



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA

RODRIGO NAZARENO ANDRADE MENDONÇA

**ATENUAÇÃO DE REFLEXÕES MÚLTIPLAS EM DADOS
SÍSMICOS REAIS UTILIZANDO A TÉCNICA DE REMOÇÃO
DE MÚLTIPLAS RELACIONADAS À SUPERFÍCIE LIVRE -
SRME**

BELÉM
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA

RODRIGO NAZARENO ANDRADE MENDONÇA

**ATENUAÇÃO DE REFLEXÕES MÚLTIPLAS EM DADOS
SÍSMICOS REAIS UTILIZANDO A TÉCNICA DE REMOÇÃO
DE MÚLTIPLAS RELACIONADAS À SUPERFÍCIE LIVRE -
SRME**

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

Orientadora: Ellen de Nazaré Souza Gomes

Coorientador: Jessé Carvalho Costa

BELÉM
2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

M539a Mendonça, Rodrigo Nazareno Andrade

Atenuação de reflexões múltiplas em dados sísmicos reais utilizando a técnica de remoção de múltiplas relacionadas à superfície livre - SRME. / Rodrigo Nazareno Andrade Mendonça; Orientador: Ellen de Nazaré Souza Gomes; Coorientador: Jessé Carvalho Costa – 2010

63 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Quarto Período de 2009.

1. Método de reflexão sísmica. 2. Atenuação de múltiplas. 3. SRME. I. Universidade Federal do Pará. II. Gomes, Ellen de Nazaré Souza, *orient.* III. Costa, Jessé Carvalho, *coorient.* IV. Título.

CDD 20º ed.: 622.159

RODRIGO NAZARENO ANDRADE MENDONÇA

**ATENUAÇÃO DE REFLEXÕES MÚLTIPLAS EM DADOS
SÍSMICOS REAIS UTILIZANDO A TÉCNICA DE REMOÇÃO
DE MÚLTIPLAS RELACIONADAS À SUPERFÍCIE LIVRE -
SRME**

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

Data de Aprovação: / /

Banca Examinadora:

Prof^a.Dr^a. Ellen de Nazaré Souza Gomes - Orientadora
Faculdade de Geofísica - Universidade Federal do Pará

Prof^o.Dr. Jessé Carvalho Costa - Co-orientador
Faculdade de Geofísica - Universidade Federal do Pará

Doutoranda Daniela Rego Amazonas - Membro
Programa de Pós-Graduação em Geofísica - Universidade Federal do Pará

BELEM
2009

AGRADECIMENTOS

O conhecimento é o fardo condicional da razão. É um vício que deve ser tornar comum e coletivo a sociedade. A busca pessoal pelo conhecimento acaba por não ser apenas pessoal, principalmente quando esse conhecimento não é utilizado apenas para benefício próprio, e sim, para um bem estar coletivo, ou até mesmo apenas daquelas pessoas em torno do detentor desse conhecimento. Com efeito similar a uma lente convergindo a luz para um determinado ponto. A vivência com outras pessoas detentoras de conhecimentos, tons e dons nos torna sábios, ricos e fortes. Por este motivo agradeço a Deus por permitir viver e conhecer uma gota deste conhecimento através da convivência com essas pessoas detentoras das mais variadas virtudes.

Agradeço também a:

A todos meus familiares que de alguma forma contribuíram para esse momento singular em minha vida, especialmente, a minha mãe, e a meu pai por me suportarem por tanto tempo.

A minha orientora Professora Ellen N. S. Gomes por me guiar neste barco. Ao meu co-orientador Professor Jessé C. Costa pelas conversas e dicas no decorrer do trabalho. Aos membros da banca examinadora.

A meus amigos: Marcelo, Ray Diego, Anderlon, Brenno, Herbert, Ordiley, David, por me ensinarem o que se deve, e o que não se deve fazer nos mais variados ambientes como universidades e bares.

A meus amigos: Rafael, Danilo, Daniel, Ciro, Kauê, Caio e Manoel pelos churrascos e noitadas.

A minhas amigas/companheiras Carolina e Cristiane pelas aulas no PROSIS, assim como por todos os momentos nossos bons momentos culturais que variaram de Chaves a Bash.

As entidades FADESP e PETROBRAS pelo suporte financeiro e técnico. Peço desculpas àqueles que não foram citados, e que de alguma forma contribuíram para minha formação.

RESUMO

A identificação e remoção de reflexões múltiplas em dados sísmicos reais é uma etapa de grande importância no processamento de dados sísmicos, pois a supressão destas múltiplas pode evitar erros na interpretação geológica das imagens sísmicas obtidas. O objetivo do trabalho é a determinação de um fluxo de processamento, para a eliminação de múltiplas de superfície livre. A implementação deste trabalho foi realizada no pacote de processamento de dados sísmicos ProMAX, software da empresa Landmark. A principal vantagem deste método é sua fácil e rápida implementação neste programa, podendo ser aplicado em qualquer etapa do processamento sísmico. O método apresenta um desempenho satisfatório principalmente na parte da seção sísmica onde a lâmina de água é mais espessa.

Palavras-Chave: Método sísmico de reflexão. Atenuação de Múltiplas. SRME.

ABSTRACT

The identification and removal of multiple reflections in seismic data is a stage of great importance in the processing this data, because the suppression of these multiple it can avoid mistakes in the geological interpretation of the seismic images obtained. The goal of work is the determination of a processing flow, for the elimination of multiple of free surface. The implementation of this work was accomplished in the package of processing of seismic data ProMAX, software of the Landmark company. The main advantage of this method is its easy and fast implementation in this program, could be applied in any stage of the seismic processing. The method presents a satisfactory performance mostly in the part of the seismic section where water blade is thicker.

Key Words: Seismic method of reflection. Multiple Attenuation. SRME.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	Esquema mostrando como se dá uma aquisição sísmica de refração.	15
Figura 2.2	Esquema mostrando como se dá uma aquisição sísmica de reflexão.	16
Figura 2.3	Composição de um dado sísmico	17
Figura 2.4	Observamos na imagem ampliada(moldura em vermelho), a região onde se localiza a bacia do Jequitinhonha. Após ampliarmos novamente a imagem na moldura em vermelho, obtemos a localização geográfica(imagem na moldura verde) da linha sísmica 214-2660 e a Bacia do Jequitinhonha.	18
Figura 2.5	Levantamento sísmico com streamer e dados do arranjo.	19
Figura 3.1	Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltipla de superfície livre.	23
Figura 3.2	Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltiplas internas, gerada em camadas internas, também chamada múltipla intercamada.	23
Figura 3.3	Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltiplas simétricas.	24
Figura 3.4	Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltiplas assimétricas.	24
Figura 3.5	Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltipla de curto percurso ou <i>peg-leg</i>	25
Figura 3.6	Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltipla de longo percurso.	25
Figura 3.7	Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltipla de primeira ordem.	26
Figura 3.8	Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltipla de segunda ordem.	26
Figura 3.9	Observa-se que o bubble purse comporta-se como fonte de várias frentes de onda após a onda primária, esse efeito é registrado no hidrofone e o dado é convolvido com outras respostas no mesmo tempo.	27

Figura 3.10 Assinatura da Fonte de um único canhão de ar de 40 polegadas cúbicas (0,66 litros), gravado a 300m de distância vertical do canhão.	28
Figura 3.11 Conceito e disposição de arranjo do Air-gun. (a) A assinatura da fonte individual tem um período da "bolha de ar" que depende do volume de ar do Air-gun (dado em polegadas cúbicas).(b) Se os seis Air-guns são colocados em um arranjo e disparados simultaneamente, produzem uma assinatura em que os pulsos da "bolha" são suprimidos.	29
Figura 3.12 Linha vermelha - fantasma da fonte; linha amarela - fantasma do receptor; linha preta - reflexão primária. Observa-se que essas ondas podem ser captadas pelo receptor ao mesmo tempo, o que torna difícil a distinção sinal/ruído.	30
Figura 4.1 Filtro $F-K$ onde se observa que a transformada de dominios concentra eventos com <i>moveout</i> diferentes.	34
Figura 4.2 O <i>Filtro Radon</i> concentra a energia dos eventos parabólicos em regiões diferentes do domínio $\tau - p$, após essa distinção a energia da múltipla é zerada.	35
Figura 6.1 Dados mostrados em seção afastamento mínimo de 150m, observe o padrão dos dados antes e depois do CDP-1282, observe que as múltiplas são distintas apenas na parte profunda da seção	44
Figura 6.2 Visualização das múltiplas de superfície livre indicadas pela letra "A" e múltiplas internas indicadas pelas letras "B" na seção de afastamento mínimo de 150m.	45
Figura 6.3 Fluxograma de processamento sísmico adotado. As setas pretas mostram as etapas de um fluxo convencional de processamento sísmico. Enquanto que as setas azuis mostram o fluxo utilizado para remoção de múltiplas com o SRME. As setas vermelhas mostram as etapas seguidas para a aplicação conjunta do SRME seguido do Radon. ..	47
Figura 6.4 Modelo de velocidades RMS após <i>picking</i> e suavização.	48
Figura 6.5 A linha em azul mostra os <i>picking</i> feito na interface terra/água, a linha vermelha é resultado do cálculo da múltipla de superfície livre de 1ª ordem.	50
Figura 6.6 Resultado da subtração de múltiplas com SRME em seção de Afastamento-Comum de 1050m.	52
Figura 6.7 Seção bruta organizada em Afastamento-Comum de 1050m.	53
Figura 6.8 Visualização da seção de Afastamento-Comum de 1050m, com o aplicação do SRME seguido do Radon.	54
Figura 6.9 Visualização da seção empilhada, com o aplicação do SRME.	55

Figura 6.10 Visualização da seção empilhada apenas com fluxo de processamento convencional.	56
Figura 6.11 Visualização da seção empilhada, com o aplicação do SRME, seguido do filtro Radon.	57
Figura 6.12 Seção mostrando o resultado da migração com a aplicação apenas do SRME.	58
Figura 6.13 Seção mostrando o resultado da migração com fluxo convencional.	59
Figura 6.14 Seção mostrando o resultado da migração após a aplicação do SRME seguido do filtro Radon.	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	PRINCÍPIOS DO MÉTODO SÍSMICO DE REFLEXÃO	15
2.1	LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO JEQUETINHONHA	18
2.2	DADOS DA AQUISIÇÃO	19
2.3	PROBLEMAS DE AQUISIÇÃO	20
3	MÚTIPLAS	22
3.1	QUANTO À ORIGEM	23
3.2	QUANTO À SIMETRIA	24
3.3	QUANTO AO PERCURSO	25
3.4	QUANTO AO NÚMERO DE REFLEXÕES	26
3.5	PULSO DE BOLHA - <i>BUBBLE PURSE</i>	27
3.6	REFLEXÃO FANTASMA - <i>GHOST</i>	29
3.7	PROPRIEDADE DAS MÚTIPLAS	30
4	MÉTODOS DE ATENUAÇÃO DE MÚTIPLAS	32
4.1	MÉTODOS DE FILTRAGEM	32
4.1.1	Empilhamento CMP	33
4.1.2	Filtragem $f - k$	33
4.1.3	Filtragem Radon	34
4.1.4	Filtragem $t - x$	35
4.2	MÉTODOS DE PREDIÇÃO	36
4.2.1	Deconvolução Preditiva	36
4.2.2	SRME	36

5	O SURFACE-RELATED MULTIPLE ELIMINATION (SRME) . .	37
6	O PROCESSAMENTO	42
7	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Um dos métodos mais utilizados na pesquisa do petróleo é o método sísmico de reflexão que busca através de ondas mecânicas obter imagens de subsuperfície, e desta forma, poder estimar possíveis alvos para a exploração de petróleo. Nos últimos anos, com a redução relativa dos custos de aquisição dos dados sísmicos e com o desenvolvimento de certas tecnologias (softwares e hardwares), a comunidade geofísica tem buscado desenvolver novos métodos de imageamento sísmico e melhorar técnicas antigas a ponto de se alcançar melhores resultados na qualidade das imagens sísmicas. Um dos principais fatores que afeta diretamente a qualidade das imagens sísmicas são as reflexões múltiplas.

As reflexões múltiplas são informações repetidas de ondas que ficam reverberando em subsuperfície até serem totalmente dissipadas no meio. Essas informações podem se sobrepor à outras informações de interesse, e desta forma, mascarar estruturas geológicas, tornando a visualização da área uma tarefa complexa. As múltiplas não podem ser totalmente removidas dos dados. Contudo, elas podem ser atenuadas a ponto de não serem mais observadas nas imagens sísmicas. Existem muitos métodos utilizados para atenuação de múltiplas, neste trabalho trataremos de um método especial para atenuar múltiplas, chamado Eliminação de múltiplas relacionadas à superfície livre - SRME¹, utilizado para atenuar um tipo especial de múltipla conhecida como múltipla de superfície livre.

Em 1967, Anstey e Newman observaram que a convolução de primárias com outros traços geravam reflexões múltiplas relacionadas à superfície livre, e de posse desses dados que continham apenas múltiplas, era feita a subtração desses eventos do dado. Este é o princípio básico do SRME.

Muitas variações deste método surgiram ao longo dos anos. Em 1992, Verschuur, Berkout e Wapennar, propuseram um método equivalente aos métodos baseados na equação da onda, onde a influência da superfície refletora é removida do dado, sendo necessário apenas o conhecimento da assinatura da fonte e o coeficiente de reflexão da superfície. A aplicação desse método e suas variações em geral, permitem que as múltiplas sejam previstas através de um procedimento de inversão do dado sísmico, sem a necessidade de informações sobre a estrutura em subsuperfície. A medição da assinatura da fonte pode complementar e aumentar

¹Surface-Related Multiple Elimination.

a eficiência do método visto que o mesmo pode ser bastante efetivo na remoção de múltiplas geradas a partir de geologias complexas (VERSCHUUR, 2006).

O objetivo deste trabalho é atenuar múltiplas de superfície livre em dado marinho. Serão aplicadas algumas técnicas de atenuação de múltiplas de superfície livre, entre elas o SRME. Para isto, é proposta uma metodologia para a eliminação das múltiplas de superfície livre.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: no capítulo 2, apresentaremos o princípio do método sísmico e algumas informações sobre as múltiplas. No capítulo 3 mostra os principais tipos de reflexões múltiplas, suas propriedades e características. No capítulo 4 são apresentados os principais métodos para atenuação de múltiplas, os filtros e suas aplicações. O capítulo 5 trata dos princípios do método SRME. O capítulo 6 diz respeito ao processamento utilizado neste trabalho. O capítulo 7 apresenta as conclusões e algumas recomendações.

2 PRINCÍPIOS DO MÉTODO SÍSMICO DE REFLEXÃO

Os métodos sísmicos se fundamentam na geração de ondas acústicas ou elásticas e na medição do tempo requerido para que estas ondas se propaguem da fonte de emissão até os sensores dispostos em superfície em um perfil. A partir de sua geração, as ondas podem sofrer refrações ou reflexões nas interfaces entre dois meios em subsuperfície. Destas respostas se baseiam os dois métodos sísmicos o de refração e o de reflexão.

A sísmica de refração Fig. 2.1, tem por objetivo a detecção em subsuperfície das ondas sísmicas refratadas em uma determinada profundidade, a refração total acontece quando estas ondas incidem sobre uma interface em um meio com maior velocidade com um ângulo maior que o ângulo crítico¹ e desta maneira, determinar as velocidades de propagação das ondas bem como das espessuras dos estratos em subsuperfície. Essas ondas viajam a grandes distâncias. As informações obtidas por este método são em geral de áreas de grande escala, com pouco detalhe nas informações das regiões abaixo da superfície.

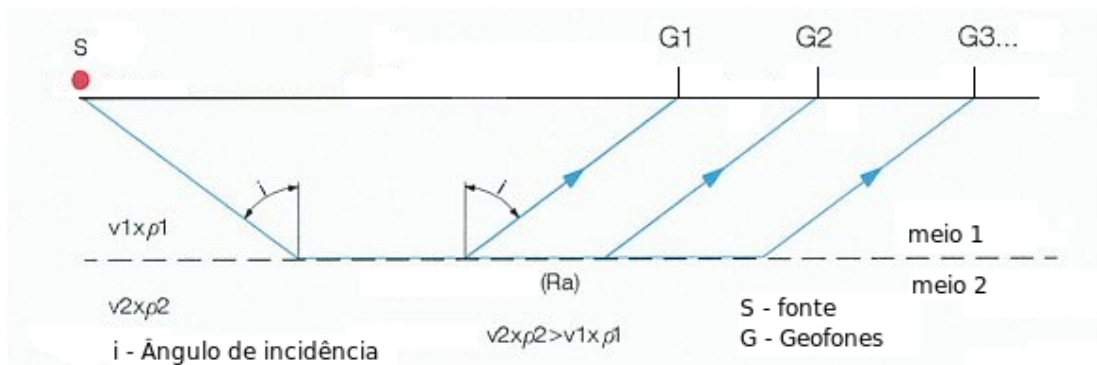


Figura 2.1: Esquema mostrando como se dá uma aquisição sísmica de refração.

A sísmica de reflexão Fig. 2.2, tem por objetivo a detecção em subsuperfície das ondas sísmicas refletidas em contato com duas camadas diferentes. É o principal método na prospecção de hidrocarboneto por oferecer detalhes das estruturas em subsuperfície.

¹Ângulo a partir do qual a onda passa de refletida para refratada, ou seja, são grandes ângulos de incidência.

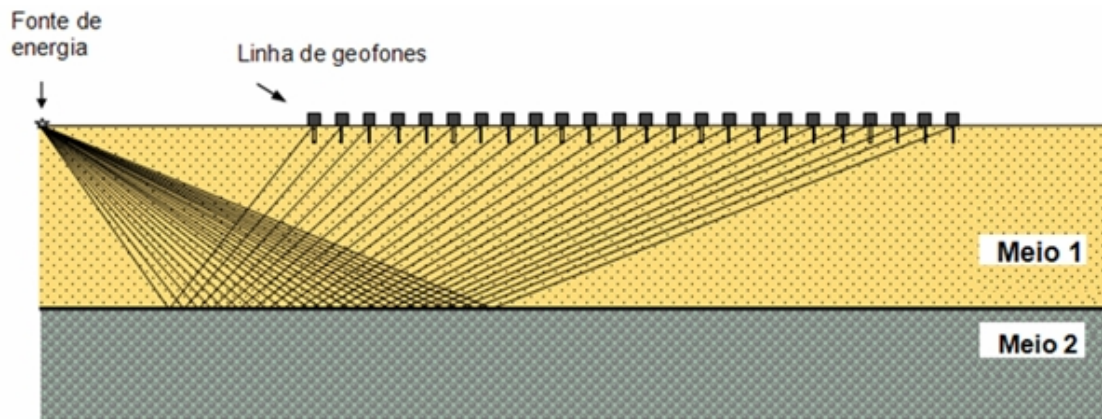


Figura 2.2: Esquema mostrando como se dá uma aquisição sísmica de reflexão.

Fonte: Ikelle.

A sísmica de reflexão se divide em três partes: a aquisição dos dados, o processamento e a interpretação das imagens. A aquisição é uma etapa onde os dados sísmicos são adquiridos em um levantamento sísmico, pode ser marinha ou terrestre, além de poder ser realizada em várias configurações como: 1-D, 2-D, 3-D ou 4-D. O processamento sísmico é a etapa aplicada com o objetivo de realçar os eventos de reflexão dos demais eventos. Tem como produto final seções sísmicas em tempo ou profundidade. A interpretação é um processo onde as seções sísmicas obtida no processamento são interpretadas, para obtenção de informações geológicas da região onde os dados foram adquiridos.

A etapa do processamento de dados sísmicos pode variar dependendo do objetivo do levantamento sísmico. Os principais objetivos do processamento sísmico são: manipular os dados de forma que em uma relação sinal/ruído, possamos fortalecer as reflexões primárias, consideradas sinal e atenuar todas as outras reflexões que são consideradas ruído.

Existem vários fatores que influenciam diretamente na qualidade das imagens sísmicas. Entre esses fatores podemos destacar: o ruído, o tipo de aquisição, a região onde se fez tal aquisição, o tipo de levantamento sísmico. Em geral, o ruído é o principal fator que afeta a qualidade das imagens sísmicas. Na etapa de aquisição, os dados adquiridos no levantamento sísmico são compostos por dois tipos de informações: as reflexões primárias que constituem o sinal e o ruído, como mostra a Fig. 2.3. Sendo que o sinal é a parte desejada dos dados sísmicos.

As reflexões primárias são informações que nos mostram a resposta geológica de subsuperfície, sendo que elas, são consideradas o sinal desejado, pois, é a partir delas que extraímos as informações geológicas de interesse. Os ruídos se dividem em: ruídos incoerentes e ruído coerente. Os ruídos incoerentes são aqueles que não apresentam uma coerência ao serem

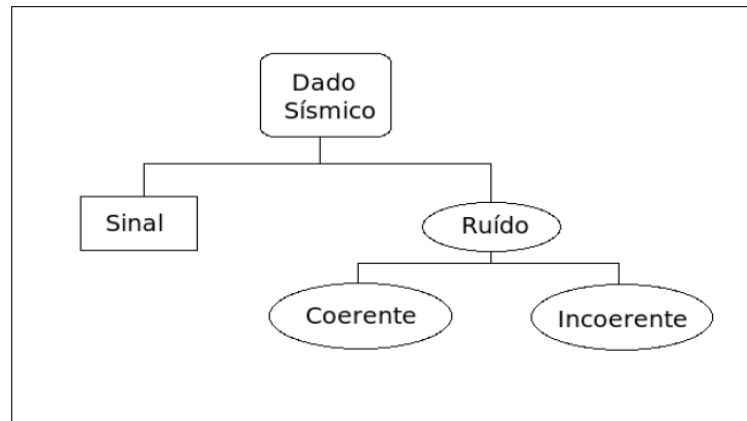


Figura 2.3: Composição de um dado sísmico

somados em fase. Já os ruídos coerentes apresentam como o nome diz, uma certa coerência ao serem somados em fase, criando falso eventos que são idênticos a reflexões.

Este trabalho tratará de um tipo especial de ruído coerente chamado de reflexões múltiplas. As reflexões múltiplas são reverberações de ondas que alcançam os receptores e registram informações repetidas. Essas informações podem se sobrepor as informações de reflexões primárias. Para este trabalho trataremos de um tipo especial de reflexões múltiplas chamadas *múltiplas de superfície livre*, que estão sempre presentes nas aquisições marinhas devido a grande diferença de impedância² entre as interfaces terra/água.

Veremos mais adiante que existem vários tipos de reflexões múltiplas, e algumas propriedades que nos permitem diferenciá-las das reflexões primárias. É a partir da diferença entre estas propriedades que temos a base para separar as múltiplas das primárias e desta forma, conseguir eliminar as reflexões múltiplas dos dados. Para o dado que foi processado, a presença de reflexões múltiplas é marcante e sua identificação é visível em apenas parte da seção, porém, fica evidente que estas reflexões afetam significativamente as imagens.

²Relação entre a densidade de uma primeira camada e velocidade das ondas sísmicas nesta camada e a densidade da segunda camada e velocidades das ondas sísmicas na segunda camada.

2.1 LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO JEQUITINHONHA

A região onde foi realizada a aquisição sísmica dos dados que serão tratados neste trabalho localiza-se na costa sul da Bahia, entre as Bacias sedimentares de Almada e Cumuruxatiba. A Bacia do Jequitinhonha é uma bacia terrestre-marítima, sendo que a maior parte de sua área está na região marítima Fig. 2.4. De uma área de 10.000Km^2 , apenas 500Km^2 pertencem a região terrestre. Na região de plataforma marítima, a batimetria varia de 50m a 3.000m de profundidade.

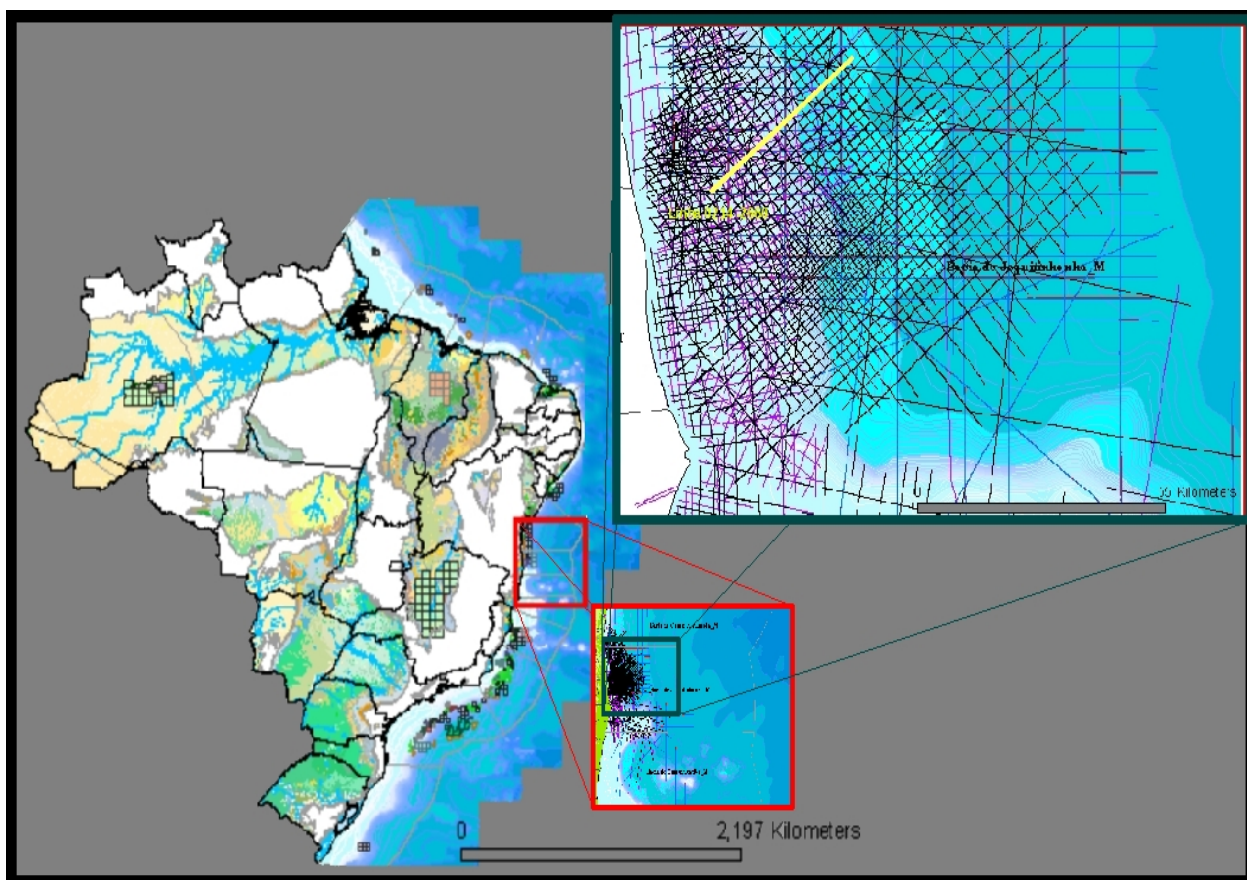


Figura 2.4: Observamos na imagem ampliada(moldura em vermelho), a região onde se localiza a bacia do Jequitinhonha. Após ampliarmos novamente a imagem na moldura em vermelho, obtemos a localização geográfica(imagem na moldura verde) da linha sísmica 214-2660 e a Bacia do Jequitinhonha.

Fonte: BD-ANP; modificado.

2.2 DADOS DA AQUISIÇÃO

Os dados deste trabalho foram adquiridos pela PETROBRAS em 1985, em levantamento sísmico *2-D* obtido na parte marinha da bacia de Jequitinhonha. A aquisição marinha realizada foi o arraste de cabo marinho (*Mariener Tower Streamer*) na configuração 2D, ver Fig. 2.5, que é realizada por um navio que reboca um conjunto de fontes, canhões de ar (*air-gun*), seguido de um cabo(*streamers*) contendo os hidrofones.

Os cabos rebocáveis flutuadores *streamers*, Fig. 2.5 são os mais utilizados devido à simplicidade de sua operação, e essa técnica é utilizada geralmente em águas com mais de vinte metros de profundidade. Os cabos têm de quatro a dezesseis quilômetros de comprimento e são preenchidos com fluidos de baixa densidade, para que possam flutuar. Quando estes cabos flutuantes são utilizados, devem ser calculadas correções com a finalidade de compensar o movimento provocado pelas correntes marinhas (efeito pluma). Um ou mais navios de guarda acompanham os navios sísmicos, com a finalidade de localizar outras embarcações e evitar colisões com os cabos rebocáveis.

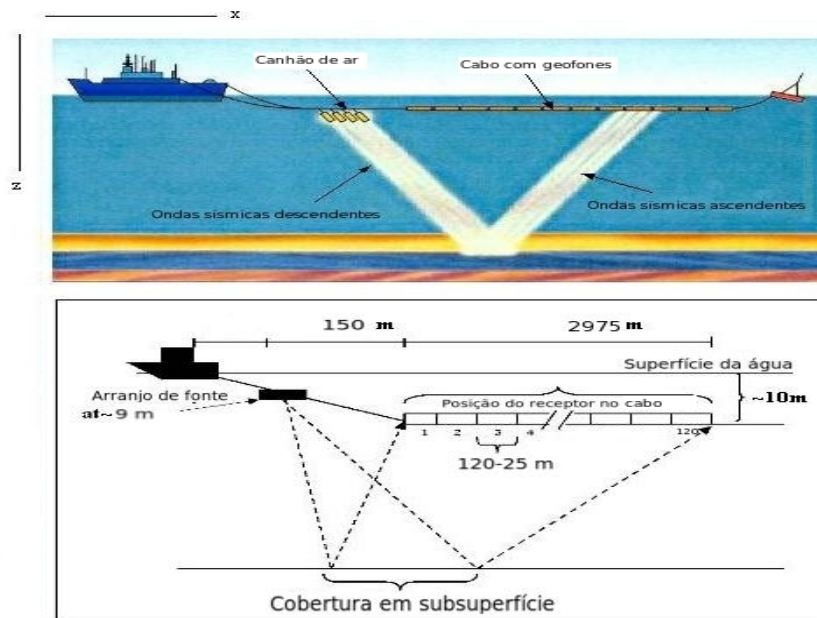


Figura 2.5: Levantamento sísmico com streamer e dados do arranjo.
Fonte: Ikelle (2005).

A linha utilizada neste trabalho é uma linha 2D de *dip*³, cujo comprimento do lanço⁴ é de 3125m. O espaçamento entre as fontes e receptores é de 25 m. O número de canais faz alusão à quantidade de geofones utilizados no *streamer*, no caso deste levantamento 120 canais. Alguns detalhes do levantamento estão na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Configuração do levantamento realizado na Bacia do Jequitinhonha

Bacia	Jequitinhonha
Comprimento do cabo	3125m
Número de receptores	120
Intervalo entre receptores	25m
Profundidade do cabo	9m-10m
Número de tiros	1577
Intervalo entre tiros	25m
Profundidade da fonte	9m
Tempo de gravação	4 ms
Afastamento mínimo	150m

2.3 PROBLEMAS DE AQUISIÇÃO

Temos para cada tipo de aquisição, ruídos que são característicos a ambiente onde foi realizado o levantamento. Para os ambientes marinhos, a presença de ruídos como múltiplas de superfície livre, efeito do fantasma e pulso de bolha, são marcantes.

Além disso, nos levantamentos marinhos com *tower streamers*, são comuns a presença de ruídos devido a efeitos ambientais sobre os streamers, causando problemas para o processamento do dado. Apesar dos cuidados adotados, o efeito causado pelo agito do mar pode comprometer muito a qualidade do dado. A eliminação deste tipo de ruído incoerente é um processo simples que se dá pela filtragem dos dados com um filtro de banda passante na faixa de frequência que varia geralmente entre 10 Hz e 80 Hz⁵.

³Perpendicular a linha costeira do continente.

⁴Comprimento máximo do *streamer* somado ao espaçamento das fontes.

⁵Em geral o ruído causado pela movimentação dos streamers tem frequência abaixo de 10Hz. Entre 10 e 80Hz, temos a banda de frequência do sinal sísmico de reflexão.

Nas aquisições marinhas uma fonte de múltiplas se deve a interface água/ar. O acentuado contraste de impedância acústica entre o ar e a água faz com que as múltiplas de superfície livre geradas por essa interface possuam grande energia fazendo com que esses eventos sejam confundidos com reflexões primárias. Além disso, nos levantamentos nos levantamentos em regiões rasas, devido ao forte contraste entre a água do mar e o fundo oceânico não registradas nas ondas guiadas⁶. No próximo capítulo é feita uma breve introdução sobre a classificação das múltiplas.

⁶São ondas presas na lâmina e viajam na direção horizontal. Geradas devido ao forte contraste de impedância entre a água e o fundo oceânico.

3 MÚLTIPLAS

As reflexões podem ser primárias e secundárias (múltiplas). As reflexões primárias são consideradas desejadas, pois, a partir delas podemos obter imagens de subsuperfície limpas de ruídos coerentes como reflexões múltiplas. Entretanto, existem outras abordagens em que, as múltiplas não são consideradas como ruído, por se tratar de informações repetidas, alguns autores as utilizam como sinal sísmico utilizado para fortalecer as reflexões primárias. Contudo, não utilizaremos essa abordagem neste trabalho.

As reflexões múltiplas podem mascarar importantes informações em um registro sísmico. Podemos comparar esse efeito a uma conversa entre duas pessoas em uma caverna, onde o eco provocado pela reverberação das ondas sonoras pode de certa forma interferir na comunicação entre essas pessoas, podendo causar erro na comunicação entre elas. A atenuação dessas múltiplas é fundamental para uma boa interpretação das reais informações.

No sismograma não é fácil a separação de reflexões primárias e secundárias. Os eventos no sismograma em forma de retas estão relacionados a refrações e a ondas diretas, enquanto que os eventos hiperbólicos estão relacionados às reflexões. As reflexões múltiplas podem ser divididas em vários tipos de acordo com o percurso, simetria, origem e quanto à ordem de reflexão. Considerando que o ambiente de aquisição dos dados sísmicos seja o ambiente marinho, as reflexões múltiplas podem ser classificadas em:

3.1 QUANTO À ORIGEM

Diz respeito ao local onde a múltiplas são geradas e estão relacionadas com as diferenças nas impedâncias sísmica entre às interfaces em subsuperfície.

- Múltiplas de superfície livre - se originam nas interfaces terra/água e água/ar, causada pelas grandes diferenças de impedância entre essas interfaces.

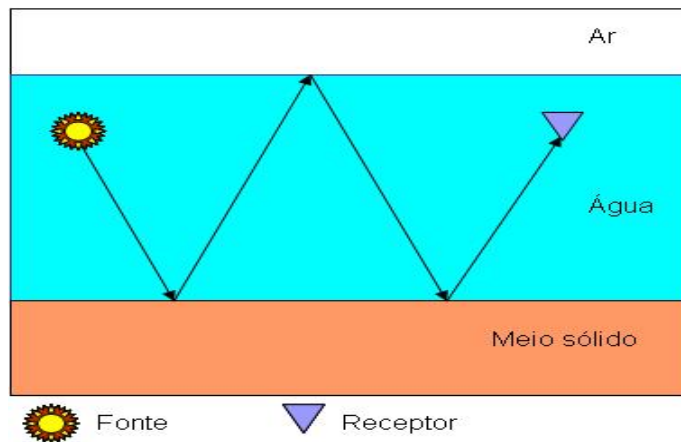


Figura 3.1: Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltiplas de superfície livre.

- Múltiplas internas - se originam nas camadas abaixo da superfície livre.

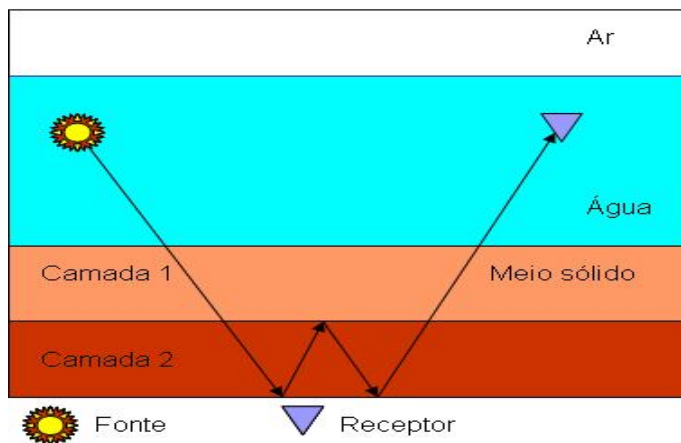


Figura 3.2: Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltiplas internas, gerada em camadas internas, também chamada múltipla intercamada.

3.2 QUANTO À SIMETRIA

Está relacionada com a igualdade geométrica da trajetória do raio de uma onda, através do caminho de ida e volta dessa onda pela subsuperfície.

- Múltiplas simétricas - tem trajetórias idênticas de percurso;

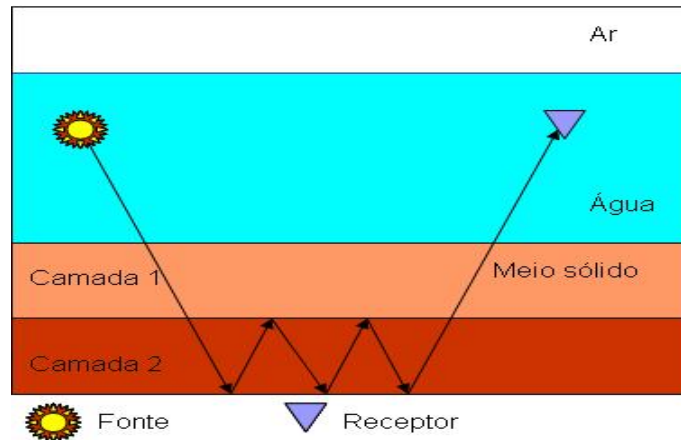


Figura 3.3: Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltiplas simétricas.

- Múltiplas assimétricas - apresentam trajetórias de percurso diferentes.

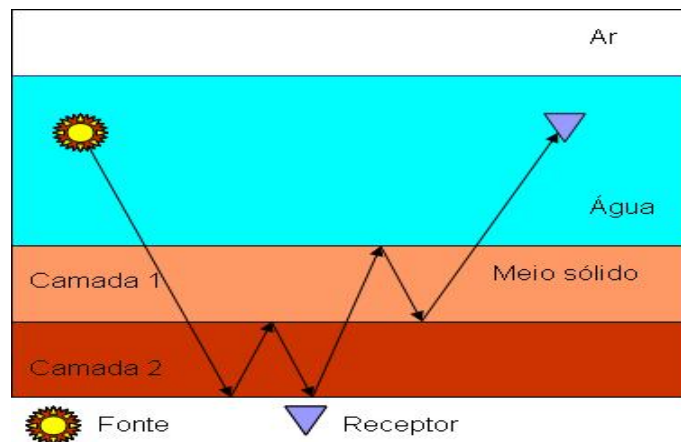


Figura 3.4: Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltiplas assimétricas.

3.3 QUANTO AO PERCURSO

São classificadas em relação às distâncias percorridas da fonte até sua captação nos sensores, em: múltiplas de curto percurso (*Peg-legs*) e múltiplas de longo percurso.

- Múltiplas de pequeno percurso - são também chamadas *Peg-legs*, possuem tempo de trânsito muito próximo do tempo das reflexões primárias;

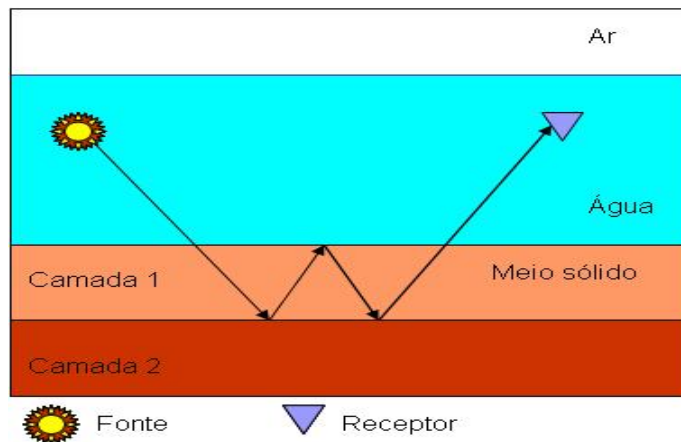


Figura 3.5: Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltipla de curto percurso ou *peg-leg*.

- Múltiplas de grande percurso - possuem tempo de trânsito bem maior que os das primárias. estão associadas a reflexões secundárias.

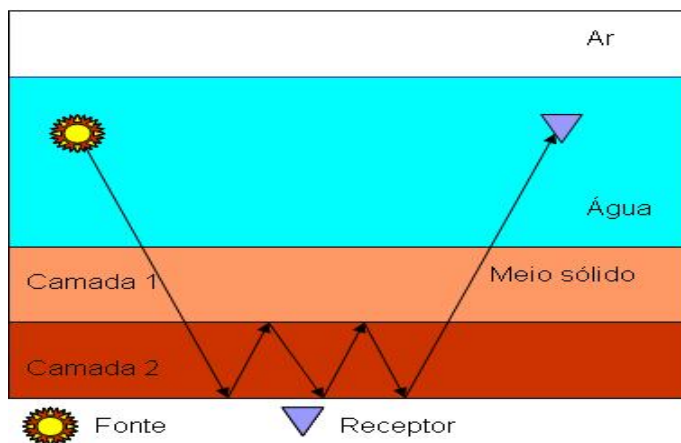


Figura 3.6: Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltipla de longo percurso.

3.4 QUANTO AO NÚMERO DE REFLEXÕES

Essa classificação está relacionada com a quantidade de reflexões ascendentes que a múltipla pode sofrer. Reflexões primárias são consideradas múltiplas de ordem zero.

- Múltiplas de 1^a ordem - são aquelas que sofreram duas reflexões ascendentes.

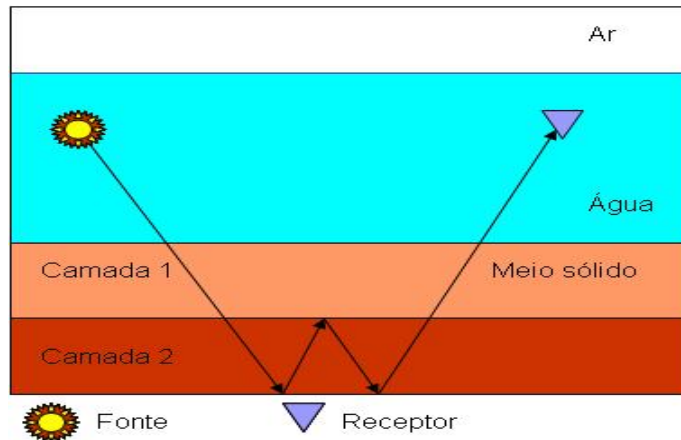


Figura 3.7: Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltipla de primeira ordem.

- Múltiplas de 2^a ordem - são aquelas que sofreram três reflexões ascendentes.

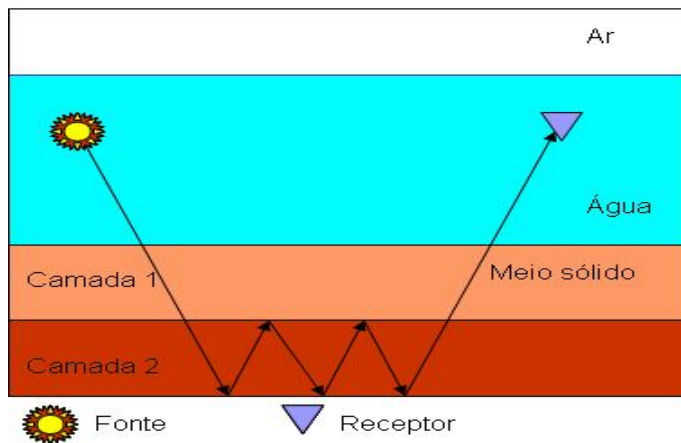


Figura 3.8: Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltipla de segunda ordem.

3.5 PULSO DE BOLHA - *BUBBLE PURSE*

O *Bubble Purse*¹ é um efeito de fonte que acontece após a primeira expansão da “bolha” de ar” no *Air-gun*. Imediatamente após a liberação do ar comprimido, é formada uma espécie de “bolha” de ar ao redor do canhão. À medida que esta “bolha” se expande, sua pressão interna diminui, já que a mesma quantidade de ar agora ocupa um volume maior. Em tese, a “bolha” alcança seu tamanho máximo quando a pressão externa iguala a pressão interna. Na realidade, o que acontece é que este limiar de igualdade de pressões é ultrapassado ligeiramente, fazendo com que a pressão externa fique maior que a interna por alguns instantes, provocando um colapso da “bolha” e a redução do seu volume. Novamente, a pressão interna volta a sobrepular a externa e a “bolha” torna a se expandir. Esta situação se repete algumas vezes em questão de poucos milissegundos até a estabilização completa, conferindo um movimento oscilatório ao sinal acústico que está sendo gerado (DRAGOSET, 2000). Esse efeito causa o registro de informações muito parecido com o registro de reflexões múltiplas, é como se existisse outras fontes em diferentes tempos criando várias frentes de ondas, como mostra a Fig. 3.9.

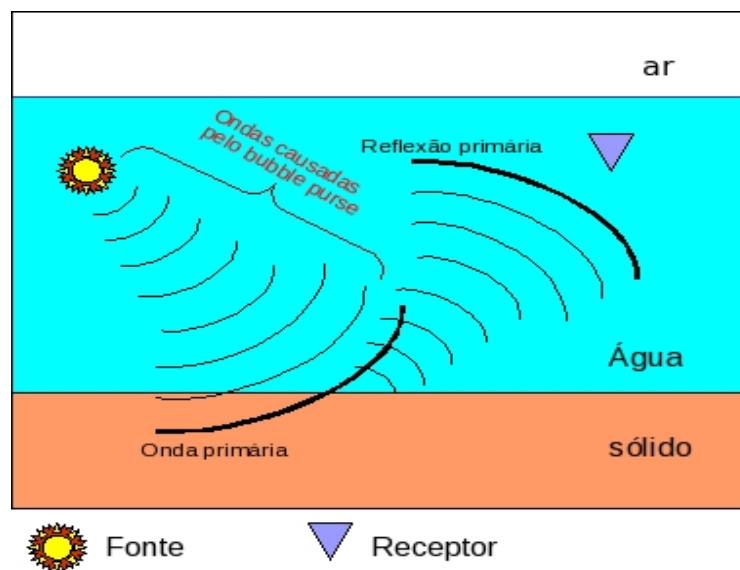


Figura 3.9: Observa-se que o bubble purse comporta-se como fonte de várias frentes de onda após a onda primária, esse efeito é registrado no hidrofone e o dado é convolvido com outras respostas no mesmo tempo.

O resultado em um sismograma é o registro consecutivo da mesma interface. Apesar da tecnologia que se tem hoje para minimizar este efeito, é fato que o mesmo ainda acontece

¹Termo em inglês que significa *Pulso de bolha*. Será adotado este termo neste trabalho, devido sua ampla difusão no meio sísmico.

e causa perdas na relação sinal/ruído. Podemos observar na Fig. 3.10, que a assinatura da fonte apresenta efeitos de bolha o que pode comprometer o resultado final da etapa de subtração dos ruídos modelados dos dados sísmicos. A eliminação do efeito de bolha é fundamental para que seja realizada a deconvolução da assinatura da fonte com a resposta sísmica de subsuperfície de forma que tenhamos apenas a resposta geológica do meio. Mesmo com a obtenção de uma assinatura da fonte próxima do sinal real gerado pela fonte, os dados sísmicos registrados apresentam esse efeitos de bolha, o que torna a subtração do ruído uma tarefa difícil.

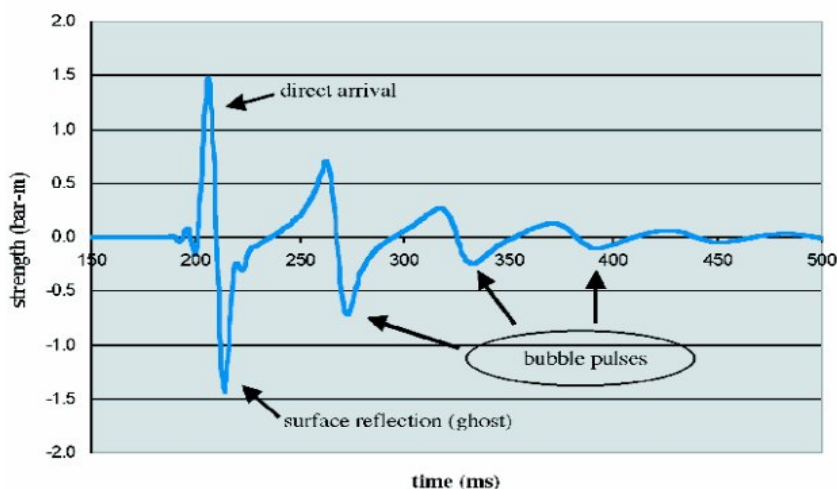


Figura 3.10: Assinatura da Fonte de um único canhão de ar de 40 polegadas cúbicas (0,66 litros), gravado a 300m de distância vertical do canhão.

Fonte: Dragoset, 2000.

Para minimizar o efeito do *Bubble Purse*, hoje temos um arranjo de fontes de tal forma que as “bolhas de ar” geradas pelas fontes sofram interferência construtiva de forma que apenas o primeiro pulso seja maximizado e os restantes causados pelo Bubble Purse sejam atenuados Fig. 3.11. Existem também, canhões de ar construídos especialmente para eliminar este tipo de ruído.

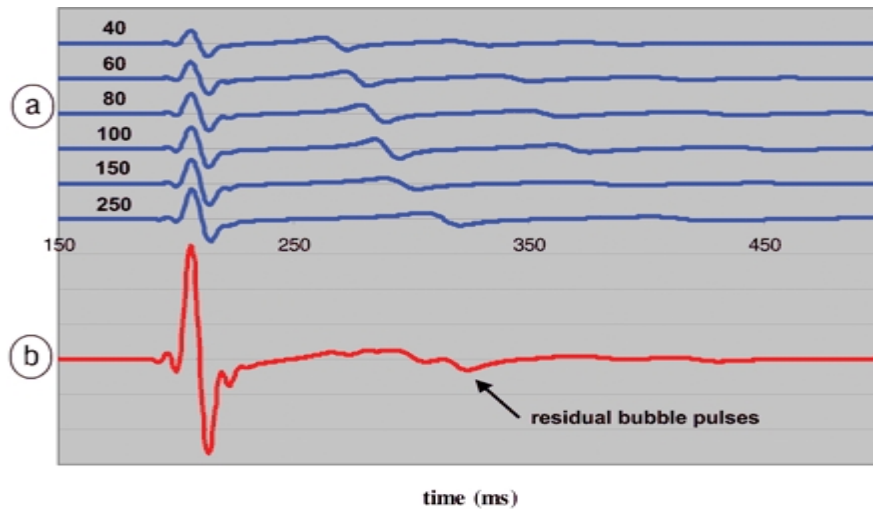


Figura 3.11: Conceito e disposição de arranjo do Air-gun. (a) A assinatura da fonte individual tem um período da "bolha de ar" que depende do volume de ar do Air-gun (dado em polegadas cúbicas). (b) Se os seis Air-guns são colocados em um arranjo e disparados simultaneamente, produzem uma assinatura em que os pulsos da "bolha" são suprimidos.

Fonte: Dragoset, 2000.

3.6 REFLEXÃO FANTASMA - *GHOST*

Outro tipo de múltipla geralmente registrada nos dados de levantamentos marinhos são aquelas causadas pelas reflexões fantasmas. Reflexão fantasma é um efeito que acontece quando uma fonte pontual em uma profundidade $z = z_0$ no tempo $t = 0$, emite energia em todas as direções até o instante que a onda propagada atinge a interface água/ar sofrendo reflexão. A partir daí, o pulso descendente inicial passa a ser acompanhado por um pulso defasado, de polaridade invertida com relação ao primeiro, o que pode ser observado na Fig. 3.10. O coeficiente de reflexão daquela interface é próximo de -1 , e portanto, a amplitude deste pulso é a mesma do pulso inicial para todos os ângulos de incidência. Como na maioria dos casos, a profundidade da fonte é muito menor que a profundidade dos alvos geológicos, e o efeito diferencial da divergência esférica entre o pulso primário e a reflexão fantasma, esse efeito pode ser desprezado (DRAGOSSET, 2000).

A reflexão fantasma é comum em registros onde fontes e receptores estão ambos em subsuperfície, causando um efeito destrutivo ao sinal em certas frequências. Podem estar associados à fonte ou ao receptor Fig. 3.12. No caso da reflexão fantasma da fonte, a onda transmitida pela fonte se propaga para todas as direções, inclusive para a superfície (interface água/ar). Similarmente, o fantasma do receptor ocorre quando os receptores posicionados abaixo da superfície do mar registram, além das reflexões primárias, as reflexões geradas na

interface água/ar (DRAGOSET, 2000).

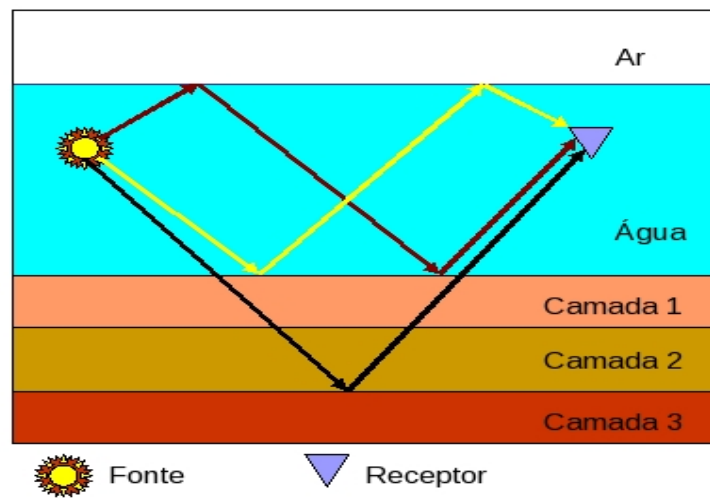


Figura 3.12: Linha vermelha - fantasma da fonte; linha amarela - fantasma do receptor; linha preta - reflexão primária. Observa-se que essas ondas podem ser captadas pelo receptor ao mesmo tempo, o que torna difícil a distinção sinal/ruído.

3.7 PROPRIEDADE DAS MÚTIPLAS

As reflexões múltiplas apresentam algumas propriedades que se diferem das primárias. Graças a elas, podemos distinguir as múltiplas das primárias e então depois de modeladas, essas múltiplas podem ser subtraídas dos dados sísmicos. Entre estas propriedades podemos destacar: a velocidade, a frequência, o espalhamento geométrico, a inclinação e a periodicidade (GAMBOA, 2003).

- Velocidade – As múltiplas apresentam velocidades mais baixas que sua concorrente primária, o que significa que o tempo de trânsito ou *moveout*² das múltiplas é maior que o da primária. A partir dessa característica estão baseados vários dos métodos de atenuação de múltiplas, como: Filtragem $F-K$, Filtragem Radon, Filtragem $T-X$.
- Frequência das múltiplas – Outra característica marcante é o maior conteúdo de frequência apresentado pelas reflexões múltiplas, se comparadas às primárias. No caso particular das múltiplas de superfície livre, o efeito da absorção na camada de água menor do que nas rochas. Como o coeficiente de absorção possui uma relação inversamente proporcional frequência, espera-se que o conteúdo de frequências das múltiplas superficiais seja superior ao das primárias num mesmo tempo de reflexão.

²Palavra derivada do inglês que significa *sobretempo*, devido sua ampla utilização este termo será adotado.

- Espalhamento Geométrico – Também, relacionado a propagação (trajetória) das reflexões primárias e múltiplas, o espalhamento geométrico (ou divergência esférica) é menor nas múltiplas, especialmente superficiais, que em uma primária concorrente.
- Inclinação – As reflexões múltiplas apresentam aumento no mergulho quando as interfaces sísmicas apresentam uma certa inclinação. E quanto maior a ordem da múltipla, maior será o mergulho apresentado por ela.
- Periodicidade – Por último, podemos mencionar a propriedade de periodicidade que a múltipla apresenta quando as identificamos em uma seção empilhada, propriedade que as primárias não apresentam. Através desta propriedade, podemos prever o comportamento da múltipla no tempo, modela-las e subtraí-las dos dados sísmicos. O SRME se baseia nesta propriedade para distinguir múltiplas de primárias.

Existem vários métodos para a atenuação de reflexões múltiplas, os mais populares são: deconvolução preditiva, filtragem Radon, filtragem f - k , filtragem t - x e o próprio empilhamento CMP que atenua algumas reflexões múltiplas. Desta forma, apenas o método SRME será tratado com maiores detalhes neste trabalho, portanto, não entraremos no mérito destes outros métodos, apenas apresentaremos algumas características e algumas aplicações.

4 MÉTODOS DE ATENUAÇÃO DE MÚTIPLAS

Os métodos para remoção de múltiplas sofreram diversas classificações ao longo dos anos, alguns autores divergem principalmente sobre as considerações dos métodos de predição. Muitos desses autores não consideram o método de Decolução Preditiva parte integrante deste método. Entretanto, não entraremos nos méritos desta discussão, apresentaremos neste trabalho, a classificação proposta por Verschuur que divide os métodos de remoção de múltiplas em duas categorias, segundo as propriedades descritas no capítulo anterior, são eles: Métodos de Filtragem e Métodos de Predição (VERSCHUUR, 2006).

- Métodos de filtragem – Métodos baseados em uma diferença no comportamento espacial das primárias e das múltiplas
- Métodos de predição – São métodos baseados na propriedade de periodicidade das múltiplas.

4.1 MÉTODOS DE FILTRAGEM

Esses métodos são baseados no comportamento espacial da múltipla, observando a trajetória que essas múltiplas apresentam que são diferentes das primárias, assim como suas diferentes velocidades e conteúdo de frequência. Estas técnicas, dependendo do tipo, podem ser aplicadas em dados pré-empilhados ou em dados empilhados e objetivam separar primárias de múltiplas. Esses métodos são menos custosos e mais simples se comparados aos métodos de predição e podem ser aplicados em qualquer etapa do processamento de dados sísmicos. Em geral, os métodos de filtragem empregam transformações de domínios o que facilita a separação de primárias de múltiplas. Uma desvantagem deste método é a dificuldade na diferenciação de primárias e múltiplas em pequenos afastamentos fonte/receptor, devido a pequena diferença de *Moveout* no registros dos dados.

4.1.1 Empilhamento CMP

Idealizada por (MAYNE, 1962) como Ponto comum em profundidade (CDP)¹, mais tarde adotou-se o Ponto Médio Comum (CMP)², esta técnica organiza os dados em famílias de afastamento comum de forma que o mesmo ponto em profundidade possa ser amostrado por um ou mais pares de fonte/receptor. O empilhamento CMP utiliza a correção NMO³ das primárias que se somam em fase, enquanto que as múltiplas por apresentarem uma correção NMO inadequada acabam por serem atenuadas.

4.1.2 Filtragem $f - k$

A filtragem $f - k$ foi introduzida por Embreer, Burg e Backus (1963) com o objetivo de reduzir ruídos indesejáveis dos dados. Esta técnica tornou possível processar um registro sísmico de forma que, todos os eventos com mergulhos em um dado intervalo são preservados sem alteração alguma na banda de frequência, enquanto que, todos os eventos fora deste intervalo específico serão atenuados uniformemente. A Transformada $f - k$ (também conhecida como a Transformada Dupla de Fourier) separa as bandas de frequência, auxiliando na distinção entre primárias e múltiplas. A filtragem no domínio $f - k$ pode auxiliar na discriminação das múltiplas baseando-se no “*Moveout*” Fig 4.1. O dado no domínio *afastamento-tempo* é corrigido (correção NMO) para ser então transformado para o domínio $f - k$ *frequência-número de onda*. Neste domínio, os eventos primários e múltiplos são bem separados baseando-se em seus mergulhos (ou, equivalentemente, em suas velocidades aparentes), para então a energia das múltiplas serem anuladas (ou pelo menos suavizadas). Os próximos passos consistem em transformar o dado para o domínio original (Transformada de Fourier Inversa) e remover a correção NMO (GAMBOA, 2003).

¹Do inglês: Common Depth Point.

²Do inglês: Common Mid Point.

³Do inglês: *Normal Moveout*, processo que corrige o sobretempo.

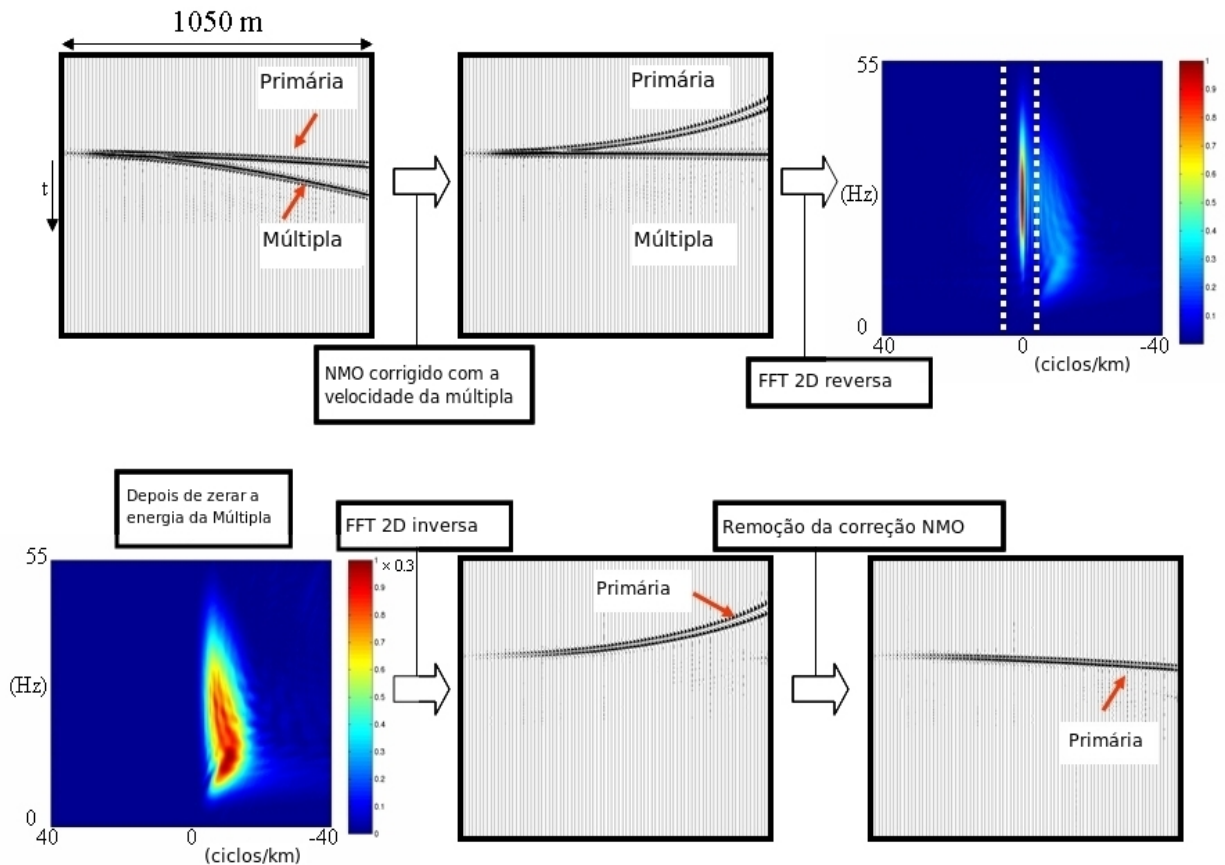


Figura 4.1: Filtro F - K onde se observa que a transformada de domínios concentra eventos com *moveout* diferentes.

Fonte: Dragoset, 2000.

4.1.3 Filtragem Radon

A técnica é normalmente usada modelando as múltiplas e subtraindo-as dos dados sísmicos. O filtro Radon transforma os dados ao domínio tempo-moveout, onde podemos zerar a energia das primárias. A energia restante das múltiplas, pode então ser subtraída dos dados. A transformada de Radon distingue as primárias das múltiplas com base na diferença entre os *moveout* que apresentam os dois tipos de reflexões. A transformada é aplicada aos dados na configuração CMP e com correção NMO usando a velocidade das reflexões primárias. O benefício desta técnica é que não requer nenhum conhecimento do mecanismo (interfaces) que gerou a múltipla. Ao contrario dos processos de eliminação de múltiplas $f - k$, atenua múltiplas, igualmente, em todos os afastamentos.

Neste trabalho foi aplicado uma variação da transformada Radon, conhecida como transformada de Radon parabólica. A transformada de Radon mapeia um evento linear no domínio

$t - x$ para um ponto focado no domínio *tempo-parâmetro de raio*, onde as reflexões múltiplas apresentam um comportamento aproximadamente periódico. As variações das transformadas de Radon, como a parabólica e transformada de Radon hiperbólica, idealmente usam eventos mapeados com padrões correspondentes para enfocar pontos no domínio de Radon como nós podemos ver na Fig. 4.2. Os eventos com *moveout* parabólico no domínio $t - x$ são mapeados para um ponto focado no domínio modelo ($\tau - p$ pela transformada de Radon hiperbólica. Na prática, a transformada de Radon não é exatamente reversível. Na maioria das vezes a transformada de Radon inversa é usada para resolver problemas lineares usando a técnica típica dos mínimos-quadrados.

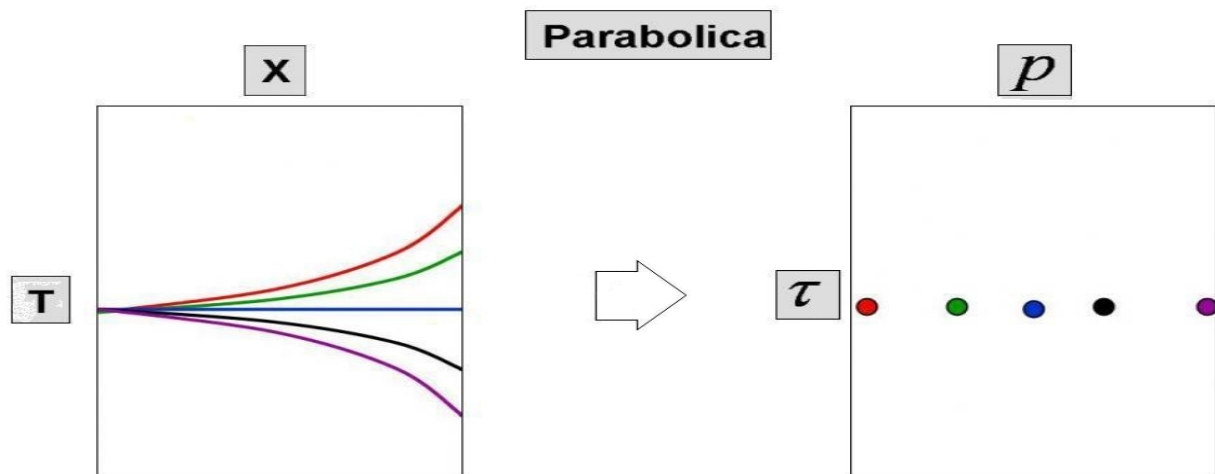


Figura 4.2: O *Filtro Radon* concentra a energia dos eventos parabólicos em regiões diferentes do domínio $\tau - p$, após essa distinção a energia da múltipla é zerada.

Fonte: Dragoset, 2000.

4.1.4 Filtragem $t - x$

Uma outra proposta para a supressão das múltiplas opera-se no domínio $t - x$. A correção NMO aplicada, desta vez usando a função de velocidades dada pelas múltiplas seguida de empilhamento dos dados. Os traços resultantes são chamados de traços modelo para múltiplas, os traços empilhados contêm quase que inteiramente a energia das múltiplas. Esses traços são subtraídos dos correspondentes traços que contêm as primárias e múltiplas, da família corrigida de NMO. Desta forma, os traços resultantes devem conter somente a energia das primárias. O problema principal desta técnica está em construir um traço modelo que contenha somente a energia das múltiplas. Por causa das mudanças da frente de onda e das ligeiras variações de *moveout* entre primárias e múltiplas com afastamento, o traço modelo para múltiplas pode não representar bem as múltiplas de modo igual para cada um dos

afastamentos. Finalmente, porque há relativamente menos diferença entre os *moveout* das primárias e das múltiplas nos afastamentos mais próximos, um silenciamento (mute) interno (ou algum tipo de empilhamento com pesos) pode ajudar a suprimir as múltiplas (GAMBOA, 2003).

4.2 MÉTODOS DE PREDIÇÃO

Os métodos de predição são aqueles que como o nome sugere, predizem o comportamento do campo de onda e a partir deste princípio, podemos também prever o comportamento das múltiplas. Comparando esse método ao exemplo do eco na caverna, poderíamos dizer que nós saberíamos a que momento da conversa cada eco apareceria e assim a comunicação não seria afetada. A partir da predição das múltiplas pode se subtraí-las dos dados, resultando em um dado livre desses ruídos. Como exemplos dos métodos de predição, podemos citar: a Deconvolução preditiva e o SRME.

4.2.1 Deconvolução Preditiva

A deconvolução preditiva é normalmente empregada no processamento de dados sísmicos com o objetivo de comprimir o pulso sísmico ou predizer e “suprimir” reflexões múltiplas. O primeiro objetivo é alcançado utilizando-se o operador de erro de predição unitária que corresponde ao filtro inverso de Wiener-Levinson. Para a predição e atenuação de reflexões múltiplas utiliza-se o filtro preditivo com a distância de predição pouco menor que o período da múltipla que se deseja suprimir. O filtro preditivo de Wiener-Levinson estima eventos periódicos, como múltiplas no sismograma, permitindo assim que a componente estimada seja removida. Esse método trabalha com a periodicidade da múltipla. O resultado depende da escolha certa da distância de predição e do tamanho do operador da deconvolução (YILMAZ, 1987).

4.2.2 SRME

O SRME é um método baseado na periodicidade das múltiplas, onde é feita a predição das múltiplas e posteriormente sua subtração dos dados. Este método será descrito com maiores detalhes no próximo capítulo.

5 O SURFACE-RELATED MULTIPLE ELIMINATION (SRME)

Este método foi inicialmente implementado por Anstey e Newman em 1967. Eles observaram que a convolução de primárias com outros traços geravam reflexões múltiplas relacionadas à superfície livre, e de posse desses dados que continham apenas múltiplas, era feita a subtração desses eventos do dado. Este é o princípio básico do SRME. Berkhout em 1982, transformou eventos primários em múltiplos e através de uma redefinição para o problema das múltiplas para variação lateral em geologias complexas utilizando para isso uma formulação de matriz baseada na teoria do campo de onda. Uma versão adaptativa foi descrita por Verschuur, Berkhout e Wapenaar, 1992.

O conceito de extrapolação do campo de onda foi fundamentado através da Integral de Kirchhoff- Helmholtz, que, a partir de certas considerações, permite obter o comportamento de campos de onda em diferentes pontos de um modelo. A partir da aplicação desta integral, os processos de extrapolações de campos de onda possibilitam reconstruir as reflexões múltiplas relacionadas à primeira camada (FERREIRA, 2009).

As extrapolações são realizadas através de convoluções entre os sismogramas registrados na superfície e as funções de Green equivalentes. Conhecendo o campo de onda na superfície, é possível simular o comportamento deste campo em outras profundidades do modelo. Este é o princípio do método de previsão das múltiplas. As reflexões primárias e múltiplas do dado inicial são extrapoladas, isto é, são deslocadas em tempo as suas posições. Neste processo, as primárias transformam-se em múltiplas da superfície livre de primeira ordem, pois as extrapolações adicionam uma viagem a mais para estas ondas na primeira camada (VERSCHUUR, BERKHOUT e WAPENAAR, 1992).

O SRME assume que o campo de onda para a reflexão primária de superfície livre possui um *moveout* equivalente a uma viagem de ida e volta do campo de onda na camada d'água, acima desta trajetória, o campo de onda estaria relacionado a reflexões com fontes ou receptores fantasmas (*gosht*) ou a múltiplas de ordens mais altas.

Este método apresenta melhor eficiência em relação aos outros métodos quando aplicados em situações onde múltiplas e primárias apresentam pequenas velocidades ou onde é difícil a separação entre elas, quando essas velocidades se encontrarem próximas. Este método

também apresenta melhor desempenho que outros quando aplicado a meios geológicos complexos. Em situações onde temos forte refletores abaixo da interface terra/água, ou onde os alvos se encontram com o tempo acima de 2s (profundos), este método pode ser melhor aplicado.

Como já vimos anteriormente, os registros nos sensores (geofones e hidrofones) são convoluções de ondas que saem da fonte, interagem com a subsuperfície e são captadas nos sensores. Idealmente a trajetória destas ondas seria uma viagem até a subsuperfície, uma interação com cada superfície refletiva (reflexões primárias) e em seguida retornando à superfície, sendo diretamente captadas nos receptores. Porém, isto não acontece e o que fica registrado deve ser deconvolvido com a assinatura da fonte, para desta forma, poder-mos obter a resposta da subsuperfície. O conjunto de equações que descrevem todo o processo foi proposto por Verschuur, Berkhout e Wapenaar, 1992.

Adotaremos uma notação matriz para apresentar a descrição matemática do método, onde as matrizes serão indicada pelas letras maiúsculas em negrito. Neste método os tiros registrado são transformados para o domínio da frequência.

Para um meio acústico sem múltiplas de superfície livre, temos que:

$$\mathbf{P}_0^-(z_0) = \mathbf{X}_0(z_0)\mathbf{S}^+(z_0). \quad (5.1)$$

é a equação que descreve um campo de pressão medido nos receptores. Sendo que, $\mathbf{P}_0^-(z_0)$ a matriz campo de pressão; $\mathbf{X}_0(z_0)$ a matriz resposta da subsuperfície; \mathbf{S}^+ a assinatura da fonte; a referência z_0 indica que que o dado é em função da profundidade.

Considerando que, $\mathbf{X}_0(z_0)$ contém tanto ondas *Ascendentes*¹ quanto ondas *Descendentes*², e considerando também o fato de que as ondas ascendentes refletem na superfície livre e transformam-se em ondas descendente, o total do campo de onda descendente não consiste apenas nas ondas provenientes da fonte \mathbf{S}^+ , como também destas ondas transformadas pela superfície livre, o que modifica a Eq. 5.1 para:

$$\mathbf{P}^-(z_0) = \mathbf{X}_0(z_0) \left[\mathbf{S}^+ + \mathbf{R}^-(z_0)\mathbf{P}^-(z_0) \right]. \quad (5.2)$$

Sendo $\mathbf{P}^-(z_0)$ definido como o total do campo de ondas ascendentes na superfície z_0 , e $\mathbf{R}^-(z_0)$ sendo a matriz refletividade da superfície livre, Note que a Eq. 5.2 é a equação para múltiplas

¹Ondas *Upgoing*, indicadas pelo simbolo negativo (-).

²Ondas *Downgoing*, indicadas pelo simbolo positivo (+).

implícitas. A expressão explícita para o total de ondas ascendentes do campo de onda na superfície inclusive múltiplas de superfície livre pode ser derivada da Eq. 5.2.

$$\mathbf{P}^-(z_0) = \mathbf{X}_0(z_0)\mathbf{S}^+[\mathbf{I} - \mathbf{X}_0(z_0)\mathbf{R}^-(z_0)]^{-1}. \quad (5.3)$$

Pela definição $\mathbf{X}(z_0)$ é a resposta da subsuperfície incluindo reflexões múltiplas relacionadas à superfície livre e \mathbf{I} é a matriz identidade, sendo então:

$$\mathbf{P}^-_0(z_0) = \mathbf{X}(z_0)\mathbf{S}^+. \quad (5.4)$$

com

$$\mathbf{X}(z_0) = \mathbf{X}_0(z_0)[\mathbf{I} - \mathbf{X}_0(z_0)\mathbf{R}^-(z_0)]^{-1}. \quad (5.5)$$

A matriz inversa na Eq. 5.3 pode ser expandida em uma série, o que resulta em:

$$\mathbf{P}^-(z_0) = \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} [\mathbf{X}_0(z_0)\mathbf{R}^-(z_0)]^n \right\} \mathbf{X}_0(z_0)\mathbf{S}^+. \quad (5.6)$$

Comparando a Eq. 5.6 com Eq. 5.1, verificamos que os termos extras na Eq. 5.6 estão relacionados a todas múltiplas de superfície livre. Para a pressão acústica na superfície livre (caso marinho), a refletividade matriz $\mathbf{R}^-(z_0)$ é simplificada para:

$$\mathbf{R}^-(z_0) = r_0\mathbf{I}. \quad (5.7)$$

em que idealmente $r_0 = -1$ é o valor próximo coeficiente de reflexão da interface água/ar. Tomando a matriz de reflexão como uma matriz unitária, se exige que fonte e receptor estejam localizados em um gride equidistante.

Utilizando a Eq. 5.7, a Eq. 5.3 é simplificada para:

$$\mathbf{P}^-(z_0) = \mathbf{X}_0(z_0)\mathbf{S}^+[\mathbf{I} - r_0\mathbf{X}_0(z_0)]^{-1} \quad (5.8)$$

ou, pela expansão inversa de termos dentro de uma série:

$$\mathbf{P}^-(z_0) = \mathbf{X}_0(z_0)\mathbf{S}^+[\mathbf{I} - r_0\mathbf{X}_0(z_0) + r_0^2\mathbf{X}_0^2(z_0) + \dots]^{-1} \quad (5.9)$$

Para a eliminação de múltiplas de superfície livre com $\mathbf{P}^-(z_0)$, a Eq. 5.2 deve ser invertida para gerar uma expressão explícita para $\mathbf{X}_0(z_0)$:

$$\mathbf{X}_0(z_0) = \mathbf{P}^-(z_0) \left[\mathbf{S}^+ + \mathbf{R}^-_0(z_0) \mathbf{P}^-(z_0) \right]^{-1}, \quad (5.10)$$

ou pelo uso da Eq. 5.4:

$$\mathbf{X}_0(z_0) = \mathbf{X}(z_0) \left[\mathbf{I} + \mathbf{R}^-_0(z_0) \mathbf{X}(z_0) \right]^{-1}. \quad (5.11)$$

A inversão direta do lado direito da matriz na Eq. 5.11, resulta em instabilidade se fortes múltiplas estão presentes. Para entender isso, a matriz inversa na Eq. 5.11 pode ser escrita como uma expansão em série.

$$\mathbf{X}_0(z_0) = \mathbf{X}(z_0) \left[\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ -\mathbf{R}^-_0(z_0) \mathbf{X}(z_0) \right\}^n \right], \quad (5.12)$$

ou,

$$\mathbf{X}_0(z_0) = \mathbf{X}(z_0) \left[\mathbf{I} - \left\{ \mathbf{R}^-_0(z_0) \mathbf{X}(z_0) \right\} + \left\{ \mathbf{R}^-_0(z_0) \mathbf{X}(z_0) \right\}^2 - \left\{ \mathbf{R}^-_0(z_0) \mathbf{X}(z_0) \right\}^3 + \dots \right]. \quad (5.13)$$

Tomando apenas um número limitado de termos em conta na Equação 5.13, estabiliza-se a inversão. O número de termos que deve se levar em conta depende da ordem das reflexões múltiplas relacionada à superfície, porque cada termo adicional tomado em conta na equação resulta em eliminar múltiplas relacionadas à superfície livre de ordem mais alta.

Usando a Eq. 5.7 na Eq. 5.13, tornamos:

$$\mathbf{X}_0(z_0) = \mathbf{X}(z_0) - r_0 \mathbf{X}(z_0)^2 + r_0^2 \mathbf{X}(z_0)^3 - r_0^3 \mathbf{X}(z_0)^4 + \dots \quad (5.14)$$

Nas equações 5.13 e 5.14 não modelamos a subsuperfície. Apenas os dados sísmicos para a fonte do campo de onda, isto é, determinamos $\mathbf{X}(z_0)$, a propriedade de refletividade da superfície livres e o escalar r_0 . São determinados os dados que contêm toda informação necessária sobre a subsuperfície para prever as múltiplas.

Substituindo as Eq. 5.1 e 5.4 na Eq. 5.14, temos:

$$\mathbf{P}_0^-(z_0) = \mathbf{P}^-(z_0) - r_0 [\mathbf{P}^-(z_0) \mathbf{S}^+(z_0)^{-1}] \mathbf{P}^-(z_0) + r_0^2 [\mathbf{P}^-(z_0) \mathbf{S}^+(z_0)^{-1}]^2 \mathbf{P}^-(z_0) - r_0^3 [\mathbf{P}^-(z_0) \mathbf{S}^+(z_0)^{-1}]^3 \mathbf{P}^-(z_0) + \dots \quad (5.15)$$

Assume-se para o momento que a fonte do campo de onda pode ser escrito como:

$$\mathbf{S}^+(z_0) = S(\omega) \mathbf{I} \quad (5.16)$$

com $S(\omega)$ sendo a frequência dependente da assinatura da fonte. Isso significa que a suposição é feita para um ângulo que depende da deconvolução para a fonte, e que as fontes residuais consistem de idênticos pontos fontes cada uma com assinatura $S(\omega)$. Note que uma fonte diagonal da matriz é definida na Equação 5.16, o que implica na pressão de fonte dipolar.

Utilizando as Eq. 5.15 e 5.16,

$$\mathbf{P}_0^-(z_0) = \mathbf{P}^-(z_0) - A(\omega) [\mathbf{P}^-(z_0)]^2 + A(\omega)^2 [\mathbf{P}^-(z_0)]^3 - A(\omega)^3 [\mathbf{P}^-(z_0)]^4 + \dots \quad (5.17)$$

onde,

$$A(\omega) = \frac{r_0}{S(\omega)} \quad (5.18)$$

Utilizamos a Eq. 5.17 para eliminação de múltiplas de simples componente³. Note que na referida equação, o primeiro termo $\mathbf{P}^-(z_0)$ não é afetado por $A(\omega)$. Isto significa que as primárias são preservadas durante o procedimento de otimização. Depois de otimizada a função $A(\omega)$ é estimada, e pode ser usada para a deconvolver os dados primários.

Na Eq. 5.17, cada termo depois do primeiro termo $\mathbf{P}^-(z_0)$ é relativo a uma reflexão múltipla de superfície livre, onde o 2º termo da equação corresponde a uma reflexão múltipla de 1ª ordem, o 3º termo da equação corresponde a uma múltiplas de 2ª ordem, e assim sucessivamente.

³Para o caso marinho onde a única onda captada é a onda P .

6 O PROCESSAMENTO

O processamento da linha 214-2660 da bacia do Jequitinhonha foi inteiramente realizada no Pacote de Processamento ProMAX, que consiste em um programa que possui um conjunto de ferramentas de fácil manipulação, o que permite realizar o processamento sísmico de forma rápida e prática. A principal vantagem de se utilizar este pacote é a diminuição do tempo para se processar um dado sísmico, se o compararmos ao *SU*.¹

O Pacote de Processamento ProMAX apresenta o método SRME como um sub-pacote de ferramentas fechado onde apresentamos os parâmetros para entrada de dados, esses dados são carregados de acordo com nosso objetivo e posteriormente, obtemos um dado de saída de acordo com o que foi programado. As ferramentas que o sub-pacote de processamento SRME apresenta dentro do pacote ProMAX chama-se, Surface-Related Wave Equation Multiple Rejection (MASWEMR)² e apresenta embasamento teórico relativo aos trabalhos desenvolvidos e publicados por Verschuur; Berkhout; Wapenaar(1992) e Landa(2004).

Para os trabalhos realizados no ProMAX, o primeiro passo do processamento foi a obtenção da seção de Afastamento-Comum de 150m Fig. 6.1, onde observamos que os dados apresentam comportamento distinto em duas regiões da seção sísmica. Na parte rasa da seção, no intervalo que varia do CDP 01 ao CDP 1281, a pequena profundidade da lâmina d'água fez com que um grande número de informações fossem captadas nos receptores nesse intervalo de espaço, onde as informações de primárias e múltiplas se sobrepõem, criando uma região onde é difícil a distinção sinal/ruído. Nos demais CDP's, verificamos que pode ser realizada uma distinção sinal/ruído, com base principalmente na propriedade de periodicidade das múltiplas de superfície livre e de algumas múltiplas internas. Um fato importante que deve ser ressaltado, é que todas as seções sísmicas mostradas neste trabalho apresentam *controle de ganho automático (AGC)*³.

Após a análise da seção de afastamento mínimo, as principais reflexões múltiplas foram identificadas, e em seguida, foram distintas de acordo com a origem em: múltiplas de superfície livre e múltiplas internas, como podemos observar na Fig. 6.2. Para diferenciar as reflexões primárias de múltiplas e múltiplas internas de múltiplas de superfície livre o

¹Seismic Unix, pacote de processamento sísmico.

²Nome dado pela Landmark para nomear a ferramenta no ProMAX.

³Do Inglês, que significa: *Automatic Gain Control*.

principal fator é o tempo em que elas ocorram. Além do tempo, a geometria com que estas reflexões se apresentam também é um fator que permite associar as reflexões e classificá-las.

O tempo para que a múltipla de superfície livre apareça no dado, deve ser próximo ao tempo duplo para uma viagem de ida e volta da onda pela camada de água. Quando uma reflexão aparece próximo a esse tempo, com geometria idêntica à geometria da interface terra/água, é muito provável que esta reflexão seja uma múltipla de superfície livre. A letra "A" na Fig. 6.2 mostra uma múltipla de superfície livre. Quando a interface terra/água apresenta declive, a múltipla apresentará uma inclinação mais acentuada que a interface livre. O resultado desta análise é identificar as reflexões múltiplas de superfície livre, que são os alvos deste trabalho.

No caso de múltiplas internas, esse tempo deve ser maior que o tempo das primeiras reflexões, pois as múltiplas internas são geradas destas reflexões. As múltiplas internas podem ser identificadas na região profunda da seção a partir do tempo de 5500 ms Fig.6.2, identificadas pelas letras "B", apresentando uma geometria parecida com os refletores em subsuperfície.

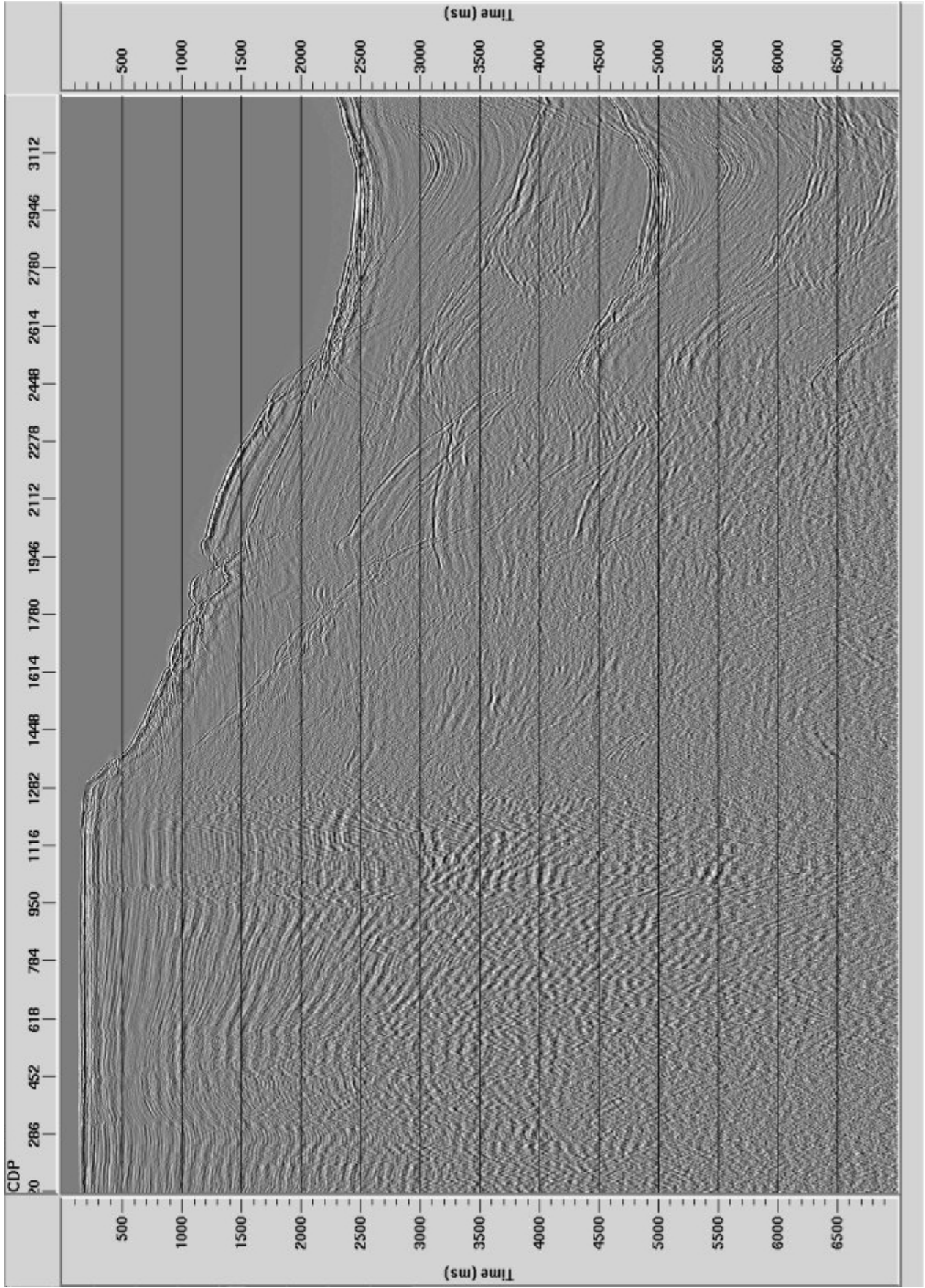


Figura 6.1: Dados mostrados em seção afastamento mínimo de 150m, observe o padrão dos dados antes e depois do CDP-1282, observe que as múltiplas são distintas apenas na parte profunda da seção

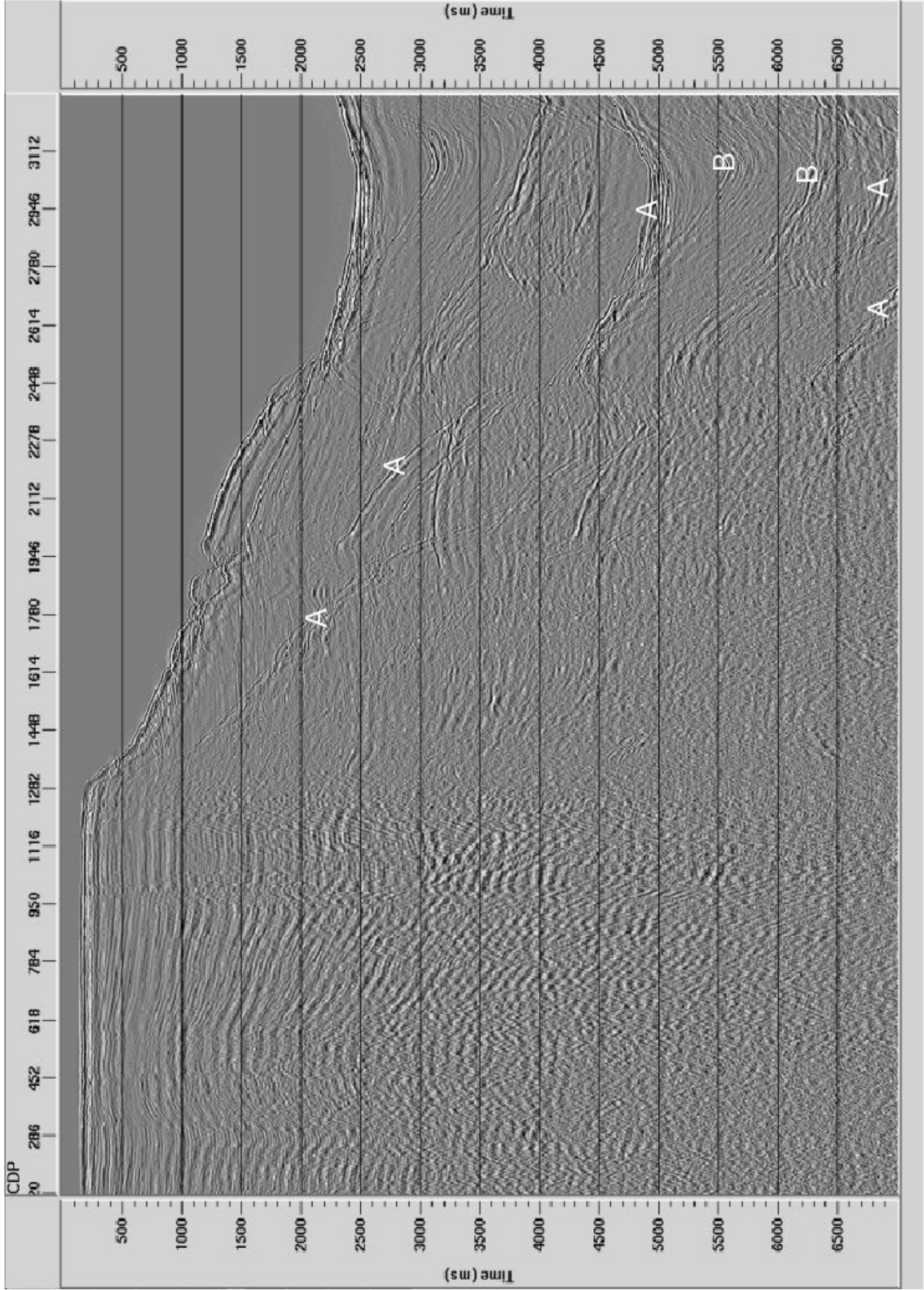


Figura 6.2: Visualização das múltiplas de superfície livre indicadas pela letra "A" e múltiplas internas indicadas pelas letras "B" na seção de afastamento mínimo de 150m.

Após a identificação dos alvos deste trabalho, iniciou-se a etapa de tratamento dos dados. Na etapa do pré processamento, a geometria foi carregada ao dado, em seguida foi realizada a etapa de edição de traços, onde muito ruído aleatório foi eliminado. Essa etapa consistiu no silenciamento de traços ruidosos e aplicação de um filtro de banda passante para retirada dos ruídos de alta e baixa frequência⁴.

Aos dados resultantes desta etapa foram aplicados três diferentes fluxos de processamento: o fluxo de processamento sísmico convencional, fluxo de processamento para aplicação do SRME e o fluxo de processamento na qual foi aplicado o SRME em conjunto com o filtro Radon. O fluxograma na Fig. 6.3 mostra três caminhos distintos seguidos para a realização do trabalho.

Primeiramente foi realizado o fluxo de processamento convencional. As setas pretas na Fig. 6.3 indicam cada etapa realizada para este fluxo. Cada etapa foi realizada separadamente e corresponde a um arquivo separado.

Temos também as reflexões fantasma atuando nos dados, ou ambos juntos. Porém, considerando que na maioria dos casos a profundidade da fonte é muito menor que a profundidade dos alvos geológicos e o efeito diferencial da divergência esférica entre o pulso primário e a reflexão fantasma, esse efeito pôde ser desprezado. Em seguida, foram aplicados filtros de banda passante de frequência e filtro $f - k$ para a remoção de ruídos e melhora das imagens.

Após a passagem dos filtros foi realizada a etapa da análise de velocidade, onde foram feitos os *Picking*⁵ de velocidades RMS. O modelo de velocidades utilizado pode ser visualizado na Fig. 6.4. Os passos seguintes foram: deconvolução impulsiva, empilhamento e por fim, foi utilizada migração Kirchoff os resultados foram comparados com outros dois fluxos.

⁴As frequências de corte utilizadas foram 5-10-40-60Hz.

⁵Palavra de origem inglesa amplamente difundida no meio sísmico, significando colheita.

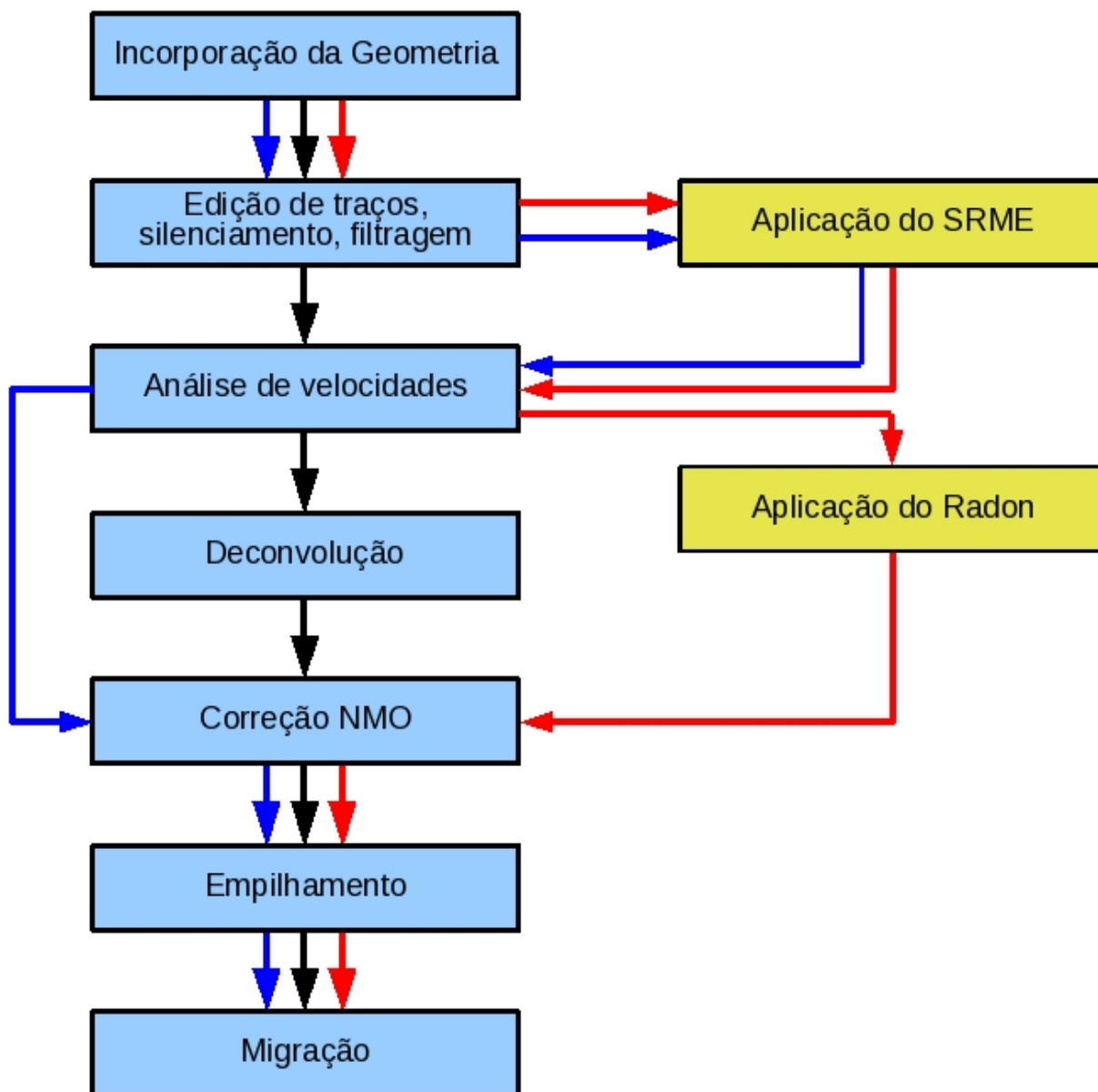


Figura 6.3: Fluxograma de processamento sísmico adotado. As setas pretas mostram as etapas de um fluxo convencional de processamento sísmico. Enquanto que as setas azuis mostram o fluxo utilizado para remoção de múltiplas com o SRME. As setas vermelhas mostram as etapas seguidas para a aplicação conjunta do SRME seguido do Radon.

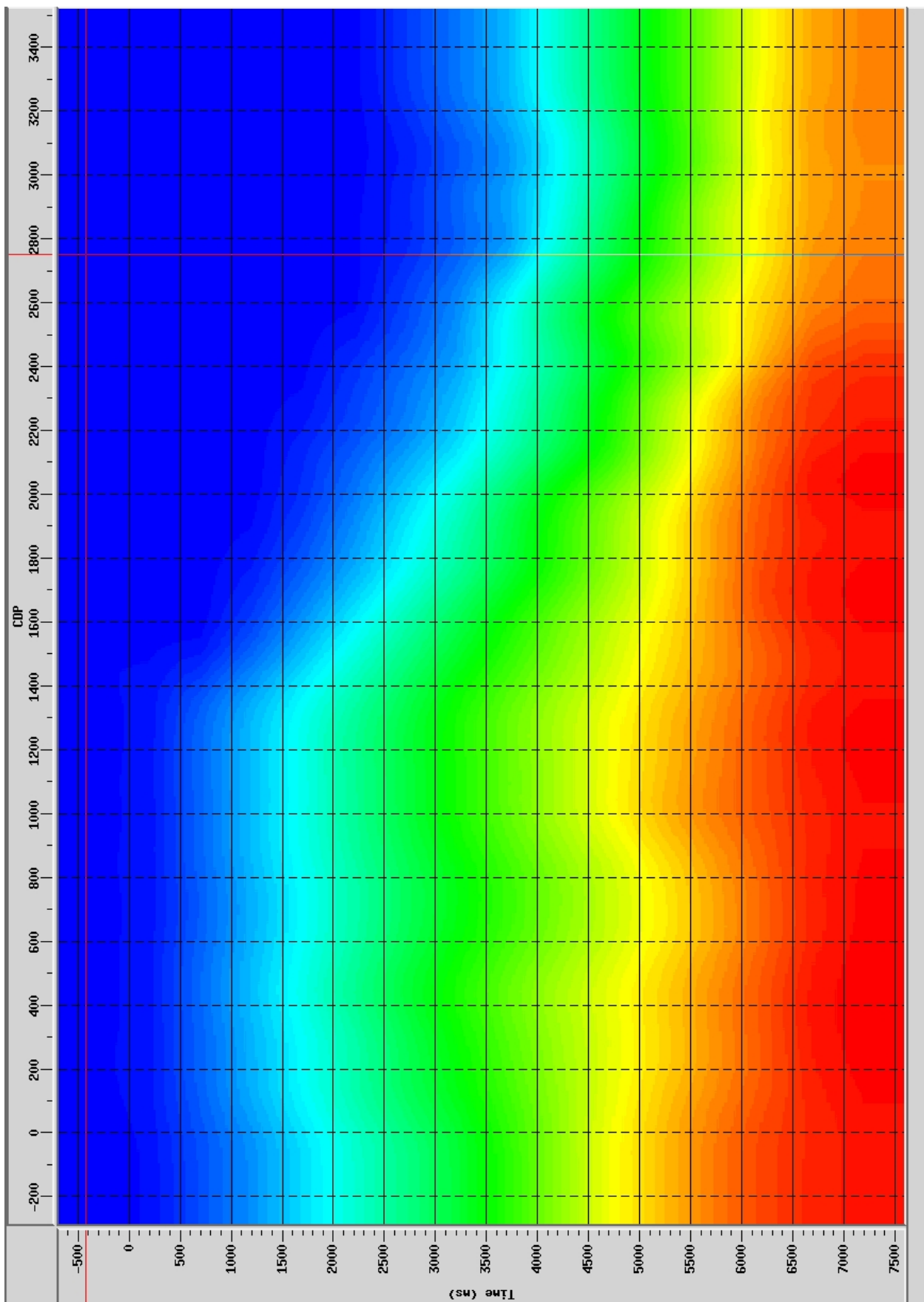


Figura 6.4: Modelo de velocidades RMS após *picking* e suavização.

Em seguida, foi aplicado ao dado o método do SRME para a remoção de múltiplas, o fluxograma seguido para a realização desta tarefa pode ser observado na Fig. 6.3 pelo caminho indicado pelas setas azuis. Em seguida, aos dados com as múltiplas são realizadas as etapas de análise de velocidade, correção NMO, empilhamento e migração.

Por último, foi aplicado o SRME seguido do filtro Radon. O fluxograma seguido para esta aplicação pode ser visualizado na Fig. 6.3, com as etapas sendo indicadas pelas setas vermelhas. Este fluxo apresenta uma etapa adicional em relação ao fluxo anterior. Após aplicação do SRME e a realização da análise de velocidades, foi aplicada a filtragem Radon. A realização de uma etapa adicional deve-se ao fato de que a aplicação do SRME a dados com pequenos afastamentos não apresentam bons resultados (Verschuur, Berckout e Wapenaar). Em seguida são aplicadas as etapas de correção NMO, empilhamento e migração.

A primeira etapa para a aplicação do SRME é a predição das múltiplas, através do campo de onda. O SRME é uma ferramenta que pode ser usada para prever múltiplas de superfície livre, múltiplas intercamadas ou a combinação de ambas (múltiplas complexas), todas no domínio do tempo. Este processo utiliza seção empilhada e precisa de um *picking* de horizontes como mostra a linha azul na Fig. 6.5. A predição de múltipla é usada para localizar as múltiplas nos dados e checar qualitativamente processos de supressão de múltiplas. Isso também pode ser usado como guia para a análise de velocidades, pois mostra onde não devemos fazer picking de velocidade na seção. A saída será o horizonte calculado mostrado na Seção Fig. 6.5 como uma linha vermelha.

Com a ferramenta SRME, os horizontes de múltiplas de superfície livre são previstos no tempo, ou seja, sabemos quando eles ocorrerão. Nesta ferramenta podemos informar os horizontes de entrada que podem gerar múltiplas. No caso de múltiplas de superfície livre, existe apenas um horizonte de entrada, no caso, o fundo oceânico. Devemos por final informar o tipo de múltipla que vamos prever.

O passo seguinte do SRME é a utilização dos arquivos com as amplitudes dos horizontes na etapa acima descrita, com uma ferramenta chamada **Sequence Attribute Analysis (SSAA)**⁶, esse dado é salvo em uma tabela de amplitude que é guardada para ser utilizada na próxima etapa. A etapa seguinte é o SRME propriamente dito, onde precisamos selecionar alguns parâmetros como: os horizontes calculados na etapa anterior, a tabela de amplitude desses horizontes, a polaridade do pulso, o *picking* da interface terra/água⁷ e a velocidade da onda na água.

⁶Significando em português: *Análise de Sequência de Atributos*.

⁷Também conhecido como *Water Bottom*.

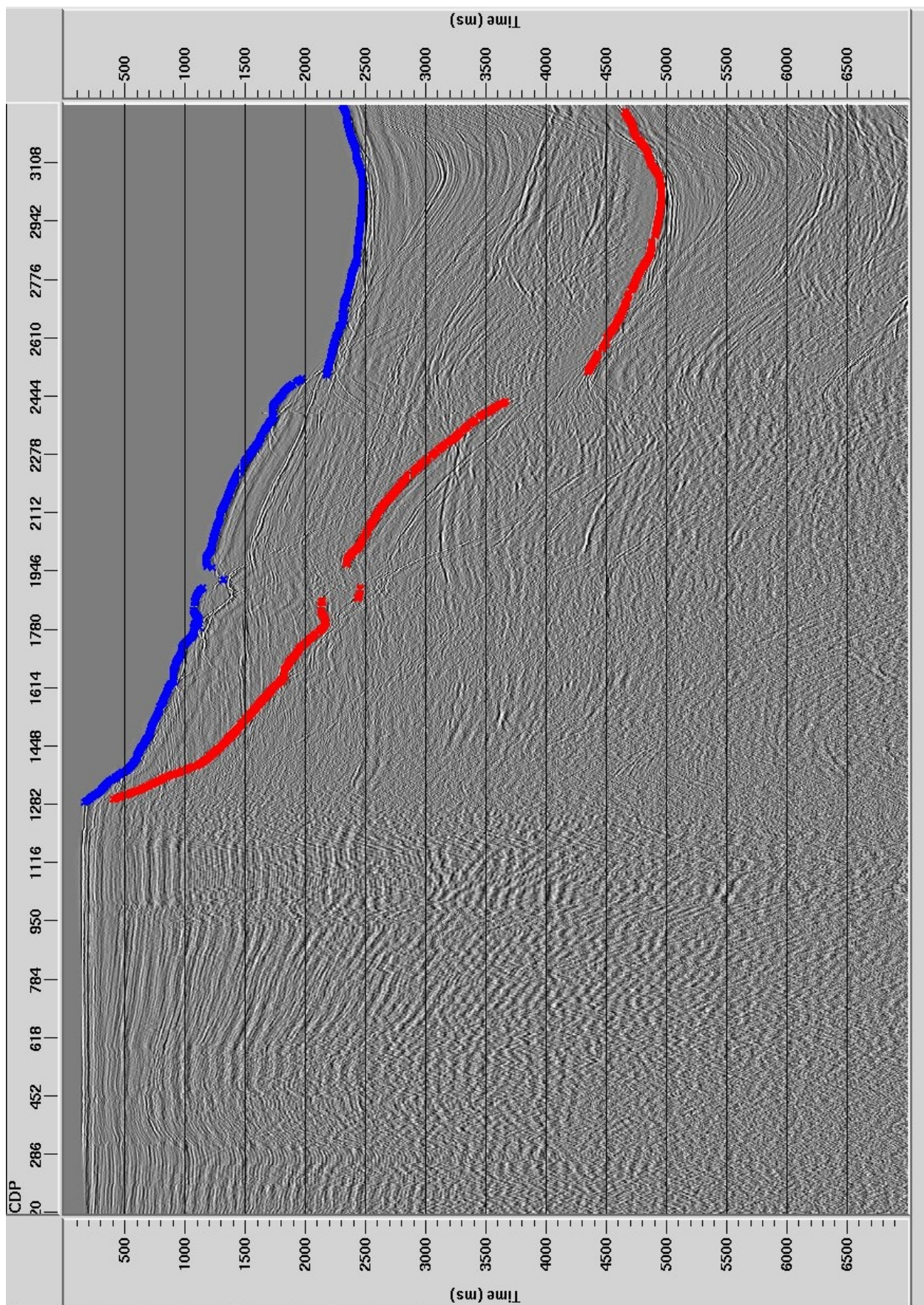


Figura 6.5: A linha em azul mostra os picking feito na interface terra/água, a linha vermelha é resultado do cálculo da múltipla de superfície livre de 1ª ordem.

Após esse passo, a etapa do SRME foi finalizada e seus dados foram salvos em um arquivos para próxima etapa. Não será mostrado neste trabalho todas as imagens obtidas nas etapas do processamento, devido ao grande número de imagens geradas. Antes e depois da aplicação do SRME, foram aplicados ao dados o filtro $f - k$ e o Radon. O filtro $f - k$ não apresentou um resultado satisfatório tanto para atenuar múltipla, quanto para complementar o método do SRME, portanto, seus resultados não foram apresentados neste trabalho.

Com o objetivo de se obter melhores resultados com o SRME, foi realizada a aplicação do Radon parabólico após o SRME, como sugere Verschuur, Berkhout e Wapenaar(1992). Vemos na Fig. 6.8, o resultado da aplicação conjunta dos métodos SRME e Radon, e em seguida, a Fig. 6.7 mostra a seção de afastamento comum de 1050m, apenas para efeito de comparação com os resultados obtidos com as etapas de SRME e Radon. O resultado desta migração pode ser comparado à seção migrada bruta visualizada na Fig. 6.13.

Os Melhores resultados para atenuar múltiplas com o SRME foram obtidos em combinação com a filtragem Radon. Segundo Vershuur, Berkhout e Wapenaar(1992), o filtro Radon depois do SRME pode ser uma combinação muito poderosa para atenuação de múltiplas. Este método apresenta segundo esse autor, melhor desempenho em regiões com lâmina d'água mais espessa e em regiões onde a geologia é bastante complexa. Esse fato pode se comprovado pela observação da seção sísmica Fig. 6.14, onde podemos verificar de fato uma atenuação da múltipla de superfície livre na região profunda das seções sísmicas, mais precisamente no tempo entre 4500 e 5000 ms, entre os CDP's 2801 e 3151, enquanto que, na região rasa não observamos mudanças tão significativas.

As Seções sísmicas apresentadas a seguir não estão na ordem em que ocorrem os fluxos de processamento, de modo a facilitar a visualização e comparação entre as imagens das seções com os métodos aplicados e a imagem da seção obtida com o processamento convencional. As três primeiras seções apresentam a imagem pré-processada. Em seguida, serão mostradas as três seções empilhadas e por último, as seções migradas.

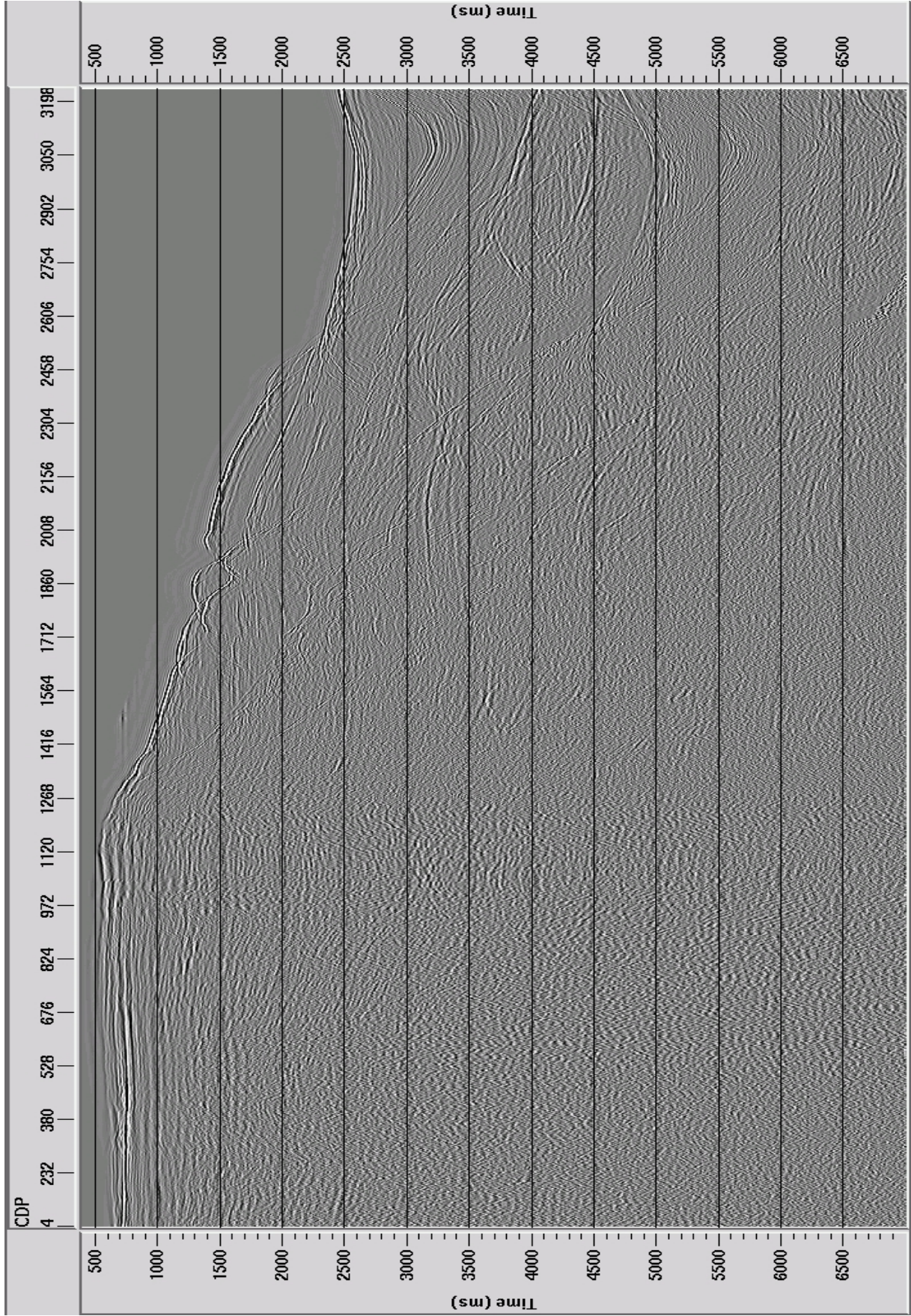


Figura 6.6: Resultado da subtração de múltiplas com SRME em seção de Afastamento-Comum de 1050m.

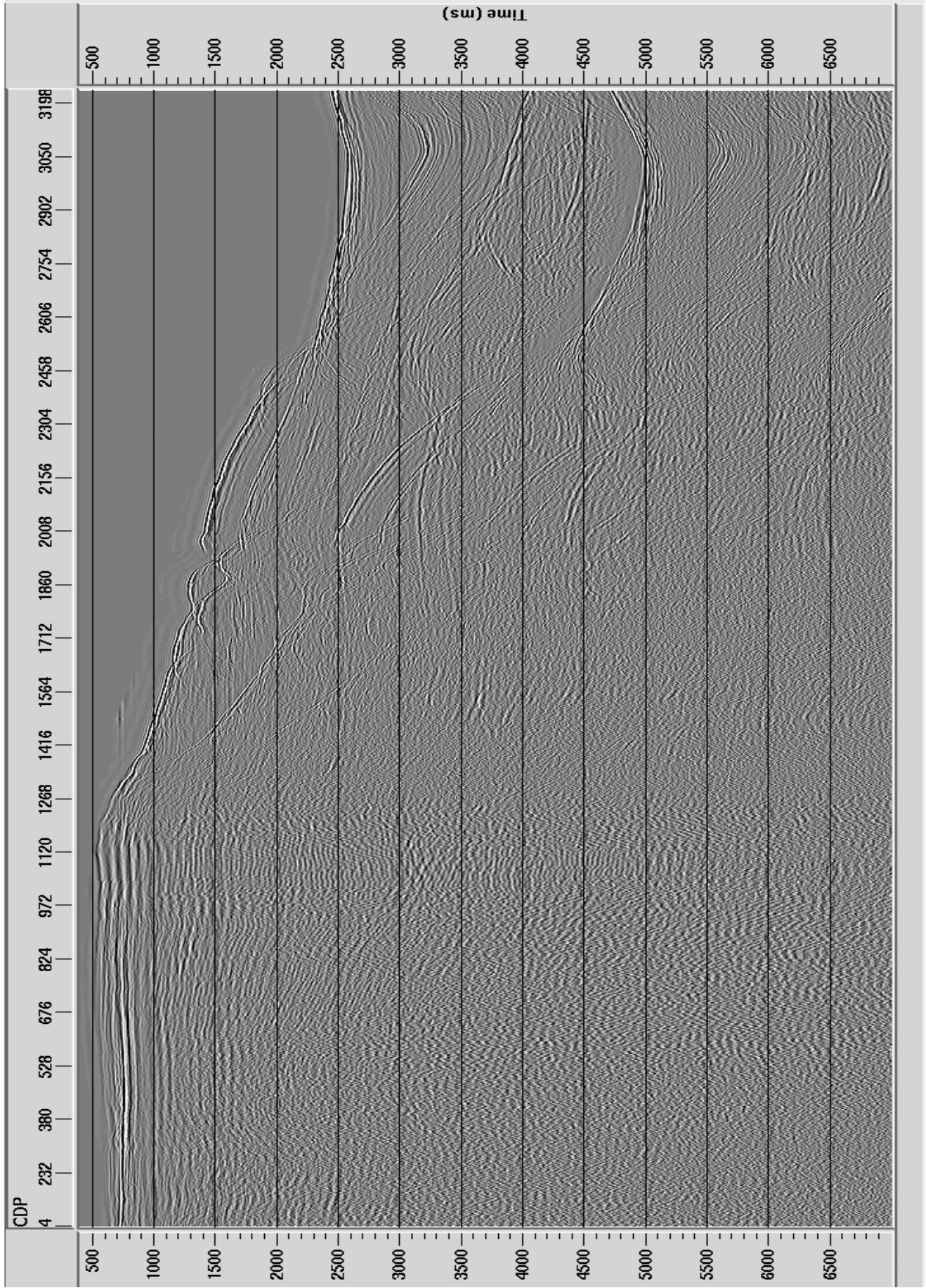


Figura 6.7: Seção bruta organizada em Afastamento-Comum de 1050m.

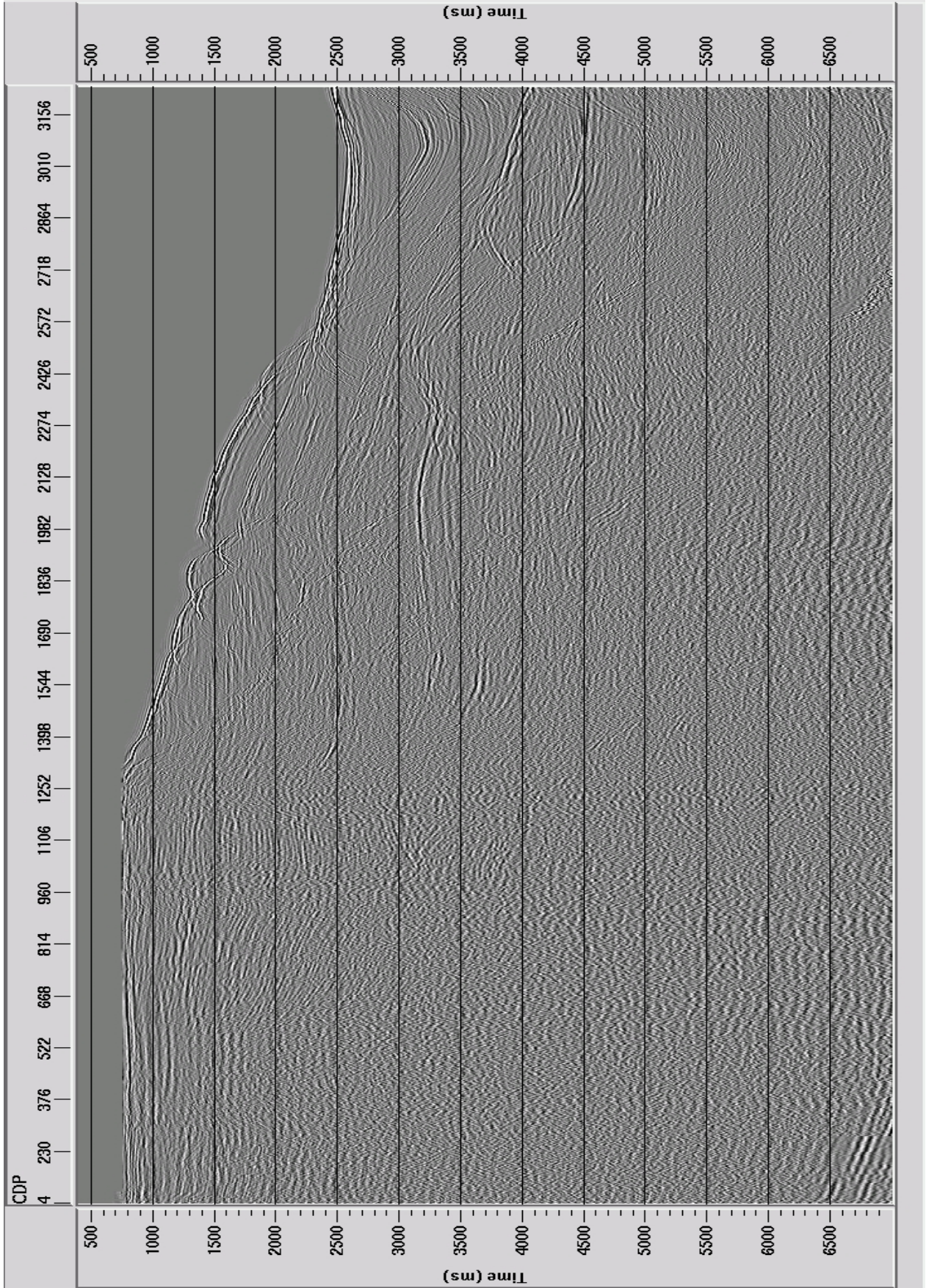


Figura 6.8: Visualização da seção de Afastamento-Comum de 1050m, com o aplicação do SRME seguido do Radon.

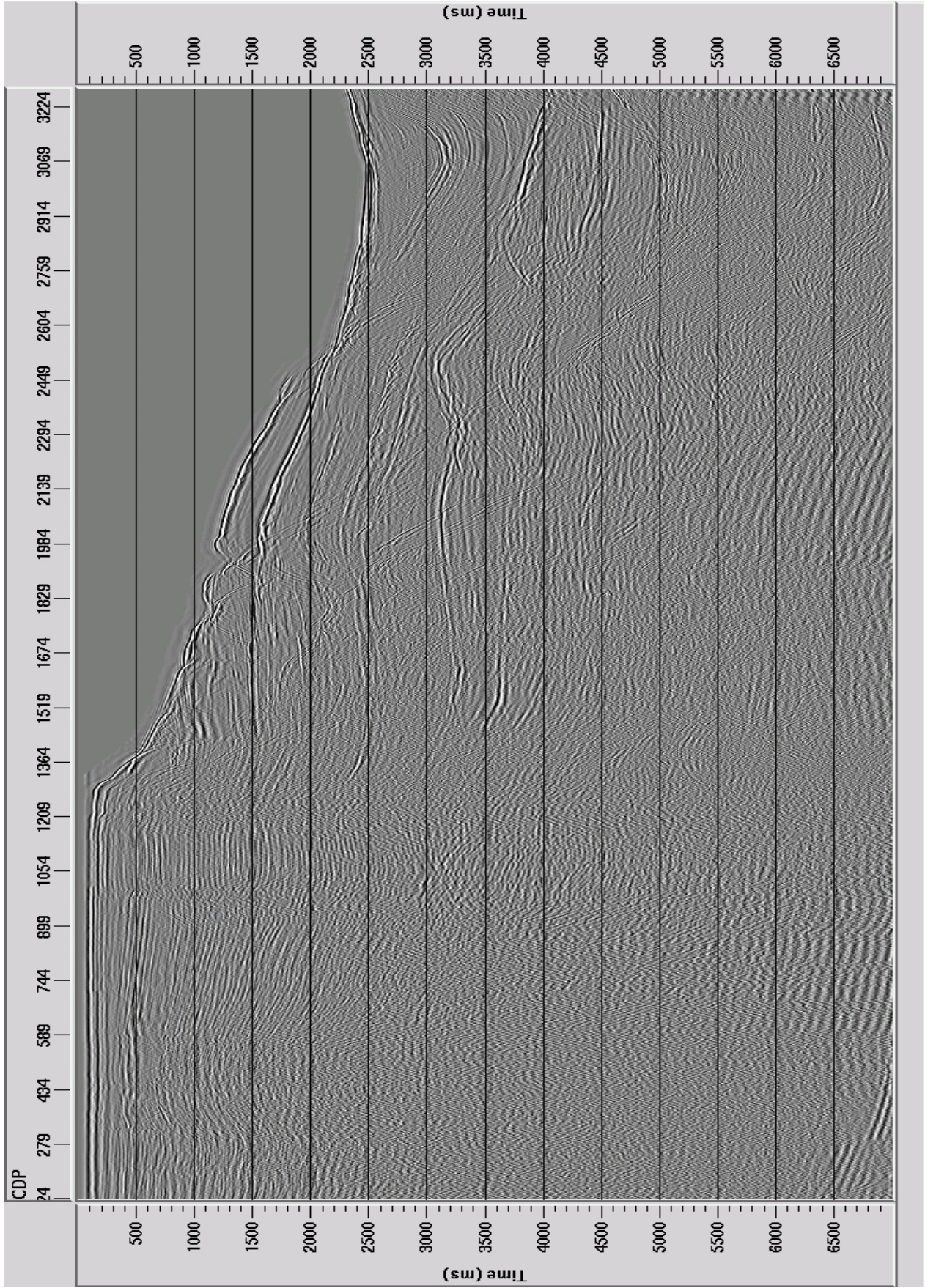


Figura 6.9: Visualização da seção empilhada, com o aplicação do SRME.

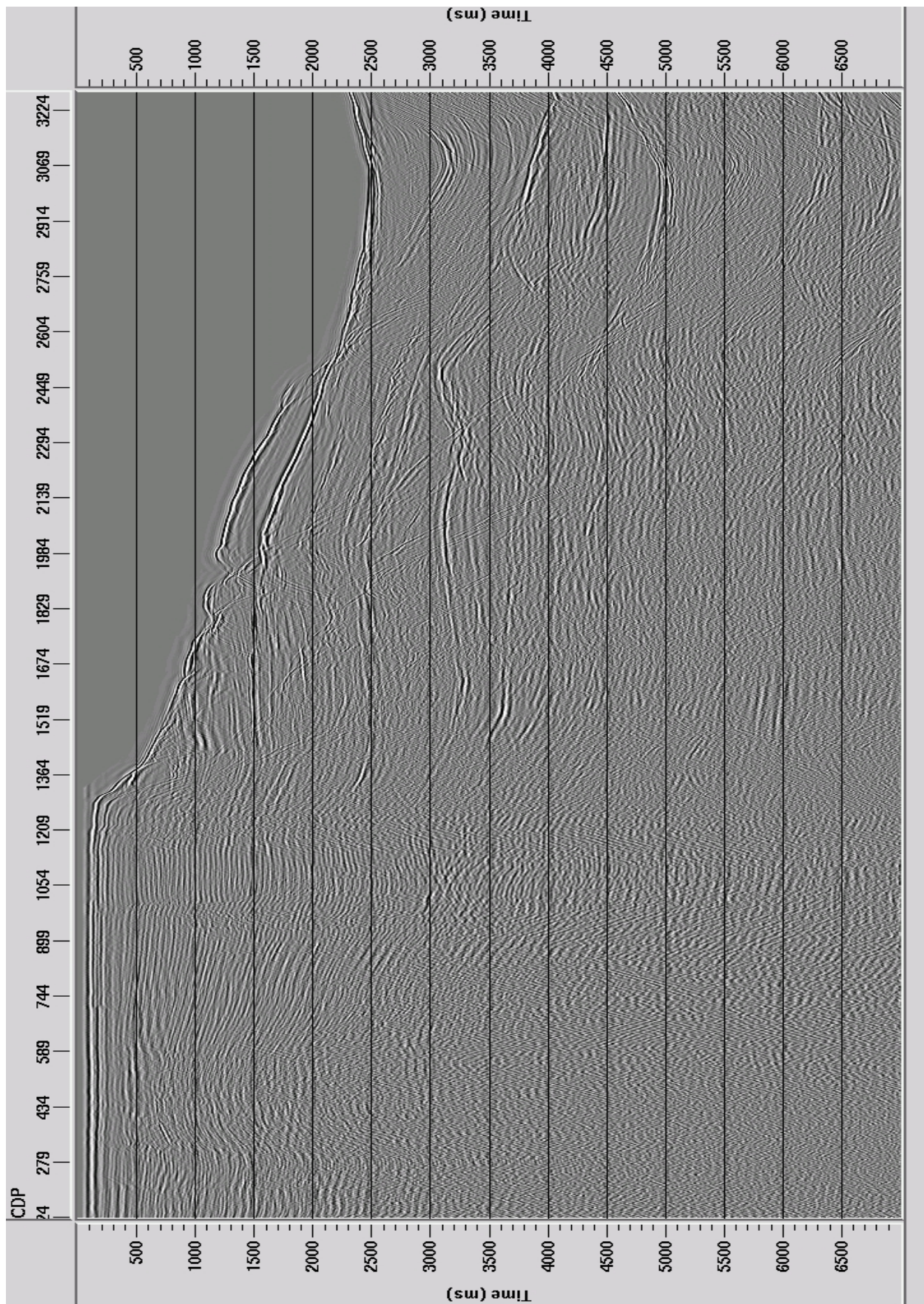


Figura 6.10: Visualização da seção empilhada apenas com fluxo de processamento convencional.

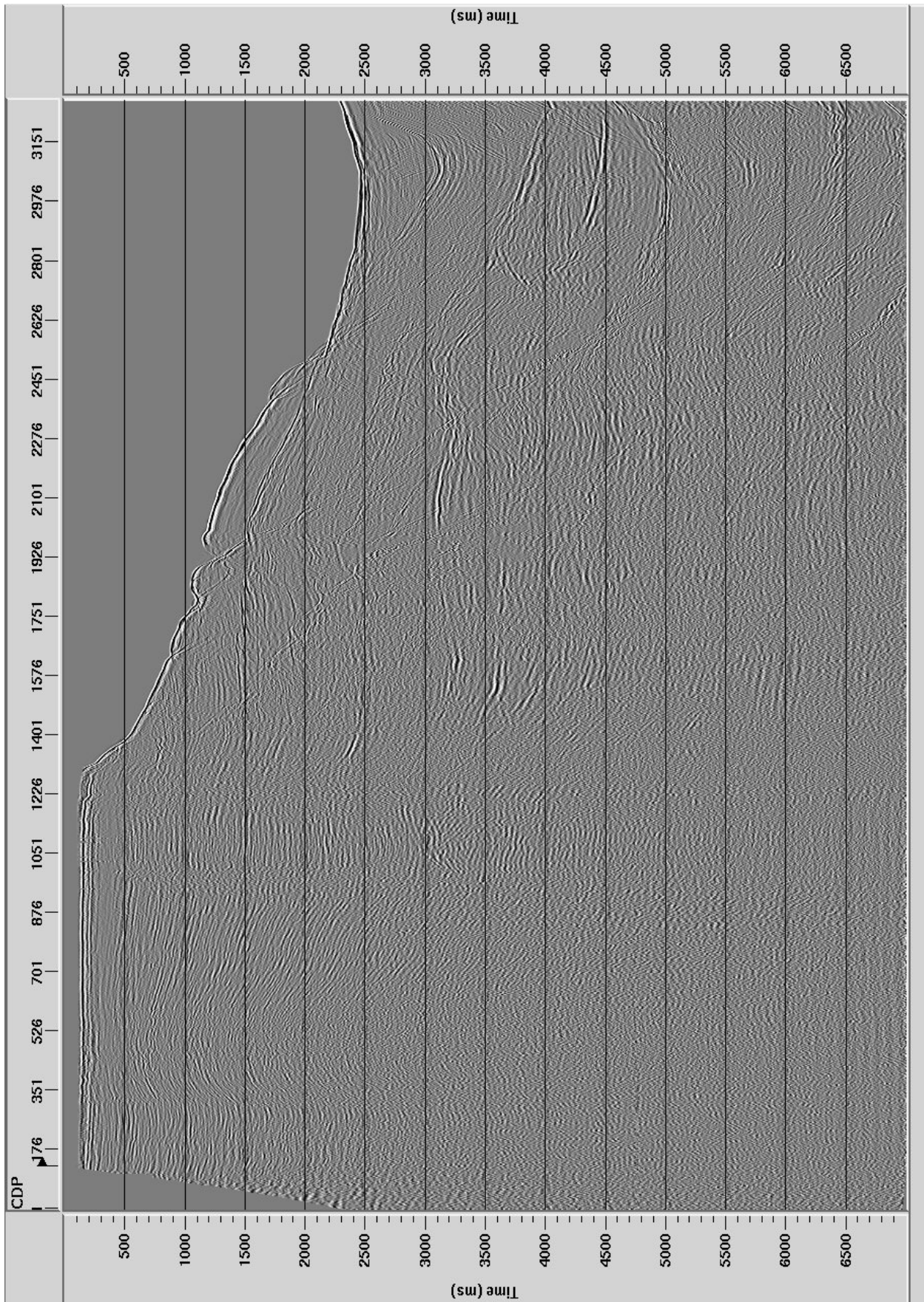


Figura 6.11: Visualização da seção empilhada, com o aplicação do SRME, seguido do filtro Radon.

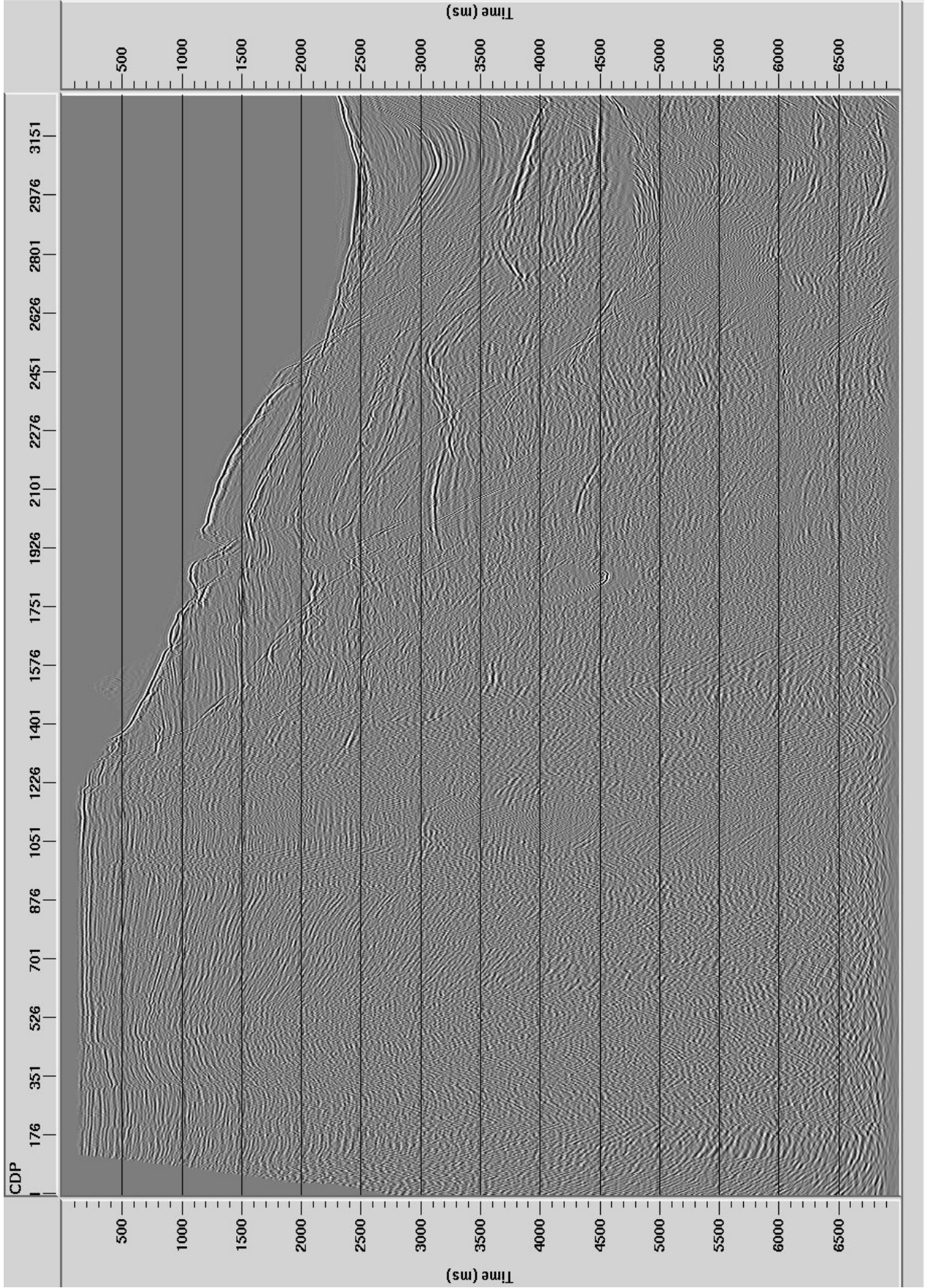


Figura 6.12: Seção mostrando o resultado da migração com a aplicação apenas do SRME.

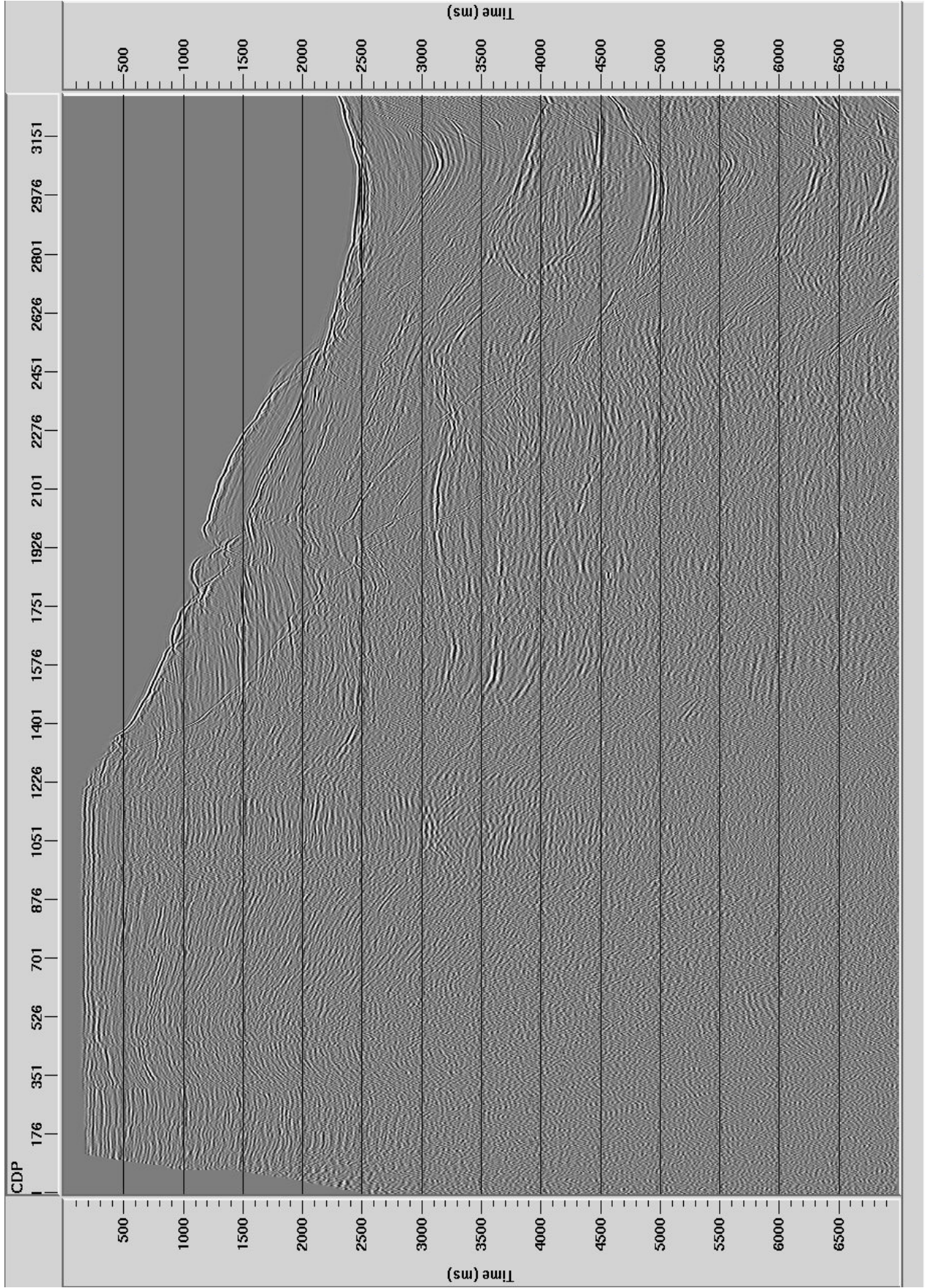


Figura 6.13: Seção mostrando o resultado da migração com fluxo convencional.

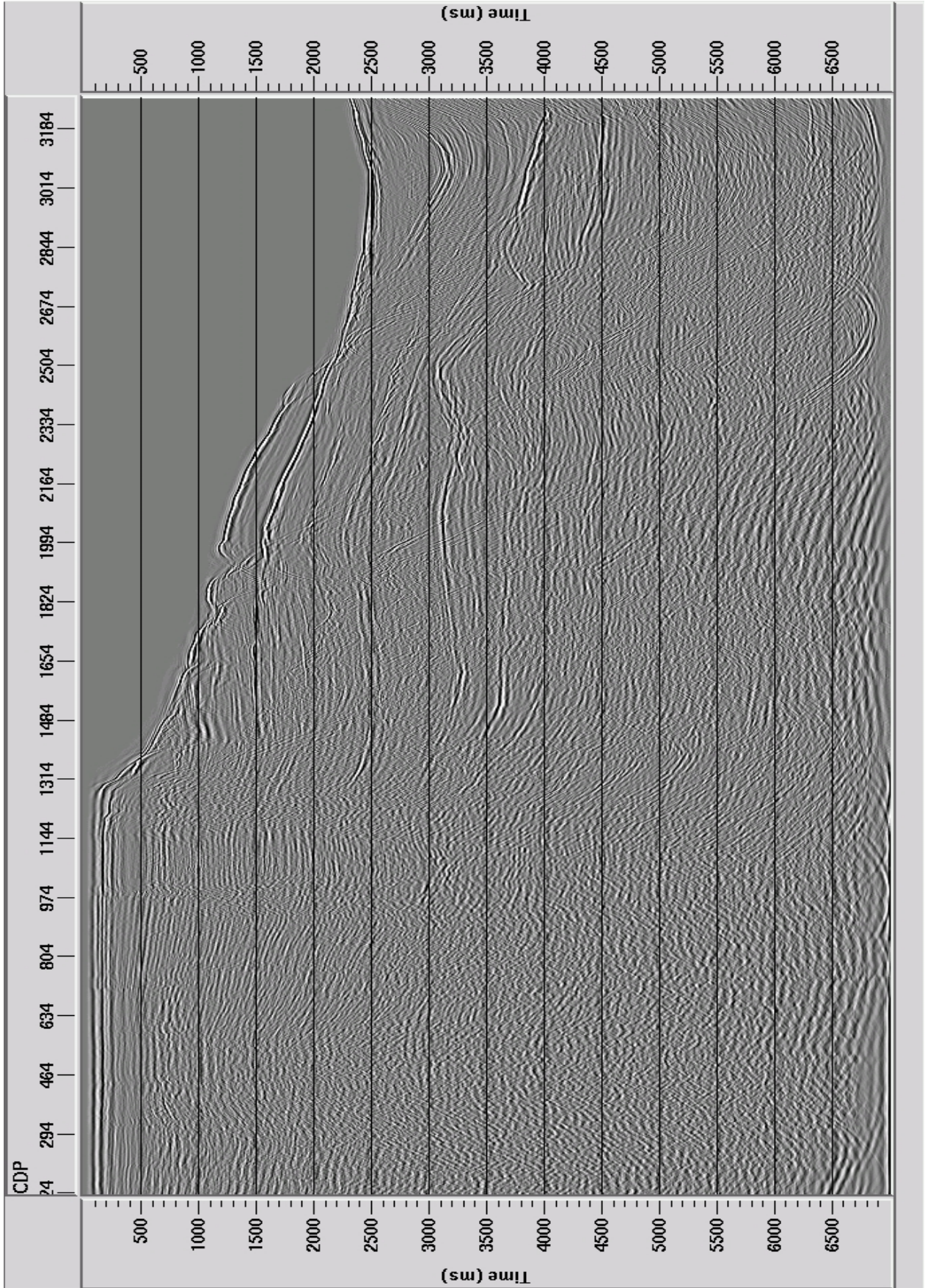


Figura 6.14: Seção mostrando o resultado da migração após a aplicação do SRME seguido do filtro Radon.

Nas Figuras 6.6, 6.7 e 6.8 são apresentados os dados com afastamento comum de 1050m. De acordo com as imagens, podemos observar através da comparação das Fig. 6.6 e 6.7 que houve boa atenuação da múltipla de superfície livre apenas com a utilização do método SRME. Essa diferença é notória principalmente na parte profunda da seção sísmica. Contudo, melhores resultados foram obtidos com a aplicação da filtragem Radon, se compararmos a imagem da Fig.6.7 com a Fig. 6.8.

Em seguida são mostradas nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11 a seção sísmica empilhada de acordo com os fluxos de aplicação apenas do SRME, fluxo convencional e fluxo com SRME com o Radon respectivamente. Assim como na etapa anterior, as imagens mostradas nas seções indicam que o resultado da aplicação do SRME em conjunto com o Radon, apresentou melhor desempenho. O que se observa na comparação das Fig. 6.9, 6.10 e 6.11.

Por fim, são mostrados nas Figuras 6.12, 6.13 e 6.14 as seções sísmicas migradas em tempo de acordo com os fluxos de aplicação apenas do SRME, fluxo convencional e fluxo com SRME com o Radon respectivamente. Podemos observar que a seção migrada Fig. 6.14 obtida com a aplicação conjunta do SRME seguido do Radon apresentou melhor resultado ao final do trabalho.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado uma análise de três diferentes fluxos de processamento aplicado a um dado marinho 2D com objetivo de atenuar múltiplas de superfície livre.

O primeiro fluxo consistiu do processamento convencional. No segundo fluxo, antes da etapa de análise de velocidade, foi aplicado a metodologia de remoção de múltiplas relacionadas a superfície livre (SRME). Esta metodologia apresenta uma grande vantagem de não necessitar de informações de subsuperfície para sua implementação. Por fim, considerando que a metodologia do SRME não apresenta bons resultados para pequenos afastamentos, foi proposto um terceiro fluxo que consistiu na aplicação combinada do SRME seguido da filtragem Radon.

De acordo com os resultados, o terceiro fluxo apresentou melhor desempenho para a atenuação de múltiplas de superfície livre, principalmente na parte profunda da seção sísmica, onde as mesmas são bem visíveis. Já na parte rasa, nenhum dos fluxos se mostrou efetivo para atenuação dessas múltiplas. Uma análise e aplicação de outras metodologias se faz necessária para atenuação de múltiplas nessa região.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, D. E. *Remoção de Reflexões Múltiplas e Efeito Fantasma de Dados sísmicos Marítimos*. 1993. 66 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1993.
- ANP-BD: Banco de dados. Disponível em:
<<http://www.bdep.gov.br/website/maps/viewer.htm>>. Acesso em: 20 set. 2009.
- ANSTEY, N. A.; NEWMAN, P. Part I: The sectional auto-correlogram and Part II: The sectional retro-correlogram. [s.l.]: *Geophys. Prospeção*. v. 14, p. 391-426, 1967.
- BERKHOUT, A. J. *Seismic migration: Imaging of acoustic energy by wavefield extrapolation. A. Theoretical aspects*. 2 ed. [s.l.] Elsevier Science Publ. Co., Inc., p. 211-218, 1982.
- BERKHOUT, A. J.; WAPENAAR, C. P. A. Delphi: Delft philosophy on acoustic and elastic inversion. [s.l.]: *The Leading Edge*, v. 9, n. 2, p. 30-33, 1990.
- DOHERTY, S.; CLAERBOUT, J. *Velocity analysis based on the wave equation*. Stanford Exploration Project Report.[s.l.]: Stanford University, 1974, v. 1.
- DRAGOSET, B. *Introduction to air guns and air-gun arrays*. Disponível em:
<<http://www.seismologypetroleum.com>>. Acesso em: 03 out. 2009.
- EMBREE, P.; BURG, J. P.; BACKUS, M. M. Wide-band velocity filtering – the pie slice process. [s.l.]: *Geophysics*, v. 28, p.948-974, 1963.
- FERREIRA, P. P. *Características da Atenuação de Reflexões Múltiplas das Superfície Livre Utilizando a Extrapolação do Campo de Onda*. 2009. 161 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- FOSTER, D.J.; MOSCCHER, C.C. Supretion od multiple reflectio using radon tranform. [S.l.]: *Geophysics*, n. 57, p. 386-395, 1992.
- GAMBOA, F. *Caracterização e Eliminação de Múltiplas pelo Método da Superfície Comum de Reflexão (CRS)*. 2003. 117 f. Dissertação Mestrado em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2003.
- IKELLE, L. T.; AMUNDSEN, L. *Introduction to Petroleum Seismology*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2005.
- LANDA, E. et. al. Multiple Attenuation in the parabolic τ - π domain using wavefront characteristics of multiple generating primaries. [S.l.]: *Journal Geophysics.*, v. 64,n. 6, p. 123-126, 2006.

MAYNE, W. H. Common reflection point horizontal data stacking techniques: *Geophysics*, v. 27, n. 06, p. 927-938, 1962.

VERSCHUUR, D. J. *Seismic multiple removal techniques: past, present and future*. [S.l.]: EAGE publications, 2006.

VERSCHUUR, D. J.; BERKHOUT, A. J.; WAPENAAR, C. P. A. Adaptive surface-related multiple elimination. [S.l.]: *Journal Geophysics*, v. 57, n. 09, p. 1166-1177, sep. 1992.

YILMAZ, O. *Seismic Data Processing*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1987.