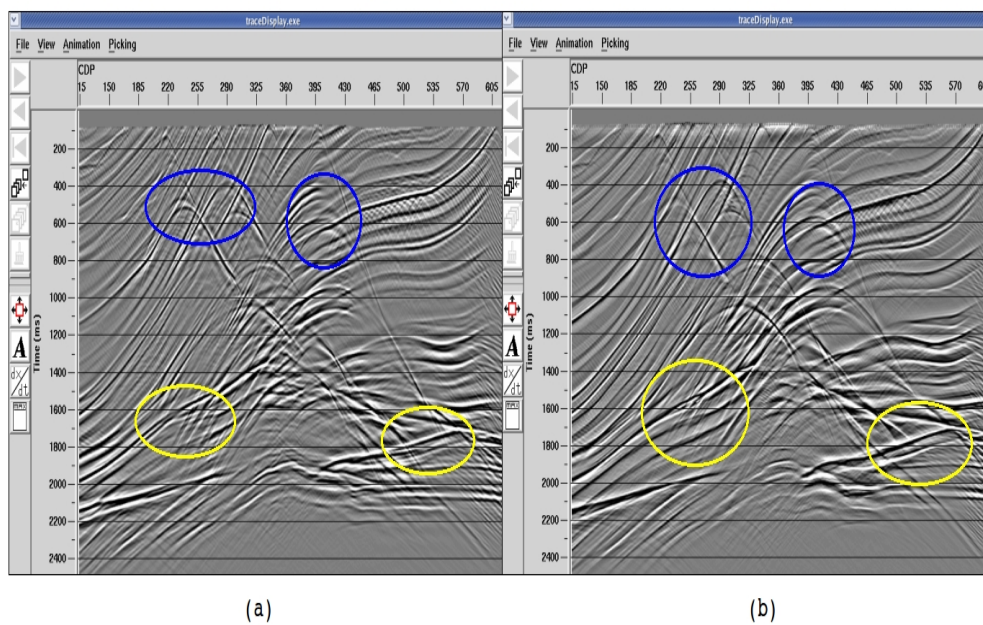


Figura 3.11: (a) Seção empilhada do modelo Marmousi, resultante da análise de velocidade: (a) sem correção DMO e (b) após a correção DMO.

4 MIGRAÇÃO EM TEMPO

Como vimos anteriormente, o processo de empilhamento fornece a primeira imagem da subsuperfície. Entretanto, para estruturas complexas que incluem refletores mergulhantes, falhas e outras complicações geológicas, esta imagem não se assemelha com a realidade. Por exemplo, os dados empilhados podem conter difrações ou imagens bastantes distorcidas dos refletores em profundidade. Visto assim, a seção ZO simulada não representa uma boa aproximação da seção ZO ideal.

O processo que visa corrigir estes efeitos e aplicado ao dado, é a migração. A migração sísmica é um processo de imageamento que consiste em determinar a localização e a intensidade da reflexão a partir do dado registrado na superfície.

A migração tem por objetivo corrigir a imagem distorcida (seção sísmica empilhada) que representa o campo de onda temporal registrado na superfície transformando-o em outro campo, cujos refletores geológicos estão verdadeiramente posicionados e as difrações colapsadas.

A migração pode ser realizada no domínio do tempo (migração em tempo) ou da profundidade (migração em profundidade). A migração em profundidade é conceitualmente mais simples porém mais difícil de executar. Ela tem por objetivo transformar os dados sísmicos registrados em tempo em uma seção em profundidade na qual as estruturas geológicas, estejam corretamente posicionadas em subsuperfície. A migração em profundidade necessita, em geral, de um macro-modelo de velocidade, que seja bastante acurado.

A migração em tempo, embora não tenha conceituação tão direta como a migração em profundidade, é de implementação bem mais simples e menos custosa. Seu objetivo é transformar os dados sísmicos registrados em tempo, em seções também no domínio do tempo, nas quais as estruturas se pareçam bem mais com aquelas existentes em subsuperfície.

A migração pós-empilhamento migra todos os traços CMP empilhados, enquanto que a migração pré-empilhamento migra todos os traços de todos os tiros, haja vista que há muito

mais traços antes do empilhamento, comparado com a quantidade de traços que ficam após o empilhamento.

Para a sua implementação é necessário estimar um modelo de velocidade de migração que melhor represente a geologia investigada.

A migração pré-empilhamento pode ser feita pela soma KIRCHHOFF baseada na equação de tempo de trânsito para um ponto difrator em dados de afastamento comum.

Neste método cada seção de afastamento comum é migrada separadamente, a seguir os resultados são sobrepostos para produzir a seção migrada final.

4.1 MIGRAÇÃO PÓS-EMPILHAMENTO

A migração pós-empilhamento em tempo como foi dito, migra seções CMP empilhadas, as quais representam uma aproximação de seções de afastamento nulo (ZO).

Assim, para a discussão do conceito de migração de afastamento nulo, primeiro é necessário examinar, dois tipos de esquemas (idealizados) de obtenção da seção zero-offset.

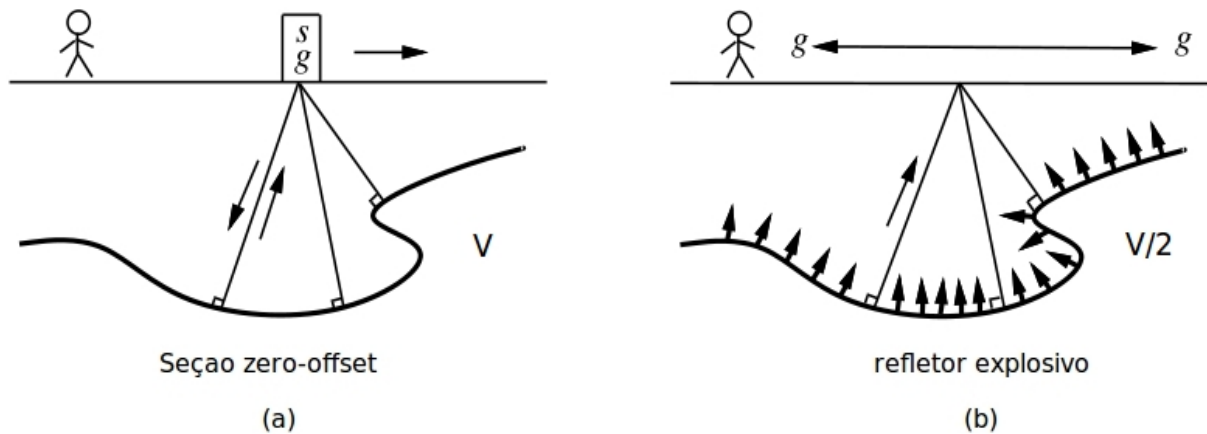


Figura 4.1: a) Seção de afastamento nulo e b) Modelo do refletor explosivo. Fonte: (Clearbout, 1978)

No primeiro esquema a seção zero offset é gerada considerando que o par fonte e o receptor estão na mesma posição e o par é movido ao longo da linha sísmica. A energia emitida e posteriormente registrada segue trajetórias que incidem normalmente às interfaces refletoras.

No segundo esquema, para a geração de imagens, precisamos de um modelo (uma condição de imagem) que explique a seção zero-offset ou seja, como ela foi formada. Esse esquema

considera que a seção de afastamento nulo resulta da energia que chega à subsuperfície provenientes de fontes ao longo das interfaces refletoras (LOEWENTHAL, 1976). A energia é captada por refletores situados na superfície em cada posição CMP situados ao longo da linha. Mais especificamente as fontes explodem simultaneamente no mesmo instante $t = 0$ e emitem ondas que se propagam para cima e são gravadas pelos receptores na superfície.

A seção sísmica que resulta desse experimento, chamada modelo do refletor explosivo tem grande semelhança com a seção de afastamento nulo, porém com uma diferença importante: Na seção de afastamento nulo é gravado com o tempo de trânsito em dois sentidos (da fontes ao ponto de reflexão e deste ao receptor), enquanto no modelo do refletor explosivo é registrado o tempo em um único sentido (da fonte situada no refletor ao receptor na superfície).

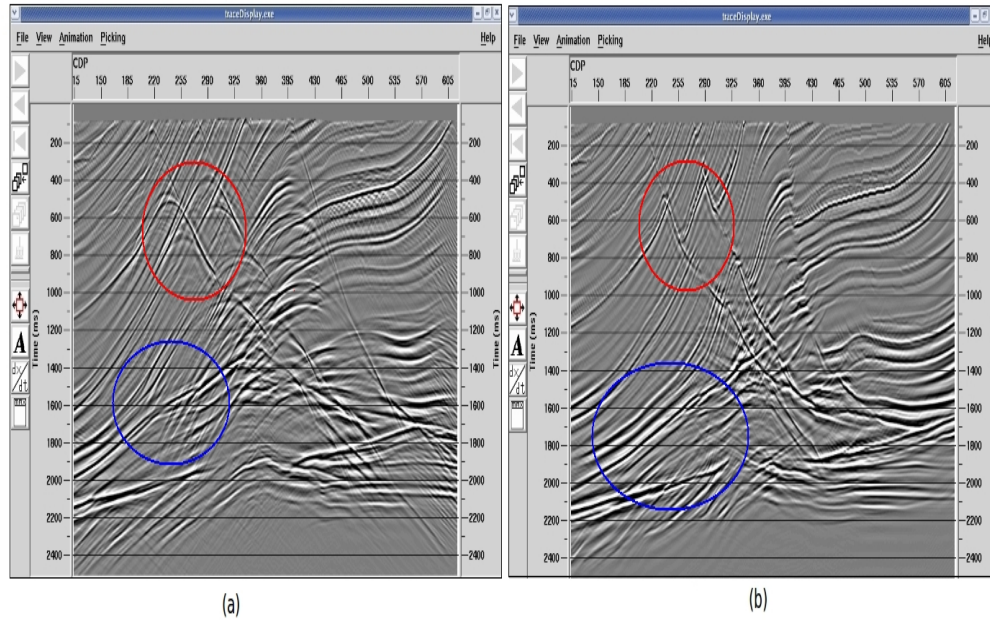


Figura 4.2: Seções do modelo sintético Marmousi. a) empilhada com DMO; e b) migrada após a correção DMO. As difrações na Figura "a", foram colapsadas na Figura "b" (elipse vermelha). Os eventos com mergulhos da Figura "a", ficaram melhor focalizados na Figura "b" (elipse azul).

Para fazer as seções de afastamento nulo e do modelo do refletor explosivo compatíveis matematicamente (isto, em tempo), pode-se imaginar que no modelo do refletor explosivo a velocidade da propagação é a metade da velocidade original do meio. A equivalência entre a seção de afastamento nulo e do modelo do refletor explosivo não é completamente exata, particularmente quando há forte variações laterais de velocidade ao longo da linha (KJARTANSSON e ROCCA, 1979). Vale salientar, no entanto, mesmo que as seções de afastamento nulo e do refletor explosivo sejam equivalentes em tempo, tal equivalência não

pode ocorrer em amplitudes.

4.2 MIGRAÇÃO PRÉ-EMPILHAMENTO

4.2.1 Princípio de Huygens

O princípio de Huygens, descrito por Christian Huygens em seu trabalho sobre a Teoria Ondulatória da Luz em 1678, foi formulado primordialmente no contexto de ondas de luz e na teoria dos raios óticos.

O princípio de Huygens pode ser formulado da seguinte maneira: Se considerarmos uma frente de onda que se propaga em um dado meio, sendo sua posição e formas conhecidas em um dado tempo t . Podemos prever a posição e formas das frentes de onda em um tempo $t + \Delta_t$ como uma superposição construtiva de frentes de ondas que se originam de fontes secundárias. Cada fonte secundária é excitada em $t = 0$ e sua frente de onda é determinada no tempo Δ_t . O envelope destas frentes de onda (fictícias) fornece a frente de onda obtida pela propagação da frente de onda original no tempo $t + \Delta_t$. Este princípio explica o comportamento das ondas quando passam através de uma fenda estreita.

Consideremos o caso de uma onda plana que incide normalmente sobre um obstáculo com uma abertura estreita. Pelo princípio de Huygens a propagação da frente da onda após a incidência no obstáculo consiste da superposição das frentes de onda originados com fontes pontuais secundárias localizadas ao longo da abertura estreita (as frentes de onda originadas por fontes secundárias fora da abertura não se propagam pela presença do obstáculo). Desta forma, a frente de onda que se propaga tem uma forma, mais ou menos, circular em torno da abertura do obstáculo. Podemos dizer que a onda a partir da abertura estreita se comporta como uma difração.

4.2.2 Hipérboles de Difração

O princípio de Huygens pode ser aplicado à sísmica de reflexão na medida que imaginemos que cada ponto no refletor gera uma fonte secundária, excitada em reposta ao campo de onda incidente (modelo do Refletor Explosivo). Consideremos o caso de um refletor que se reduz a um único ponto. Este é o caso de um ponto difrator e a reflexão se transforma em difração (figura 4.1). Para o caso de um ponto difrator de coordenadas $(x_0 = 0, z_0 = H)$ num meio homogêneo de velocidade (constante) V , a curva de tempo de trânsito na seção de afastamento nulo é dado por:

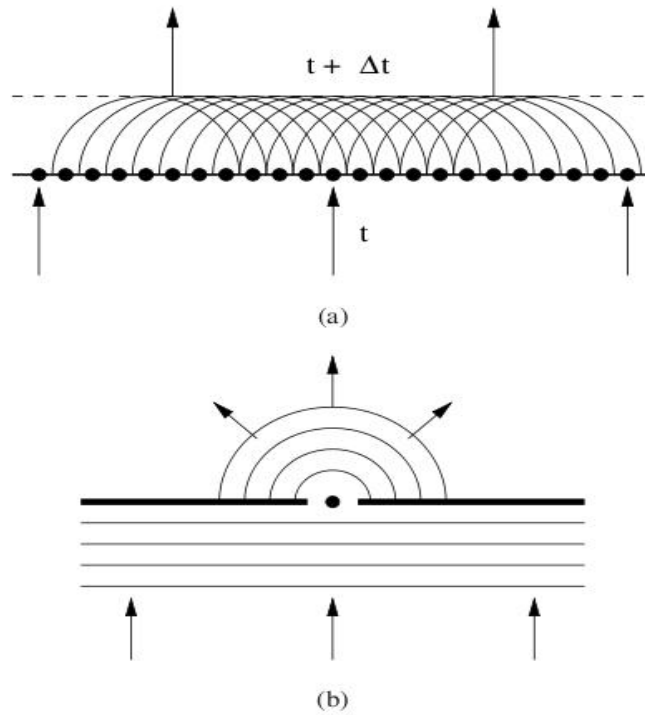


Figura 4.3: Princípio de Huygens para propagação de uma frente de onda. Cada ponto de uma frente de onda se comporta como uma fonte virtual de onda.

$$t(x) = \frac{2}{V} \sqrt{x^2 + H^2} \quad (4.1)$$

4.3 MIGRAÇÃO DE KIRCHHOFF

A migração pré-empilhamento em tempo pode ser feita pela soma KIRCHHOFF baseada na equação de tempo de trânsito para um ponto difrator em dados de afastamento comum, a qual pode ser obtida pela chamada equação de dupla raiz quadrada (DSR). Em vez de somar ao longo das hipérboles de difração no afastamento nulo, as amplitudes são somadas ao longo das trajetórias de tempo de trânsito das difrações dos dados de afastamento comum.

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).

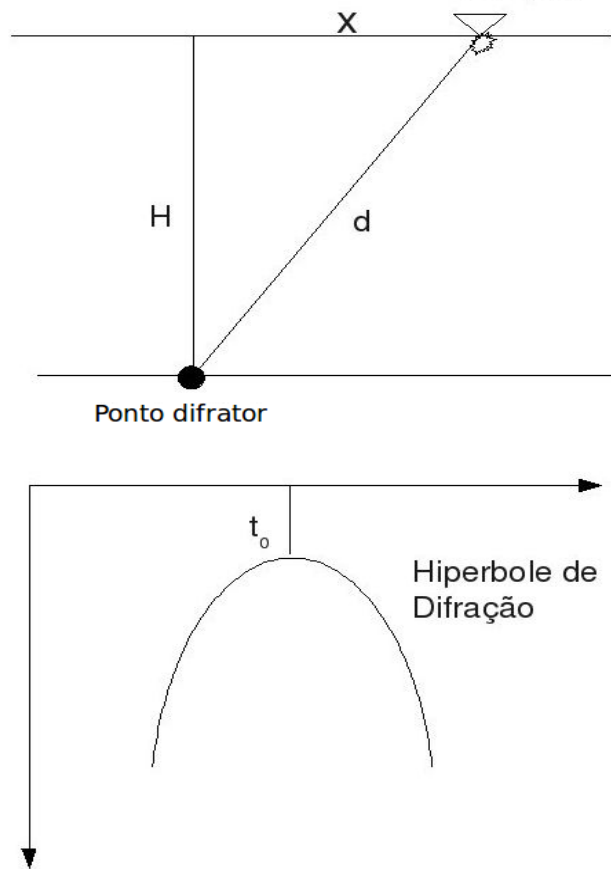


Figura 4.4: Hipérbole de difração produzida por um ponto difrator.

Para se obter a superfície de difração para a migração em tempo, pressupõe-se que a variação lateral de velocidade na escala do lanço de aquisição é muito menor que a variação vertical. Esta hipótese justifica associar a cada ponto imagem uma velocidade efetiva, por exemplo a velocidade de empilhamento.

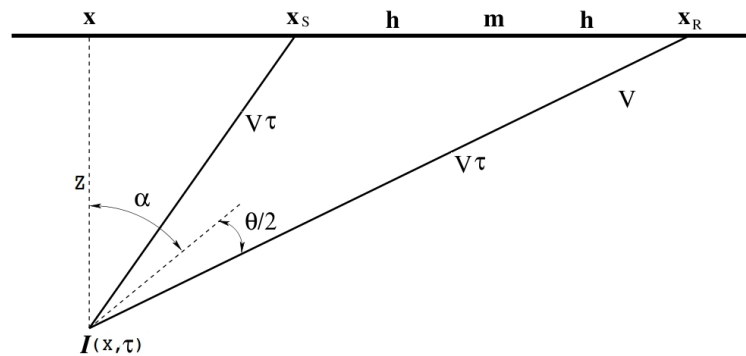


Figura 4.5: Geometria para o cálculo do tempo de trânsito para cada evento de difração determinado pela equação DSR.

O registro sísmico é uma função $D(s, r, t)$, em que s representa a posição fonte, r a posição do receptor, e t intervalo de tempo de registro. A migração pré-empilhamento em tempo pressupõe que um ponto difrator, na posição x , espalhe o campo de onda em uma superfície de tempo. O tempo de trânsito para cada evento de difração é dado por:

$$t_D(x, \tau, m, h; V_{mig}) = \sqrt{\frac{(m - x - h)^2}{V_{mig}^2} + \tau^2} + \sqrt{\frac{(m - x + h)^2}{V_{mig}^2} + \tau^2} \quad (4.2)$$

Nestas coordenadas o operador de migração é representado pela integral a seguir (BIONDO, 2006):

$$I(x, \tau) = \int_m \int_h W(x, \tau, m, h) D(m, h, t = t_D(m, h; x, \tau)) dm dh, \quad (4.3)$$

Em que h é o meio afastamento entre fonte-receptor; m representa o ponto médio, x representa as coordenadas do ponto imagem em subsuperfície; τ o tempo de trânsito vertical; $W(x, \tau, m, h)$ é o peso do operador de migração; $D(m, h, t)$ o registro sísmico; $t_D(m, h; x, \tau)$ representa o tempo de trânsito para um evento de difração no ponto imagem e $I(x, \tau)$ a imagem sísmica.

4.4 ANÁLISE DE VELOCIDADE USANDO A PSTM

A análise de velocidade Pré-STM é baseada na afirmação: a melhor imagem Pré-STM é obtida quando cada evento é migrado no mesmo tempo para todos os afastamentos. Para obtermos o mesmo tempo para todos os afastamentos significa planificar as famílias das imagens Pré-STM e, conseqüentemente, maximizar a amplitude do empilhamento. Note que a amplitude da imagem para cada deslocamento pode variar devido os efeitos da amplitude versus offset (AVO) ou da geologia.

O objetivo da análise de velocidade PréSTM é, portanto, encontrar a função velocidade $V_{mig}(T)$ com os operadores que vão planificar as famílias das imagens e maximizar o empilhamento. Notamos que a velocidade $V_{mig}(T)$ de migração Pré-STM é frequentemente chamada de "velocidade de empilhamento Pré-STM", enfatizando o aspecto do processo de empilhamento e os aspectos da sua migração.

4.4.1 Seções CIG

O sucesso ou o fracasso da migração em tempo depende da estimativa do modelo de velocidade $V_{mig}(x, \tau)$. Convencionalmente, a estimativa do modelo de velocidade foi feita em famílias CMP (YILMAZ, 1987). Nesta configuração, a curva tempo-afastamento, $t(h)$, para eventos de reflexão é

$$t_{CMP}(m, h) = t_0 + \frac{4h^2}{V_{stk}^2(m, t_0)} , \quad (4.4)$$

em que t_0 é o tempo de afastamento nulo, $V_{stk}(m, t_0)$ é a velocidade de empilhamento e h o meio afastamento. Em geral, a velocidade de empilhamento é estimada interpolando os máximos de coerência no espectro de velocidade (YILMAZ, 1987).

Porém este método, demonstrou limitações na determinação do modelo um velocidade. A primeira é que a equação (4.4) é válida apenas para pequenos afastamento, $h < V_{stk}t_0$ e para um modelo sem variação lateral de velocidade (SHERIFF;GELDART, 1982). A segunda é a dependência da velocidade de empilhamento do mergulho do refletor.

A dependência da velocidade de empilhamento do mergulho dos refletores pode atenuar eventos na seção empilhada, comprometendo a interpretação dos dados sísmicos. Nestas circunstâncias a escolha de uma única velocidade, em geral a menor, leva a atenuação de eventos com maior mergulho na seção empilhada e, por consequência, na migração pós-empilhamento. Portanto, a dependência da velocidade de empilhamento do mergulho dos refletores pode degradar a qualidade da imagem sísmica prejudicando a interpretação.

A correção DMO, aplicada, utilizando-se um modelo de velocidade constante para toda a área do levantamento, demonstrou suas limitações comprometendo a transformação dos dados para afastamento nulo e posteriormente o empilhamento.

Um domínio mais adequado para se avaliar o modelo de velocidade é em famílias de imagem comum, CIG (common image gather). Todos os traços da CIG são imagens sob o mesmo ponto x na superfície, cada traço é obtido pela migração de cada uma seção de afastamento comum diferente. Este modelo será visto na próxima seção.

4.5 ANÁLISE DE VELOCIDADE

Nesta fase foi utilizado o seguinte fluxo para a análise de velocidade:

- 1) Em primeiro lugar, os dados são pré-processados;

- 2) Em seguida, ordenados por intervalos de afastamento comum;
- 3) Um campo de velocidade inicial é configurado, resultante de uma análise de velocidade rápida clássica que chamamos de V_{mig} inicial.
- 4) Em seguida a correção NMO é removida;
- 4) E os dados são organizados em famílias CMP;
- 5) Análise de velocidade clássica;
- 5) Em seguida, as escolhas das velocidade final de migração V_{mig} são realizadas;
- 5) Finalmente é aplicado o somatório Kirchhoff PreSTM.

Na maioria dos casos, o empilhamento ao longo da dimensão de offset não é realizado nesta fase. Pelo contrário, todas as famílias de imagens são preservadas e passam eventualmente por uma análise residual final antes que o empilhamento seja realizado. Esta análise final da família de imagens planas só é possível se a correção correspondente for pequena, daí as iterações mencionadas na etapa anterior.

Para validar o modelo de velocidade, reordenamos esses traços em famílias de imagens comuns (CIG). Cada família CIG é uma seção $I(x, \tau; h)$, do volume de dados migrados $I(x, \tau; h)$, contendo os traços com o mesmo CMP e diferentes afastamentos, conforme ilustra a figura (4.7).

A construção das seções de afastamento comum correspondem ao passo inicial para a construção das seções CIG. Cada seção de afastamento comum é migrada em tempo através da migração pré-empilhamento. A partir das seções migradas, cada CMP é mostrado em diferentes painéis de cada afastamento h . Esses painéis mostrarão a consistência dos dados migrados, ou seja se cada painel focaliza a seção migrada com a mesma qualidade.

A Figura (4.9) ilustra a construção das famílias CIG. Para um modelo de velocidade todos os traços em uma CIG deveriam ser idênticos, conseqüentemente, os eventos deveriam estar alinhados (YILMAZ, 1987).

Para a construção das seções CIG 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.

A Figura (4.8) ilustra a análise de velocidade em famílias CIG. Se a velocidade de migração estiver correta para um evento, a curva de afastamento para este evento terá curvatura nula,

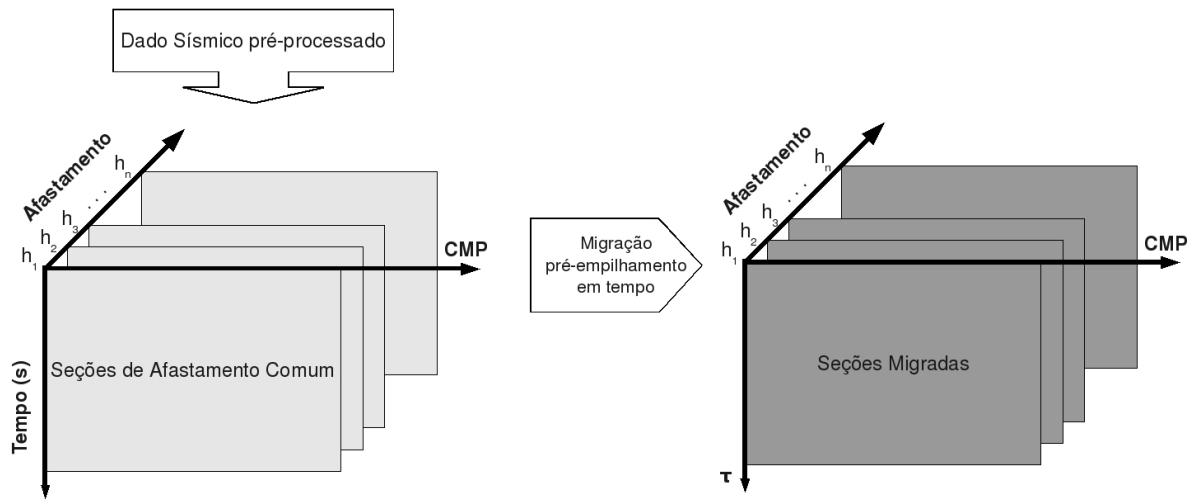


Figura 4.6: representação esquemática da migração pré-empilhamento em tempo de cada seção de afastamento comum. Cada seção migrada corresponde a uma seção de afastamento comum com o mesmo CMP e diferente afastamento.

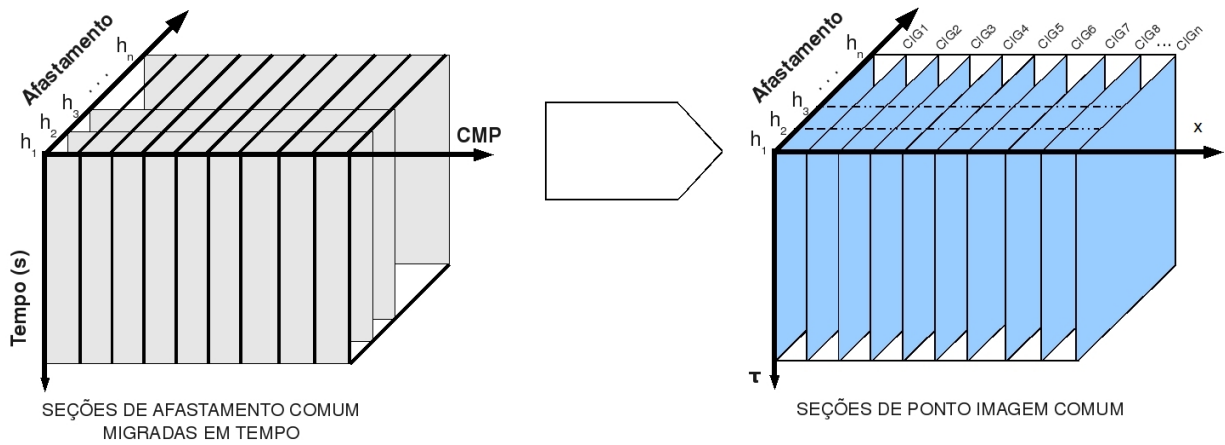


Figura 4.7: representação esquemática da construção das seções CIG a partir das seções de afastamentos comum migradas em tempo.

ou seja, o evento estará alinhado horizontalmente. Se o valor da velocidade de migração estiver incorreto, haverá curvatura ascendente ou descendente na curva de afastamento associada ao evento na seção CIG.

Embora o problema dos mergulhos conflitantes possa ser resolvido pela migração pré-empilhamento, outros problemas são associados com este processo. Para dados, por exemplo de grandes multiplicidade, teriam de ser realizadas múltiplas migrações, encarecendo o processo.

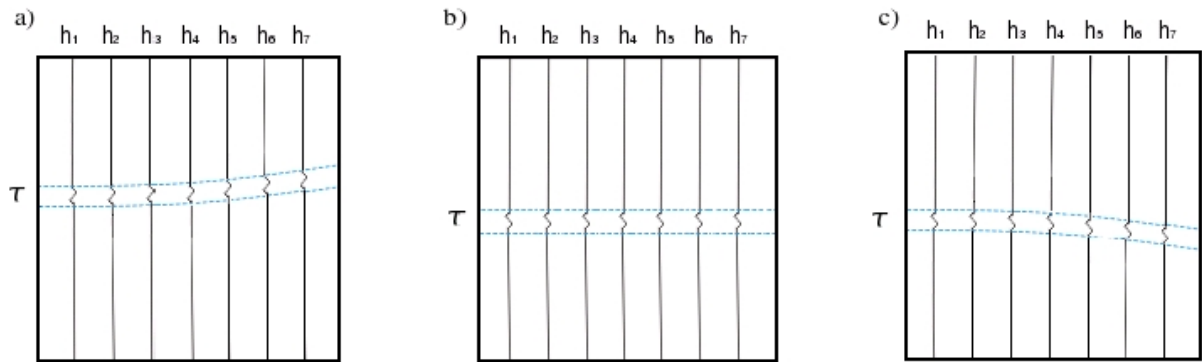


Figura 4.8: Seções CIG com velocidade de migração: a) menor que o valor correto; b) com o valor igual ao correto e c) com o valor maior que o correto.

4.5.1 Experimentos Numéricos

Para avaliar os efeitos da análise de velocidade utilizando a migração pré-empilhamento em tempo, foram utilizados os dados sintéticos 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.

Nessa avaliação foram comparados dois conjuntos de imagens: As imagens empilhadas resultantes da migração das seções de afastamento comum e as imagens das CIG selecionadas da seção empilhada de acordo com a Figura (4.10).

No primeiro conjunto de imagens, o modelo de velocidade utilizado para migrar os dados foi estimado através da focalização das imagens migradas em tempo, já que o processo convencional não é adequado para a migração em tempo.

As Figuras (4.9a-e) apresentam imagens obtidas após o empilhamento das migrações de cada seção de afastamento comum. As cinco imagens diferem entre si pela análise de velocidade e pela função peso utilizada no operador de migração Kirchhoff. As imagens das figuras (4.9-a), (4.9-b), (4.9-c) e (4.9-d), obtidas a partir das funções peso W_1 , W_2 , W_3 e W_4 , apresentam ruídos de baixa frequência e perda de amplitude para os eventos abaixo de 1.0 s. A imagem da Figura (4.9-e), obtida a partir da função peso W_5 apresenta o pior resultado. Os eventos em torno de toda seção apresentam amplitudes muito baixas.

Para o segundo conjunto de imagens, seis famílias de ponto imagem comum foram selecionadas, de acordo com a Figura (4.10), para avaliar a análise de velocidade. Nesta avaliação, o critério utilizado foi a horizontalização das imagens CIG. Na figura (4.11) nota-se que as

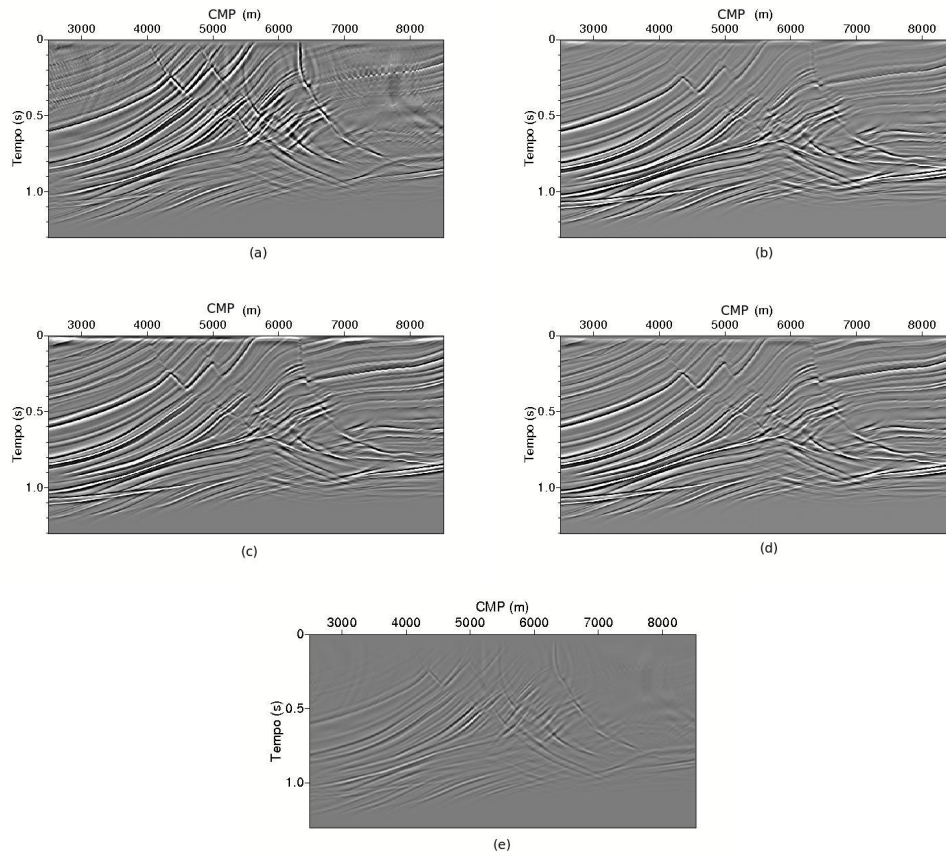


Figura 4.9: Seções migradas obtidas através da PSTM. A variação de amplitude entre estas imagens é devido a análise de velocidade e as funções peso utilizadas.

CIG nas posições 6000m, 6500m e 7000m estão em regiões de maior variações lateral de velocidade. Estas CIG apresentam bastante ruídos, pois nenhum evento foi horizontalizado, indicando que a análise de velocidade precisa ser refinada.

Na CIG 4000 observamos eventos horizontalizados somente na região em torno de 1.0 s, indicando que o modelo de velocidade ainda precisa ser refinado. Na CIG 5000, temos eventos horizontalizados nas regiões em torno de 0.6 s e 0.8 s, porém de baixa amplitude, indicando que houve melhora no modelo de velocidade.

Na CIG 7500 também observamos uma melhora no modelo de velocidade, mas ainda precisa ser refinado para produzir melhores eventos, pois temos horizontalização somente nas regiões em torno de 0.8 s e 1.0 s.

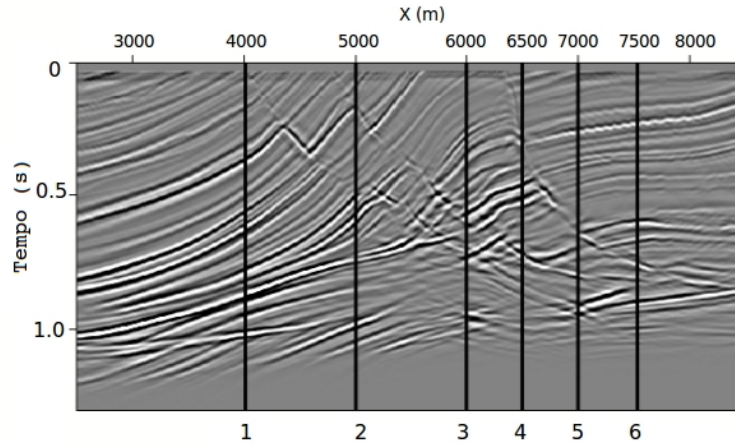


Figura 4.10: Regiões selecionadas correspondem as CIG locadas nas posições 4000m, 5000m, 6000m, 6500m, 7000m e 7500m, e referenciadas respectivamente pelos números de 1 a 6 em cada CIG.

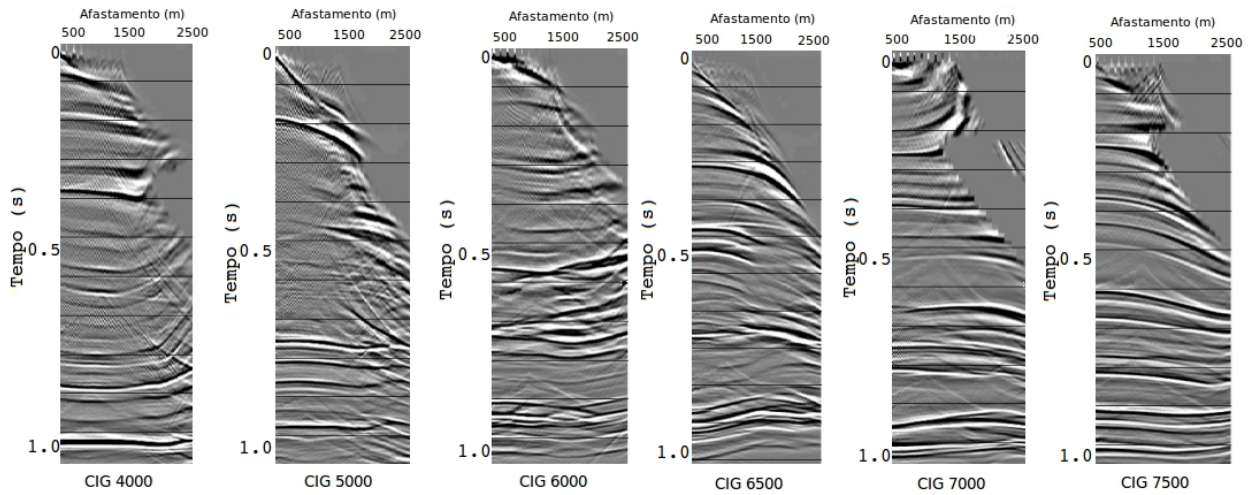


Figura 4.11: representação esquemática das seções CIG nos CMP 4000, 5000 e 6000, 6500, 7000 e 7500.

4.6 ANÁLISE DE VELOCIDADE UTILIZANDO A PSTM KIRCHHOFF COMPLETA

A técnica da migração pré-empilhamento em tempo Kirchhoff, anteriormente usada foi uma boa aproximação para a estimativa do modelo de velocidade, pois permitiu a análise de velocidade de empilhamento na posição (parcialmente) migrada, mas os resultados obtidos na análise de velocidade não foram totalmente os esperados, já que em algumas CIG, os eventos não foram totalmente horizontalizados.

O uso de uma velocidade inicial V_{NMO} variante no tempo para correção NMO, uma

velocidade de migração intermediária V_{mig} , um campo de velocidade final variante no tempo, bem como as variações laterais de velocidade, foram alguns dos fatores que levaram a não horizontalização total dos eventos em determinadas regiões, demonstrando as limitações do método.

Para tentar resolver esses problemas, utilizaremos a migração pré-empilhamento em tempo Kirchhoff completa, que descreveremos na próxima seção.

A análise de velocidade nesta fase foi feita da seguinte maneira: Em vez de atualizar um campo de velocidade inicial com uma análise de velocidade residual, testamos várias funções de velocidade e selecionamos aquelas que produziram o melhor resultado. O "melhor resultado" foi avaliado segundo critérios objetivos e também interpretativos. A sequência é a seguinte:

- 1) O primeiro passo é o mesmo dos métodos anteriores: os dados são pré-processados e classificados por faixa de afastamento comum e um campo de velocidade inicial é configurado.
- 2) Em seguida, um intervalo de percentagens, normalmente de 5 a 10 valores entre 80% a 110%, é aplicado ao campo de velocidade inicial de $V_{mig_{init}}$ (x, y, t).
- 3) A PSTM é então aplicada a cada um desses novos campos de velocidade, mas apenas os resultados das linhas de velocidade predefinidas estão de saída, juntamente com uma seleção de famílias de imagens ao longo destas linhas. Mais uma vez, note que a KIRCHHOFF PSTM tem a vantagem de nos permitir calcular apenas um subconjunto dos resultados de saída.
- 4) Estes resultados são carregados em softwares interativos para análise e interpretação. A tarefa agora é de decidir qual a percentagem dá o "melhor resultado" em um determinado local. A escolha é feita com base nos mesmos critérios anteriores, ou seja, na horizontalização da família de imagem.

Os resultados dessa tarefa é uma série de percentagem escolhidas desigualmente amostradas no volume de (x, τ, h) . Essas escolhas são a entrada para uma atualização da velocidade inicial a fim de produzir o campo de velocidade final de migração.

A PSTM Kirchhoff completa é aplicada várias vezes com um intervalo de percentagens do campo de velocidade inicial e atualizado para produzir a PSTM e o empilhamento final.

O campo de velocidade de migração é atualizado de acordo com as escolhas para construir o campo de velocidade final de migração. Este é usado para o processo de PSTM de todo o conjunto de dados.

4.6.1 Experimentos Numéricos

A avaliação da análise de velocidade, ou seja, a equalização da amplitude foi efetuada nas famílias de imagem comum. A Figura (5.1a-e) apresenta as CIG no CMP 4000 obtido com as cinco funções peso do operador de migração KIRCHHOFF. Após a análise de velocidade, observamos horizontalização da maioria dos eventos, indicando que o modelo de velocidade foi adequado. Na Figura (4.12a) por exemplo, obtida com a função peso W_1 , o evento em torno de 0.4 s apresenta maior amplitude que nas Figuras (4.12b) e (4.12e), obtidas com as funções peso W_2 e W_5 , na mesma região de 0.4 s. O evento com forte amplitude na região em 1.0 s que aparece nas Figuras (4.12b), (4.12c) e (4.12d) são atenuados nas Figuras (4.12a) e (4.12e) na mesma região. As CIG com melhor equalização de amplitude estão nas Figuras (4.12c) e (4.12d), obtidas com as funções pesos W_3 e W_4 . Essas funções corrigem o efeito do espalhamento geométrico, melhorando a análise de velocidade. Essas duas Figuras são praticamente idênticas, demonstrando que o modelo de velocidade foi corretamente utilizado.

Nas Figuras (4.12a), (4.12c) e (4.12d), nas regiões em torno de 0.3 s observamos eventos horizontalizados, porém de baixas amplitudes, isto acontece também com o evento na Figura (4.12b), mas com amplitude mais baixa ainda. As Figuras (4.13a-e) mostram as CIG obtidas com as diferentes funções peso para o CMP de coordenada 5000 m. Alguns eventos estão planificados, por exemplo na região em torno de 0.5 s e 0.6 s, Figuras "a" e "e" com forte amplitudes e com baixas amplitudes nas demais, na mesma região. Temos horizontalização nas Figuras "b", "c" e "d" nas regiões em torno de 0.7 s. Esses eventos são atenuados nas Figuras "a" e "e" indicando que o modelo de velocidade precisa ser refinado. Novamente as funções pesos W_3 e W_4 produziram melhor equalização de amplitudes.

As Figuras (4.14), (4.15) e (4.16) mostram CIG no CMP 6000 m, 6500 m e 7000 m, em regiões de maior variação lateral de velocidade, em torno de 0.2 s a 0.7 s. Em função disso, não há focalização uniforme de eventos ao longo destas CIG. Particularmente, os eventos mais profundos, em torno de 1.0 s, não foram focalizados.

As Figuras (4.17a-e) mostram as CIG obtidas para o CMP de coordenada 7500 m. Estas CIG estão em uma região de grande variação lateral de velocidade e apresentando ruídos, indicando que o modelo de velocidade utilizado para a migração ainda precisa ser refinado ou os dados usados não são suficientes para produzir seções de boas qualidades. Apesar do

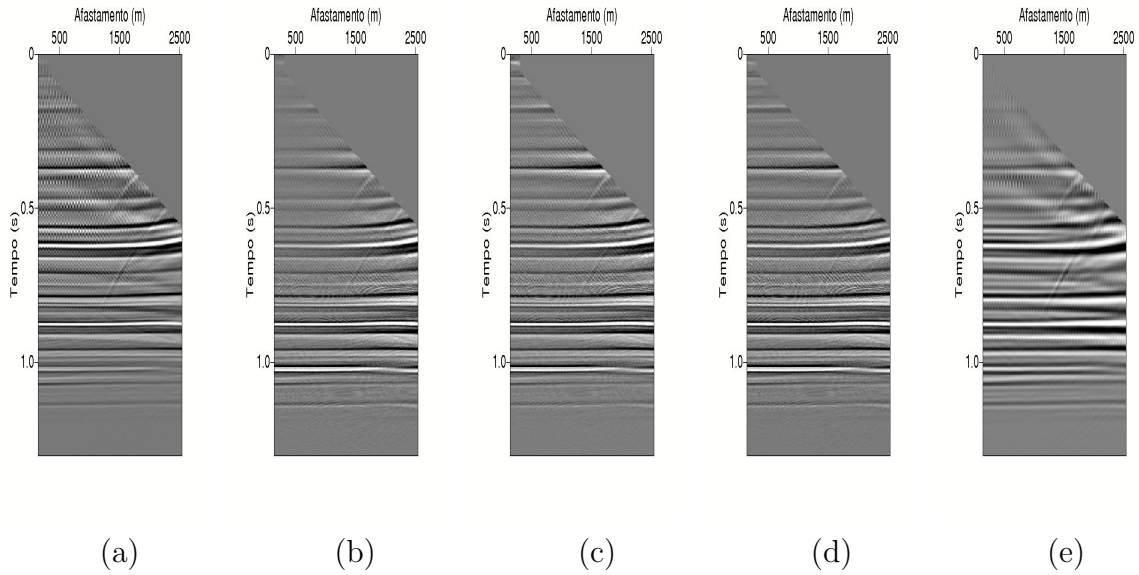


Figura 4.12: Seções CIG no CMP 4000 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (e) função peso W_5 .

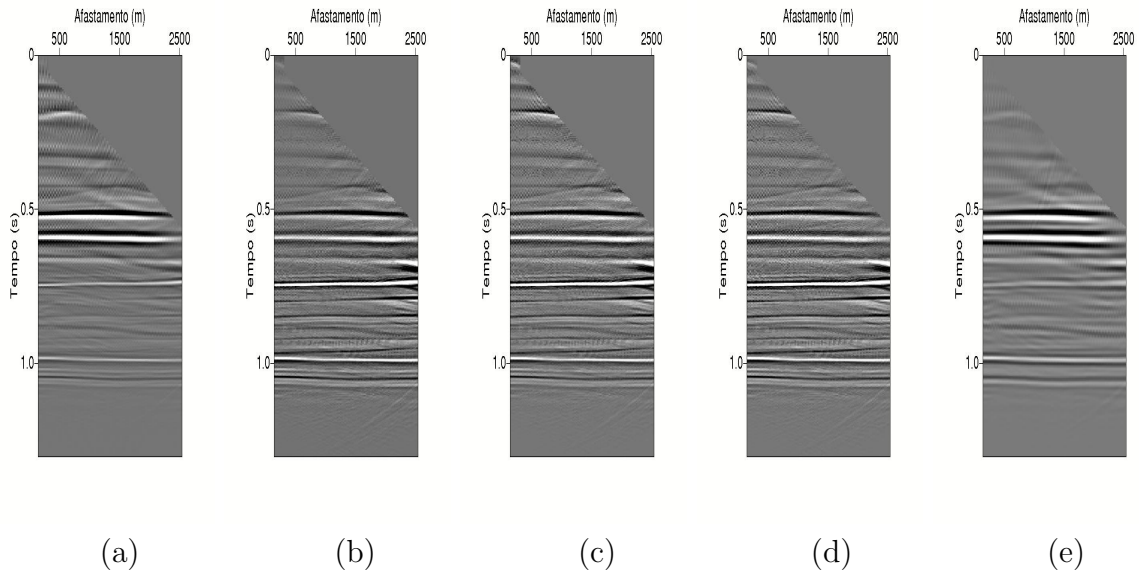


Figura 4.13: Seções CIG no CMP 5000 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (e) função peso W_5 .

ruído, as Figuras (4.17c) e (4.17d) destacam melhor, o alinhamento dos eventos mais rasos, por volta de 0.2 s onde o modelo de velocidade está melhor estimado.

O resultado destes experimentos indicam que as funções peso W_3 e W_4 são as mais adequadas para serem usadas na análise de velocidade utilizando a migração KIRCHHOFF completa.

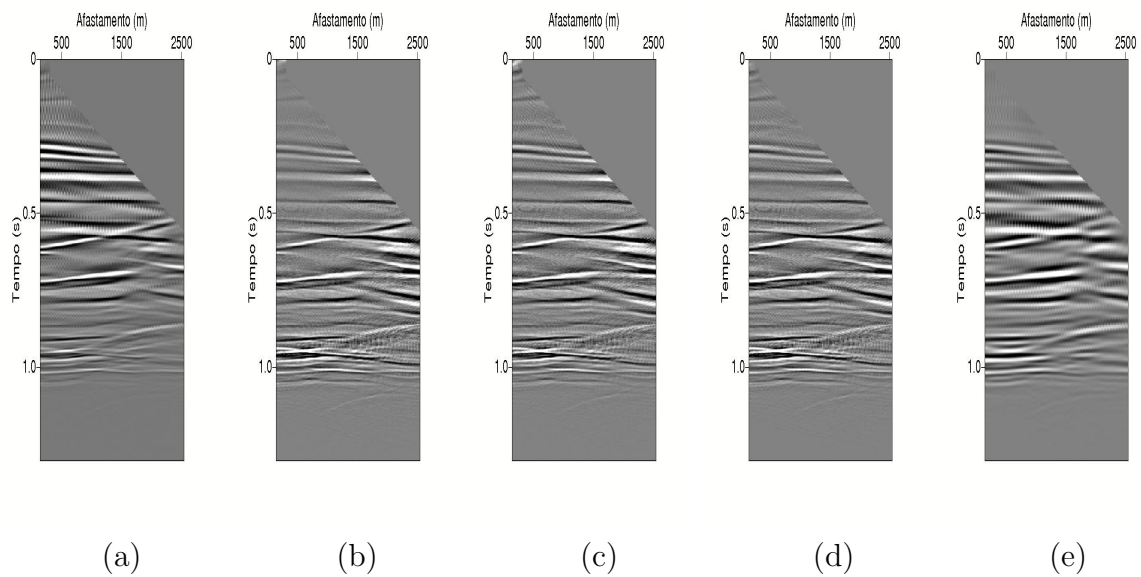


Figura 4.14: Seções CIG no CMP 6000 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5 .

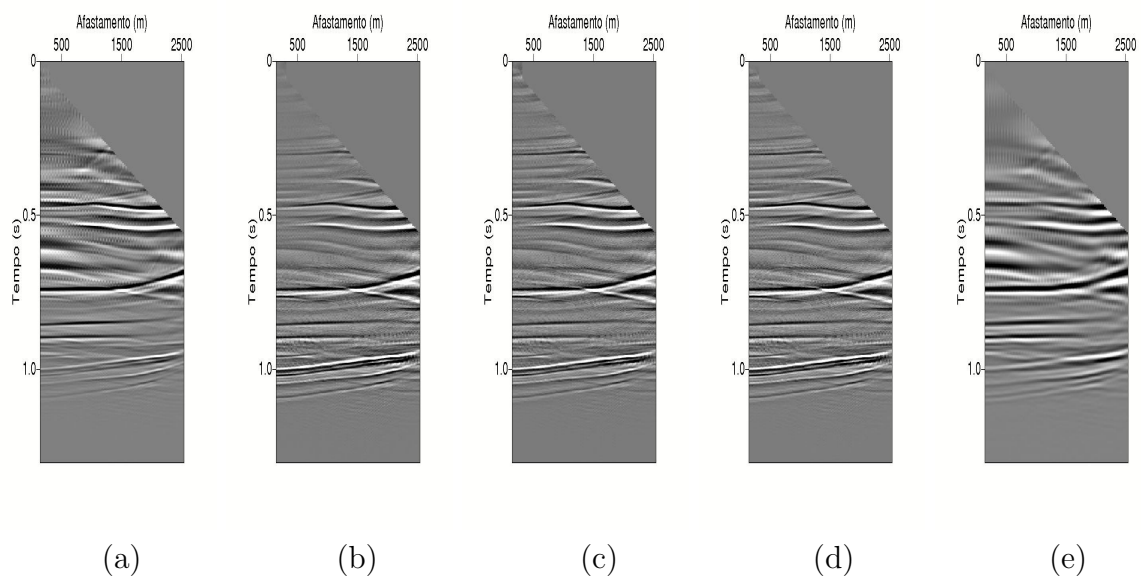


Figura 4.15: Seções CIG no CMP 6500 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5 .

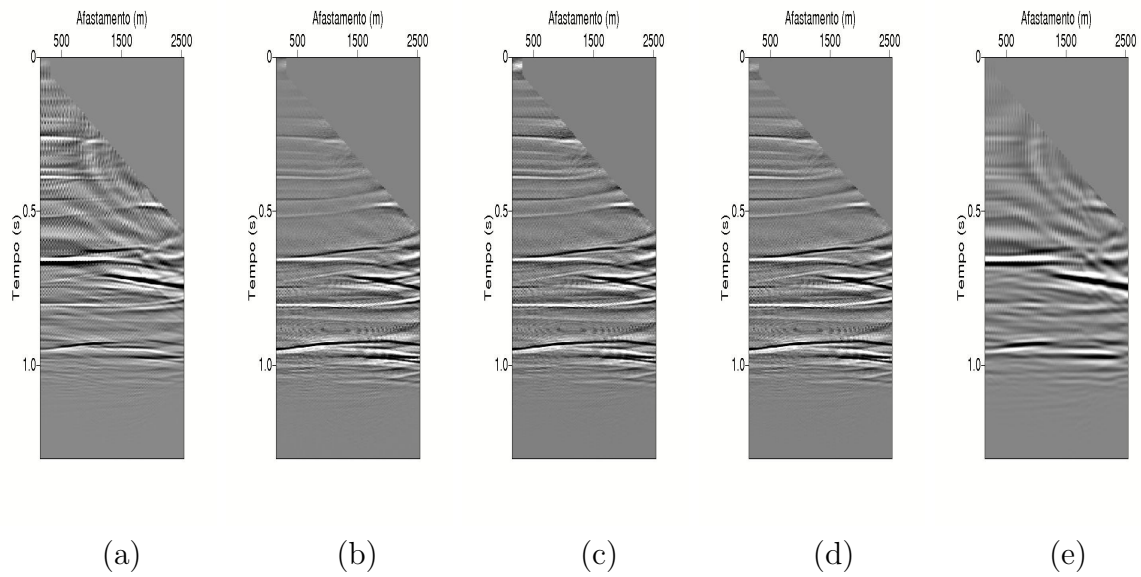


Figura 4.16: Seções CIG no CMP 7000 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (e) função peso W_5 .

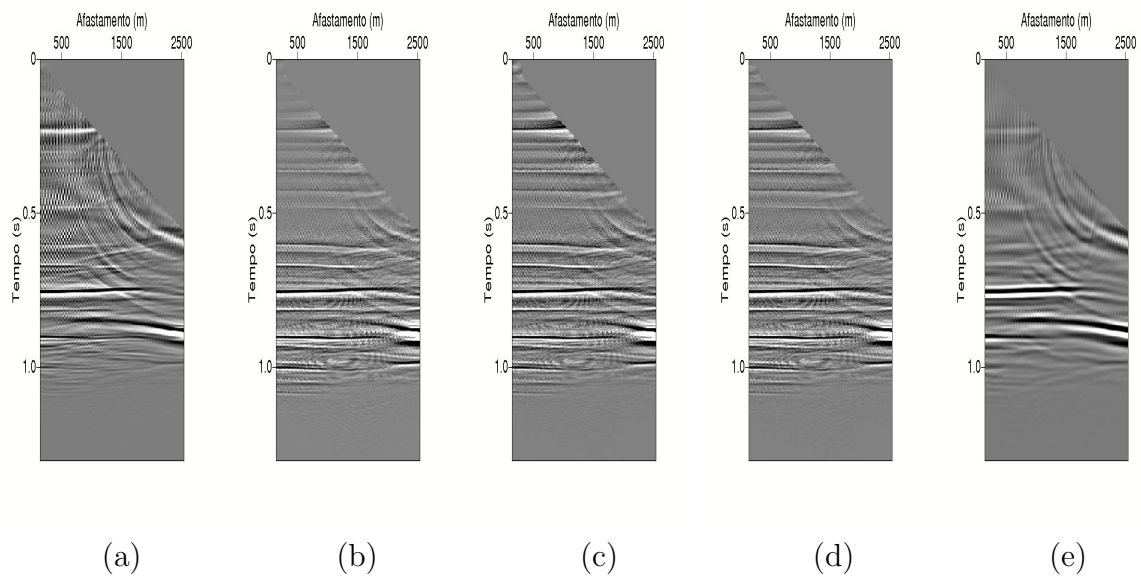


Figura 4.17: Seções CIG no CMP 7500 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (e) função peso W_5 .

5 CONCLUSÃO

Para gerar imagens sísmicas é necessário um campo de velocidade. Esta é uma etapa imprescindível no processamento sísmico. Neste trabalho foi feita uma revisão dos métodos de análise de velocidades em tempo.

A técnica CMP serviu para aumentar a razão Sinal/Ruído, efetuar análise de velocidade, gerar traços empilhados e atenuar múltiplas, porém o método é limitado quando consideramos meios com variações laterais de velocidade e refletores com fortes mergulhos.

A aplicação da correção DMO foi fundamental para corrigir os efeitos dos mergulhos dos refletores e melhorar a análise de velocidade pela técnica NMO-DMO e empilhamento. A técnica melhorou a análise e o modelo de velocidade para o empilhamento e migração. As limitações deste método são quanto ao uso de velocidade constante para todo o meio que pode suprimir eventos mergulhantes, bem como realçar múltiplas.

A PSTM nos permitiu executar análises de velocidades nas seções CIG, o que representou uma melhoria significativa na rota tradicional NMO-DMO-zero-offset. Porém, a planificação das seções CIG, utilizada como critério, não foi condição suficiente para produzir melhores imagens.

A análise de velocidade utilizando a PSTM tipo KIRCHHOFF, com as funções peso, permitiu o refinamento do modelo de velocidade utilizado, melhorando mais ainda o imageamento, mesmo na presença de ruído aditivo. As desvantagens deste método, no entanto, é quanto ao seu alto custo computacional.

Todas estas técnicas, apresentaram limitações quando analisamos meios com fortes variações laterais de velocidades. Para corrigir esses problemas, o método mais adequado é a migração em profundidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-CHALABI, M. Series approximations in velocity and travelttime computations. *Geophys. Prosp.*, v. 21, p. 783–795, 1973.
- CAINELLI, C.; MOHRIAK, W. U. Some remarks on the evolution of sedimentary basins along the eastern brazilian continental margin. *Episodes*, v. 22, n. 3, September 1999.
- CERVENY, V. *Seismic Ray Theory*. [S.l.: s.n.], 2001.
- CLAERBOUT, J. F. How to derive interval velocities using a pencil and straight edge. *Stanford Expl. Proj.*, v. 14, 1978.
- CLAYTON, R. Common midpoint migration. *Stanford Exploration Project Report. Stanford University*, v. 14, 1978.
- DOHERTY, S.; CLAERBOUT, J. Velocity analysis based on the wave equation. *Stanford Exploration Project Report. Stanford University*, v. 1, 1974.
- DUARTE, O. O. *Dicionário Enciclopédico de Geologia e Geofísica*. [S.l.]: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2003.
- EGLER CLAUDIO A G. PIRES DO RIO, G. A. Territórios do petróleo no brasil: Redes globais e governança local. *Trabalho encontrado em <http://www.laget.igeo.ufrj.br/egler>*.
- FOSTER, D. J.; MOSCCHER, C. C. Supretion od multiple reflectio using radon tranform. *Geophysics*, n. 57, p. 386–395, 1992.
- HAMID, N. A.-S. *Seismic Exploration: Technique and Processing*. [S.l.]: Birkhausfr, Stuttgart, 1982.
- H.K. KOWSMANM R.O., F. A. C. *Origem e Evolução de bacias sedimentares*. [S.l.: s.n.], 1990. 269-289 p.
- HUBRAL, P.; KREY, T. Interval velocities from seismic reflection time measurements. *Soc.Expl. Geophys.*, 1980.
- IKELLE, L. T.; AMUNDSEN, L. *Introduction to Petroleum Seismology*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2005.
- J. HOLZ M, F. d. B. A. B. K. Análise estratigráfica de bacias rift – uma abordagem genética na bacia de camamu-almada, brasil. *0 Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP*, 2004.
- KJARTANSSON, E.; ROCCA, F. The exploding reflector model and laterally variable media. *Stanford Exploration Project Report. Stanford University*, v. 16, 1979.

- KLUCHE J., e. a. Análise estratigráfica ed bacias rifte: aplicação de conceitos genéticos nas bacias camamu-almada e jequitinhonha. *Boletim de Geociências Petrobras*, v. 13, n. 2, p. 227–244, maio/nov. 2005.
- LOEWENTHAL D., L. L. R. R.; SHERWOOD, J. The wave equation applied to migration. *Geophys. Prosp.*, v. 24, p. 380–399, 1976.
- MAYNE, W. H. Common reflection point horizontal data stacking techniques: Geophysics. *Elsevier Scientific*, v. 27, n. 06, p. 927–938, 1962.
- NEIDELL, N. S.; TANER, M. T. Semblance and other coherency measures for multichannel data. *Geophysics*, v. 34, p. 482–497, 1971.
- ROBINSON, E. A.; TREITEL, S. *Geophysical signal analysis*. [S.l.: s.n.], 1980.
- SCHOENBERGER, M.; F., M. J. Hydrophone streamer noise. *Geophysics*, v. 39, n. 6, p. 781–793, December 1974.
- SEG Y rev 1 Data Exchnage Format. *Soc. Expl. Geophys*, 2002.
- SHERIFF, R. E.; L.P, G. *Exploration Seismology*. [S.l.]: Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- SILVA, M. T.; ROBINSON, E. A. Deconvolution of geophysical time series in the exploration for oil and natural gas. *Elsevier Scientific*, v. 04, p. 113–168, 1979.
- SOUZA-LIMA, W. e. a. Bacia de camamu - bacias sedimentares brasileiras. *Fundação Paleontológica Phoenix*, n. 54, Junho 2003.
- SOUZA-LIMA W. E JNUIOR, G. P. H. Origem evolução e classificação das bacias sedimentares. *Fundação Paleontológica Phoenix*, n. 49, Janeiro 2003.
- TANER M. T., K. F.; ALHILALI, A. Estimation and correction of ner-ausrface time anomalies. *Geophysics*, n. 39, p. 441–446, 1974.
- TEIXEIRA, W. e. a. *Decifrando a Terra*. [S.l.]: Oficina de textos, 2000.
- TYGUEL M., S. J. H. P. H. C. Multiple weights in diffraction stack migration. *Geophysics*, v. 58, n. 12, p. 1820–1830, 1993.
- YILMAZ, O. *Seismic Data Processing*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1987.