



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

Andrei Gomes de Oliveira

**UMA ANÁLISE DE MÉTODOS DE SUPRESSÃO DE
MÚLTIPLAS DE SUPERFÍCIE LIVRE APLICADOS A UM
DADO REAL**

BELEM
2011

Andrei Gomes de Oliveira

**UMA ANÁLISE DE MÉTODOS DE SUPRESSÃO DE
MÚLTIPLAS DE SUPERFÍCIE LIVRE APLICADOS A UM
DADO REAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará para obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Sísmicos.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Ellen de Nazaré Souza Gomes.

BELÉM
2011

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

- O48a Oliveira, Andrei Gomes de
- Uma análise de métodos de supressão de múltiplas de superfície livre aplicados a um dado real / Andrei Gomes de Oliveira; Orientador: Ellen de Nazaré Souza Gomes - 2011.
- 129 fl.: il.
- Dissertação (mestrado em geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2011.
1. Método de reflexão sísmica. 2. Eliminação de múltiplas de superfície. 3. SRME. 4. Filtragem Radon. 5. Deconvolução Preditiva no Domínio τ -p. 6. Filtragem f-k. 7. Processamento de dado marinho real 2D. I. Gomes, Ellen de Nazaré Souza, *orient.* II. Universidade Federal do Pará III. Título.

CDD 22° ed.: 551.22

Andrei Gomes de Oliveira

UMA ANÁLISE DE MÉTODOS DE SUPRESSÃO DE
MÚLTIPLAS DE SUPERFÍCIE LIVRE APLICADOS A UM
DADO REAL

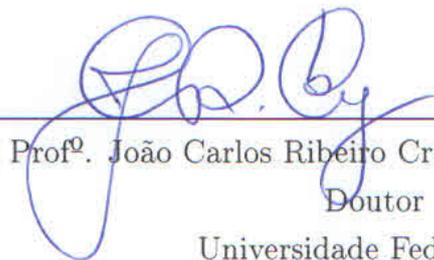
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de mestre em Ciências na área de Geofísica.

Data de Aprovação: 14 / 10 / 2011

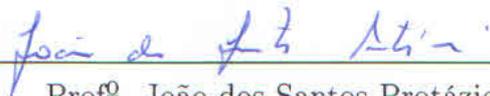
Banca Examinadora:



Prof^a. Ellen de Nazaré Souza Gomes - Orientador
Doutora em Geofísica
Universidade Federal do Pará



Prof^o. João Carlos Ribeiro Cruz - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará



Prof^o. João dos Santos Protázio - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Dedico este trabalho aos meus filhos João Vitor e Ana Luiza, que são a razão de minha vida e de minha inspiração.

A minha esposa Daniele Cristina pela paciência e por cuidar bem de nossa família na minha ausência ou da minha falta de tempo.

A minha mãe pela grande ajuda e colo que sempre me destes, mesmo nas horas mais difíceis.

Ao meu pai pelos diálogos, livros e apoio.

Aos meus irmãos Marcelo, Yuri, Iandê, Antônio e Maioi por me apoiarem e me incentivarem.

Ao meu tio Emir pelo grande homem que foi em nossas vidas.

A Renilde pelo amor que nos emprestou por toda a sua vida.

AGRADECIMENTOS

Ao grupo de Métodos Sísmicos do Instituto de Geociências da UFPa pelos recursos disponibilizados: laboratórios, livros e tempo.

A UFPa, CAPES e Petrobrás pelo apoio financeiro.

A professora Ellen Nazaré de Souza Gomes pela dedicação e paciência.

Aos demais professores pelo conhecimento, disponibilidade e amizade que se preparam.

Aos meus colegas de curso pelas longas jornadas de estudo juntos e pelos grandes desafios vencidos.

Aos meus eternos amigos aqui estabelecidos Hamilton, Francisco Oliveira e Wildney.

Ao prof. Ivan Psencik pelas longas caminhadas e pela grande amizade.

Aos professores Marcos, João Batista, João Carlos e Cícero pela confiança creditada.

A todos os funcionários do CPGf (Benildes, Marcelo, Ana e Lucibela). Aos funcionários do IG (Suelen, Roberto e Geraldo) minha eterna gratidão.

Ao amigo Adriano pelas longas conversas na tentativa de solucionar problemas no Latex.

Ao amigo Francisco Neto pelas longas conversas sobre processamento paralelo.

A UNICAMP pelo espaço cedido, os seus funcionários João e Alcides, aos professores Joerg e Maria Amélia, aos amigos Rafael e Thiago.

A Deus por nossa existência e nossa saúde.

RESUMO

O registro em levantamentos sísmicos 2D de eventos lineares são comuns nos traços dos sismogramas. Estes eventos se sobrepõem às reflexões de interesse (reflexões primárias) complicando as etapas do processamento sísmico e a identificação dos possíveis horizontes geológicos da subsuperfície. Pode-se destacar as múltiplas de superfície que se distinguem das demais por apresentarem baixas frequências, altas amplitudes e baixa velocidade de propagação. A identificação e remoção de reflexões múltiplas em dados sísmicos reais é uma etapa de grande importância no processamento sísmicos, pois a atenuação destas múltiplas pode evitar erros na interpretação geológica das imagens sísmicas. O objetivo do trabalho é a determinação de um fluxo de processamento, para a atenuação de múltiplas de superfície livre. Métodos de eliminação de múltiplas de superfície (SRME, filtragem Radon, deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ e filtragem f-k) aplicados a um dado real 2D, foram utilizados em diferentes combinações. Estas são analisadas e são apresentados os resultados das melhores combinações.

Palavras Chaves: Métodos de Reflexão Sísmica. Eliminação de múltiplas de superfície. SRME. Filtragem Radon. Deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$. Filtragem f-k. Processamento de dado marinho real 2D.

ABSTRACT

The seismic record in 2D linear events are common features in the seismograms. These events are overlap with interesting reflections (early reflections) complicating the stages of seismic processing and identification of possible subsurface geological horizons. It possible highlight multiple surface that distinguished from others by a low frequency, high amplitude and low velocity of propagation. The identification and removal of multiple reflections in seismic data is a real step of great importance in seismic processing, because the attenuation can prevent many of these errors in the interpretation of geological images seismic. This study is the determination of a processing flow for multiple attenuation free surface. Methods of elimination of multiple surface (SRME, Radon filtering, predictive deconvolution domain $\tau-p$ and fk filtering) applied to a real data 2D were used in different combinations. These are analyzed and presented the results are the best combinations.

keywords: Seismic reflection method. Attenuation multiple free surface. SRME. Radon filtering. Predictive deconvolution $\tau - p$ domain. f-k Filtering. Survey of mariner real data 2D.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Este esquema mostra como é feita a aquisição de dados sísmicos de reflexão. As ondas sísmicas são refletidas entre duas camadas com diferentes propriedades física (densidade e/ou velocidade).	23
Figura 2.2 - Constituição do dado sísmico. As reflexões primárias são dito o sinal propriamente. Outros eventos sísmicos como ondas diretas, guiadas, reflexões múltiplas etc são chamados de ruído coerente. Ruídos aleatórios fazem parte da classe de ruídos incoerentes.	24
Figura 2.3 - Fluxo com as etapas do processamento sísmico em tempo convencional.	25
Figura 2.4 - Seção sísmica somente com edição da linha 0214-0266 com afastamento mínimo de 150m. As múltiplas do assoalho oceânico, múltiplas de superfície, estão assinaladas por setas vermelhas e surgem a partir de cerca de 1000 ms na parte mais profunda do dado. Para efeito de visualização foi aplicado ganho.	27
Figura 3.1 - Reflexões múltiplas, as ondas sofrerão pelo menos uma reflexão descendente 3.1(a), indicada pela seta preta. Nas reflexões primárias, as ondas sofrerão apenas uma reflexão ascendente. 3.1(b) Representa outro tipo de múltipla que sofreu pelo menos duas reflexões descendentes.	28
Figura 3.2 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltipla de superfície livre.	29
Figura 3.3 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltiplas internas, originadas em camadas internas, também conhecidas como múltiplas intercadas.	30
Figura 3.4 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltiplas simétricas.	30
Figura 3.5 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltiplas assimétricas.	31
Figura 3.6 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltiplas de curto percurso.	31
Figura 3.7 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltiplas de longo percurso.	32

Figura 3.8 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltiplas de 1ª ordem.	32
Figura 3.9 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltiplas de 2ª ordem.	33
Figura 3.10 - Assinatura da fonte de um único canhão de ar de 40 polegadas cúbicas (0,66 litros) gravado a 300 metros de distância vertical do canhão.	34
Figura 3.11 - Conceito e disposição de arranjo do air-gun. (a) As assinaturas azuis das fontes individuais 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 vermelha em que os pulsos da “bolha de ar” são suprimidos.	35
Figura 3.12 - Este esquema mostra como se comportam as reflexões fantasmas: a linha vermelha representa a reflexão fantasma do receptor (interface água/ar). Sabendo-se que essas ondas podem ser captadas pelo receptor ao mesmo tempo que a reflexão primária e a reflexão fantasma da fonte, o que torna difícil a distinção sinal/ruído.	36
Figura 3.13 - Este esquema mostra como se comportam as reflexões fantasmas: a linha vermelha representa a reflexão fantasma da fonte. Sabendo-se que essas ondas podem ser captadas pelo receptor ao mesmo tempo que a reflexão primária e a reflexão fantasma da fonte, o que torna difícil a distinção sinal/ruído.	37
Figura 3.14 - Diferentes categorias de múltiplas identificadas na seção empilhada para um dado de campo da região de Nordkapp, mar da costa da Noruega (dado cortesia da ExxonMobil). As setas laranjas indicam múltiplas referentes a camada de água, as setas vermelhas indicam as reverberações da camada de água e as setas azuis indicam múltiplas relacionadas a superfície que não estão relacionadas com a camada de água. As setas amarelas indicam, possivelmente, uma múltipla interna.	38
Figura 3.15 - Múltiplas, muitas vezes se caracterizam, por mergulhos conflitantes com as primárias (veja as setas) devido ao fato de que as condições de águas rasas que geraram as múltiplas tem uma orientação diferente e formas diferentes em comparação com as primárias mais profundas. As setas vermelhas indicam as múltiplas relacionadas a superfície e as setas laranjas indicam multiplas internas. (seção empilhada do mar da costa da Noruega; dado cortesia da Satoil).	39
Figura 3.16 - Múltiplas, muitas vezes se caracterizam, pelo aumento da inclinação se comparadas com as primárias que as geraram. As setas vermelhas indicam as múltiplas relacionadas a superfície. (seção empilhada linha 0214-0266 da Bacia do Jequitinhonha).	40

Figura 3.17 - Pequenas variações na geometria dos limites que geram as múltiplas, como nas estruturas sinclinal e anticlinal no fundo oceânico, gerarão efeitos de focalização e desfocalização nas múltiplas registradas. Note que a energia está concentrada (focalizada) na parte inferior da feição sinclinal e ao redor das bordas da feição anticlinal.	41
Figura 3.18 - A presença de diferentes tipos e ordens de múltiplas resulta em um padrão de interferência. Pequenas variações na amplitude das reflexões e na geometria dos limites que geraram as múltiplas na parte rasa da seção resulta em fortes variações na energia das reflexões múltiplas, como pode ser visto nas setas vermelhas. (seção empilhada de mar adentro do Oeste da Austrália, dado cortesia da BHP Petroleum).	42
Figura 4.1 - Esquema do domínio $f - k$	44
Figura 4.2 - Filtragem $f - k$ para atenuação de múltiplas - As reflexões múltiplas são horizontalizadas no (x, t) através da correção NMO utilizando as velocidades das múltiplas. O dado residual é mapeado para o domínio $f - k$, onde eventos primários e múltiplos estão em regiões distintas, após a aplicação do filtro para a atenuação das múltiplas, o dado é mapeado para o domínio original e por fim é aplicada a correção NMO inversa.	45
Figura 4.3 - Fluxo da filtragem $f - k$	47
Figura 4.4 - Mapeamento de um evento de reflexão do domínio tempo-afastamento (a) para o domínio de Radon linear (b): retas com diferentes inclinações são construídas. O dado é somado ao longo destas retas. A reta tangente que intercepta o eixo $x = 0$ define o valor de τ para $p_x = 0$ no domínio Radon linear. É mostrado no domínio de Radon a posição de cinco pontos do domínio tempo-afastamento.	49
Figura 4.5 - Relação entre os dados no domínio $f - k$ (a) e no domínio do Radon linear (b). As retas, no domínio $f - k$, que passam pela origem, são retas que estão paralelas ao eixo da frequência, no domínio de Radon alterado pela transformada de Fourier.	50
Figura 4.6 - A transformada Radon hiperbólica mapeia eventos hiperbólicos no domínio tempo-afastamento (a) em pontos no domínio de Radon hiperbólico (b).	51
Figura 4.7 - A transformada Radon parabólica, mapea o dado residual da correção NMO, que está agora na forma parabólica, no domínio tempo-afastamento (a) em pontos no domínio Radon parabólico (b).	52
Figura 4.8 - Aplicação de uma correção NMO aproximada dos dados de reflexão sísmica de uma família CMP, uma melhor aproximação do sobretempo residual que está sendo descrito por parábolas é obtida. Eventos curvos ascendentes (ou seja, eventos sobre-corrigidos) estão localizados no quadrante negativo do plano q e eventos curvos descendentes (ou seja, eventos sub-corrigidos) estão localizados no quadrante positivo do plano q	53

Figura 4.9 - Fluxograma da aplicação da filtragem Radon parabólica. Aplica-se uma interpolação aos dados pré-processados, realiza-se a reamostragem dos dados interpolados, concatena-se os dados pré-processados com os das interpolados reamostrados, aplica-se a filtragem Radon parabólica utilizando a tabela de estimativa das velocidades RMS das primárias. A filtragem Radon parabólica obedece ao seguinte esquema: aplica-se a correção NMO direta, de acordo com a tabela de estimativa das velocidades RMS das primárias, aplicação da transformada Radon parabólica direta, filtragem, aplicação da transformada Radon parabólica inversa, correção NMO inversa. Por fim aplica-se a reamostragem aos dados já filtrados obtendo-se os dados de saída.	54
Figura 4.10 - Família slant-stack	55
Figura 4.11 - Atenuação de múltiplas no domínio slant-stack. (a) Uma família de tiro comum; (b) seus autocorrelogramas; (c) a família slant-stack; (d) o autocorrelograma de (c); (e) a família slant-stack após a deconvolução preditiva onde o tamanho do operador é 240 ms e o lag de predição de $p = 120$ ms; (f) o autocorrelograma de (e); (g) reconstrução da família de tiro de (e).	57
Figura 4.12 - Atenuação de múltiplas no domínio slant-stack. (a) Campo registrado sem correção do espalhamento geométrico. (b) Família slant-stack obtida a partir do dado em (a). (c) Autocorrelação de (b). (d) Família slant-stack após a deconvolução preditiva, o comprimento do operador foi de $n = 400$ ms e o lag de predição de $\alpha = 700$ ms (para $p = 0$). (e) Autocorrelação de (d). (f) Família de fonte comum em (d) reconstituída.	59
Figura 4.13 - Fluxograma da aplicação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$. Aplica-se a correção NMO com a velocidade da água de 1480 m/s, aplica-se a migração kirchhoff no tempo e marca-se o assoalho oceânico. Paralelamente escolhe-se os parâmetros para a deconvolução preditiva. Aplica-se a transformada $\tau - p$ direta, em seguida aplica-se a deconvolução preditiva, depois aplica-se a transformada $\tau - p$ inversa. O dado resultante estará com as múltiplas atenuadas.	60
Figura 4.14 - Reflexão múltipla de primeira ordem com a combinação de duas primárias. Nas reflexões primárias, as ondas sofrerão apenas uma reflexão ascendente.	61
Figura 4.15 - Reflexão primária sofreu apenas uma reflexão ascendente.	62
Figura 4.16 - Reflexão primária sofreu apenas uma reflexão ascendente.	62
Figura 4.17 - A Matriz P contém todos os dados sísmicos pré-empilhamento $P(x_r, x_s, f)$ no domínio da frequência. Cada coluna contém o registro monocromático do dado para cada fonte e a linha contém o registro monocromático para cada receptor. A predição da múltipla pode ser escrita como uma matriz de multiplicação. Um ponto da matriz M é obtida pela combinação da linha da matriz X_0 com a coluna da matriz P	64

Figura 4.18 - Fluxo para eliminação de múltiplas de superfície livre. Aplica-se a correção NMO com a velocidade da água 1480 m/s. Marca-se o assoalho oceânico, paralelamente, utilizando a tabela das estimativas das velocidades RMS das reflexões primárias, converte-se o dado de end-on para split-spread. Então aplica-se o SRME utilizando a marcação do assoalho oceânico e o dado em split-spread. O dado resultante estará com as múltiplas atenuadas.	66
Figura 5.1 - Este esquema mostra a localização da linha 0214-0266 da Bacia do Jequitinhonha, identificada pelo ponto vermelho no mapa.	68
Figura 5.2 - Este esquema mostra a localização da linha 0214-0266 da Bacia do Jequitinhonha, onde a linha vermelha indica o local do levantamento.	69
Figura 5.3 - Este esquema mostra a localização da linha 0214-0266 da Bacia do Jequitinhonha, onde a linha vermelha indica o local do levantamento.	69
Figura 5.4 - Esquema mostra uma Seção Geológica da Bacia do Jequitinhonha. ...	70
Figura 5.5 - Esquema que mostra como é feita a aquisição 2D de arraste de cabo marinho.	71
Figura 5.6 - Seção sísmica editada, organizada em offset mínimo de 150m, da linha 0214-0266 da Bacia do Jequitinhonha apresentando algumas ocorrências de múltiplas de superfície livre e múltiplas internas, com indicação em vermelho.	73
Figura 6.1 - São apresentados os Fluxos de B a G onde respectivamente: a filtragem $f - k$, a deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$, a filtragem Radon, o método SRME, a combinação: filtragem $f - k +$ deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ e a combinação: filtragem $f - k +$ filtragem Radon são aplicados a linha 66. Em todos os fluxos a etapa de pré-processamento foi a mesma. Detalhes sobre as sub-etapas das metodologias de atenuação estão no capítulo 4, Figuras 4.3, 4.9, 4.13 e 4.18.	79
Figura 6.2 - São apresentados respectivamente os Fluxos de H a J aplicados a linha 66 com objetivo de atenuar as múltiplas de superfície. No Fluxo H, foi aplicada a combinação: O método SRME + filtragem $f - k$. No Fluxo I, é aplicada a combinação: deconvolução preditiva no domínio $\tau - p +$ filtragem Radon. No Fluxo J, é aplicada a combinação: do método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$	80
Figura 6.3 - São apresentados respectivamente os Fluxos de K a M aplicados a linha 66 com objetivo de atenuar as múltiplas de superfície. No Fluxo K, é aplicada a combinação: do método SRME + filtragem Radon. No Fluxo L, é aplicada a combinação: do método SRME + filtragem $f - k +$ deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$. No Fluxo M, foi aplicada a combinação: da filtragem $f - k +$ deconvolução preditiva no domínio $\tau - p +$ filtragem Radon.	81

Figura 6.4 - Nesta Figura são apresentados os Fluxos de N a P aplicados a linha 66 com objetivo de atenuar as múltiplas de superfície. No Fluxo N, é aplicada a combinação: do método SRME + filtragem $f - k$ + filtragem Radon. No Fluxo O, é aplicada a combinação: da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + método SRME + filtragem Radon. No Fluxo P, é feita a combinação de todas as metodologias apresentadas neste trabalho: método SRME + filtragem $f - k$ + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon.	82
Figura 6.5 - Mapa de velocidades RMS interpoladas	84
Figura 6.6 - Linha 66, sem edição, organizado em afastamento mínimo comum de 150m. A posição das duas famílias CMP's usadas para a análise dos Fluxos de atenuação de múltiplas estão assinalados pela linha vermelha, são eles o CMP 1420 e CMP 2820. Nos dois a múltipla de superfície de primeira ordem é observada em 1170ms e 4810ms, respectivamente.	86
Figura 6.7 - Famílias CMP's 1420 e 2820 com a linha 66 pré-processada. As múltiplas de superfície aparecem a partir do tempo 1170ms, assinalado com a seta vermelha para do CDP 1420, Figura 6.7(a), e 4810ms, assinalado com a seta vermelha para do CMP 2820, Figura6.7(b).	87
Figura 6.8 - Resultados do CMP 1420 após a aplicação dos fluxos: B, Figura 6.8(a), C, Figura 6.8(b), D, Figura 6.8(c), e E, Figura 6.8(d), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.	91
Figura 6.9 - Resultados do CMP 1420 após a aplicação dos fluxos: F, Figura 6.9(a), G, Figura 6.9(b),H, Figura 6.9(c) e I , Figura 6.9(d), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.	92
Figura 6.10 - Resultados do CMP 1420 após a aplicação dos fluxos: J, Figura 6.10(a), K, Figura 6.10(b), L, Figura 6.10(c) e M, Figura 6.10(d), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.	93
Figura 6.11 - Resultados do CMP 1420 após a aplicação dos fluxos: N, Figura 6.11(a), O, Figura 6.11(b) e P, Figura 6.11(c), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.	94
Figura 6.12 - Resultados do CMP 2820 após a aplicação dos fluxos: B, Figura 6.12(a), C, Figura 6.12(b), D, Figura 6.12(c) e E, Figura 6.12(d), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.	99
Figura 6.13 - Resultados do CMP 2820 após a aplicação dos fluxos: F, Figura 6.13(a), G, Figura 6.13(b) H, Figura 6.13(c) e I, Figura 6.13(d), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.	100

Figura 6.14 - Resultados do CMP 2820 após a aplicação dos fluxos: J, Figura 6.14(a), K, Figura 6.14(b), L, Figura 6.14(c) e M, Figura 6.14(d), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.	101
Figura 6.15 - Resultados do CMP 2820 após a aplicação dos fluxos: N, Figura 6.15(a), O, Figura 6.15(b) e P, Figura 6.15(c), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.	102
Figura 6.16 - Dado bruto organizado em afastamento mínimo (150m). As múltiplas de superfície são facilmente identificadas na parte mais profunda do dado, identificadas pelas setas vermelhas, a partir do CMP 1352 e tempo de 1000ms. As múltiplas possuem a inclinação aparente maior que a inclinação do fundo oceânico, como era de se esperar (VERSCHUUR, 2006).	105
Figura 6.17 - Dado organizado em afastamento mínimo (150m) após a filtragem $f-k$, de acordo com o fluxo B, Figura 6.1. Não se verifica a atenuação das múltiplas de superfície.	106
Figura 6.18 - Dado organizado em afastamento mínimo (150m) após a filtragem Radon. Verifica-se uma atenuação discreta das múltiplas maior para na região que vai até o CMP 2400 que para a região do CMP 2400 em diante.	107
Figura 6.19 - Dado organizado em afastamento mínimo (150m) após a deconvolução preditiva no domínio $\tau-p$. As múltiplas são mais atenuadas comparado com os resultados da filtragem $f-k$ e Radon. A deconvolução não é efetiva para a região a partir do CMP 2700.	108
Figura 6.20 - Dado organizado em afastamento mínimo (150m) com aplicação do SRME - As múltiplas são parcialmente atenuadas para a região que vai do CMP 1200 até 3270.	109
Figura 6.21 - Dado organizado em afastamento de 1050m com aplicação do SRME.	110
Figura 6.22 - Dado organizado em afastamento de 1050m com aplicação do Radon.	111
Figura 6.23 - Dado organizado em afastamento mínimo (150m) após a aplicação do SRME e Radon.	112
Figura 6.24 - Dado 150m, Fluxo O	113
Figura 6.25 - Dado 150m, Fluxo P	114
Figura 6.26 - Na Figura 6.26 é mostrado o mapa de velocidades interpoladas a partir das velocidades estimadas. A estimativa foi feita a cada 100 CMP's, marcados pelos pontos em azul na Figura 6.26. De acordo com o mapa as velocidades RMS variam de 1480 m/s até 4000m/s.	115

Figura 6.27 - Seção migrada pré-empilhamento resultante do processamento convencional. Foi aplicado ganho de 500ms.	116
Figura 6.28 - Seção migrada pré-empilhamento resultante do fluxo que combina SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon. Foi aplicado ganho de 500ms.	117
Figura 6.29 - Seção migrada pré-empilhamento resultante do fluxo que combina SRME + filtragem $f - k$ + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon. Foi aplicado ganho de 500ms.	118
Figura A.1 - Fluxograma para transformar o dado do domínio tempo-afastamento no domínio $\tau - p$ (YILMAZ, 2001).	126
Figura A.2 - A hipérbole da família CMP no domínio tempo-afastamento mapeia em uma elipse no domínio $\tau - p$ (YILMAZ, 2001).	127
Figura A.3 - Várias chegadas em uma família CMP com a corresponde família $\tau - p$. Os eventos A , B , C e D são mapeados em A' , B' , C' e D' respectivamente (YILMAZ, 2001).	128

LISTA DE ABREVIATURAS

ABREVIATURA	DESCRIÇÃO
-------------	-----------

1-D	Uma dimensão
2-D	Duas dimensões
SRME	Do inglês “Surface-Related Multiple Elimination ”, Eliminação de múltiplas relacionadas à superfície livre
CMP	Ponto-médio-comum
CDP	Do inglês “Common Deph Point ”, Ponto-médio-comum
NMO	Do inglês “Normal Moveout ”, Sobretempo normal
AGC	Do inglês “Automatic Gain Control ”, Controle de Ganho Automático

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
$\tau - p$	tempo de intercepção por vagarosidade
$f - k$	frequência por número de onda
f	frequência
k	número de onda
x	afastamento
t	tempo
τ	tempo de intercepção
m	metros
s	segundos
v	velocidade
ms	milissegundos
p_x	parâmetro do raio horizontal
p	vagarosidade
$t(x)$	tempo de trânsito
k_x	campo número de onda
c	velocidade
α	ângulo
q	parâmetro de curvatura
$\alpha(p)$	leg de predição
n	comprimento do operador
$x_0(t)$	resposta impulsiva da Terra
$\delta(t)$	fonte impulsiva
Hz	hertz
km	kilômetros
\int	símbolo de integração
2π	frequência em radianos
$x(t)$	sismograma registrado
*	sinal de operação da convolução

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	21
2 - MÉTODOS SÍSMICOS	23
2.1 - SÍSMICA DE REFLEXÃO	23
2.2 - METODOLOGIA DO PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS CONVENCIONAL	24
3 - REFLEXÕES MÚLTIPLAS	28
3.1 - TIPOS DE MÚLTIPLAS (CATEGORIAS)	29
3.1.1 - Quanto à origem	29
3.1.2 - Quanto à simetria	30
3.1.3 - Quanto ao tempo de percurso	31
3.1.4 - Quanto ao número de reflexões	32
3.2 - FONTE SÍSMICA	33
3.2.1 - Pulso de bolha (Bubble Pulse)	33
3.2.2 - Fonte fantasma - (Source Ghost)	35
3.3 - CARACTERÍSTICAS DAS MÚLTIPLAS	37
4 - METODOLOGIAS PARA A ATENUAÇÃO DE MÚLTIPLAS	43
4.1 - MÉTODOS BASEADOS NA DIFERENÇA DE COMPORTAMENTO ESPA- CIAL DAS REFLEXÕES PRIMÁRIAS E REFLEXÕES MÚLTIPLAS	43
4.1.1 - Filtragem $f - k$ (filtragem de mergulho)	44
4.1.2 - Filtragem Radon	47
4.1.2.1 - Transformada Radon linear	48
4.1.2.2 - Transformada Radon hiperbólica	51
4.1.2.3 - Transformada Radon parabólica	51
4.2 - MÉTODOS BASEADOS NA PERIODICIDADE E PREDITIVIDADE DA MÚLTIPLA	54

4.2.1 - Deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$	55
4.2.2 - Eliminação de múltiplas relacionadas à superfície - SRME	61
5 - O DADO REAL	67
5.1 - LOCALIZAÇÃO	67
5.2 - GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO	71
6 - TÉCNICAS PARA A ATENUAÇÃO DE MÚLTIPLAS DE SUPER- FÍCIE	75
6.1 - FLUXOS DE PROCESSAMENTO	75
6.2 - ANÁLISE DE FAMÍLIAS CMP'S	87
6.3 - ANÁLISE DOS DADOS ORGANIZADOS EM AFASTAMENTO MÍNIMO .	103
7 - CONCLUSÃO	119
REFERÊNCIAS	121
APÊNDICE	124
APÊNDICE A - Transformada para o domínio $\tau - p$	125

1 INTRODUÇÃO

O método sísmico de reflexão constituiu-se no método geofísico mais utilizado na prospecção de hidrocarboneto. Através de dados de reflexão primária de ondas mecânicas é possível construir imagens aproximadas da subsuperfície e a partir da interpretação dessas imagens são determinados possíveis alvos de interesse para a indústria de petróleo.

A etapa em que os dados sísmicos são adquiridos é chamada de aquisição sísmica. Durante essa etapa outros eventos além das reflexões sísmicas, são registrados. É no processamento sísmico que os dados registrados são tratados e eventos de reflexão primária são acentuados em contraste com os demais eventos que são atenuados. A qualidade dos dados de reflexão adquiridos é fundamental para a obtenção de imagens confiáveis da subsuperfície.

Com a redução relativa dos custos de aquisição e o desenvolvimento de certas tecnologias (softwares e hardwares) a aquisição e o processamento sísmico incorporaram técnicas que utilizam dados com multicobertura, o que melhorou a qualidade dos dados processados.

Um dos principais fatores que afeta diretamente a qualidade das imagens sísmicas são as reflexões múltiplas. Reflexões múltiplas são geradas por reflexões primárias que são refletidas de volta para a subsuperfície. Possuem natureza periódica e em geral amplitudes mais baixas quando comparada com a amplitude das reflexões primárias. Dentre os vários tipos de múltiplas, as múltiplas devido a interface ar-água presentes em dados marinhos conhecidas como múltiplas de superfície, devido sua grande energia podem induzir a erros e dificultar a interpretação de possíveis refletores que estão mais profundos.

Várias técnicas foram desenvolvidas com objetivo de atenuar múltiplas, entre elas uma das primeiras foi a técnica do CMP (ponto médio comum), (MAYNE, 1956), (MAYNE, 1962) que faz parte do processamento convencional para a atenuação de múltiplas.

Para o caso específico de múltiplas de superfície, várias metodologias foram desenvolvidas no sentido de atenuar as múltiplas (TATHAM et al., 1983), (TATHAM, 1989), (RILEY; CLAERBOUT, 1976), (BERKHOUT, 1984) e (VERSCHUUR et al., 1989). Destas metodologias destacam-se a filtragem Radon e o SRME (VERSCHUUR et al., 1989), (VERSCHUUR et al., 1992), (VERSCHUUR; BERKHOUT, 1992).

Este trabalho tem por objetivo a determinação de um fluxo ótimo para atenuação de múltiplas de superfície aplicado a um dado real 2D. Será analisado a aplicação de quatro

metodologias de atenuação de múltiplas de superfície. Na classe de metodologias que se baseiam na diferença de comportamento entre múltiplas e primárias, serão analisadas a filtragem $f - k$ (ZHOU; GREENHALGH, 1994), (HOUSTON, 1998) e (LOKSHTANOV; HELLE, 1992) e a filtragem Radon parabólica (OLIVEIRA et al., 2007) e (ABBAD et al., 2011). Na classe de metodologias que se baseiam na previsibilidade e preditividade das múltiplas, serão aplicadas a deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ (YILMAZ, 2001) e a eliminação de múltiplas relacionadas a superfície livre - SRME (VERSCHUUR, 2006), (BERKHOUT; VERSCHUUR, 1997) e (VERSCHUUR; BERKHOUT, 1997). Essas metodologias serão aplicadas ao dado em separado e em combinações como feito em vários trabalhos rescentes (ALVAREZ et al., 2007), (BAARDMAN et al., 2010), (SHAW et al., 2011), (SABLON et al., 2011) e (WU; WANG, 2011).

Este trabalho está dividido da seguinte forma: no capítulo 1 é feita uma introdução e revisão bibliográfica. No capítulo 2, é feita uma breve revisão da metodologia do processamento sísmico básico. No capítulo 3, alguns conceitos de reflexões múltiplas e suas propriedades são apresentados. No capítulo 4, as técnicas para atenuação de múltiplas usadas neste trabalho são apresentadas. No capítulo 5 são apresentadas informações de localização, configuração do levantamento, perfil geológico e ao pré-processamento aplicado ao dado. O capítulo 6 é feita uma análise dos resultados, e ao melhor resultado é aplicado a migração de Kirchhoff 2D pré-empilhamento. Por fim, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões e algumas recomendações para trabalhos que utilizem as metodologias de atenuação de múltiplas.

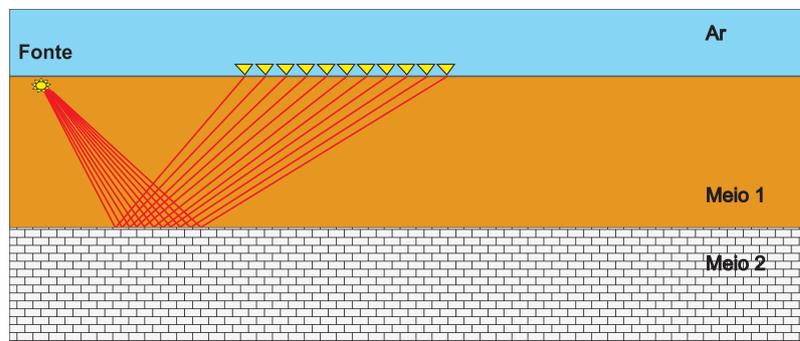
2 MÉTODOS SÍSMICOS

Neste capítulo é apresentado um breve resumo sobre o método sísmico de reflexão além das principais etapas do processamento sísmico convencional, segundo Yilmaz, 2001.

2.1 SÍSMICA DE REFLEXÃO

Os métodos sísmicos de reflexão se fundamentam na reflexão de ondas acústicas ou elásticas que são produzidas artificialmente (Figura 2.1) para estimar estruturas geológicas que compõem a subsuperfície. Possui três etapas: a aquisição dos dados, o processamento sísmico e a interpretação das imagens geradas a partir do processamento.

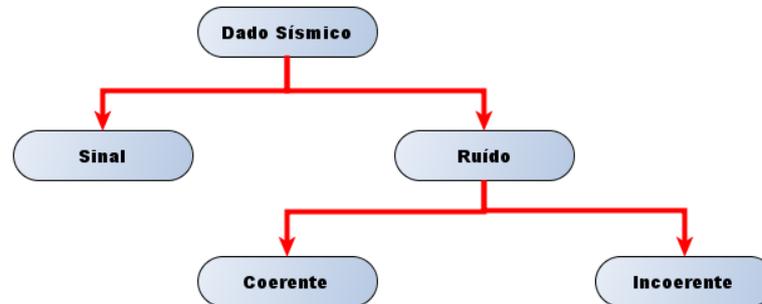
Figura 2.1 - Este esquema mostra como é feita a aquisição de dados sísmicos de reflexão. As ondas sísmicas são refletidas entre duas camadas com diferentes propriedades física (densidade e/ou velocidade).



Fonte: Do autor.

A aquisição é a etapa onde os dados sísmicos são adquiridos. De acordo com o meio em que ele é realizado pode ser marinho, terrestre ou de zona de transição. Além das reflexões primárias o campo registrado possui outros eventos como ondas diretas, guiadas, ground roll, ruídos aleatório, etc. Esses eventos estão classificados como: reflexões primárias, o sinal de interesse e todo o restante é dito ruído, Figura 2.2. Os ruídos se dividem em: ruídos coerentes e incoerentes. Ruídos incoerentes são aqueles que não apresentam uma coerência como por exemplo os ruídos ambientais. Ruídos coerentes possuem coerência, são outros eventos sísmicos que não são reflexão primária, por exemplo as reflexões múltiplas e as ondas guiadas.

Figura 2.2 - Constituição do dado sísmico. As reflexões primárias são dito o sinal propriamente. Outros eventos sísmicos como ondas diretas, guiadas, reflexões múltiplas etc são chamados de ruído coerente. Ruídos aleatórios fazem parte da classe de ruídos incoerentes.



Fonte: Do autor.

O processamento sísmico é a etapa aplicada com o objetivo de realçar os eventos de reflexão primária e atenuar os demais eventos. Constituída de uma série de transformações matemáticas, o processamento tem por produto final imagens estimadas (seções sísmicas em tempo ou profundidade) de refletores na subsuperfície. As imagens geradas no processamento são interpretadas na etapa conhecida como interpretação sísmica.

Um dos fatores que dificultam a interpretação das seções sísmicas é a presença de reflexões múltiplas¹. O caso mais grave, acontece em dados marinhos que possuem múltiplas de superfície². Presente em dados marinhos, as múltiplas de superfície possuem energia considerável quando comparada com reflexões mais profundas e assim podem mascarar essas reflexões e induzir interpretações erradas.

Uma vez que o objetivo deste trabalho é a determinação de um fluxo de processamento ótimo para a atenuação de múltiplas de superfície, na próxima seção é apresentado um breve resumo do processamento sísmico em tempo convencional.

2.2 METODOLOGIA DO PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS CONVENCIONAL

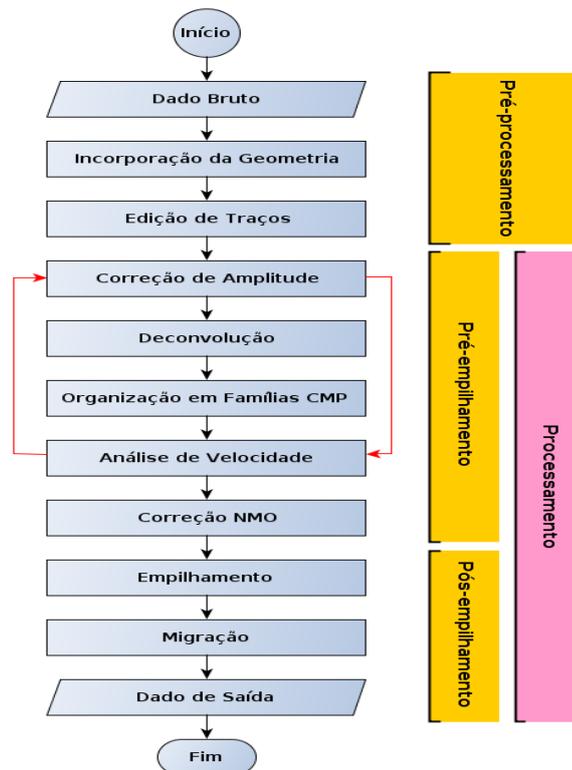
Nesta seção serão detalhados os fundamentos teóricos do processamento sísmico aplicado a linha 2D da Bacia do Jequitinhonha conhecida por 0214-0266. As etapas do processamento sísmico básico em tempo é mostrado no fluxograma na Figura 2.3 e consiste em:

¹ondas que estando a caminho da superfície após sofrerem reflexão na subsuperfície refletem de volta para a subsuperfície.

²Múltiplas que sofrem reflexão na interface ar-água.

- **Pré-processamento:** Etapa onde o dado é carregado ao software utilizado para o processamento. Os parâmetros da geometria de levantamento, baseados nas informações do relatório de campo são carregados do cabeçado dos traços. É feita a edição de traços através de filtros.
- **Pré-empilhamento:** Etapa onde é feita a correção de amplitude. Em seguida é aplicada a deconvolução impulsiva e tem por objetivo a remoção do efeito do pulso sísmico, comprimindo o dado e aumentando a sua resolução temporal. Em seguida é feita a análise de velocidade nos dados organizados em famílias de CMP³. Por fim aplica-se a correção NMO.
- **Empilhamento:** Etapa em que os traços sísmicos corrigidos do efeito NMO são somados. Essa técnica tem por principal objetivo melhorar a relação sinal/ruído. Por fim é escolhido um método de migração é gerada uma imagem da subsuperfície que pode estar tanto no tempo quanto em profundidade.

Figura 2.3 - Fluxo com as etapas do processamento sísmico em tempo convencional.



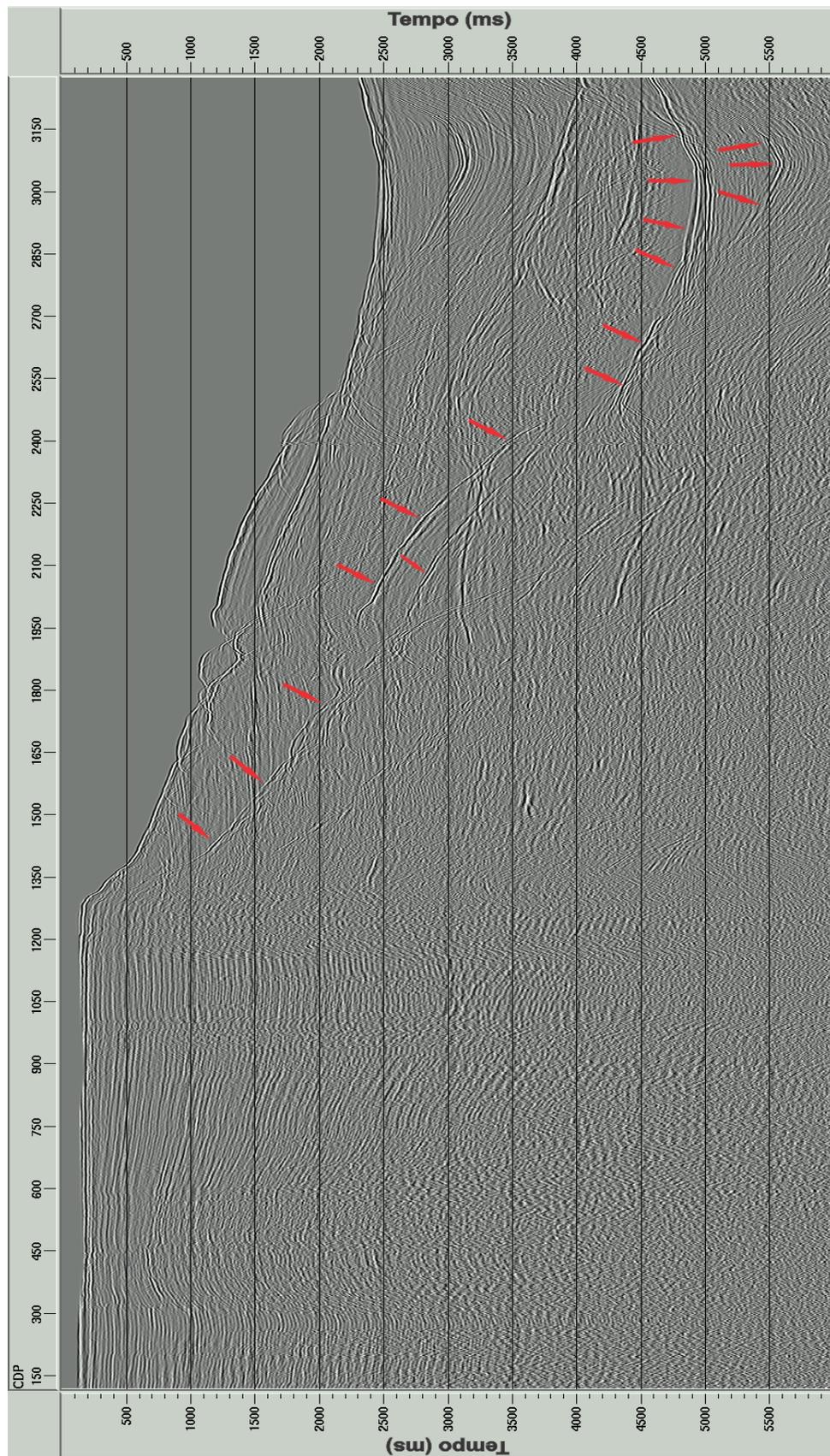
Fonte: Do autor.

Existem outras etapas do processamento sísmico, consideradas secundárias, que são aplicadas de acordo com o tipo de dado sísmico e objetivos desejados.

³Ponto Médio Comum.

Por exemplo: a linha marinha real 2D utilizada neste trabalho, tem forte presença de múltiplas de superfície (Figura 2.4 setas vermelhas) e neste trabalho para a atenuação desse tipo de múltiplas foram adicionados ao fluxo de processamento apresentado na Figura 2.3, etapas extras em que quatro diferentes metodologias de atenuação são testadas. Todo processamento aplicado nesse trabalho foi feito utilizando o pacote de processamento sísmico do Promax (Landmark inc.).

Figura 2.4 - Seção sísmica somente com edição da linha 0214-0266 com afastamento mínimo de 150m. As múltiplas do assoalho oceânico, múltiplas de superfície, estão assinaladas por setas vermelhas e surgem a partir de cerca de 1000 ms na parte mais profunda do dado. Para efeito de visualização foi aplicado ganho.



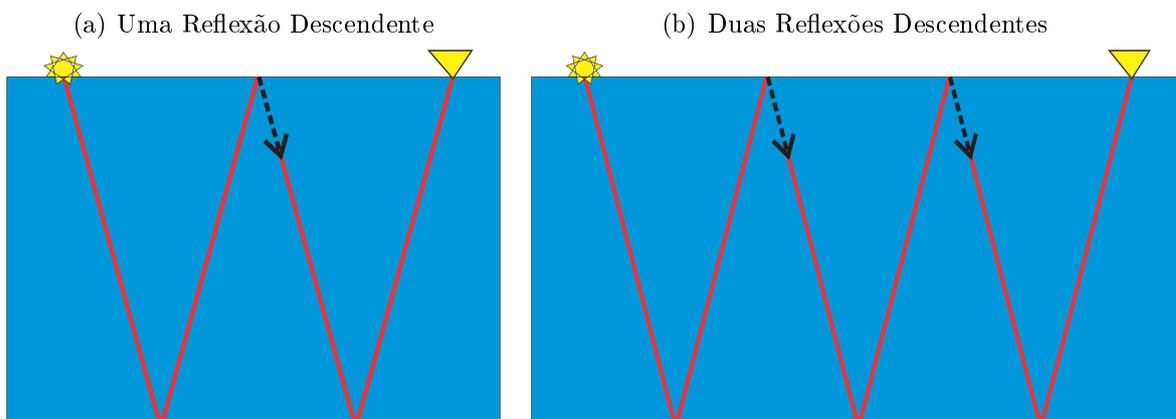
Fonte: Do autor.

3 REFLEXÕES MÚLTIPLAS

Neste capítulo é apresentado um resumo sobre as reflexões múltiplas de acordo com (VERSCHUUR, 2006). Medidas de reflexão sísmica são geralmente feitas com fontes e receptores que podem estar posicionados na superfície da Terra, próximos a superfície ou ainda dispostos dentro de poços. A partir das medidas de reflexões sísmicas é criada uma imagem da subsuperfície.

A maioria dos algoritmos de imageamento sísmico partem do pressuposto que o sinal registrado é oriundo de apenas uma reflexão na subsuperfície. Entretanto, toda onda que propaga-se da subsuperfície para a superfície retornará a subsuperfície sempre que encontrar heterogeneidades maiores que o comprimento de onda (espalhamento descendente). Quando essa onda finalmente é registrada na superfície ela é dita uma reflexão múltipla, Figura 3.1. Como na sísmica de reflexão o sinal considerado é apenas o da reflexão primária, Figura 3.1, os eventos de múltipla são normalmente considerados como ruídos e precisam ser removidos dos dados sísmicos, uma vez que 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.

Figura 3.1 - Reflexões múltiplas, as ondas sofrerão pelo menos uma reflexão descendente 3.1(a), indicada pela seta preta. Nas reflexões primárias, as ondas sofrerão apenas uma reflexão ascendente. 3.1(b) Representa outro tipo de múltipla que sofreu pelo menos duas reflexões descendentes.



Fonte: Do autor.

3.1 TIPOS DE MÚTIPLAS (CATEGORIAS)

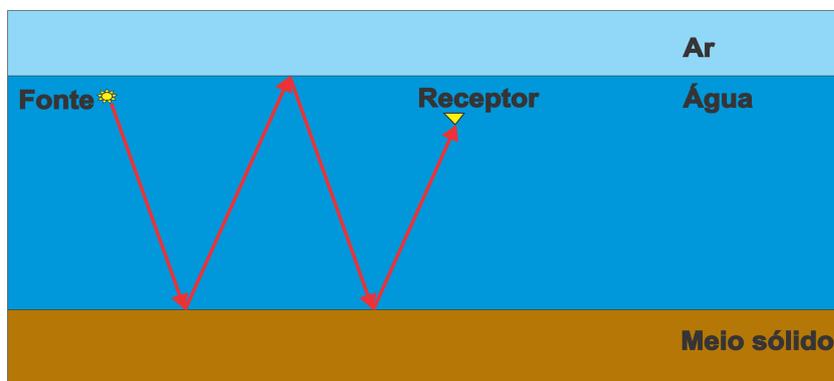
As múltiplas podem ser divididas em vários tipos de acordo com a origem, simetria, percurso e quanto á ordem. Considerando que o ambiente de aquisição dos dados sísmicos seja o ambiente marinho, as reflexões múltiplas podem ser classificadas (VERSCHUUR, 2006):

3.1.1 Quanto à origem

Está relacionado a interface onde as múltiplas sofrem o espalhamento descendente. Podem ser classificadas em:

- Múltiplas de superfície livre - São múltiplas relacionadas ao primeiro receptor. No caso marinho, se origina da interface água/ar.

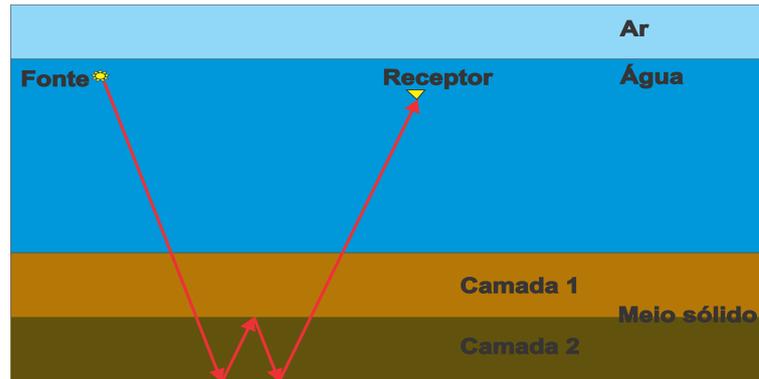
Figura 3.2 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltipla de superfície livre.



Fonte: Do autor.

- Múltiplas internas - São múltiplas cuja a reflexão descendente acontece em uma interface mais profunda que o primeiro refletor abaixo da superfície. Para o caso marinho se origina nas camadas abaixo da superfície livre.

Figura 3.3 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltiplas internas, também conhecidas como múltiplas intercamadas.



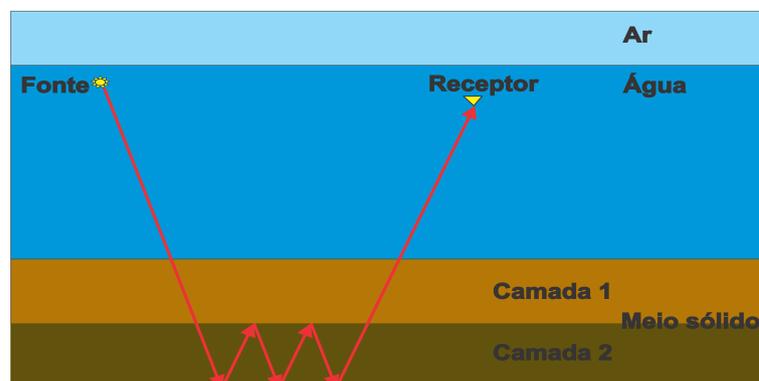
Fonte: Do autor.

3.1.2 Quanto à simetria

Está relacionada a trajetória de ida (descendente) e volta (ascendente) da subsuperfície da múltipla. Podem ser classificadas em:

- Múltiplas simétricas - Apresentam a trajetória descendente simétrica a trajetória ascendente.

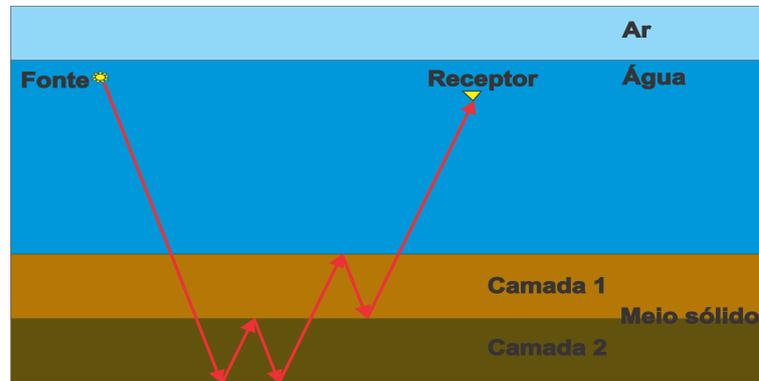
Figura 3.4 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltiplas simétricas.



Fonte: Do autor.

- Múltiplas assimétricas - Apresentam a trajetória descendente assimétrica a trajetória ascendente.

Figura 3.5 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltiplas assimétricas.



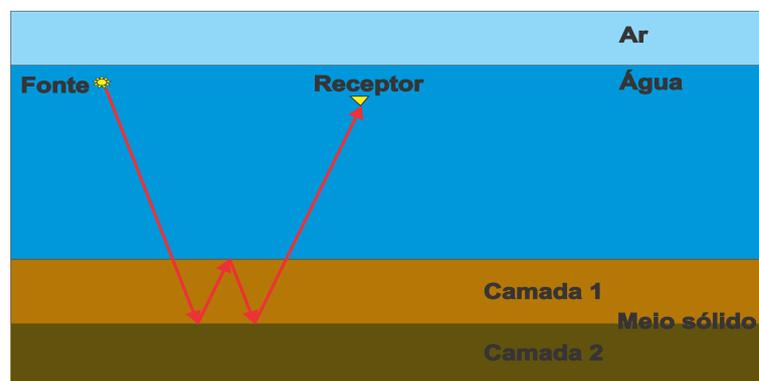
Fonte: Do autor.

3.1.3 Quanto ao tempo de percurso

Está relacionado ao tempo de percurso da múltipla em relação a reflexão primária. Podem ser classificadas em:

- Múltiplas de pequeno percurso - Também chamadas de *Peg-legs*, possuem tempo de trânsito muito próximo do tempo das reflexões primárias, não podendo ser identificadas separadamente.

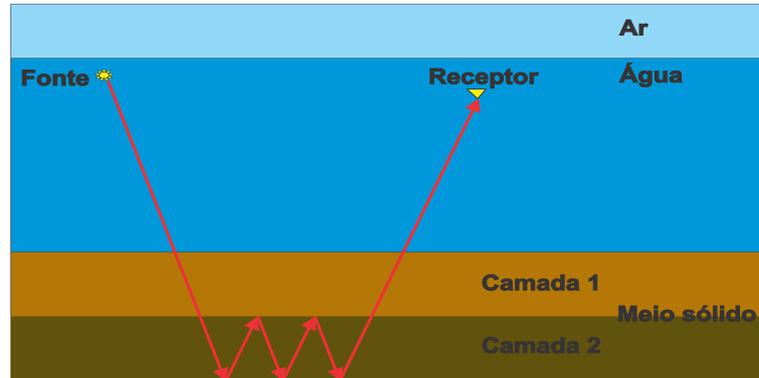
Figura 3.6 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltiplas de curto percurso.



Fonte: Do autor.

- Múltiplas de grande percurso - Possuem tempo de trânsito bem maior que o tempo de trânsito das reflexões primárias.

Figura 3.7 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltiplas de longo percurso.



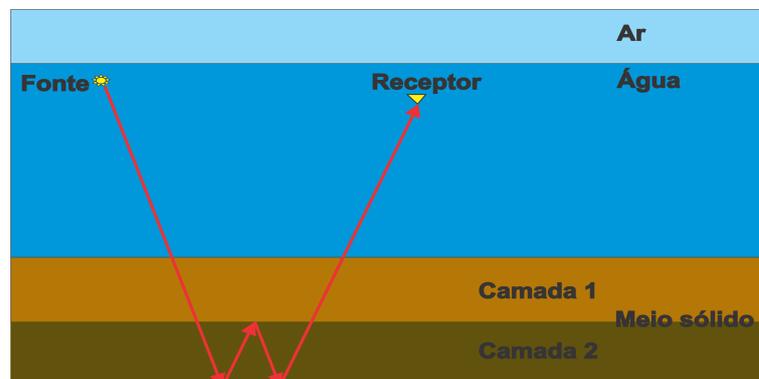
Fonte: Do autor.

3.1.4 Quanto ao número de reflexões

Refere-se a quantidade de reflexões descendentes que a múltipla pode sofrer. Podem ser classificadas em:

- Múltiplas de 1ª ordem - São aquelas que possuem uma reflexão descendente.

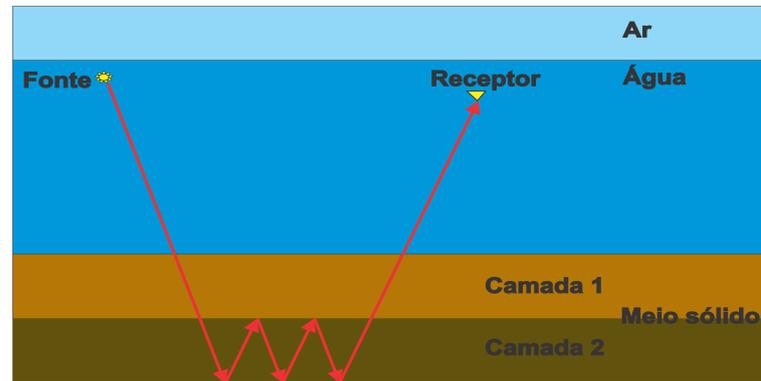
Figura 3.8 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltiplas de 1ª ordem.



Fonte: Do autor.

- Múltiplas de 2ª ordem - São aquelas que possuem duas reflexões descendentes. As múltiplas de ordem n possuem n reflexões descendentes.

Figura 3.9 - Este esquema mostra a trajetória do raio associada a múltiplas de 2ª ordem.



Fonte: Do autor.

3.2 FONTE SÍSMICA

Para o caso de levantamento marinho de arraste de cabo a utilização de fontes do tipo ar-gun podem gerar alguns tipos específicos de múltiplas.

3.2.1 Pulso de bolha (Bubble Pulse)

O *Bubble Pulse*¹ é um efeito devido ao tipo de fonte, que acontece após a primeira expansão da “bolha de ar” (emissão do sinal) do “Air-gun”. Imediatamente após a liberação do ar comprimido é formada uma “bolha de ar” ao redor do canhão. À medida que esta “bolha de ar” se expande, sua pressão interna diminui, já que a mesma quantidade de ar agora ocupa um espaço maior. Em tese, a “bolha de ar” alcança seu tamanho máximo quando a pressão externa se iguala a pressão interna (DRAGOSET, 2000). Entretanto, 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 de ar” e a redução do seu volume. Novamente, a pressão interna volta a sobrepular a externa e a “bolha de ar” 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

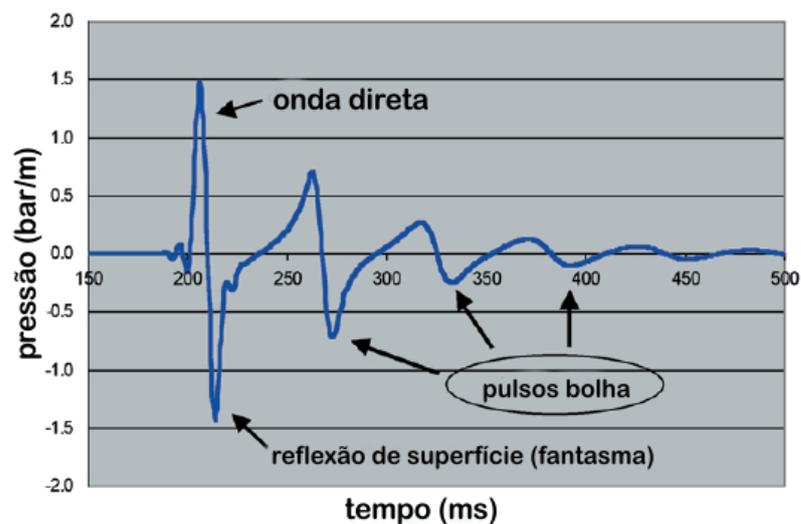
¹Termo em inglês que significa Pulso de bolha. Será adotado este termo neste trabalho, devido sua ampla difusão no meio Sísmico.

registro de reflexões múltiplas, é como se existissem outras fontes em diferentes tempos criando várias frentes de ondas.

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 e causa perdas na relação sinal/ruído. Podemos observar, na Figura 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 devido a contrastes do meio (e não devido a artefatos gerados pelo tipo de fonte).

Mesmo com a obtenção de uma assinatura da fonte próxima do sinal real gerado pela fonte, os dados sísmicos registrados apresentam esses efeitos de bolha, o que torna a subtração do ruído uma tarefa difícil.

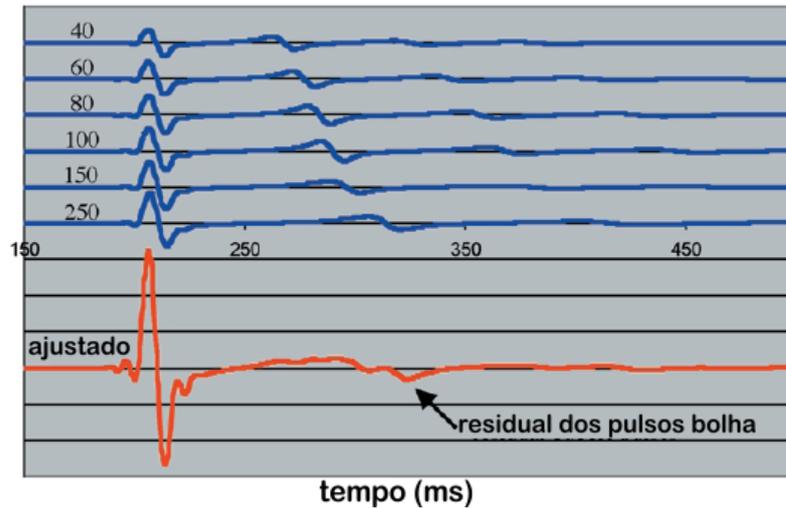
Figura 3.10 - Assinatura da fonte de um único canhão de ar de 40 polegadas cúbicas (0,66 litros) gravado a 300 metros de distância vertical do canhão.



Fonte: (DRAGOSET, 2000).

Para minimizar o efeito do “*Bubble Pulse*”, utiliza-se um arranjo de fontes de tal forma que as “*bolhas de ar*” geradas pelas fontes sofram interferência destrutiva de tal forma que apenas o primeiro pulso seja maximizado e os restantes causados pelo “*Bubble Pulse*” sejam atenuados conforme é mostrado através da assinatura do arranjo de fontes a Figura 3.11. Também existem, canhões de ar construídos especialmente para eliminar este tipo de ruído.

Figura 3.11 - Conceito e disposição de arranjo do air-gun. (a) As assinaturas azuis das fontes individuais 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 vermelha em que os pulsos da “bolha de ar” são suprimidos.



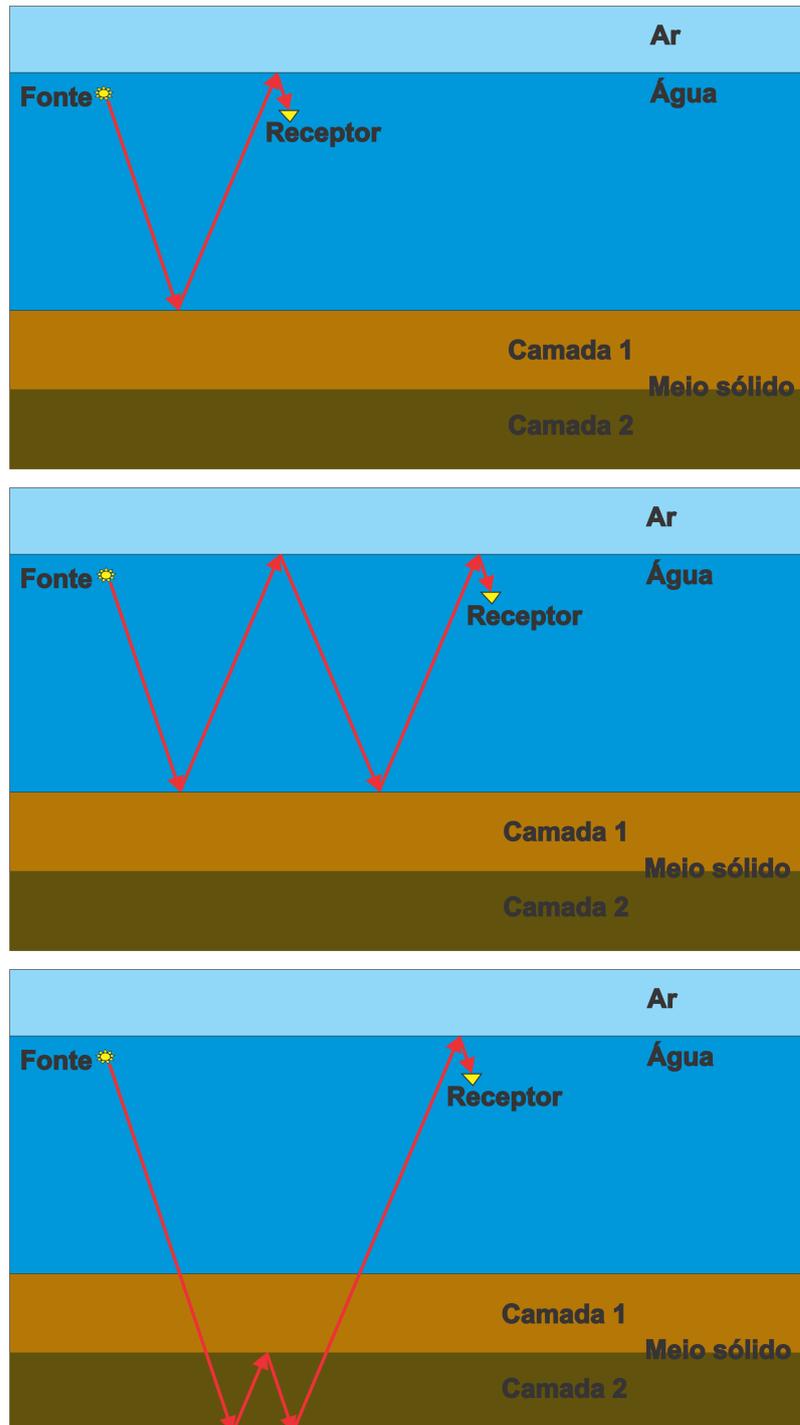
Fonte: (DRAGOSET, 2000).

3.2.2 Fonte fantasma - (Source Ghost)

Outro tipo de múltipla também presente nos dados marinhos são aquelas causadas por fontes fantasmas (LANDRØ; AMUNDSEN, 2010). A fonte fantasma acontece quando uma fonte pontual que está a uma profundidade $z = z_0$ no tempo $t = 0$, emite energia em todas as direções até o instante em 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 Figura 3.10 (LANDRØ; AMUNDSEN, 2010). 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 na subsuperfície que se quer estudar, o efeito diferencial da divergência esférica entre o pulso primário e a fonte fantasma pode ser desprezado (DRAGOSET, 2000).

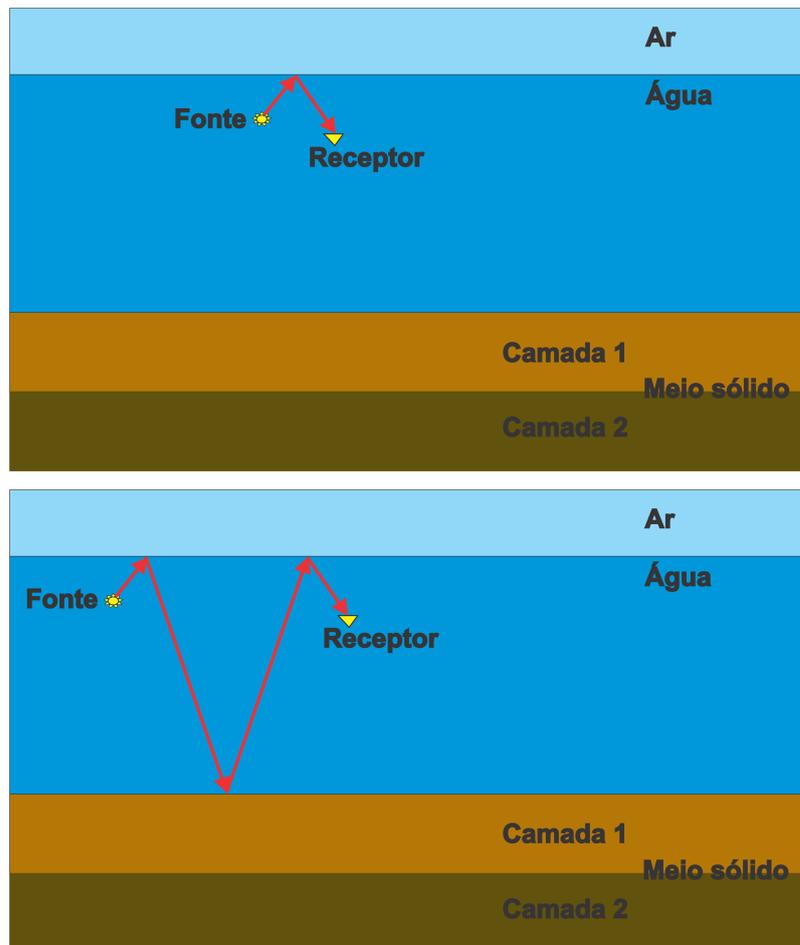
Fontes fantasmas (Figura 3.13) e receptores fantasmas (Figura 3.12) são comuns em registros onde fontes e receptores estão ambos em subsuperfície, causando um efeito destrutivo ao sinal em certas frequências. Similarmente a fonte fantasma, o receptor fantasma ocorre quando os receptores posicionados abaixo da superfície do mar (interface água/ar) registram, além das reflexões primárias, as reflexões geradas na interface água/ar (DRAGOSET, 2000).

Figura 3.12 - Este esquema mostra como se comportam as reflexões fantasmas: a linha vermelha representa a reflexão fantasma do receptor (interface água/ar). Sabendo-se que essas ondas podem ser captadas pelo receptor ao mesmo tempo que a reflexão primária e a reflexão fantasma da fonte, o que torna difícil a distinção sinal/ruído.



Fonte: Do autor.

Figura 3.13 - Este esquema mostra como se comportam as reflexões fantasmas: a linha vermelha representa a reflexão fantasma da fonte. Sabendo-se que essas ondas podem ser captadas pelo receptor ao mesmo tempo que a reflexão primária e a reflexão fantasma da fonte, o que torna difícil a distinção sinal/ruído.



Fonte: Do autor.

3.3 CARACTERÍSTICAS DAS MÚLTIPLAS

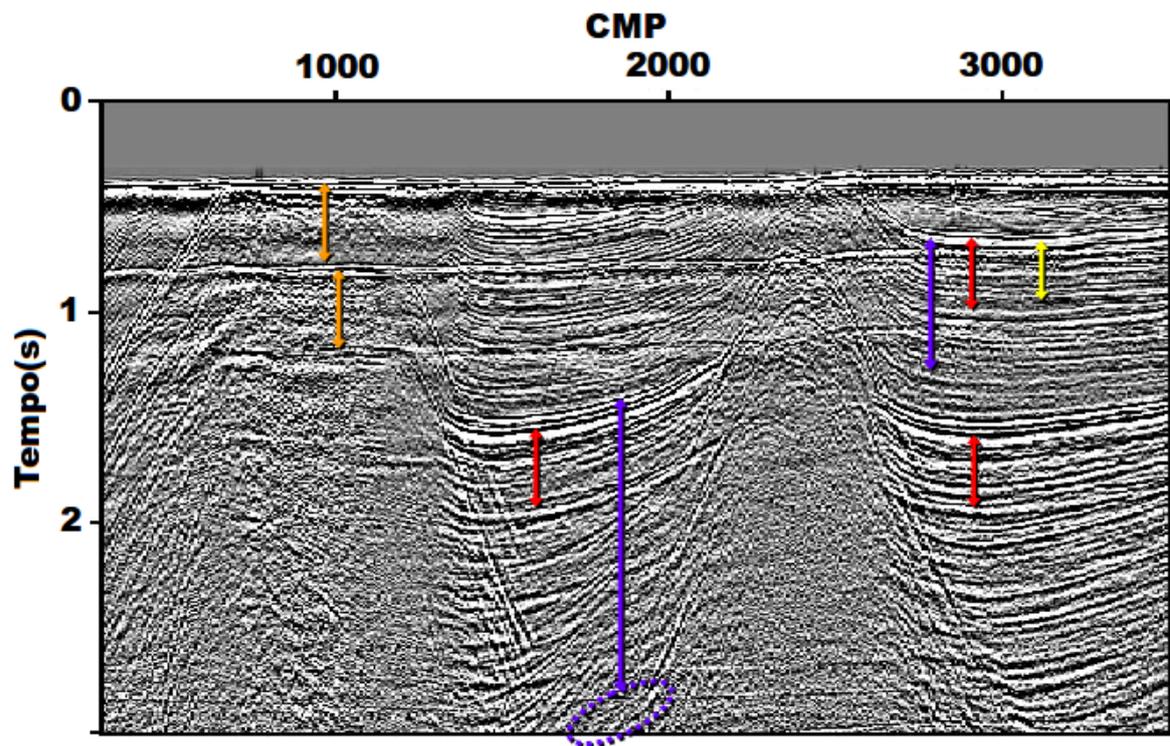
Em seções sísmicas empilhadas ou migradas as seguintes características são observadas devido a presença de múltiplas:

- Repetição periódica de refletores, Figura 3.14. Eventos são repetidos em intervalos regulares com amplitudes que estão decrescendo ou crescendo de uma forma regular.
- Refletores com mergulho conflitante, Figura 3.15.
- Para refletores inclinados, horizontes que apresentam aumento dessa inclinação, Fi-

gura 3.16.

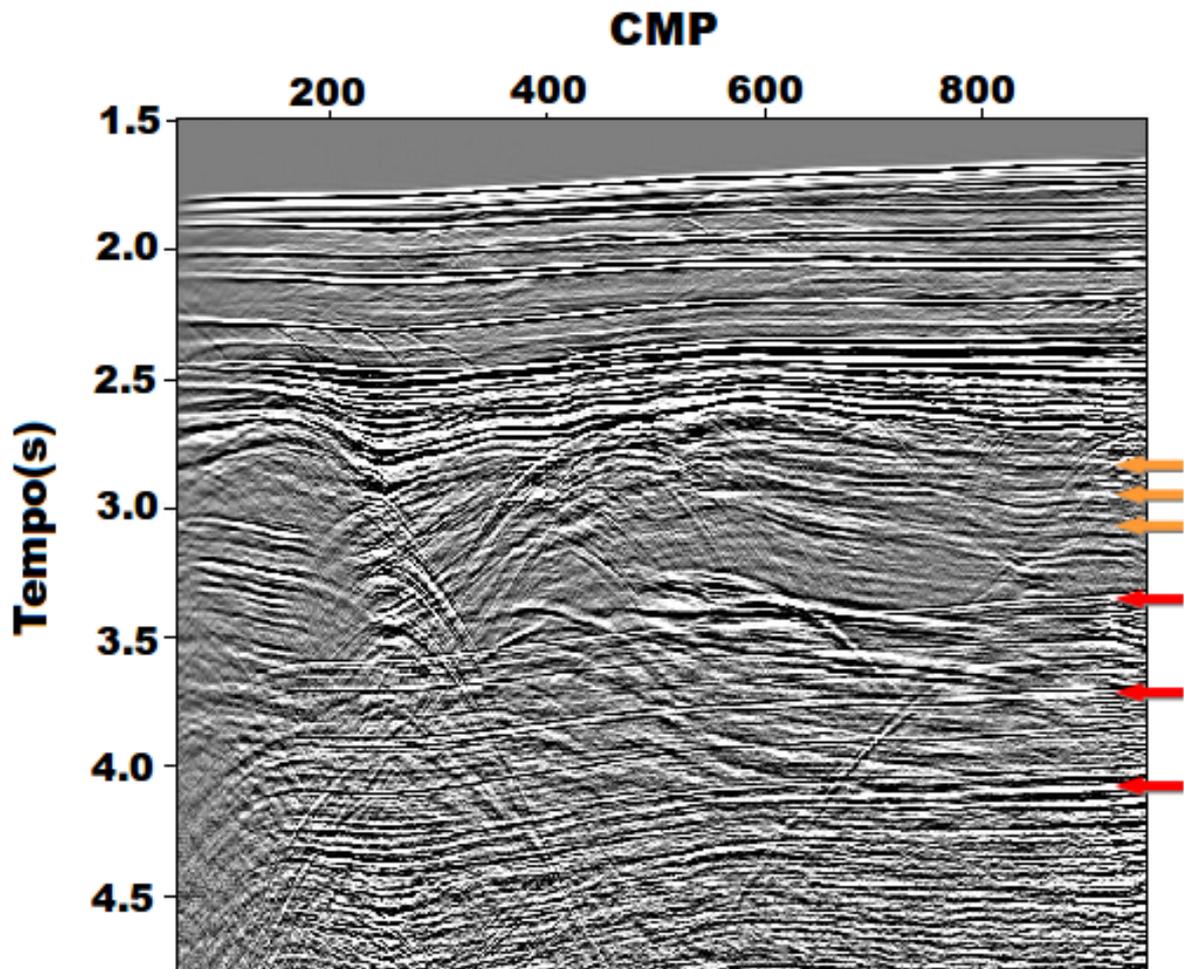
- Efeitos de focalização e desfocalização, Figura 3.17.
- Interferência com reflectores mais profundos e com diversos tipos de múltiplas, Figura 3.18.

Figura 3.14 - Diferentes categorias de múltiplas identificadas na seção empilhada para um dado de campo da região de Nordkapp, mar da costa da Noruega (dado cortesia da ExxonMobil). As setas laranjas indicam múltiplas referentes a camada de água, as setas vermelhas indicam as reverberações da camada de água e as setas azuis indicam múltiplas relacionadas a superfície que não estão relacionadas com a camada de água. As setas amarelas indicam, possivelmente, uma múltipla interna.



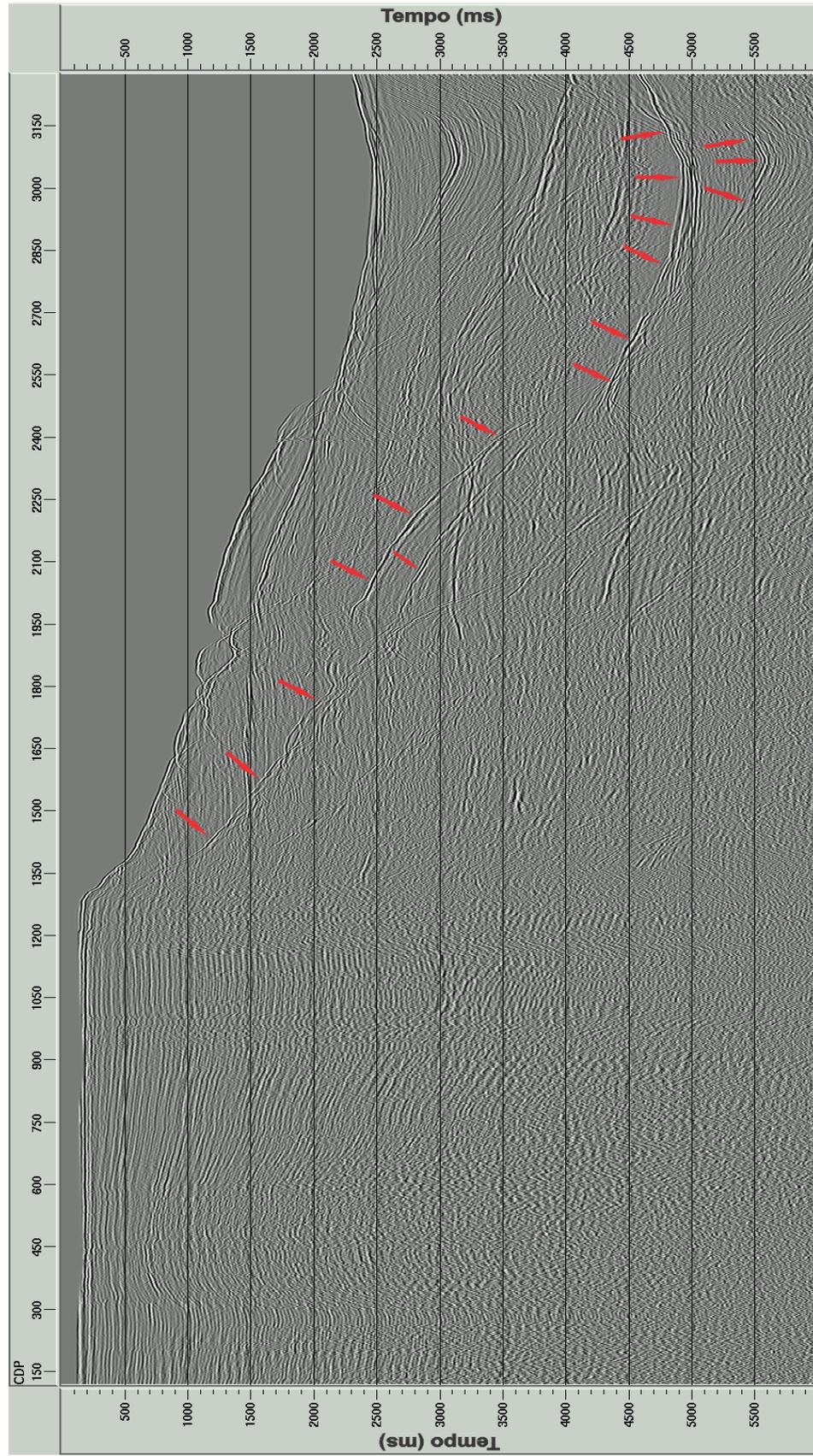
Fonte: Modificado de (VERSCHUUR, 2006).

Figura 3.15 - Múltiplas, muitas vezes se caracterizam, por mergulhos conflitantes com as primárias (veja as setas) devido ao fato de que as condições de águas rasas que geraram as múltiplas tem uma orientação diferente e formas diferentes em comparação com as primárias mais profundas. As setas vermelhas indicam as múltiplas relacionadas a superfície e as setas laranjas indicam múltiplas internas. (seção empilhada do mar da costa da Noruega; dado cortesia da Satoil).



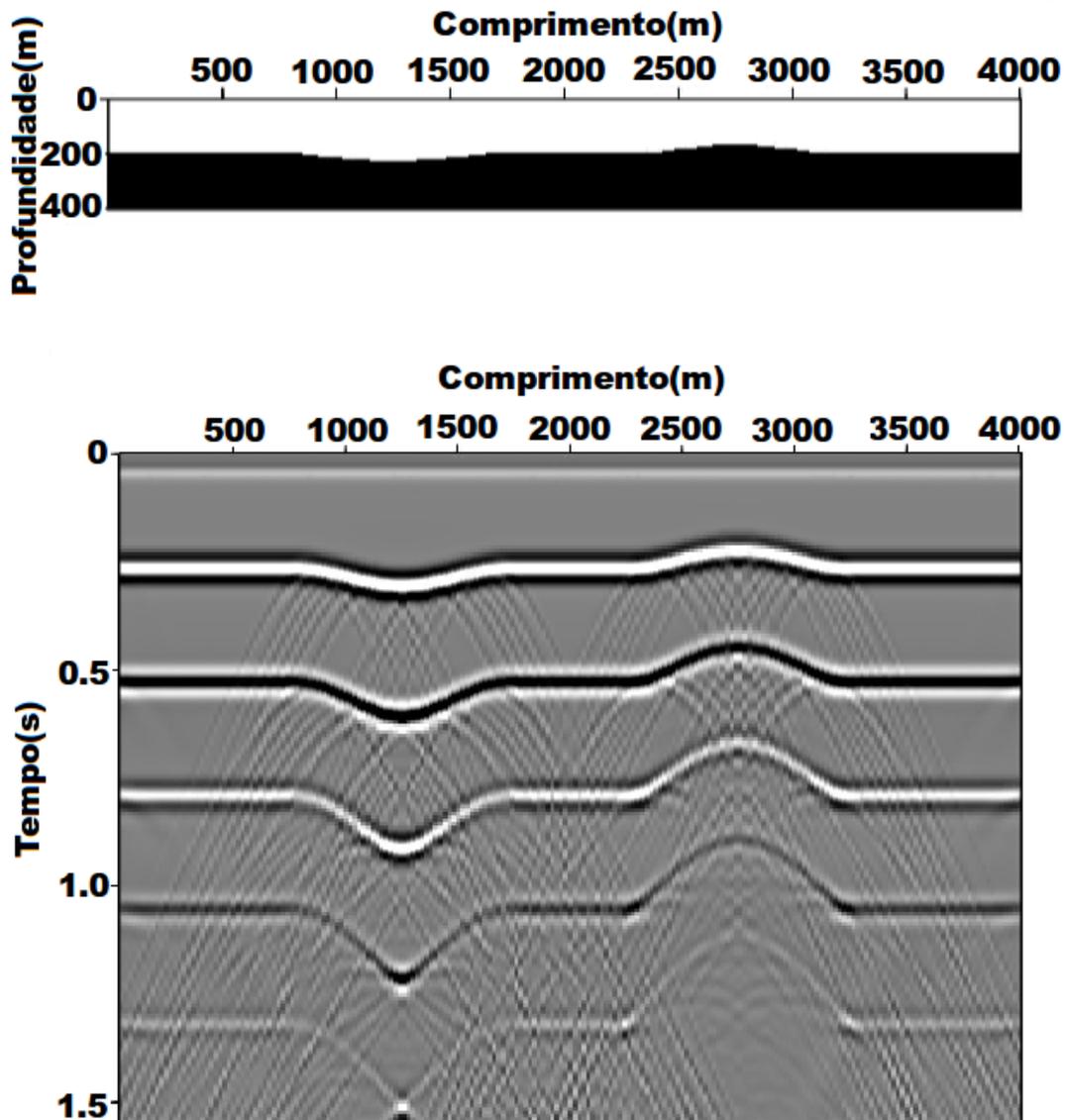
Fonte: Modificado de (VERSCHUUR, 2006).

Figura 3.16 - Múltiplas, muitas vezes se caracterizam, pelo aumento da inclinação se comparadas com as primárias que as geraram. As setas vermelhas indicam as múltiplas relacionadas a superfície. (seção empilhada linha 0214-0266 da Bacia do Jequitinhonha).



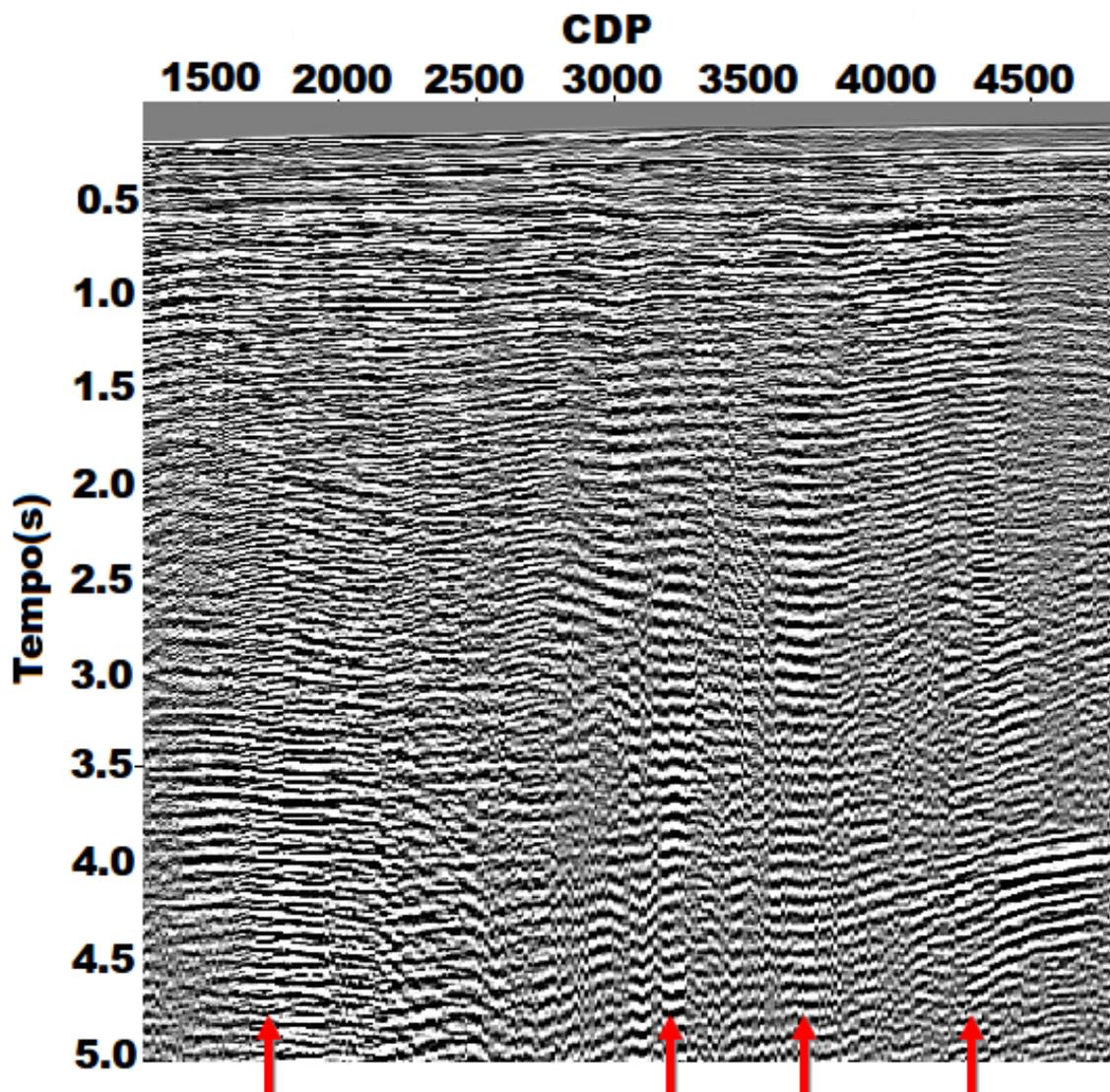
Fonte: Do autor.

Figura 3.17 - Pequenas variações na geometria dos limites que geram as múltiplas, como nas estruturas sinclinal e anticlinal no fundo oceânico, geram efeitos de focalização e desfocalização nas múltiplas registradas. Note que a energia está concentrada (focalizada) na parte inferior da feição sinclinal e ao redor das bordas da feição anticlinal.



Fonte: Modificado de (VERSCHUUR, 2006).

Figura 3.18 - A presença de diferentes tipos e ordens de múltiplas resulta em um padrão de interferência. Pequenas variações na amplitude das reflexões e na geometria dos limites que geraram as múltiplas na parte rasa da seção resulta em fortes variações na energia das reflexões múltiplas, como pode ser visto nas setas vermelhas. (seção empilhada de mar adentro do Oeste da Austrália, dado cortesia da BHP Petroleum).



Fonte: Modificado de (VERSCHUUR, 2006).

4 METODOLOGIAS PARA A ATENUAÇÃO DE MÚLTIPLAS

Considerada como ruído, existem vários métodos que tem por objetivo atenuar múltiplas. Neste capítulo é feita uma breve revisão das principais metodologias de atenuação de múltiplas de superfície livre, baseadas no que é apresentado em (VERSCHUUR, 2006).

As metodologias de atenuação de múltiplas são classificadas na literatura de várias formas. Nesta dissertação foi escolhida a classificação proposta por (VERSCHUUR, 2006) que divide as metodologias de atenuação de múltiplas em duas grandes categorias: as que são baseadas na diferença de comportamento espacial entre reflexões primárias e múltiplas, são exemplos as fitragens $f - k$ e Radon, as que são baseadas na periodicidade e preditividade das múltiplas, são exemplos a deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ e o SRME.

Neste trabalho, é aplicada a uma linha marinha real 2D as fitragens $f - k$, Radon, a deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ e o SRME, em diderentes combinações com objetivo de determinar um fluxo ótimo de atenuação de múltiplas de superfície livre.

4.1 MÉTODOS BASEADOS NA DIFERENÇA DE COMPORTAMENTO ESPACIAL DAS REFLEXÕES PRIMÁRIAS E REFLEXÕES MÚLTIPLAS

Estes métodos baseiam-se no fato de que reflexões múltiplas e reflexões primárias apresentam comportamento espacial (moveout) diferentes (VERSCHUUR, 2006).

Nestes métodos, os dados sísmicos registrados são mapeados do domínio tempo-afastamento para um novo domínio, no qual reflexões múltiplas e primárias são mapeadas em regiões distintas. Nesse novo domínio, são então aplicadas técnicas de filtragem para atenuar as múltiplas. Em seguida o dado já filtrado é mapeado de volta para o domínio tempo-afastamento. Este dado deve em tese contém apenas a energia das reflexões primárias. Para aplicação deses metodos alguns pré-requisitos são necessários:

- O novo domínio deve ser escolhido de forma que reflexões primárias e reflexões múltiplas sejam mapeadas em regiões diferentes com uma sobreposição mínima entre estas regiões.
- A transformada do domínio original para o novo domínio deve ser reversível, isto é,

o mapeamento de um domínio para o outro não deve gerar artefatos.

- Há necessidade de informação a priori do dado. Em geral do modelo de velocidade das reflexões primárias.

Esses métodos podem ser aplicados ao dado no domínio pré ou pós-empilhamento.

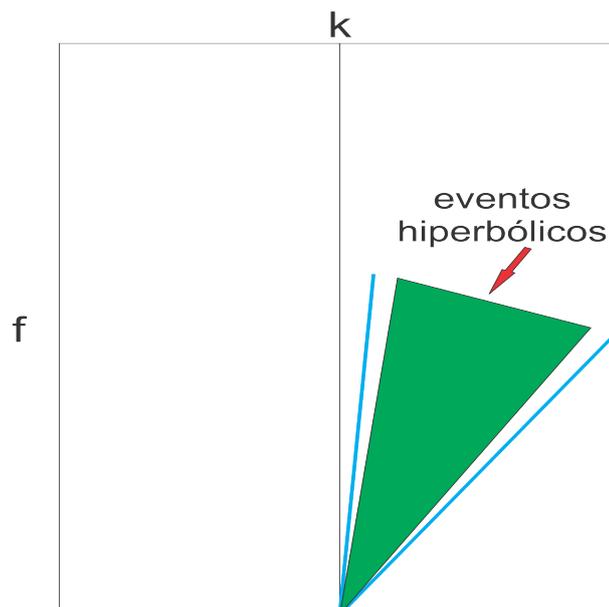
4.1.1 Filtragem $f - k$ (filtragem de mergulho)

A filtragem $f - k$ foi introduzida por (EMBREE et al., 1963) com o objetivo de reduzir ruídos lineares indesejáveis nos dados. A filtragem basea-se no mergulho dos eventos.

Neste método, o dado sísmico registrado é mapeado do domínio tempo-afastamento para o domínio frequência-número de onda, através da transformada de Fourier tanto no tempo quanto e no afastamento. No novo domínio, um filtro é desenhado para atenuar (ou realçar) os eventos de uma determinada região.

A filtragem $f - k$ é muito utilizada para a atenuação de eventos lineares tais como ground-roll, ondas guiadas, etc. Eventos de reflexão múltipla e primária (eventos hiperbólicos) são mapeados na mesma região do domínio $f - k$, cone próximo ao eixo f (ver Figura 4.1).

Figura 4.1 - Esquema do domínio $f - k$ com a representação da localização dos eventos hiperbólicos destacados em verde.



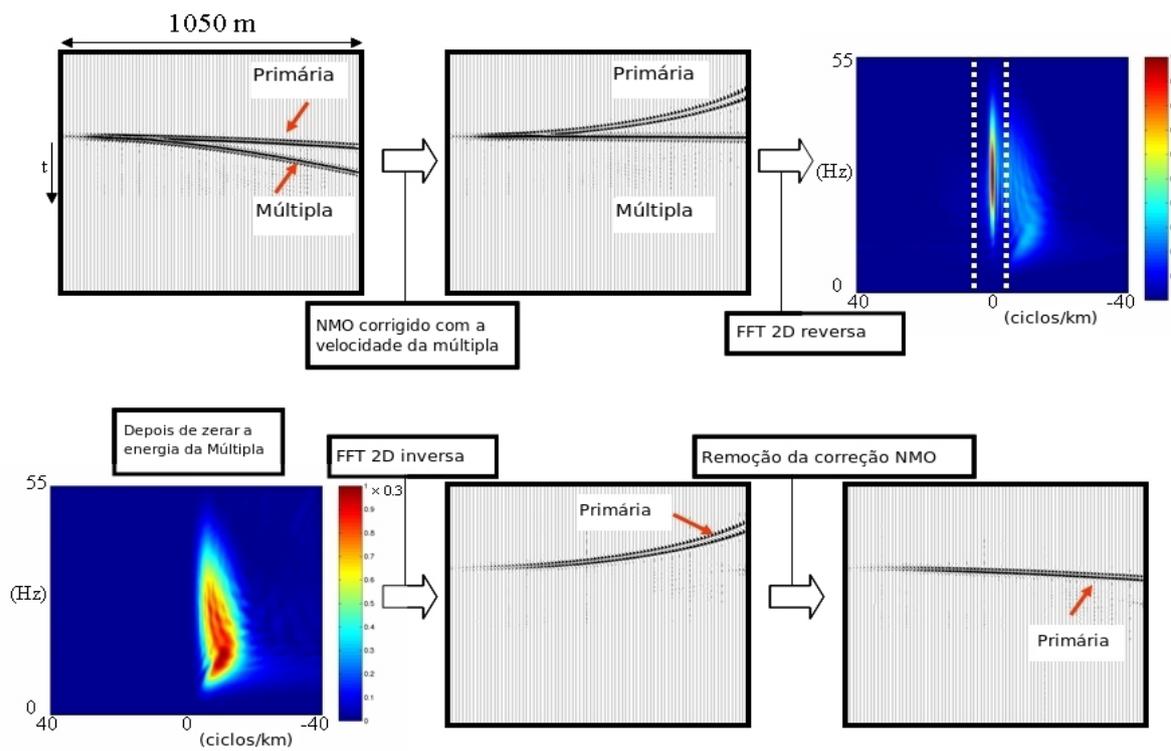
Fonte: Do autor.

Devido a isto, para a utilização desta metodologia na atenuação de reflexões múltiplas

é necessário que antes do mapeamento para o domínio $f - k$ transformar o moveout hiperbólico das reflexões primárias ou múltiplas em moveout linear. Isso pode ser obtido aplicando a correção NMO aos dados, utilizando para isso a velocidade das reflexões primárias ou múltiplas.

Um exemplo é mostrado na Figura 4.2, onde as reflexões múltiplas são horizontalizadas no domínio tempo-afastamento (x, t) através da utilização das velocidades das múltiplas para fazer a correção NMO.

Figura 4.2 - Filtragem $f - k$ para atenuação de múltiplas - As reflexões múltiplas são horizontalizadas no (x, t) através da correção NMO utilizando as velocidades das múltiplas. O dado residual é mapeado para o domínio $f - k$, onde eventos primários e múltiplos estão em regiões distintas, após a aplicação do filtro para a atenuação das múltiplas, o dado é mapeado para o domínio original e por fim é aplicada a correção NMO inversa.



Fonte: (DRAGOSET, 2000).

Em seguida o dado residual da correção NMO é mapeado para o domínio $f - k$. Neste novo domínio, os eventos primários e múltiplos estão em regiões distintas, pode-se então desenhar um filtro para a atenuação da energia das múltiplas. O dado filtrado é mapeado para o domínio original (através da Transformada de Fourier Inversa) e por fim é aplicada a correção NMO inversa.

O evento de múltipla horizontalizado no domínio tempo-afastamento é mapeado em

um evento paralelo ao eixo da frequência no domínio frequência-número de onda (VERSCHUUR, 2006).

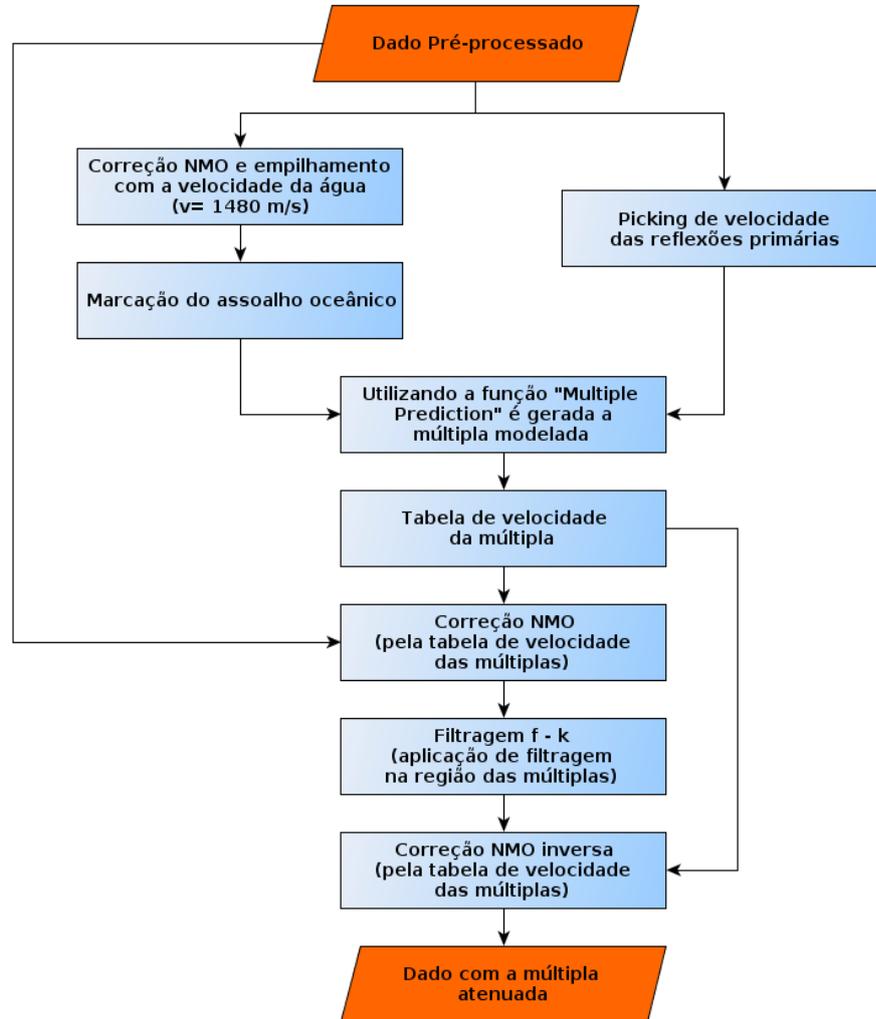
Na Figura 4.3, é apresentado o fluxo utilizado neste trabalho com objetivo de atenuar múltipla do dado 2D através da filtragem $f - k$. Este fluxo mostra o esquema da filtragem $f - k$ que segue as etapas:

- 1) No dado pré-processado é estimada a velocidade RMS dos eventos de primária;
- 2) Feita a correção NMO e empilhamento do dado pré-processado com a velocidade da água ($v = 1480m/s$), realiza-se a marcação do assoalho oceânico;
- 3) Com a velocidade dos eventos de primária e a marcação do assoalho oceânico, é calculada a múltipla do assoalho oceânico, através da função “multiple prediction” presente no Promax. Como um sub-produto é gerada a tabela de velocidades RMS das múltiplas;
- 4) Ao dado pré-processado é realizada a correção NMO utilizando a tabela de velocidades das múltiplas;
- 5) Mapeamento $f - k$ e aplicação de filtro para atenuação da região próxima do eixo f , onde estão as múltiplas;
- 6) Mapeamento inverso ao dado filtrado;
- 7) Correção NMO inversa, utilizando a velocidades das múltiplas. Dado resultante com as múltiplas atenuadas.

A filtragem $f - k$ pode gerar resultados satisfatórios para a atenuação da energia das múltiplas para grandes afastamentos. Entretanto, a energia das múltiplas nos pequenos afastamentos não é atenuada de maneira satisfatória, isto se deve a dificuldade de separar múltiplas de primárias para pequenos afastamentos. Além disso, essa filtragem pode causar distorções no sinal filtrado.

Esta distorção se devem, principalmente, porque a banda de frequência do filtro $f - k$ rejeitada sobrepõe-se na região que possui o sinal de interesse (no domínio $f - k$). Uma possível solução para este problema é apresentada (DUNCAN; BERESFORD, 1994), que consiste na implementação de um filtro adaptativo $f - k$ de vagarosidade, que reduz a distorção e aumenta as características de atenuação do filtro.

Figura 4.3 - Fluxo de utilização para a aplicação da filtragem $f - k$ para a atenuação de múltiplas de superfície.



Fonte: Do autor.

4.1.2 Filtragem Radon

Este método recebeu o nome do matemático tcheco Johann Radon (1887-1956), que foi o responsável pela implementação, em 1917, dos fundamentos matemáticos para a reconstituição de imagens tomográficas de um objeto através das projeções do mesmo (DUARTE, 2009).

A filtragem Radon consiste na aplicação da transformada de Radon no dado sísmico e ao resultado é aplicado um filtro para atenuação ou realce de um determinado evento.

A transformada de Radon é constituída de dois passos: a soma do dado sísmico ao longo de uma curva e o mapeado dessa soma em um novo domínio chamado de domínio de

Radon. De acordo com a curva ao longo da qual o dado sísmico é somado, a transformada de Radon é classificada em (VERSCHUUR, 2006):

- Transformada Radon linear (ou empilhamento oblíquo¹). Esse tipo de transformada, foi proposto por Schultz e Claerbout (1978). O dado sísmico é somado ao longo de retas.
- Transformada Radon hiperbólica - O dado sísmico é somado ao longo de hipérbolas. Este tipo de transformada só mapea eventos sísmicos com moveout hiperbólico. Os eventos de reflexão no domínio tempo-afastamento, são mapeados em pontos, no domínio de Radon.
- Transformada Radon parabólica - Ao dado sísmico é aplicada uma correção NMO e o dado residual, que estará na forma parabólica, com eventos de reflexão sobre ou sub-corrigidos, é somado ao longo do afastamento.

De maneira similar a filtragem $f - k$, em que o dado é mapeado para o domínio $f - k$, na filtragem Radon, o dado é transformado para o domínio de Radon através da transformada de Radon, onde os eventos indesejáveis são removidos através de filtragem.

Entretanto, diferente da transformada de Fourier inversa 2D, a transformação de Radon inversa (que mapeia o dado filtrado para o domínio original) não é uma tarefa simples. Na prática, limitações no lançamento do levantamento e a discretização do dado, fazem com que no mapeamento do domínio de Radon para o domínio tempo-afastamento o dado perca resolução. É então procurada uma estimativa da transformada de Radon, em que as perdas na resolução do dado sejam mínimas. Esta estimativa da inversa é obtida através de inversão no sentido dos mínimos quadrados (YILMAZ, 2001)².

O sucesso da aplicação da filtragem Radon está vinculado ao grau de separabilidade dos eventos de múltipla e primária no domínio Radon, além da transformação inversa desses eventos para o domínio original. O modelo de velocidade é de extrema importância nesse processo. É possível encontrar na literatura muitos trabalhos voltados para o aperfeiçoamento das Transformadas Radon, direta e inversa, com relação ao custo computacional e a busca da inversa aceitável.

4.1.2.1 Transformada Radon linear

A transformada Radon linear é muito similar a transformada $f - k$, ambas decompõem o sinal de entrada em eventos de ondas planas, entretanto a organização da informação

¹do inglês *slant-stack*

²Designação dos esquemas para solução de problemas numéricos que minimizam a soma dos erros quadráticos (DUARTE, 2009).

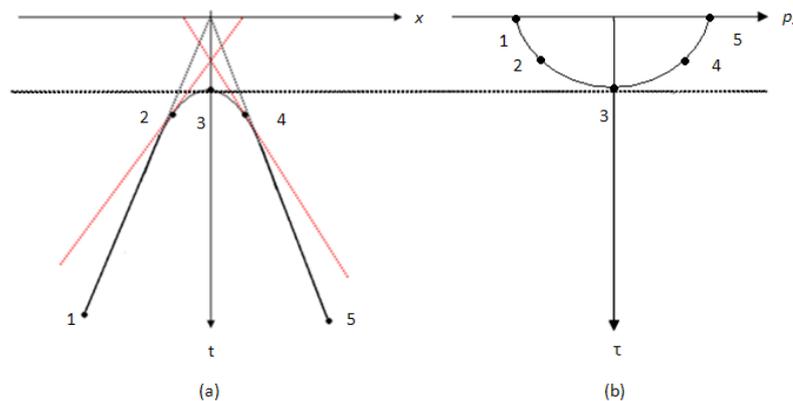
no domínio Radon linear é diferente. O dado sísmico é somado ao longo de retas com inclinação p_x como em:

$$m(p_x, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} d(x, t = \tau + p_x x) dx \quad , \quad (4.1)$$

em que τ é o tempo de intercepção. A função p_x é dependente da variável distância x e é também conhecido como parâmetro do raio horizontal, a qual define uma linha de integração. A escolha deste parâmetro ocasiona, frequentemente, a denominação da transformada linear como $\tau - p$ (τ = tempo de intercepção e p = vagarosidade) ou slant-stack.

Através da transformada de Radon linear, um evento hiperbólico no domínio do tempo-afastamento é mapeado como uma elipse no domínio Radon linear (DIEBOLD; STOFFA, 1981), ver Figura 4.4.

Figura 4.4 - Mapeamento de um evento de reflexão do domínio tempo-afastamento (a) para o domínio domínio de Radon linear (b): retas com diferentes inclinações são construídas. O dado é somado ao longo destas retas. A reta tangente que intercepta o eixo $x = 0$ define o valor de τ para $p_x = 0$ no domínio Radon linear. É mostrado no domínio de Radon a posição de cinco pontos do domínio tempo-afastamento.



Fonte: (VERSCHUUR, 2006).

O domínio de Radon linear é também conhecido como domínio $\tau - p$. O domínio $\tau - p$ tem sido utilizado em muitos casos para filtrar os dados sísmicos e para discriminar intervalos de velocidade. Dependendo da aplicação, em alguns casos não há a necessidade de preservar a amplitude e a fase da onda, podendo ser utilizado o slant-stack (STOFFA, 1989).

O parâmetro do raio (p_x) é definido como a inclinação da linha tangente ao longo de

um evento no domínio do tempo-afastamento o qual segue uma função tempo de trânsito $t(x)$ (VERSCHUUR, 2006):

$$p_x = \frac{\partial t(x)}{\partial x} \quad . \quad (4.2)$$

O valor máximo do parâmetro de raio no domínio Radon depende da máxima inclinação no domínio do tempo-afastamento, ver Figura 4.4. O parâmetro do raio é inversamente proporcional a velocidade de propagação.

A relação entre os domínios $f - k$ e Radon linear é obtida através da transformação do dado no domínio Radon linear por meio da transformada de Fourier, no domínio do tempo de intercepção para frequência (VERSCHUUR, 2006) dado por:

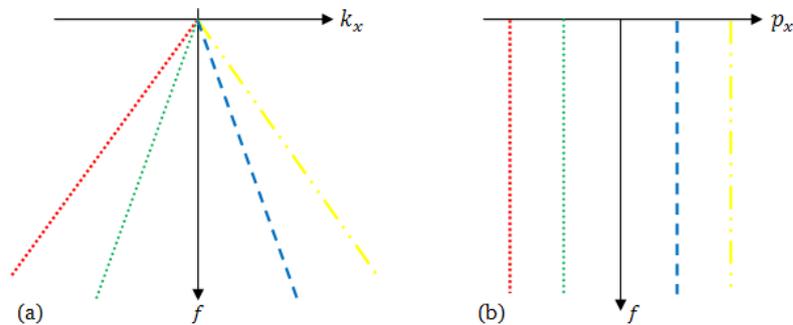
$$M(p_x, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} m(p_x, t) e^{-j2\pi ft} d\tau. \quad (4.3)$$

A relação com o domínio $f - k$ é obtida considerando o fato de que tanto o número de ondas planas k_x e do parâmetro do raio plano p_x estão relacionados com o ângulo de um evento plano. Esta relação pode ser expressada como:

$$k_x = \frac{f}{c} \text{sen}\alpha = \omega p_x \quad . \quad (4.4)$$

O número de onda plana é uma versão escalar do parâmetro do raio plano, ver Figura 4.5.

Figura 4.5 - Relação entre os dados no domínio $f - k$ (a) e no domínio do Radon linear (b). As retas, no domínio $f - k$, que passam pela origem, são retas que estão paralelas ao eixo da frequência, no domínio de Radon alterado pela transformada de Fourier.



Fonte: (VERSCHUUR, 2006).

De acordo com 4.4, a informação no domínio do parâmetro de frequência do raio pode ser obtida a partir do domínio duplo de Fourier por um processo de interpolação, que

mapeia o eixo k_x em um eixo do parâmetro do raio.

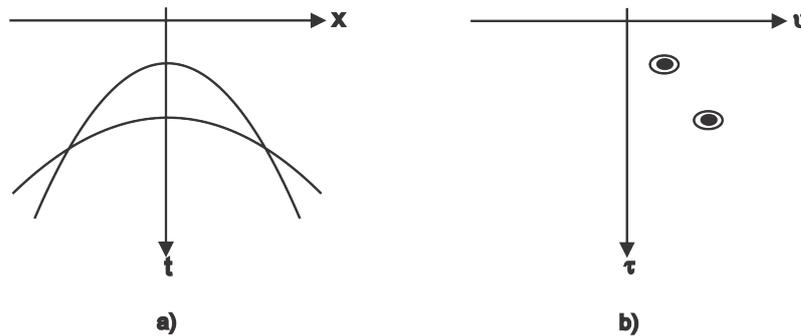
4.1.2.2 Transformada Radon hiperbólica

Na transformada Radon hiperbólica, o dado sísmico é somado ao longo de hipérbolas definida matematicamente como (VERSCHUUR, 2006):

$$m(v, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} d \left(x, t = \sqrt{\tau^2 + \frac{x^2}{v^2}} \right) dx. \quad (4.5)$$

Este tipo de transformação só mapeia eventos hiperbólicos. Na Figura 4.6 é ilustrado o mapeamento de eventos hiperbólicos, no domínio tempo-afastamento, em pontos, o domínio de Radon hiperbólico.

Figura 4.6 - A transformada Radon hiperbólica mapeia eventos hiperbólicos no domínio tempo-afastamento (a) em pontos no domínio de Radon hiperbólico (b).



Fonte: (VERSCHUUR, 2006).

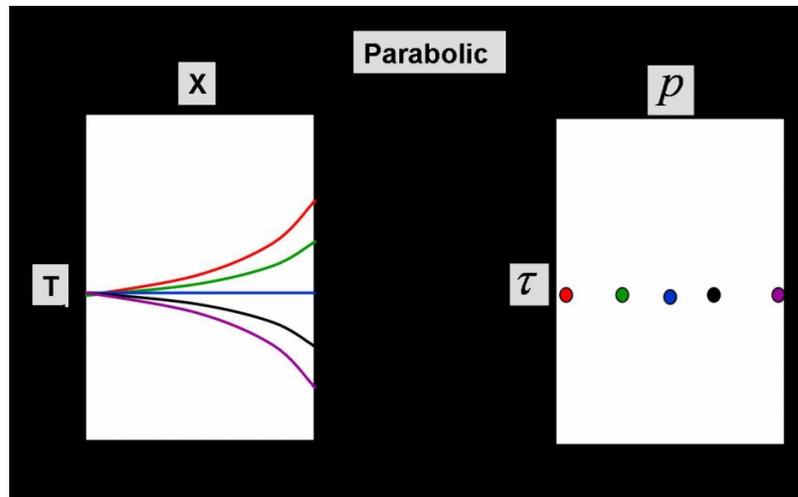
4.1.2.3 Transformada Radon parabólica

Transformada aplicada ao resíduo da correção NMO que é somado ao longo da parábola, definida matematicamente por (VERSCHUUR, 2006):

$$m(q, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} d(x, t = \tau + qx^2) dx. \quad (4.6)$$

O parâmetro q é, frequentemente, referido como o parâmetro de curvatura. Isto significa que os eventos no domínio tempo-afastamento que tem uma forma parabólica serão mapeados em pontos no domínio Radon parabólico, ver Figura 4.7.

Figura 4.7 - A transformada Radon parabólica, mapea o dado residual da correção NMO, que está agora na forma parabólica, no domínio tempo-afastamento (a) em pontos no domínio Radon parabólico (b).



Fonte: (VERSCHUUR, 2006).

O uso da transformada Radon parabólica para separação de primárias e múltiplas foi introduzida por Hampson (1986).

Fazendo a suposição de que após uma correção NMO utilizando velocidades intermediárias entre as velocidades de reflexões múltiplas e primárias, o sobretempo residual das reflexões primárias e múltiplas são descritos por parábolas que diferem na inclinação e portanto, esses eventos são mapeados em regiões distintas. Permitindo uma melhor filtragem das múltiplas gerando resultados melhores quando comparado com o processo de filtragem $f - k$.

Este método deu um enorme impulso para aplicação na atenuação de múltiplas pela discriminação do sobretempo (VERSCHUUR, 2006).

Todavia, os eventos que possuem características lineares no domínio tempo-afastamento não serão mapeados em uma determinada área no domínio do Radon parabólico, resultando na dispersão da energia.

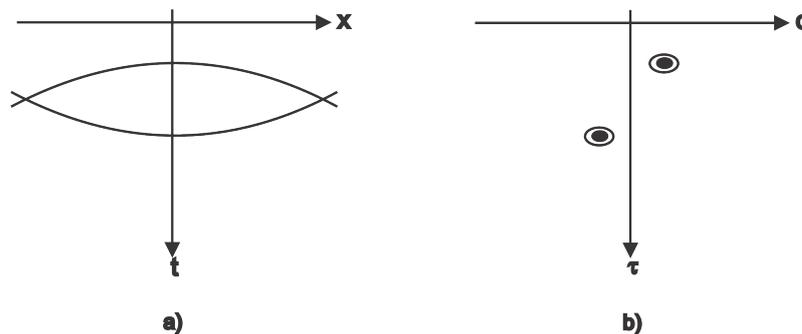
A razão pela qual a transformada Radon parabólica ser uma transformada muito atrativa para a compressão da energia sísmica em pequenas áreas está no fato de que a relação linear entre o tempo t e o tempo de interceptação τ com o operador da transformada parabólica permite um cálculo eficiente da transformada Radon parabólica no domínio da frequência. A transformada Radon parabólica também pode ser calculada no domínio da

frequência, que pode ser matematicamente definida por (VERSCHUUR, 2006):

$$m(q, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} D(x, f) e^{-j2\pi f q x^2} dx. \quad (4.7)$$

A desvantagem desta transformação é que as reflexões sísmicas geralmente não apresentam um sobretempo parabólico, mas sobretempo hiperbólico. Isso é resolvido pela aplicação de uma correção aproximada de sobretempo aos dados antes da transformada Radon parabólica ser calculada. O sobretempo residual dos eventos pode ser melhor aproximado para a forma parabólica, conforme a Figura 4.8.

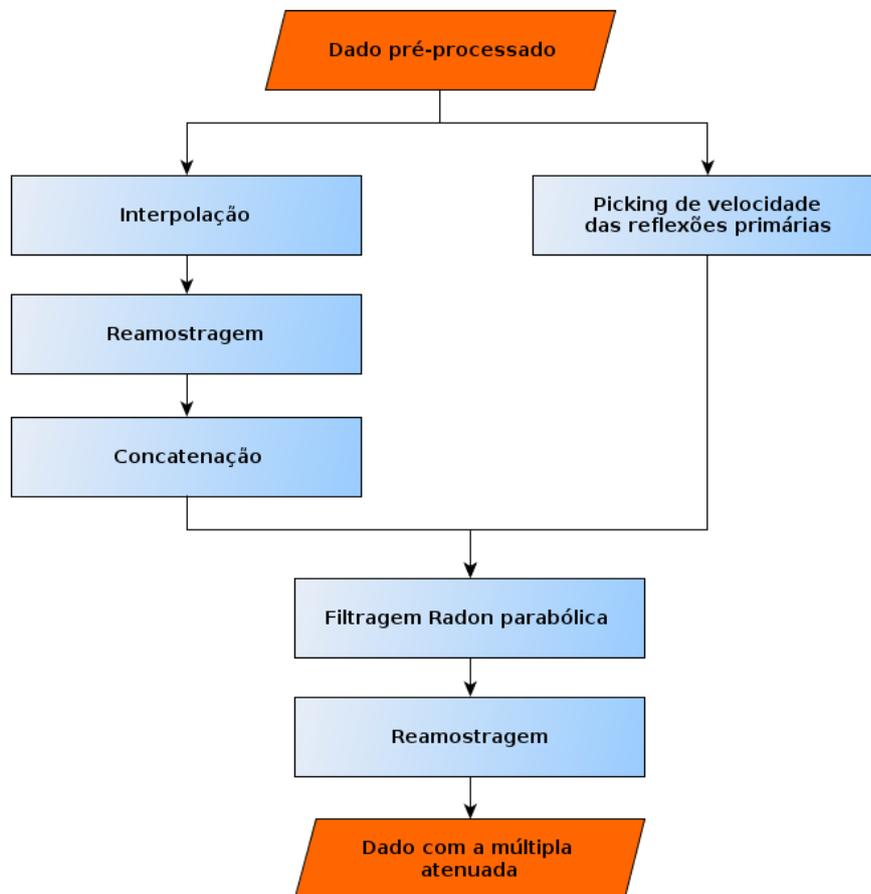
Figura 4.8 - Aplicação de uma correção NMO aproximada dos dados de reflexão sísmica de uma família CMP, uma melhor aproximação do sobretempo residual que está sendo descrito por parábolas é obtida. Eventos curvos ascendentes (ou seja, eventos sobre-corrigidos) estão localizados no quadrante negativo do plano q e eventos curvos descendentes (ou seja, eventos sub-corrigidos) estão localizados no quadrante positivo do plano q .



Fonte: (VERSCHUUR, 2006).

Neste trabalho foi aplicado o Radon parabólico para atenuação de múltiplas de superfície livre, de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 4.9.

Figura 4.9 - Fluxograma da aplicação da filtragem Radon parabólica. Aplica-se uma interpolação aos dados pré-processados, realiza-se a reamostragem dos dados interpolados, concatena-se os dados pré-processados com os das interpolados reamostrados, aplica-se a filtragem Radon parabólica utilizando a tabela de estimativa das velocidades RMS das primárias. A filtragem Radon parabólica obedece ao seguinte esquema: aplica-se a correção NMO direta, de acordo com a tabela de estimativa das velocidades RMS das primárias, aplicação da transformada Radon parabólica direta, filtragem, aplicação da transformada Radon parabólica inversa, correção NMO inversa. Por fim aplica-se a reamostragem aos dados já filtrados obtendo-se os dados de saída.



Fonte: Do autor.

4.2 MÉTODOS BASEADOS NA PERIODICIDADE E PREDITIVIDADE DA MÚLTIPLA

Estes métodos pressupõe que primárias e múltiplas tem uma relação inerente e que as reflexões múltiplas são eventos repetitivos. A partir de pressupostos estatísticos, as múltiplas são então modeladas e subtraídas do dado original (VERSCHUUR, 2006).

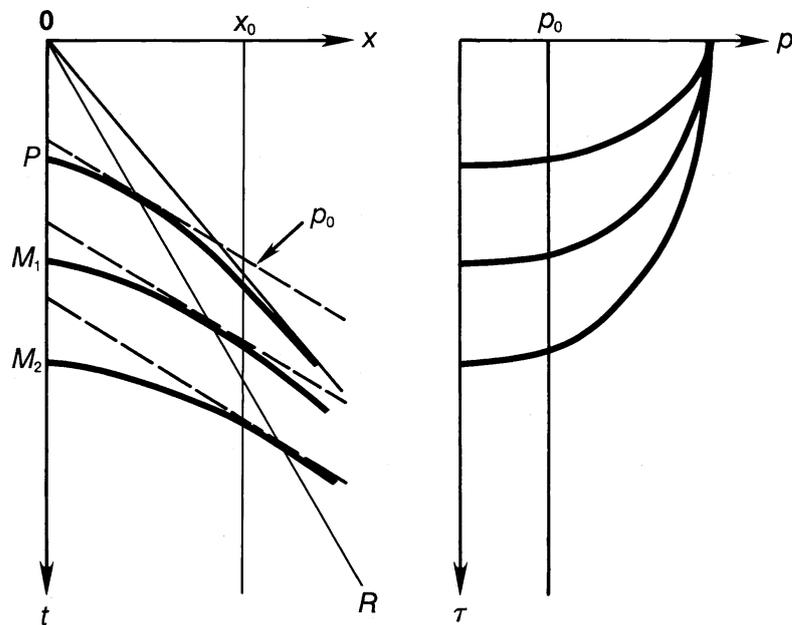
Estes métodos são aplicados em geral nos dados pré-empilhados. São exemplos a

deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ (também conhecido como domínio slant-stack) e o SRME.

4.2.1 Deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$

Nesta metodologia as múltiplas são modeladas no domínio $\tau - p$ (mesmo que slant-stack) através da deconvolução preditiva e em seguida subtraídas do dado inicial, tal como em Alam e Austin (1981) e Treitel et al. (1982). Na Figura 4.10 é mostrado um esboço de uma família de fonte comum com a reflexão primária P , do fundo oceânico, e as múltiplas M_1 e M_2 , esquerda, e a família slant-stack correspondente, a direita. No domínio tempo-afastamento, o tempo de separação entre as múltiplas só é igual para um afastamento particular onde $x = 0$ (YILMAZ, 2001). Assim, a modelagem da múltipla no domínio $\tau - p$ se deve ao fato de que neste domínio a múltipla é periódica e portanto melhor identificada.

Figura 4.10 - Família de fonte comum no domínio tempo-afastamento e família slant-stack. É mostrado a periodicidade das múltiplas ao longo do traço radial OR e o traço p descendente.



Fonte: (YILMAZ, 2001).

Taner (1980) foi o primeiro a mostrar que os tempos de separação entre duas chegadas são iguais ao longo de uma direção radial OR , ver Figura 4.10. Um traço pode ser construído pela extração de amostras ao longo dessa direção radial. O ângulo de propagação é constante ao longo desse traço radial. Um traço radial em um meio formado de camadas

planas horizontais é chamado de traço de snell (CLAERBOUT, 1985). Em um meio com camadas planas e horizontais o traço de snell pode não seguir uma trajetória reta como na Figura 4.10, uma vez que o ângulo de propagação muda para cada camada de acordo com a lei de snell (YILMAZ, 2001).

Na deconvolução preditiva, a reflexão múltipla predita, no tempo $t + \alpha$, a partir da reflexão primária está a um tempo t . O valor α é chamado de lag de predição.

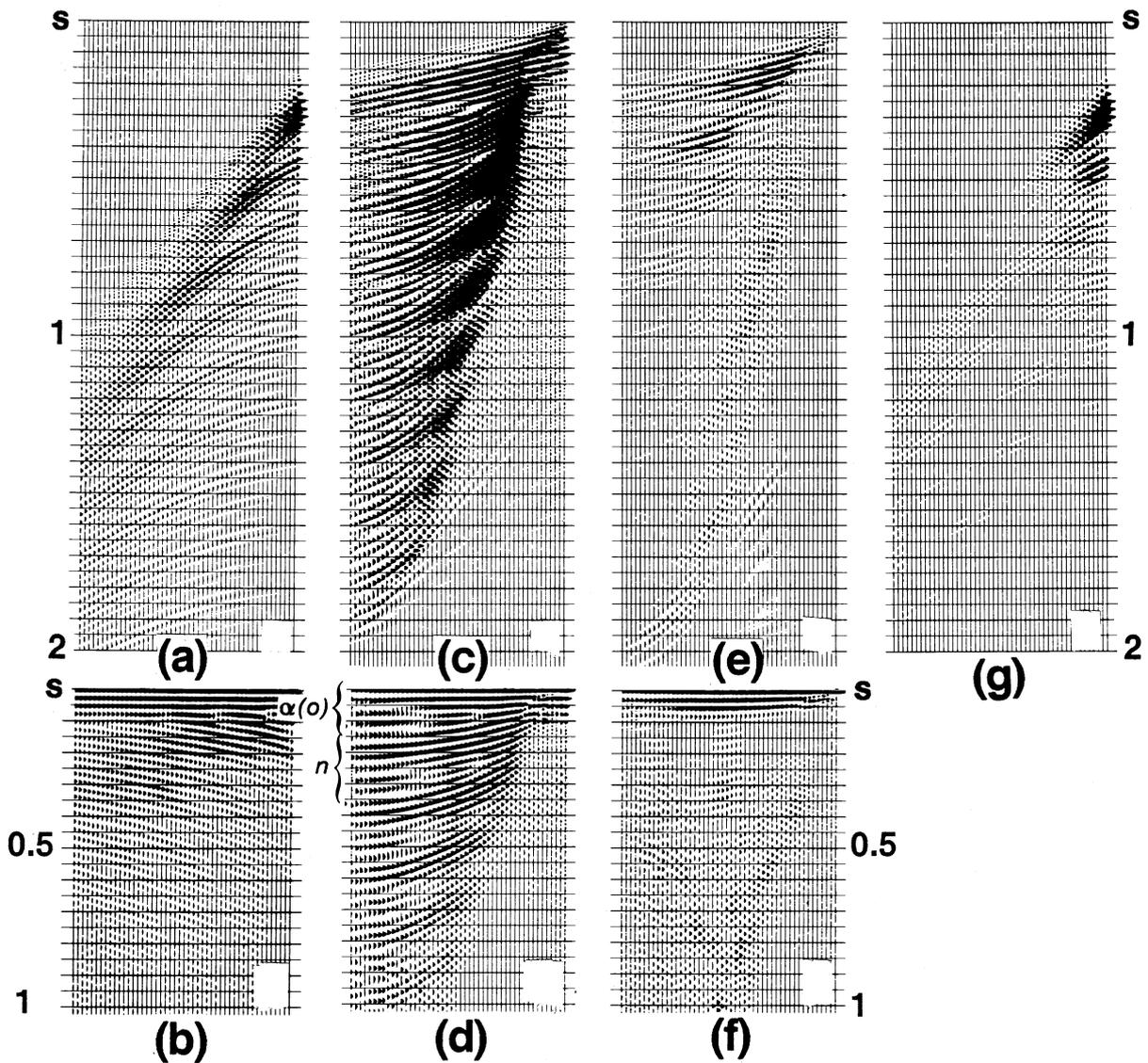
A família de fonte comum mostrada na Figura 4.11a é transformada para o domínio $\tau - p$. As Figuras 4.11c e 4.11e mostram a família slant-stack antes e depois da deconvolução preditiva ser aplicada. A Figura 4.11g mostra a família de tiro comum reconstituída a partir da família slant-stack (Figura 4.11e). A autocorrelação antes e depois da deconvolução preditiva no domínio slant-stack são mostradas abaixo dos respectivos painéis. Diferente da autocorrelação da família de fonte comum mostrada na Figura 4.11b, a natureza periódica das múltiplas no dado é pronunciada na autocorrelação da família slant-stack mostrada na Figura 4.11d. Verifica-se que a periodicidade das múltiplas muda de um traço p para outro. A autocorrelação após a deconvolução preditiva mostra que a energia nos lags é menor que o lag de predição especificado, que é mantido, enquanto a energia da múltipla é atenuada (Figura 4.11f) (YILMAZ, 2001).

O lag de predição α e o comprimento do operador n podem ser especificados através da análise do autocorrelograma da família slant-stack (Figura 4.11d). Esses dois parâmetros são especificados para o traço correspondente ao menor valor de p , como indicado na Figura 4.11d. O comprimento do operador é mantido constante, enquanto o lag de predição é ajustado baseado no valor de p sobre toda a família (ALAM; AUSTIN, 1981) (YILMAZ, 2001):

$$\alpha(p) = \alpha(0)\sqrt{1 - p^2v_w^2} \quad , \quad (4.8)$$

em que $\alpha(0)$ é o lag de predição para $p = 0$ e v_w é a velocidade da reflexão primária, suas múltiplas são alvo para a atenuação. Para altos valores de p , o lag de predição decresce. Comparando a família de fonte comum reconstituída (Figura 4.11g) com a família de fonte comum do dado de entrada (Figura 4.11a), nota-se que a saída contém a primária do fundo oceânico e um resíduo da primeira múltipla (YILMAZ, 2001).

Figura 4.11 - Atenuação de múltiplas no domínio slant-stack. (a) Uma família de tiro comum; (b) seus autocorrelogramas; (c) a família slant-stack; (d) o autocorrelograma de (c); (e) a família slant-stack após a deconvolução preditiva onde o tamanho do operador é 240 ms e o lag de predição de $p = 120$ ms; (f) o autocorrelograma de (e); (g) reconstrução da família de tiro de (e).



Fonte: (YILMAZ, 2001).

A performance da atenuação via slant-stack é analisada na Figura 4.12. A Figura 4.12a mostra uma família de fonte comum que contém uma forte reflexão do fundo do mar A , duas primárias distintas, B e C , múltiplas do fundo do mar, D e E e peg-lags (múltiplas de curta duração), F , as quais estão associadas com o evento primário B . As famílias slant-stack antes e após a deconvolução preditiva são mostradas nas Figuras 4.12b e 4.12d, com suas respectivas autocorrelações (Figura 4.12c e 4.12e). Verifica-se que as múltiplas

são significativamente atenuadas da família reconstituída (Figura 4.12f) (YILMAZ, 2001).

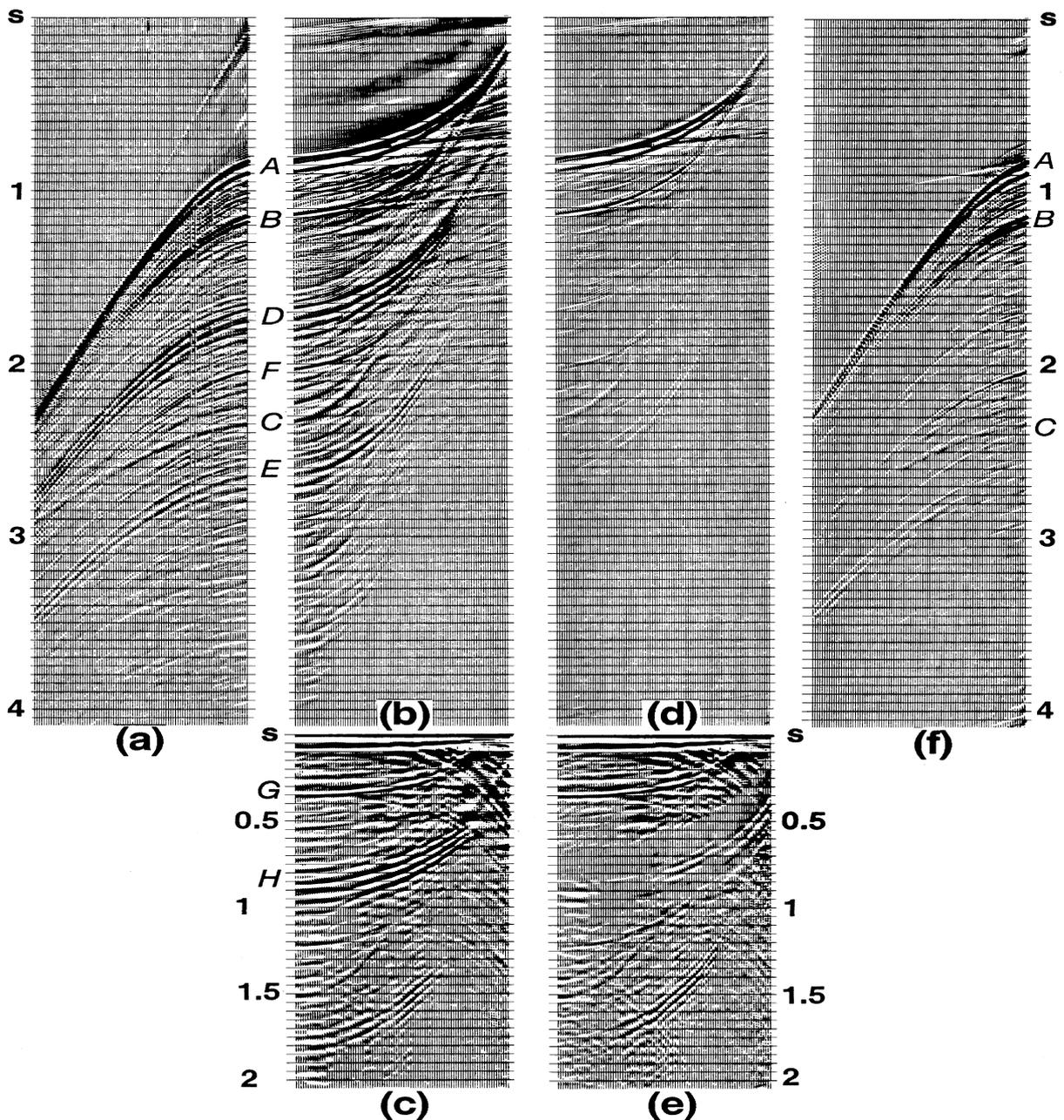
A escolha do lag de predição e o comprimento do operador é complicado para este dado em particular. Da autocorrelação na Figura 4.12c, nota-se a energia G , a qual é causada pela correlação de duas primárias - A e B na Figura 4.12a. A energia H é causada pela correlação das múltiplas do fundo oceânico. O lag de predição é escolhido para reter a energia da primária G e o comprimento do operador é escolhido para incluir a energia da múltipla H . Nota-se na Figura 4.12e que a energia H é significativamente atenuada e a energia da primária G é preservada.

Uma vez que o slant-stack é a decomposição em onda planas e ondas planas não sofrem divergência esférica, o dado slant-stack de entrada não deve ter sofrido processamento para a compensação por espalhamento geométrico. A preservação da relação das amplitudes corretas é essencial para a boa performance da atenuação de múltiplas via slant-stack. A correção de espalhamento geométrico é aplicada pelo uso da velocidade da primária. Isto realça as múltiplas nos dados e destrói a relação existente entre as amplitudes. A deconvolução preditiva no domínio do offset pode então não suprimir essas múltiplas com efetividade.

Para a eliminação de reverberações verifica-se que a aplicação da deconvolução preditiva no domínio do tempo-afastamento apresenta resultados satisfatórios, entretanto, para múltiplas de longo período os melhores resultados da deconvolução preditiva são obtidos no domínio do slant-stack.

Um maior detalhamento poderá ser consultado no Apêndice A

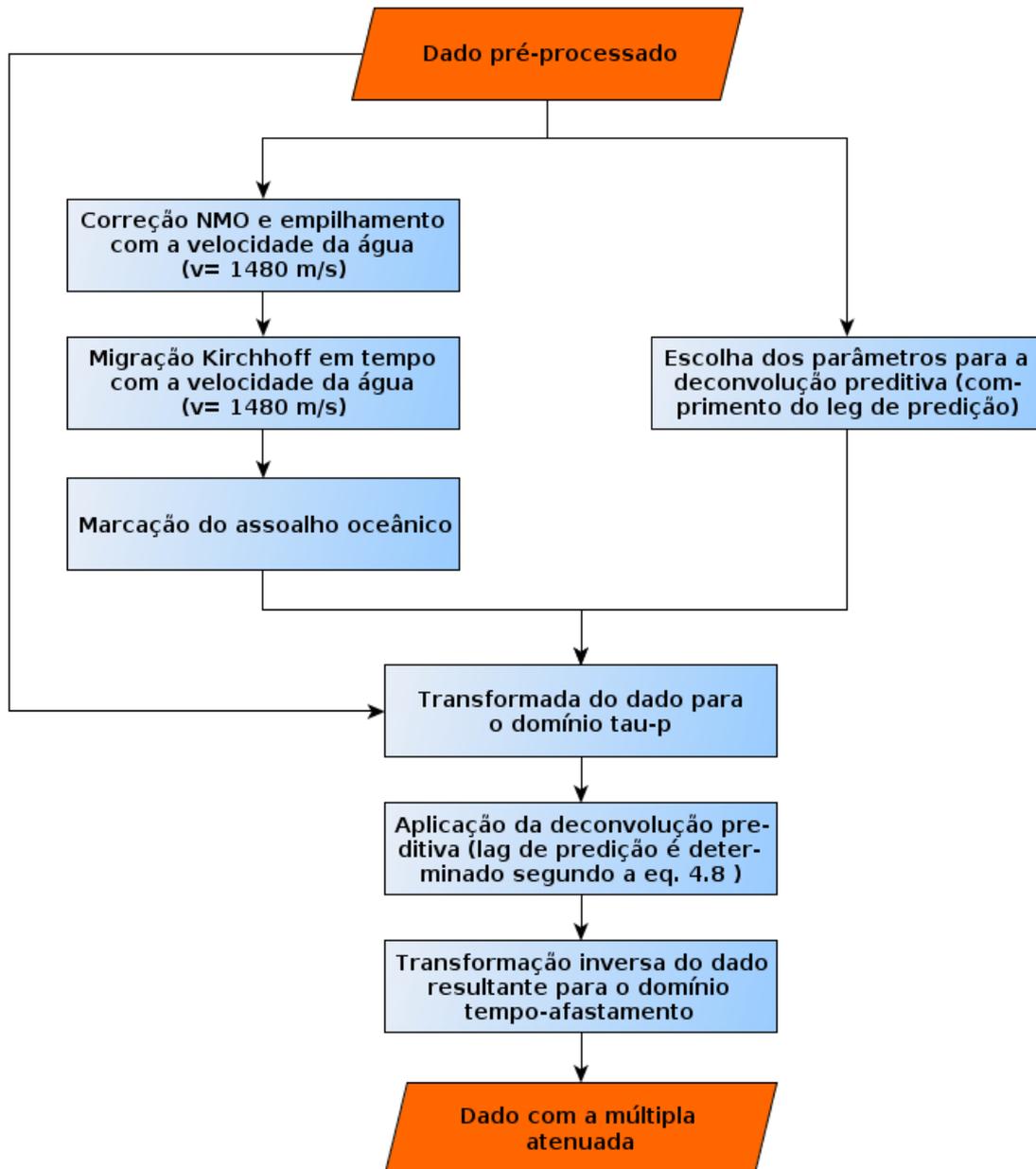
Figura 4.12 - Atenuação de múltiplas no domínio slant-stack. (a) Campo registrado sem correção do espalhamento geométrico. (b) Família slant-stack obtida a partir do dado em (a). (c) Autocorrelação de (b). (d) Família slant-stack após a deconvolução predictiva, o comprimento do operador foi de $n = 400$ ms e o lag de previsão de $\alpha = 700$ ms (para $p = 0$). (e) Autocorrelação de (d). (f) Família de fonte comum em (d) reconstituída.



Fonte: (YILMAZ, 2001).

Neste trabalho a deconvolução predictiva no domínio $\tau - p$ é mostrado no fluxograma da Figura 4.13 abaixo.

Figura 4.13 - Fluxograma da aplicação da deconvolução preditiva no domínio $\tau-p$. Aplica-se a correção NMO com a velocidade da água de 1480 m/s, aplica-se a migração kirchhoff no tempo e marca-se o assoalho oceânico. Paralelamente escolhe-se os parâmetros para a deconvolução preditiva. Aplica-se a transformada $\tau-p$ direta, em seguida aplica-se a deconvolução preditiva, depois aplica-se a transformada $\tau-p$ inversa. O dado resultante estará com as múltiplas atenuadas.



Fonte: Do autor.

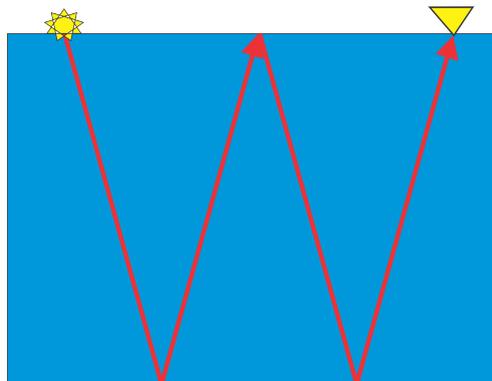
4.2.2 Eliminação de múltiplas relacionadas à superfície - SRME

No **SRME** as múltiplas são modeladas dos dados sísmicos registrados, não havendo portanto a necessidade de informação a priori do meio em subsuperfície, em seguida as múltiplas modeladas são subtraídas do dado original.

Este método foi inicialmente implementado por Anstey (1966) e Anstey e Newman (1966), eles observaram que a convolução de primárias com outros traços geravam reflexões múltiplas relacionadas à superfície livre, de posse desses dados que continham apenas múltiplas, era feita a subtração desses eventos do dado.

As múltiplas de primeira ordem podem ser interpretadas como uma combinação de duas reflexões primárias que são conectadas cada uma por um ponto de reflexão, ver a Figura 4.14.

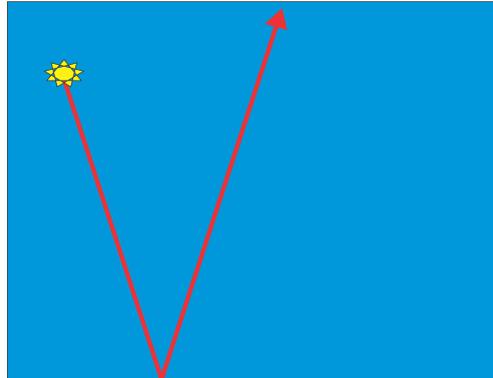
Figura 4.14 - Reflexão múltipla de primeira ordem com a combinação de duas primárias. Nas reflexões primárias, as ondas sofrerão apenas uma reflexão ascendente.



Fonte: Do autor.

Considerando uma onda plana horizontal de banda larga afetando a Terra e a resposta impulsiva da Terra é dada por $x_0(t)$, o campo total medido considerando que a interface água-ar não existe (Figura 4.15) é dado por:

Figura 4.15 - Reflexão primária sofreu apenas uma reflexão ascendente.

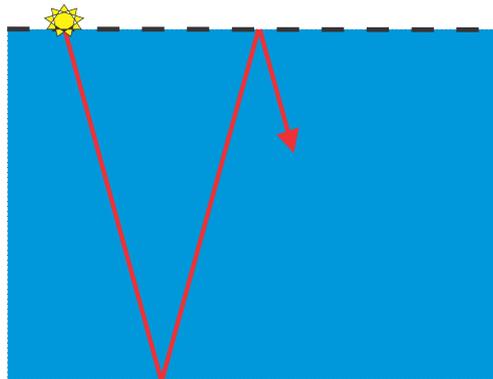


Fonte: Do autor.

$$x_0(t) = x_0(t) * \delta(t) \quad , \quad (4.9)$$

em que $\delta(t)$ é a fonte impulsiva. O campo total, contém todas as reflexões primárias e múltiplas internas. Considerando agora a existencia da interface água-ar, o campo total ao chegar nesta interface será refletido de volta para a sub-superfície (ver Figura 4.16).

Figura 4.16 - Reflexão primária sofreu apenas uma reflexão ascendente.



Fonte: Do autor.

Para um meio $1D$, fonte impulsiva e apenas um par de fonte e receptor, uma inter-

pretação de como as múltiplas de superfície são geradas é dado por:

$$m_1(t) = -x_0(t) * x_0(t) \quad , \quad \text{Múltipla de primeira ordem} \quad (4.10)$$

$$m_2(t) = x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) \quad , \quad \text{Múltipla de segunda ordem} \quad (4.11)$$

⋮

$$m_n(t) = x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) * \dots * x_0(t) \quad , \quad \text{Múltipla de ordem n} \quad (4.12)$$

A resposta total $x(t)$ com todas as múltiplas de superfície, primárias e múltiplas internas é a série:

$$x(t) = x_0(t) - x_0(t) * x_0(t) + x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) - x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) + \dots \quad (4.13)$$

Usando o diagrama de feedback (VERSCHUUR, 2006) a relação implícita entre a resposta com e sem múltiplas no domínio da frequência é dada por:

$$X(f) = X_0(f) - X_0(f)X(f) \quad (4.14)$$

Para modelos 2D, seja $\mathbf{S}(f)$ a matriz no domínio da frequência das assinaturas das N fontes. O campo total com e sem múltiplas para os M receptores no domínio da frequência são dados por:

$$\mathbf{P}(f) = \mathbf{X}(f) * \mathbf{S}(f), \quad \text{e} \quad \mathbf{p}_0(f) = \mathbf{S}_0(f) * \mathbf{S}(f), \quad (4.15)$$

em que $\mathbf{X}(f)$ é a matriz com o campo com múltiplas resposta de fontes impulsivas e $\mathbf{X}_0(f)$ é a matriz com o campo sem múltiplas resposta de fontes impulsivas. Os campos, $\mathbf{P}(f)$ e $\mathbf{P}_0(f)$, são matrizes para frequência de acordo com a Figura 4.17.

A relação implícita entre os campos com e sem múltiplas, de acordo com o diagrama de Feedback (VERSCHUUR, 2006) é dada por:

$$P(f) = P_0(f) - P(f)X_0(f). \quad (4.16)$$

De acordo com a (4.16), para predizer as múltipla de superfície livre, o termo negativo da equação (4.16), é necessária a resposta impulsiva real $X_0(f)$, operando com o campo total, $P(f)$. Uma maneira de remover essa dependência é, considerar o termo $A(f) = S(f)^{-1}$ (inverso da assinatura da fonte) e equação (4.15) aplicada na equação (4.16). Tem-se então:

$$P(f) = P_0(f) + A(f)P_0(f)P(f) \quad (4.17)$$

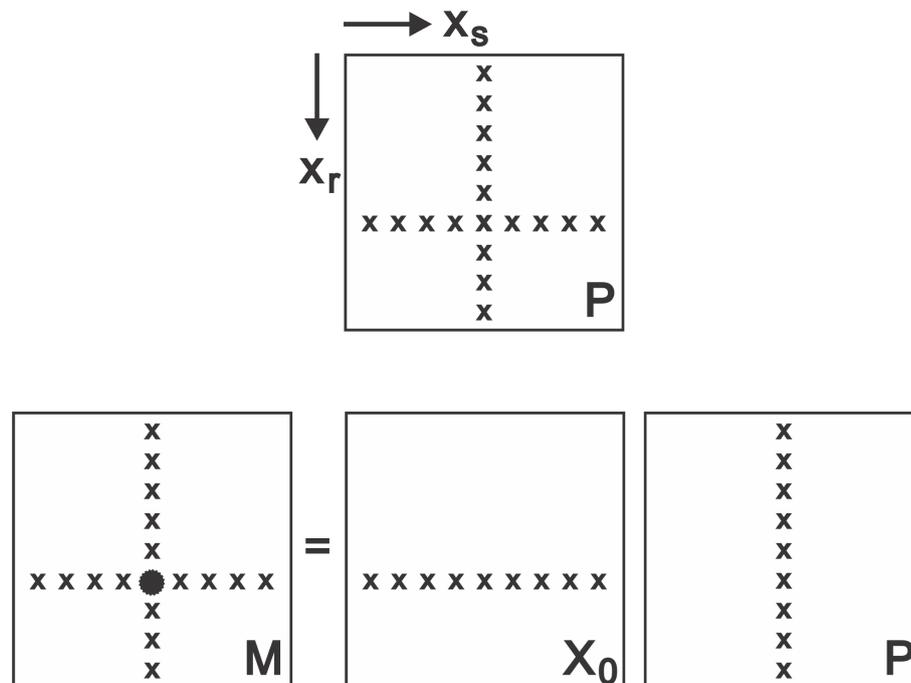
Explicitando o campo livre de múltiplas:

$$P_0(f) = P(f) [1 + A(f)P(f)]^{-1} \quad (4.18)$$

Aproximando por série, o campo livre de múltipla é dado por:

$$P_0(f) = P(f) - A(f)P^2 + A^2(f)P^3 - A^3(f)P^4 + \dots \quad (4.19)$$

Figura 4.17 - A Matriz P contém todos os dados sísmicos pré-empilhamento $P(x_r, x_s, f)$ no domínio da frequência. Cada coluna contém o registro monocromático do dado para cada fonte e a linha contém o registro monocromático para cada receptor. A predição da múltipla pode ser escrita como uma matriz de multiplicação. Um ponto da matriz M é obtida pela combinação da linha da matriz X_0 com a coluna da matriz P



Fonte: Do autor.

Para a determinação do campo sem múltiplas é necessário conhecimento do inverso da assinatura da fonte $A(f)$, que é desconhecida na prática, e de suas potências. Esses valores podem ser estimados, fazendo a inversão de (4.19) minimizando a energia do campo sem múltiplas. A estimativa dos valores de $A(f)$, $A^2(f)$, ..., $A^n(f)$ é não linear e pequenos erros na assinatura da fonte podem gerar grandes resíduos na atenuação das múltiplas.

Berkhout e Verschuur (1997), propuseram uma implementação alternativa, em que o campo livre de múltiplas é estimado de maneira iterativa.

Dada a relação implícita:

$$P_0(f) = P(f) - A(f)P_0(f)P(f) \quad (4.20)$$

De acordo com esta relação, a resposta livre de múltipla requer que o dado livre de múltipla, P_0 já seja conhecido, de acordo com o trabalho apresentado em (BERKHOUT; VERSCHUUR, 1997), considerando que inicialmente o dado livre de múltipla é aproximado por:

$$P_0^0(f) = P(f) \quad (4.21)$$

O termo $A(f)$ é estimado linearmente da equação:

$$P_0(f) = P(f) - A(f)P_0(f)P(f) \quad , \quad (4.22)$$

através da minimização da energia do campo livre de múltiplas no sentido de mínimos quadrados. O novo valor estimado de $A(f)$, é atualizado em:

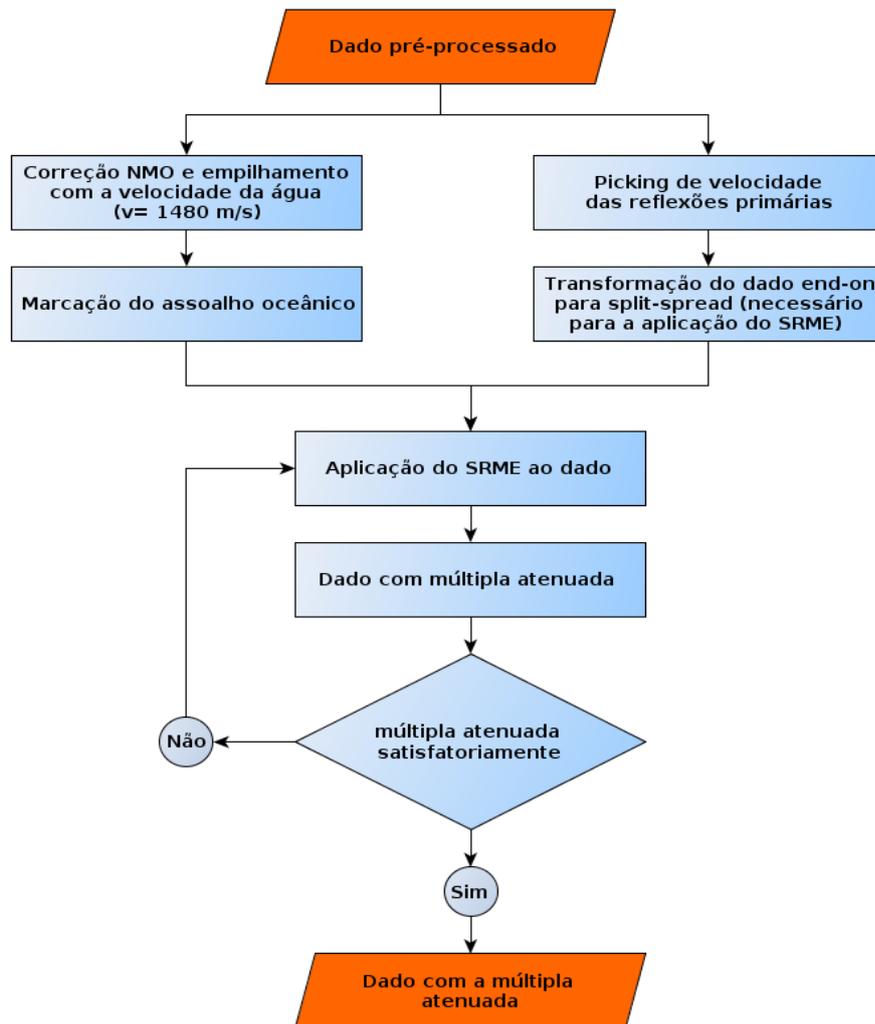
$$P_0^{i+1}(f) = P(f) - A(f)P_0^i(f)P(f) \quad , \quad (4.23)$$

A cada iteração o campo que deve estar livre de múltiplas é atualizado. A estimativa do parâmetro $A(f)$ é um ponto sensível na metodologia do SRME, o resultado do dado com as múltiplas atenuadas depende da subtração entre as múltiplas modeladas e o dado original. Para que essa subtração produza resultados satisfatórios a amplitude das múltiplas modeladas e do dado registrado devem “casar” caso contrário a subtração irá gerar o que chamado de “cicatriz” (resquícios da múltipla modelada ou da múltipla no dado original).

Neste trabalho o SRME foi aplicado a um dado real, segundo o fluxograma apresentado na Figura 4.18, da forma que foi aplicado neste trabalho. De acordo com essa Figura, ainda que o SRME não precise a priori do modelo de velocidade do meio, como o dado real utilizado neste trabalho está no formato end-on, há necessidade de transforma-lo em split-spread e para isso o conhecimento do modelo de velocidade das primárias se faz necessário.

Neste trabalho, será analisado a aplicação de diferentes combinações das metodologias de filtragem $f - k$, filtragem Radon parabólica, deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ e SRME para a atenuação de múltiplas de superfície livre a um dado real 2D da bacia do Jequitinhonha.

Figura 4.18 - Fluxo para eliminação de múltiplas de superfície livre. Aplica-se a correção NMO com a velocidade da água 1480 m/s. Marca-se o assoalho oceânico, paralelamente, utilizando a tabela das estimativas das velocidades RMS das reflexões primárias, converte-se o dado de end-on para split-spread. Então aplica-se o SRME utilizando a marcação do assoalho oceânico e o dado em split-spread. O dado resultante estará com as múltiplas atenuadas.



Fonte: Do autor.

5 O DADO REAL

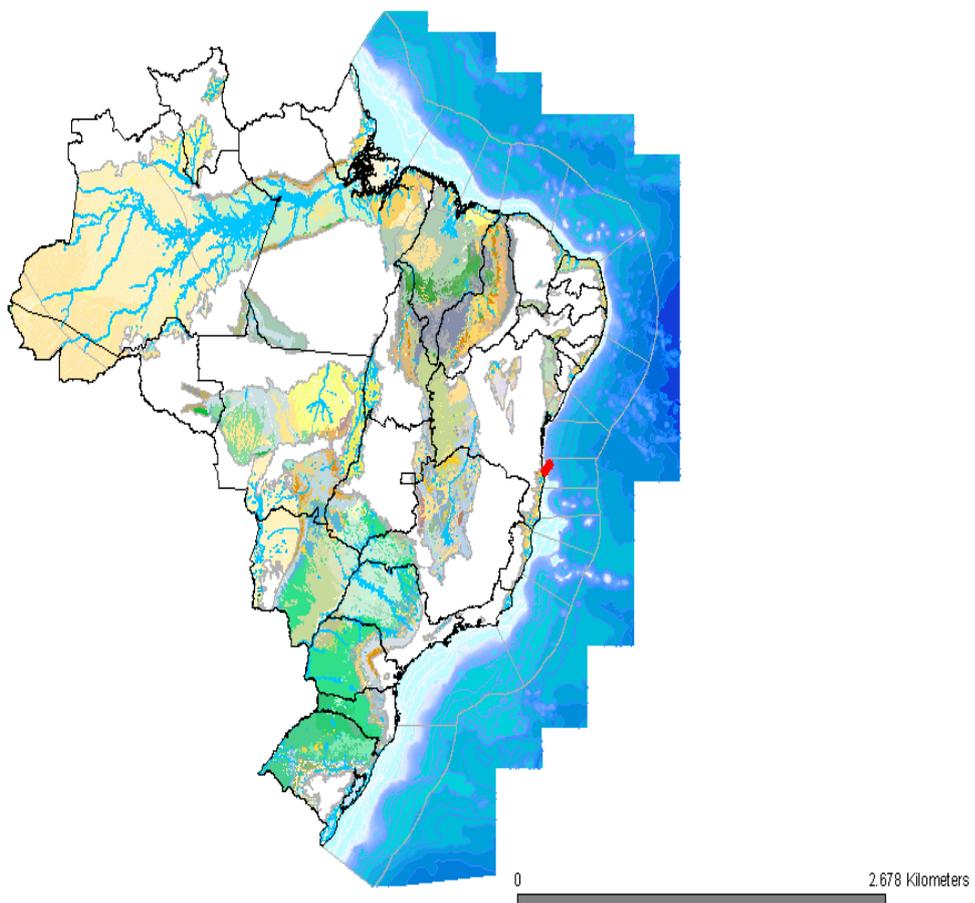
Nesse capítulo, as informações como: localização, informações geológicas, tipo de levantamento e geometria de aquisição sobre o dado real 2D marinho utilizado neste trabalho são apresentadas.

5.1 LOCALIZAÇÃO

A linha 2D foi adquirida em uma região localizada 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 conforme podemos ver nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3. De uma área de 10.000 Km², apenas 500 Km² pertencem a região terrestre. Na região de plataforma marítima, a batimetria varia de 50m à 3.000m de profundidade (MOHRIAK, 2003).

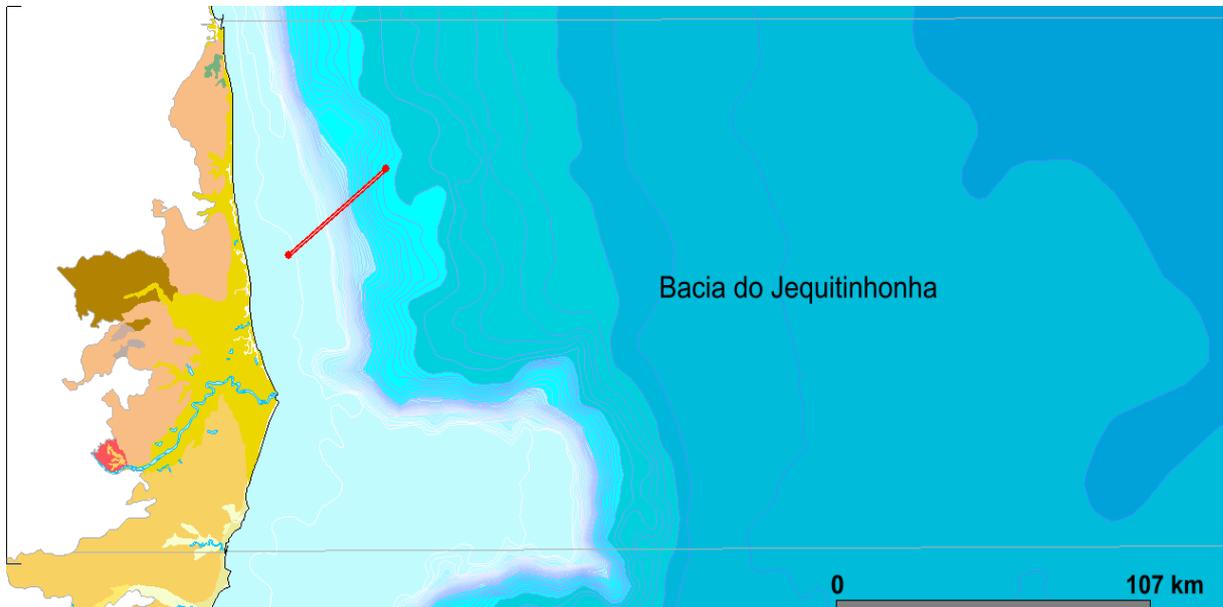
Esta região de estudo apresenta uma geologia muito complexa onde aconteceram muitas modificações topográficas, devido aos eventos geológicos (rift, tectônica, etc) ocorridos durante um longo período na separação dos continentes. A Figura 5.4 mostra a complexidade dos resultados da tectônica local.

Figura 5.1 - Este esquema mostra a localização da linha 0214-0266 da Bacia do Jequitinhonha, identificada pelo ponto vermelho no mapa.



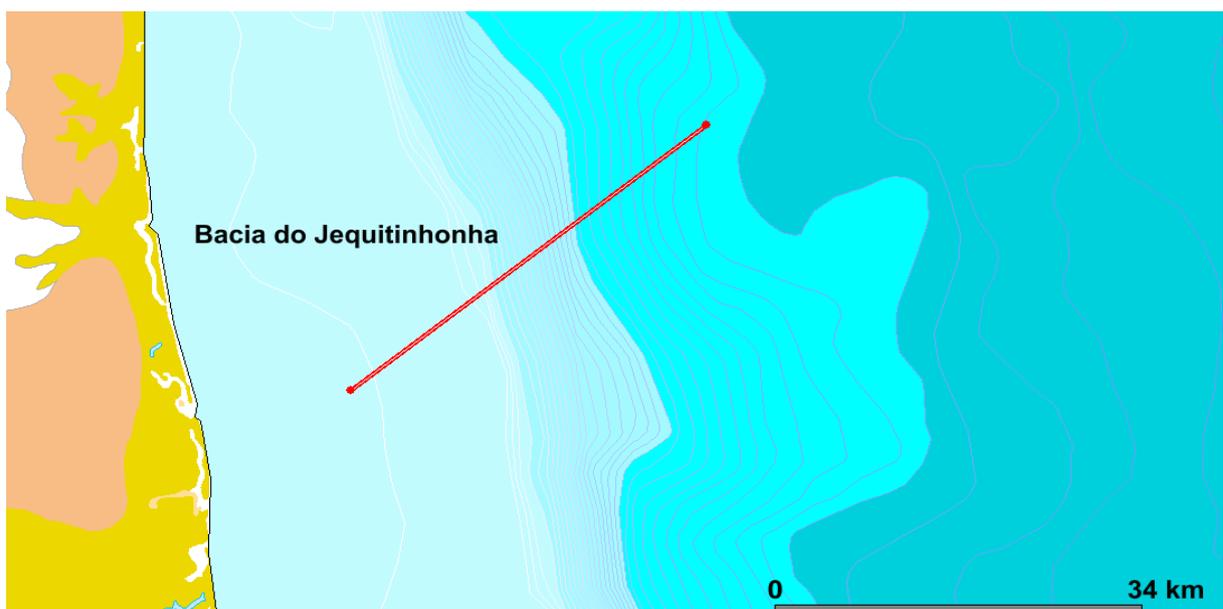
Fonte: ANP(2011).

Figura 5.2 - Este esquema mostra a localização da linha 0214-0266 da Bacia do Jequitinhonha, onde a linha vermelha indica o local do levantamento.



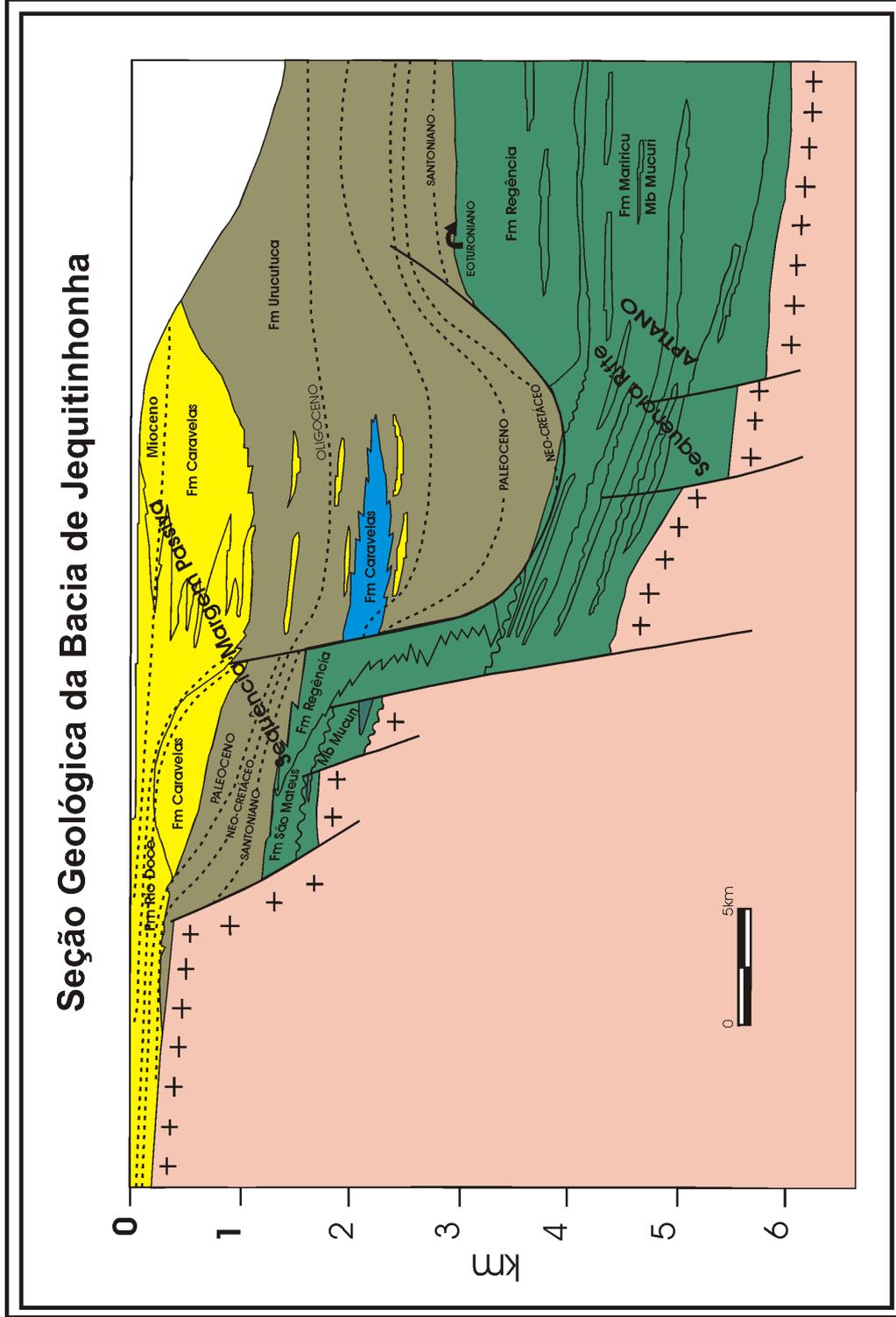
Fonte: ANP(2011).

Figura 5.3 - Este esquema mostra a localização da linha 0214-0266 da Bacia do Jequitinhonha, onde a linha vermelha indica o local do levantamento.



Fonte: ANP(2011).

Figura 5.4 - Esquema mostra uma Seção Geológica da Bacia do Jequitinhonha.

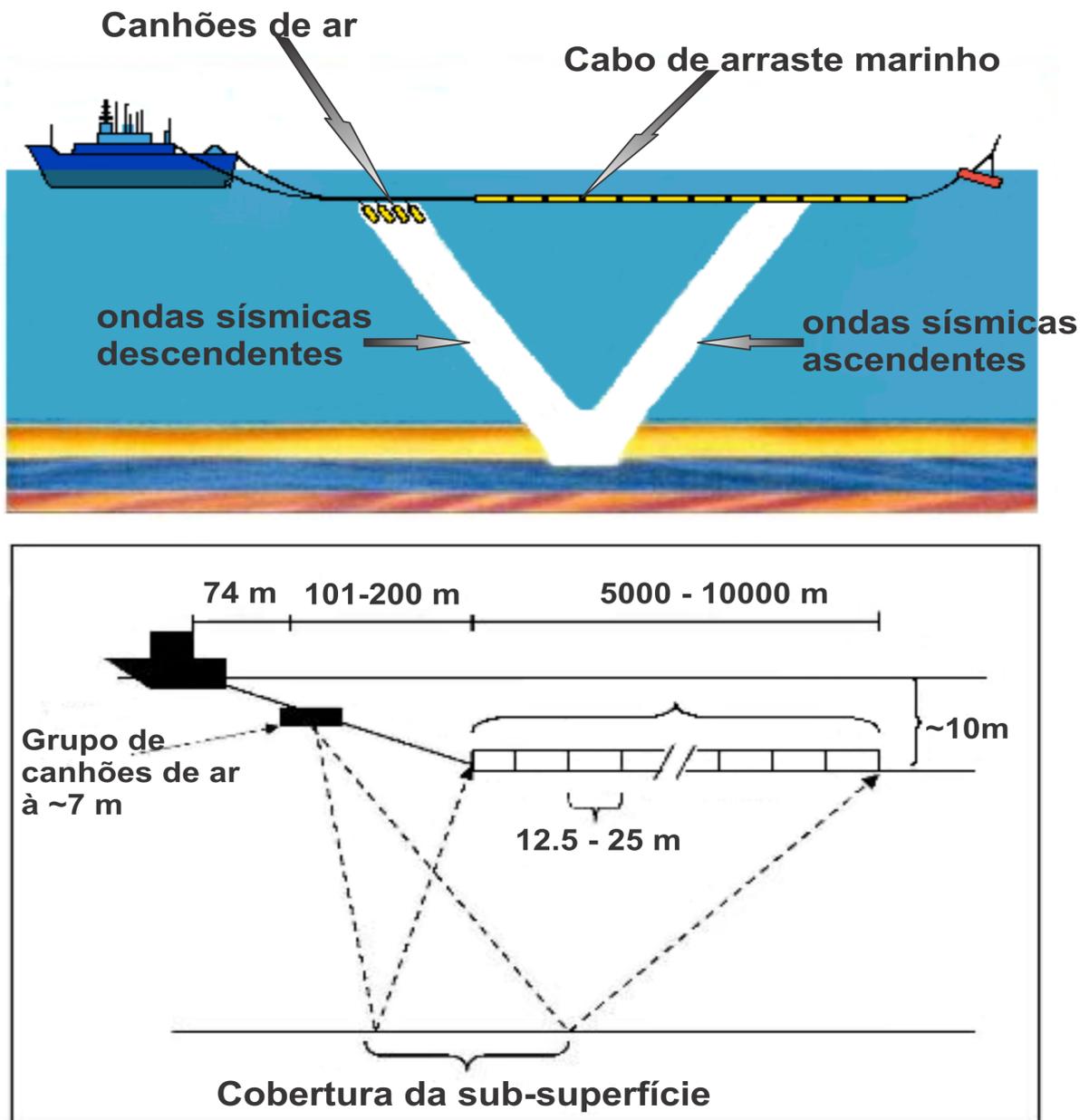


Fonte: CPRM(2011).

5.2 GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO

A aquisição marinha realizada foi a de arraste de cabo marinho (Mariner Tower Streamer), Figura 5.5, 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.

Figura 5.5 - Esquema que mostra como é feita a aquisição 2D de arraste de cabo marinho.



Fonte: Modificado de (IKELLE; AMUNDSEN, 2005).

Nesse tipo de levantamento, em geral os cabos têm de três a dezesseis quilômetros de comprimento e são preenchidos com fluidos de baixa densidade, para que possam flutuar. São 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.

A linha utilizada neste trabalho é uma linha 2D do tipo dip¹, conhecida como linha 66, cujo comprimento do lanço² é de 3125m. Os detalhes sobre a geometria de aquisição são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Detalhes da configuração do levantamento da linha 0214-0266 da Bacia do Jequitinhonha.

Especificações	Dados
Número de receptores	120
Intervalo entre receptores	25
Profundidade do cabo	10.5m
Número de tiros	1577
Intervalo entre tiros	25m
Profundidade da fonte	9m
Tempo de registro	7s
Afastamento mínimo	150m
Afastamento máximo	3125m
Extensão do levantamento	39.425m
Discretização	4ms

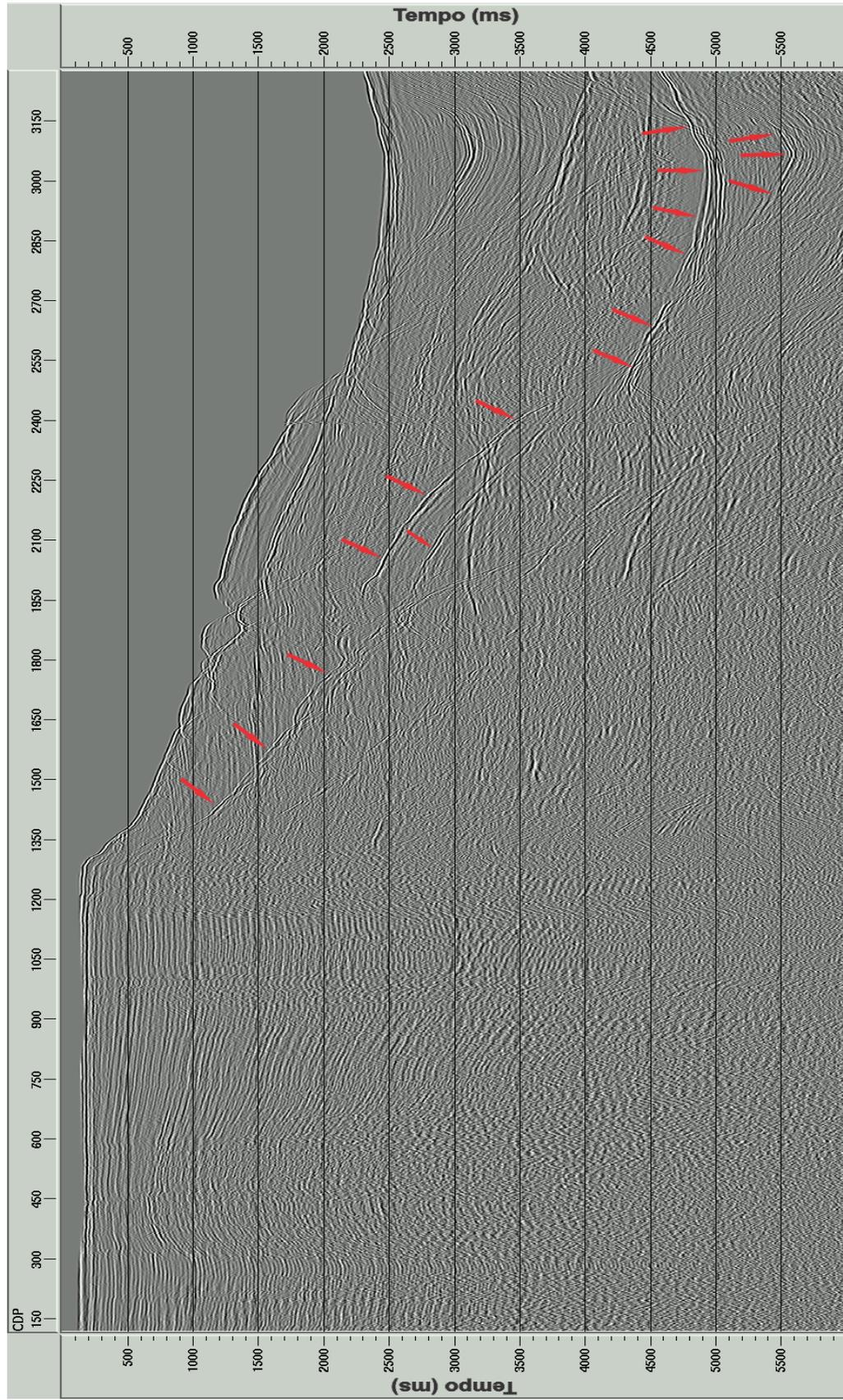
Nesse tipo de aquisição (marinha) a interface ar-água gerar as chamadas reflexões de superfície livre. Essas reflexões múltiplas são acentuadas levando a interpretações erradas da seção sísmica e podendo mascarar refletores mais profundos.

A parte da linha 66 mais rasa (com lâmina de água de 34m até 74m) apresenta diversos tipos de múltiplas. Na parte mais profunda, (com lâmina de água de 76m até 1830m) as múltiplas de superfície livre são identificáveis a partir de 1000ms. Isto é verificado na Figura 5.6, onde os dados foram organizados em afastamento comum de 150m. Nesta Figura as múltiplas estão assinaladas por setas vermelhas.

¹Perpendicular a região entre as plataformas continental e marítima.

²Distância entre o ponto de tiro e os hidrofones.

Figura 5.6 - Seção sísmica editada, organizada em offset mínimo de 150m, da linha 0214-0266 da Bacia do Jequitinhonha apresentando algumas ocorrências de múltiplas de superfície livre e múltiplas internas, com indicação em vermelho.



Fonte: Do autor.

Em todas as seções sísmicas mostradas neste trabalho apresentam um controle de ganho automático (AGC)³, com o valor da janela de 500ms. Todo o processamento da linha 0214-0266 foi realizado no Pacote de Processamento PROMAX⁴.

³Do inglês: Automatic Gain Control

⁴Software de processamento da empresa Landmark.

6 TÉCNICAS PARA A ATENUAÇÃO DE MÚLTIPLAS DE SUPERFÍCIE

Neste capítulo as técnicas de atenuação se superfície livre de filtragem $f-k$, filtragem Radon, SRME e Deconvolução Preditiva no Domínio $\tau - p$, são aplicadas a linha 2D real marinha 0214-0266 (linha 66 daqui por diante). Os fluxos de processamento com essas técnicas separadas e combinadas são analisados. O objetivo é a determinação de um fluxo ótimo de atenuação de múltiplas de superfície.

6.1 FLUXOS DE PROCESSAMENTO

Os fluxos para a atenuação de múltiplas de superfície foram aplicados nos dados já pré-processados. O pré-processamento consistiu em: carregar a geometria do levantamento de acordo com o relatório de campo e fazer a edição dos traços, que consistiu no silenciamento de dados ruidosos, aplicação do silenciamento da coluna de água e aplicação de filtro de banda-passante¹.

Os fluxos para a atenuação de múltipla de superfície são apresentados nas Figuras 6.1 a 6.4 e descritos a seguir:

- Fluxo A - processamento convencional, aplicado de acordo com a Figura 2.3 do Capítulo 2.
- Fluxo B - (Figura 6.1) No dado pré-processado é feita uma estimativa da velocidade RMS. Em seguida essa estimativa é utilizada para correção NMO e logo após é aplicada a filtragem $f - k$. Múltiplas e primárias devem ser mapeadas em diferentes regiões, sendo que as primárias são mapeadas no primeiro quadrante e as múltiplas serão mapeadas sobre o eixo das frequências e assim as múltiplas podem ser atenuadas.
- Fluxo C - (Figura 6.1) O dado pré-processado é transformado do domínio tempo-afastamento para o domínio $\tau - p$. Nesse domínio eventos de múltiplas e primárias são mapeadas em regiões distintas. Em seguida é aplicada a deconvolução preditiva. As escolhas do comprimento do operador e do leg de predição foi feito de acordo com o apresentado em (YILMAZ, 2001), discutido no capítulo 4 e no apêndice A.

¹As frequências de corte utilizadas 8 – 12, 5 – 40 – 50.

- Fluxo D - (6.1) No dado pré-processado é feita uma estimativa da velocidade RMS dos eventos de primária. Em seguida é feita a correção NMO e as primárias ficam aproximadamente horizontalizadas e as múltiplas apresentam sobretempo parabólico. A transformação para o domínio $t_0 - p$ é aplicado e esse resíduo da correção NMO, em seguida é feita a filtragem Radon parabólica (detalhes da metodologia ver capítulo 4).
- Fluxo E - (Figura 6.1) No dado pré-processado é feita uma estimativa da velocidade RMS. Essa velocidade será utilizada para a transformação dos dados que são do tipo end-on (dados medidos em apenas um lado da fonte) para dados tipo split-spread (dados medidos nos dois lados da fonte). Para a aplicação do SRME, há a necessidade da construção de dados em ambos os lados da fonte para pequenos afastamentos, assim ainda que o SRME não utilize informação sobre o modelo de velocidade em sub-superfície, este é necessário para a aplicação do SRME, caso o dado medido esteja na configuração end-on. Além da transformação dos dados para o tipo split-spread, há necessidade de marcação do assoalho oceânico, para a construção das múltiplas do mesmo. Detalhes da metodologia são apresentados no capítulo 4.

Como será mostrada na próxima seção, a aplicação das metodologias em separado não são suficientes para a atenuação das múltiplas de superfície de maneira satisfatória, foram então testadas possíveis combinações entre essas metodologias. Estas combinações são apresentadas nos fluxos de F à P. Utilizaremos por conversão o sinal positivo “+” para simbolizar a combinação de metodologias.

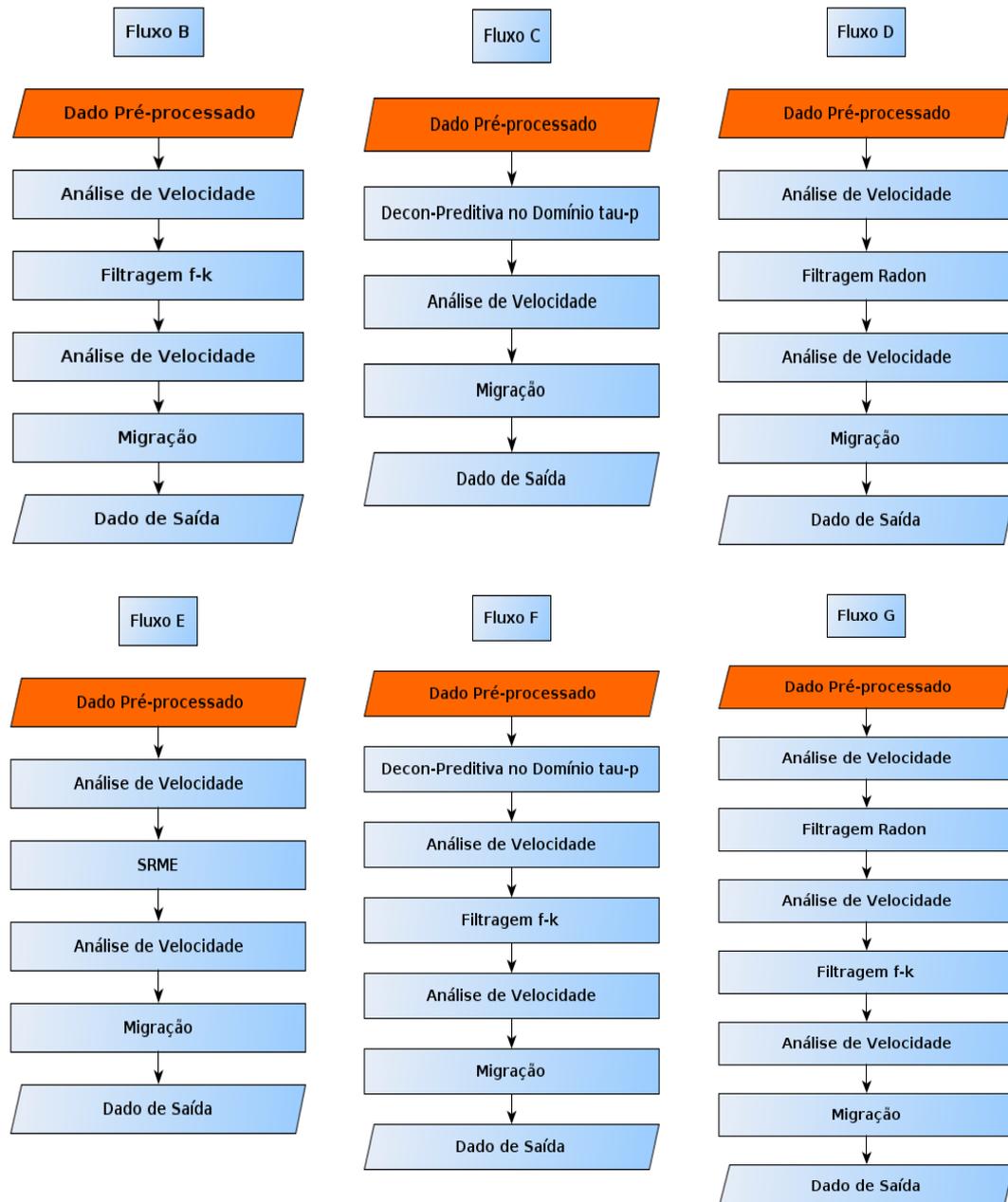
- Fluxo F - (Figura 6.1) É aplicada uma combinação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem $f - k$. Inicialmente aplica-se a deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$, da mesma forma que a aplicada no Fluxo C. Então, considerando que parte das múltiplas de superfície são atenuadas é feita uma estimativa da velocidade RMS, em seguida a filtragem $f - k$ é aplicada.
- Fluxo G - (Figura 6.1) Neste fluxo é aplicada uma combinação da filtragem Radon + filtragem $f - k$. Inicialmente ao dado pré-processado é feita uma estimativa da velocidade RMS. Após a correção NMO os dados são transformados para o domínio $t_0 - p$ e a filtragem Radon é aplicada, considerando que parte das múltiplas de superfície são atenuadas, é aplicada nova análise de velocidade RMS dos eventos de primária. Em seguida a filtragem $f - k$ é aplicada.
- Fluxo H - (Figura 6.2) Neste fluxo é aplicada uma combinação do método SRME + a filtragem $f - k$. Inicialmente ao dado pré-processado é feita uma estimativa da

velocidade RMS. O método SRME é então aplicado. Considerando que parte das múltiplas de superfície são atenuadas, é aplicada uma nova análise de velocidade RMS dos eventos de primária. Então a filtragem $f - k$ é aplicada.

- Fluxo I - (Figura 6.2) Neste fluxo é aplicada uma combinação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon. Inicialmente o dado pré-processado é transformado para o domínio $\tau - p$ e a deconvolução preditiva é aplicada da mesma forma que o realizado no Fluxo C. Em seguida, considerando que parte das múltiplas de superfície são atenuadas, é aplicada uma análise de velocidade RMS dos eventos de primária e então ao dado corrigido do efeito NMO e transformado para o domínio $t_0 - p$ é aplicada a filtragem Radon.
- Fluxo J - (Figura 6.2) Neste fluxo é aplicada uma combinação do método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$. Inicialmente ao dado pré-processado é feita uma estimativa da velocidade RMS. Em seguida é aplicado ao dado o método SRME. Depois transforma-se o dado para o domínio $\tau - p$ e aplica-se a deconvolução preditiva.
- Fluxo K - (Figura 6.3) Neste fluxo é aplicada uma combinação do método SRME + filtragem Radon. Essa combinação já foi analisada em outros trabalhos como em (MENDONÇA, 2009) e (TAVARES, 2009). Inicialmente ao dado pré-processado é feita uma estimativa da velocidade RMS. Em seguida é aplicado ao dado o método SRME. Uma nova análise de velocidade RMS é feita nos dados cuja múltipla foi atenuada e então a filtragem Radon é aplicada.
- Fluxo L - (Figura 6.3) Neste fluxo é aplicada a combinação entre três metodologias de atenuação de múltiplas de superfície: método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem $f - k$. Inicialmente ao dado pré-processado é feita uma estimativa da velocidade RMS. Em seguida é aplicado ao dado o método SRME. Considerando que parte das múltiplas de superfície são atenuadas, é aplicada a deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$. Ao dado resultante é aplicada uma nova análise de velocidade RMS dos eventos de primária, depois a filtragem $f - k$ é aplicada ao dado.
- Fluxo M - (Figura 6.3) Neste fluxo é aplicada a combinação entre três metodologias de atenuação de múltiplas de superfície: deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon + filtragem $f - k$. Neste dado são aplicadas duas análises de velocidade RMS. Inicialmente a deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ é aplicada. Considerando que parte das múltiplas de superfície são atenuadas, é feita uma estimativa da velocidade RMS. Em seguida é aplicada ao dado a filtragem Radon. Por fim, logo após nova análise de velocidade RMS é então aplicada a filtragem $f - k$.

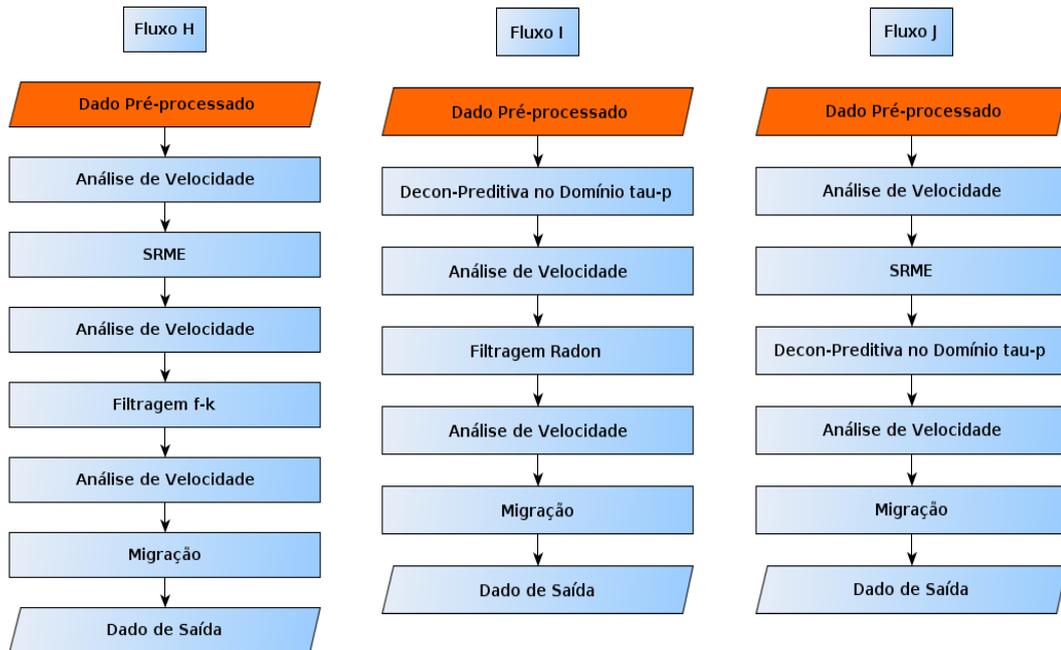
- Fluxo N - (Figura 6.4) Neste fluxo é aplicada a combinação entre três metodologias de atenuação de múltiplas de superfície: método SRME + filtragem Radon + filtragem $f - k$. Neste dado são aplicadas três análises de velocidade RMS a medida que as metodologias são aplicadas aos dados, com objetivo de se fazer o picking apenas de dados de reflexão primária. Inicialmente ao dado pré-processado é feita uma estimativa da velocidade RMS. Em seguida é aplicado o método SRME. Então após uma nova análise de velocidade RMS é aplicado ao dado a filtragem Radon. Uma nova análise de velocidade RMS é feita e por fim é aplicada a filtragem $f - k$.
- Fluxo O - (Figura 6.4) Neste fluxo é aplicada a combinação entre três metodologias de atenuação de múltiplas de superfície, o que muda em relação aos dois fluxos anteriores é que são combinados: método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon. São feitas duas análises de velocidade. Inicialmente é feita uma análise de velocidade RMS e depois aplica-se o método SRME. Em seguida é aplicado ao dado a deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$. Então após uma nova análise de velocidade RMS é aplicado a filtragem Radon.
- Fluxo P - (Figura 6.4) Neste fluxo as quatro metodologias aplicadas são combinadas. Foram elas: método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon + filtragem $f - k$. Com o objetivo de refinar o modelo de velocidade RMS utilizado e assim melhorar a performance da metodologia de atenuação. Antes da aplicação de cada metodologia uma análise de velocidade RMS foi realizada exceto para a deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$.

Figura 6.1 - São apresentados os Fluxos de B a G onde respectivamente: a filtragem $f - k$, a deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$, a filtragem Radon, o método SRME, a combinação: filtragem $f - k$ + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ e a combinação: filtragem $f - k$ + filtragem Radon são aplicados a linha 66. Em todos os fluxos a etapa de pré-processamento foi a mesma. Detalhes sobre as sub-etapas das metodologias de atenuação estão no capítulo 4, Figuras 4.3, 4.9, 4.13 e 4.18.



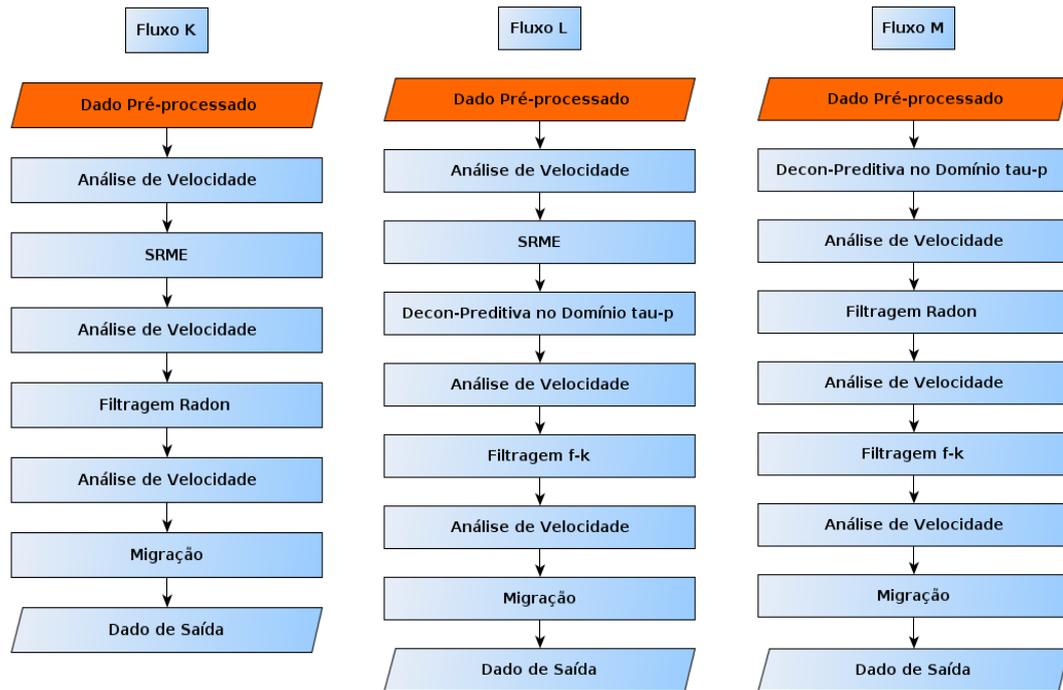
Fonte: Do autor.

Figura 6.2 - São apresentados respectivamente os Fluxos de H a J aplicados a linha 66 com objetivo de atenuar as múltiplas de superfície. No Fluxo H, foi aplicada a combinação: O método SRME + filtragem $f - k$. No Fluxo I, é aplicada a combinação: deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon. No Fluxo J, é aplicada a combinação: do método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$.



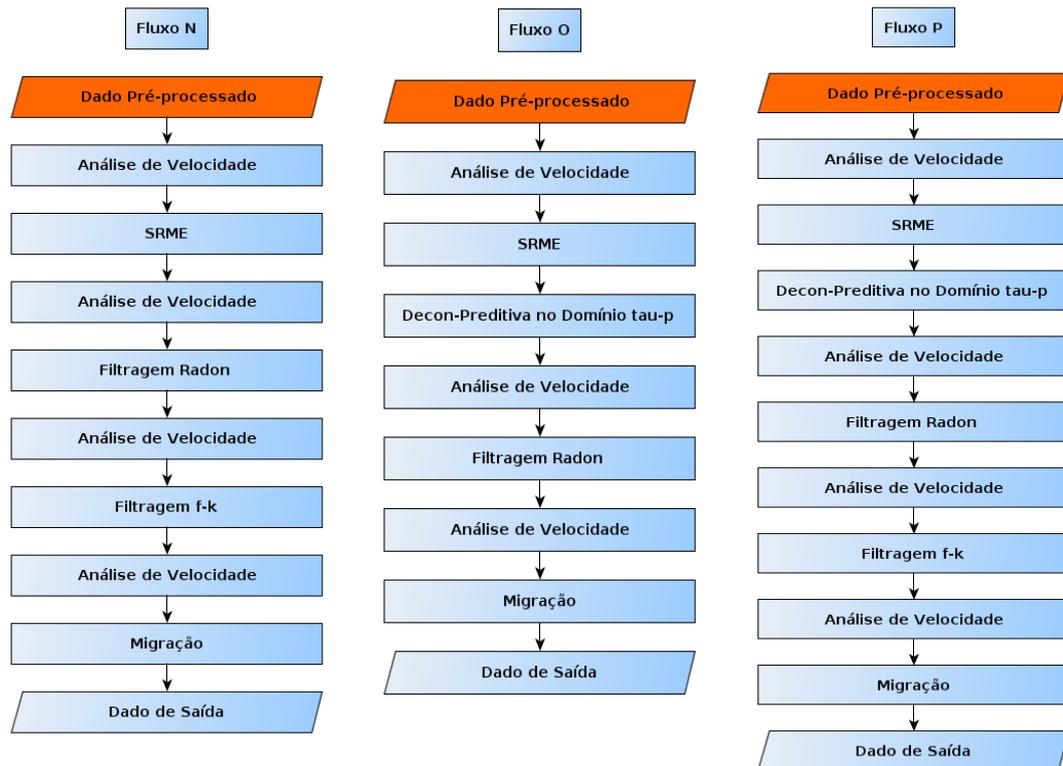
Fonte: Do autor.

Figura 6.3 - São apresentados respectivamente os Fluxos de K a M aplicados a linha 66 com objetivo de atenuar as múltiplas de superfície. No Fluxo K, é aplicada a combinação: do método SRME + filtragem Radon. No Fluxo L, é aplicada a combinação: do método SRME + filtragem $f - k$ + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$. No Fluxo M, foi aplicada a combinação: da filtragem $f - k$ + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon.



Fonte: O autor.

Figura 6.4 - Nesta Figura são apresentados os Fluxos de N a P aplicados a linha 66 com objetivo de atenuar as múltiplas de superfície. No Fluxo N, é aplicada a combinação: do método SRME + filtragem $f - k$ + filtragem Radon. No Fluxo O, é aplicada a combinação: da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + método SRME + filtragem Radon. No Fluxo P, é feita a combinação de todas as metodologias apresentadas neste trabalho: método SRME + filtragem $f - k$ + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon.



Fonte: Do autor.

Os dados processados de acordo com esses fluxos serão comparados com o Fluxo A, apresentado na Figura 2.3 do capítulo 2, onde apenas o processamento convencional é aplicado.

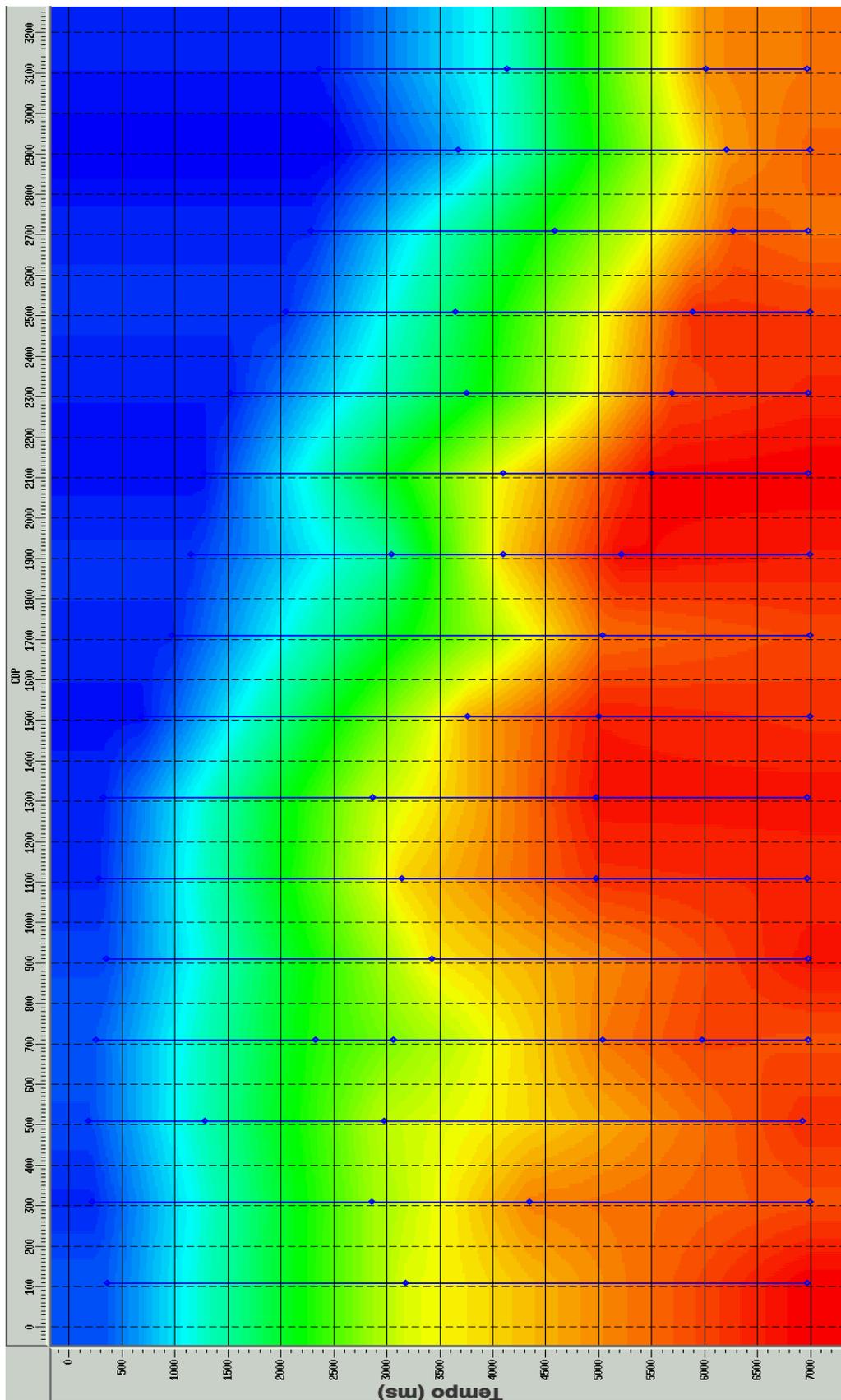
Antes da aplicação de qualquer uma das metodologias, foi realizada a estimativa da velocidade RMS para todos os Fluxos exceto para o Fluxo C (Figura 6.1). A velocidade RMS é fundamental para aplicação dos métodos de atenuação de múltipla baseados na diferença de comportamento espacial entre reflexões primárias e reflexões múltiplas, apresentados nos Fluxos B, D e G, e nas combinações desses métodos com os métodos baseados na periodicidade e preditividade, Fluxos F, H, L, M, N e P.

Mesmo para os fluxos que aplicam o método SRME, há a estimativa da velocidade RMS, Fluxos E, J, K e O, pois ainda que o método SRME seja um método baseado na periodicidade e preditividade, portanto, em teoria não precisa de informação do modelo

de velocidade RMS em sub-superfície, para a aplicação do fluxo com o método SRME, há necessidade dos dados estarem organizados na forma split-spread² para pequenos afastamentos. Para a realização da transformação os dados medidos em apenas um lado da fonte para dados medidos nos dois lados da fonte, há necessidade da velocidade RMS. Na Figura 6.5 é mostrado o mapa de velocidades RMS interpoladas a partir das velocidades estimadas a cada 200 CMP's. Os CMP's estão identificados na Figura pelos pontos em azul. As velocidades variando de 1480m/s até 4000m/s.

²split spread: lanço simétrico. Método de registro sísmico no qual o ponto de tiro ocupa uma posição aproximadamente central, em relação às estações receptoras (DUARTE, 2009).

Figura 6.5 - Mapa de velocidades RMS interpoladas a partir das velocidades RMS estimadas a cada 200 CMP's. As velocidades variam de 1480m/s até 4000m/s.

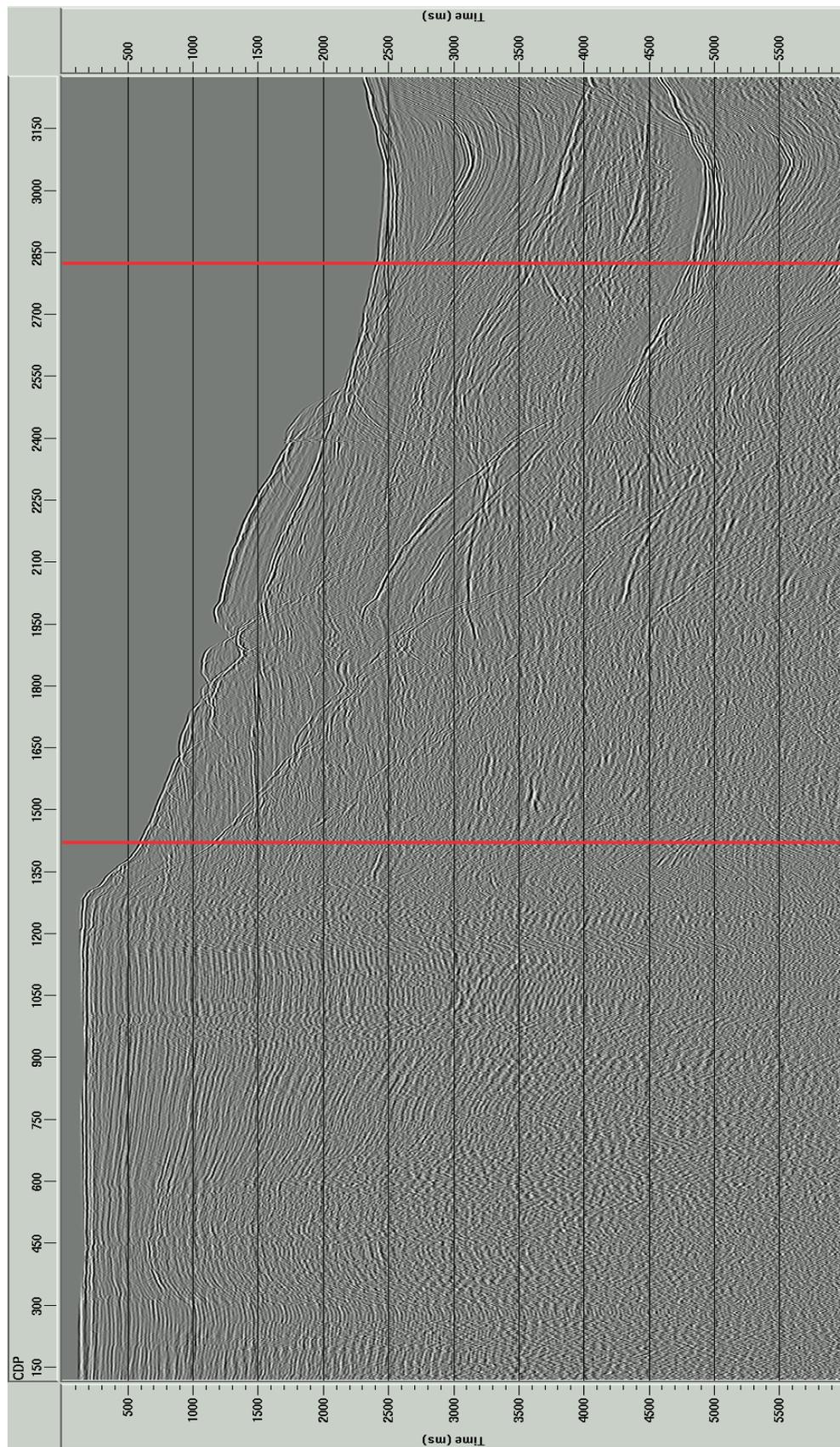


Fonte: Do autor.

Os resultados após a aplicação dos fluxos foram analisados de duas maneiras:

- Através de dados organizados em famílias CMP's. Foram escolhidas duas famílias de CMP's para serem analisadas mostradas na Figura 6.6, representadas por linhas vermelhas. A análise dos dados organizados dessa maneira será denominado nesse trabalho de Análise de família CMP.
- Através dos dados organizados em afastamento mínimo comum, Figura 5.6, os dados estão organizados em afastamento mínimo comum de 150m, é fácil a visualização de múltiplas de superfície começando no CMP 1320 no tempo 560ms. Essa análise foi feita a todos os dados resultantes dos fluxos de atenuação e como os resultado dessa análise só confirmam os resultados obtidos pela análise anterior, só foi apresentado, na seção Análise dos dados organizados em afastamento mínimo, os melhores resultados para atenuação de múltiplas de superfície.

Figura 6.6 - Linha 66, sem edição, organizado em afastamento mínimo comum de 150m. A posição das duas famílias CMP's usadas para a análise dos Fluxos de atenuação de múltiplas estão assinalados pela linha vermelha, são eles o CMP 1420 e CMP 2820. Nos dois a múltipla de superfície de primeira ordem é observada em 1170ms e 4810ms, respectivamente.

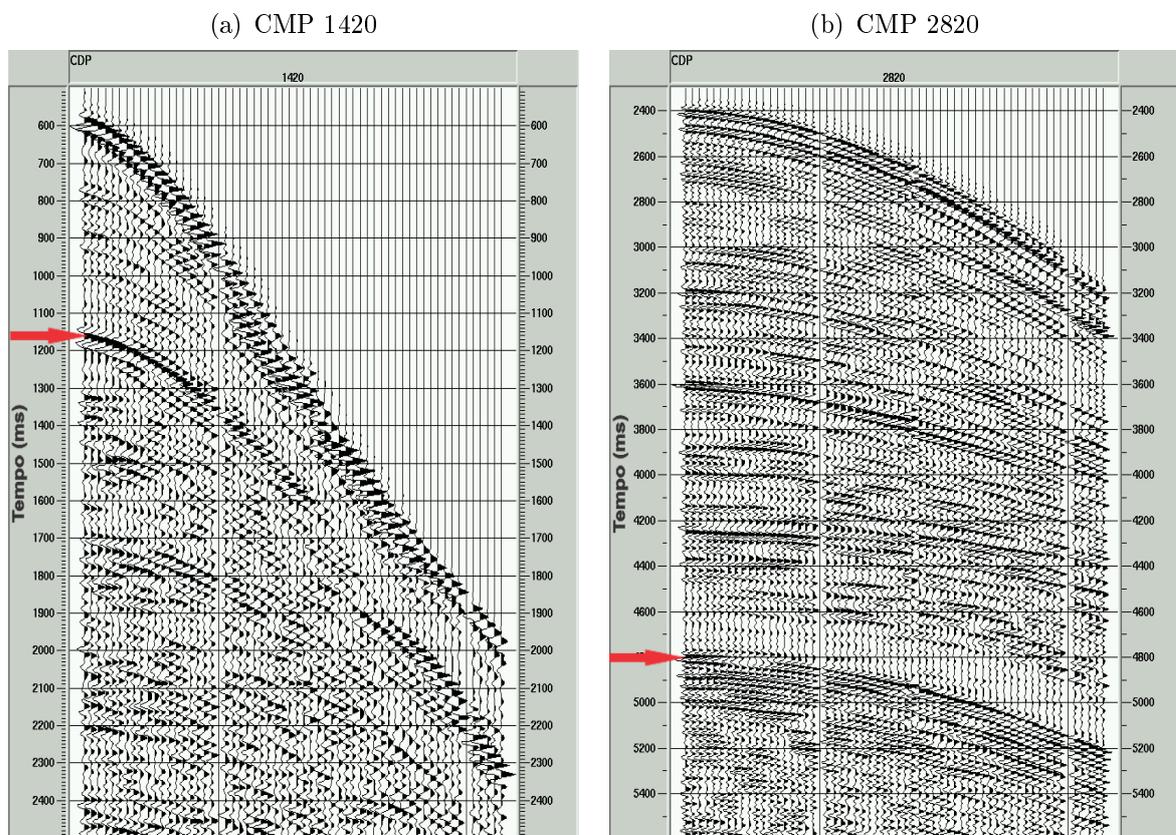


Fonte: Do autor.

6.2 ANÁLISE DE FAMÍLIAS CMP'S

Na Figura 6.7 são mostradas para os dados pré-processados, as famílias CMP's 1420 (Figura 6.7(a)) e 2820 (Figura 6.7(b)). De acordo com esta Figura, as múltiplas de superfície de primeira ordem a partir do tempo de 1170ms (para a família CMP 1420) e de 4810ms (para a família CMP 2820). Assinaladas na Figura 6.7 pela seta vermelha.

Figura 6.7 - Famílias CMP's 1420 e 2820 com a linha 66 pré-processada. As múltiplas de superfície aparecem a partir do tempo 1170ms, assinalado com a seta vermelha para do CDP 1420, Figura 6.7(a), e 4810ms, assinalado com a seta vermelha para do CMP 2820, Figura 6.7(b).



Fonte: Do autor.

Nas Figuras de 6.8 a 6.11, são apresentados os resultados da aplicação dos Fluxos de B a P ao CMP 1420. Através destas Figuras verifica-se que:

- Após a aplicação da filtragem $f - k$ a reflexão múltipla foi atenuada, mas também se percebe que a amplitude das reflexões primárias também foram atenuadas, principalmente para grandes afastamentos (comparação entre as Figuras 6.7(a) e 6.8(a)).
- Após a aplicação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ verifica-se que uma parcela das reflexões múltiplas é atenuada, há, entretanto por volta do tempo 1000

ms, 1400 ms e 2200 ms, a presença de artefato (um aumento de amplitude do sinal, que difere do sinal original)(comparação entre as Figuras 6.7(a) e 6.8(b)).

- Após a aplicação da filtragem Radon a reflexão múltipla sofre uma atenuação acentuada para pequenos afastamentos. Além disso, parte das reflexões primárias é perdida. Isso ocorre para pequenos afastamentos e para eventos rasos. Essa perda se deve ao percentual do estiramento que é silenciado devido a correção NMO aplicada antes da filtragem Radon (comparação entre as Figuras 6.7(a) e 6.8(c)).
- Após a aplicação do método SRME a reflexão múltipla teve uma atenuação, no entanto essa atenuação é pouca para grandes afastamentos. Não há perda da reflexão primária para grandes afastamentos e eventos rasos, quando comparado com o resultado anterior (comparação entre as Figuras 6.7(a) e 6.8(d)).
- Após a aplicação da combinação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem $f - k$, verifica-se que as múltiplas são atenuadas, além da perda de amplitude das primárias para grandes afastamentos e eventos rasos (comparação entre as Figuras 6.7(a) e 6.9(a)). É percebida a diferença entre a aplicação do Fluxo B (Figura 6.8(a)), com apenas a filtragem $f - k$, onde a múltipla não foi completamente atenuada, no entanto, quando comparada com o resultado da aplicação apenas da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ (Figura 6.8(b)), esta combinação apresenta resultado melhor na atenuação das múltiplas, além da perda de amplitude das primárias para grandes afastamentos e eventos rasos e por volta do tempo 1400 ms, a presença de artefato (um aumento de amplitude do sinal, que difere do sinal original).
- Após a aplicação da combinação da filtragem Radon + filtragem $f - k$, verifica-se que as múltiplas são atenuadas, além disso, há perda de amplitude das primárias (ver Figuras 6.7(a) e 6.9(b)). Comparando este resultado com o resultado onde só foi aplicada a filtragem $f - k$ (Figura 6.8(a)) há perda de amplitude das primárias mais rasas para grandes afastamentos. Quanto é comparado este resultado com o resultado onde só foi aplicada a filtragem Radon (Figura 6.8(c)) há perda de primárias para grandes afastamentos e eventos rasos. Isso é observado nos dados cujas duas metodologias foram aplicadas conjuntamente. Com relação a atenuação das múltiplas de superfície a aplicação das metodologias combinadas se mostra melhor que aplicação das metodologias em separado.
- Após a aplicação da combinação do método SRME + filtragem $f - k$ verifica-se que as múltiplas são atenuadas de maneira satisfatória, há, entretanto por volta do tempo 1000 ms, 1400 ms e 2200 ms, a presença de artefato (um aumento de amplitude do sinal, que difere do sinal original), além disso, há alguma perda de

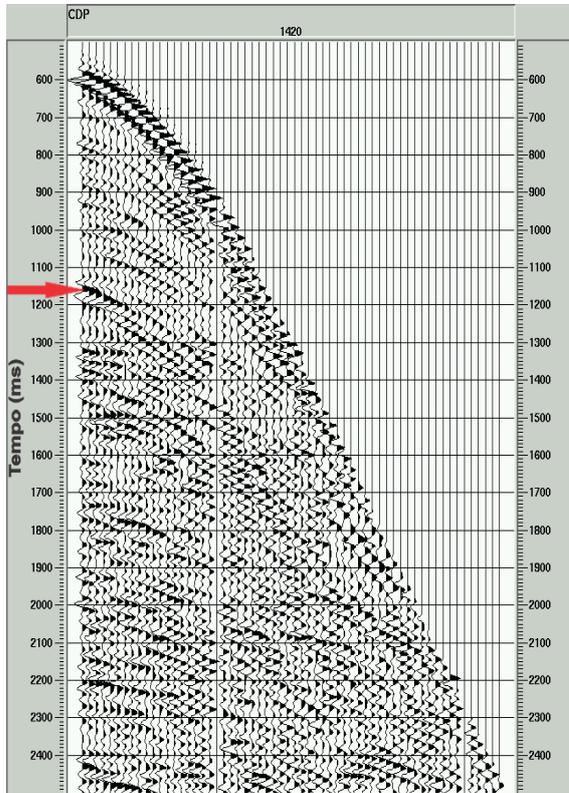
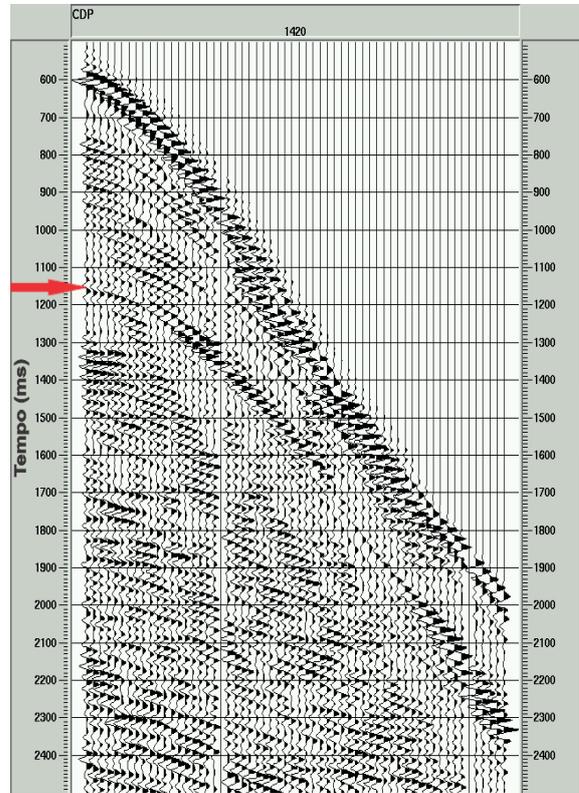
amplitude das primárias (ver Figuras 6.7(a) e 6.9(c)). Quando esse resultado é comparado com o resultado onde só o método SRME foi usado (Figura 6.8(d)) ou só a filtragem $f - k$ foi usada (Figura 6.8(a)), a aplicação das duas metodologias combinadas atenua melhor as múltiplas que as mesmas em separado.

- Após a aplicação da combinação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p +$ filtragem Radon verifica-se que uma parcela das múltiplas é atenuada, há, entretanto por volta do tempo 1700 ms, a presença de artefato (um aumento de amplitude do sinal, que difere do sinal original), ver Figuras 6.7(a) e 6.9(d). Acredita-se que isso se deva a transformação do dado do domínio $\tau - p$ para o domínio tempo-afastamento, uma vez que esse mesmo artefato aparece no resultado da aplicação apenas da filtragem Radon (ver Figura 6.8(c)). Além disso, há vestígio das múltiplas para pequenos afastamentos e perda de reflexão primária para pequenos afastamentos e eventos rasos decorrentes do uso da filtragem Radon. Esse resultado é melhor que o resultado da aplicação das metodologias em separado (comparação entre as Figuras 6.8(b) e 6.8(c)).
- Após a aplicação da combinação do método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ tem-se que parte da múltipla é atenuada restando vestígios para grandes afastamentos (comparar Figuras 6.7(a) e 6.10(a)). Esse resultado é melhor que o resultado obtido da aplicação apenas da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ (Figura 6.8(b)) e não apresenta diferenças significativas do resultado obtido da aplicação apenas do método SRME (Figura 6.8(d)).
- Após a aplicação da combinação do método SRME + filtragem Radon tem-se que múltipla é quase toda atenuada, entretanto há perda de reflexão primária para pequenos afastamentos e eventos rasos, além do aparecimento de artefatos (comparar Figuras 6.7(a) e 6.10(b)). Comparando esse resultado, com o resultado obtido só com a aplicação do método SRME (Figura 6.8(d)) ou só com a aplicação da filtragem Radon (Figura 6.8(c)) verifica-se que esse resultado atenua melhor as múltiplas.
- Após a aplicação da combinação do método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p +$ filtragem $f - k$, tem-se que múltipla é quase toda atenuada, entretanto, há presença de artefatos, além da perda de reflexão primária para grandes afastamentos e eventos rasos (comparar Figuras 6.7(a) e 6.10(c)).
- Após a aplicação da combinação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p +$ filtragem Radon + filtragem $f - k$, tem-se que múltipla é quase toda atenuada, existem vestígios para pequenos afastamentos, além da perda de amplitude de primárias mais rasas e a grandes afastamentos (comparar as Figuras 6.7(a) e 6.10(d)). Esse resultado comparado com o resultado só da filtragem $f - k$ (Figura 6.8(a)),

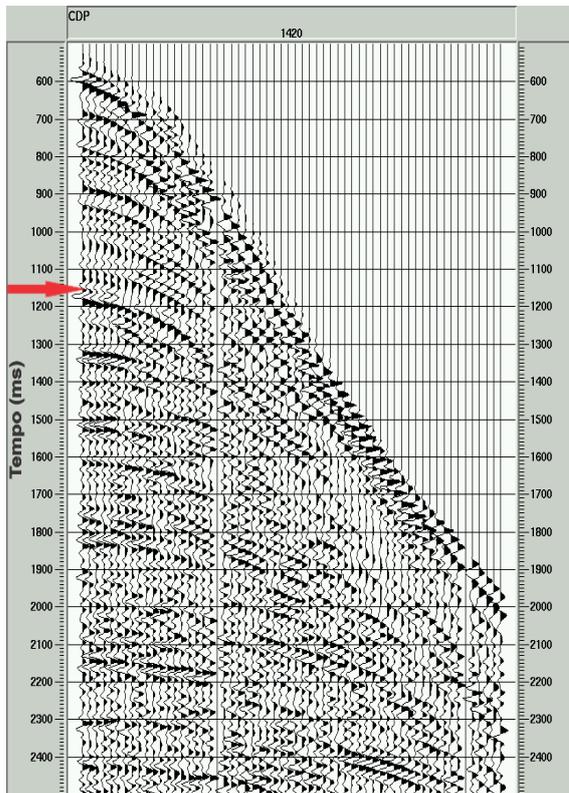
atenua mais as múltiplas. Quanto comparado com o resultado só com a aplicação da filtragem Radon (Figura 6.8(c)), há perda de amplitude de primária para eventos mais rasos e pequenos afastamentos. Quanto comparado com o resultado da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ (Figura 6.8(b)), atenua melhor as múltiplas. Quanto às combinações, verifica-se que há melhora em relação ao resultado da combinação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p +$ filtragem $f - k$ (Figura 6.9(a)), piora em relação ao resultado da combinação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p +$ filtragem Radon (Figura 6.9(d)) e piora em relação ao resultado da combinação da filtragem Radon + filtragem $f - k$ (Figura 6.9(b)).

- Após a aplicação da combinação do método SRME + filtragem Radon + filtragem $f - k$, tem-se que múltipla é quase toda atenuada, há, no entanto, perda de amplitude de primárias mais rasas (comparar as Figuras 6.7(a) e 6.11(a)). Esse resultado é melhor se comparado com o resultado da filtragem $f - k$ (Figura 6.8(a)), com o resultado do método SRME (Figura 6.8(d)) e com o resultado da filtragem Radon (Figura 6.8(c)), além de ser melhor que as combinações de apenas dois desses métodos (Figuras 6.9(c), 6.9(b) e 6.10(b)).
- Após a aplicação da combinação do método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p +$ filtragem Radon, tem-se que a múltipla é quase toda atenuada, há, no entanto, perda de amplitude de primárias mais rasas (comparar as Figuras 6.7(a) e 6.11(b)). Esse resultado é melhor se comparado com o resultado do método SRME (Figura 6.8(d)), com o resultado da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ (Figura 6.8(b)) e com o resultado da filtragem Radon (Figura 6.8(c)), além de ser melhor que as combinações de apenas dois desses métodos (Figuras 6.10(a), 6.10(b) e 6.9(d)).
- Após a aplicação da combinação do método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p +$ filtragem Radon + filtragem $f - k$, tem-se que múltipla é quase toda atenuada, há, no entanto, perda de amplitude de primárias mais rasas (comparar as Figuras 6.7(a) e 6.11(c)). Esse resultado é melhor se comparado com o resultado da filtragem $f - k$ (Figura 6.8(a)), com o resultado do método SRME (Figura 6.8(d)), com o resultado da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ (Figura 6.8(b)) e com o resultado da filtragem Radon (Figura 6.8(c)), além de ser melhor que as combinações de apenas dois desses métodos (Figuras 6.9(c), 6.9(a), 6.9(b), 6.10(a), 6.11(a) e 6.10(d)), e por fim melhor que as combinações de apenas três desses métodos (Figuras 6.10(c), 6.11(a), 6.10(d) e 6.11(b)).

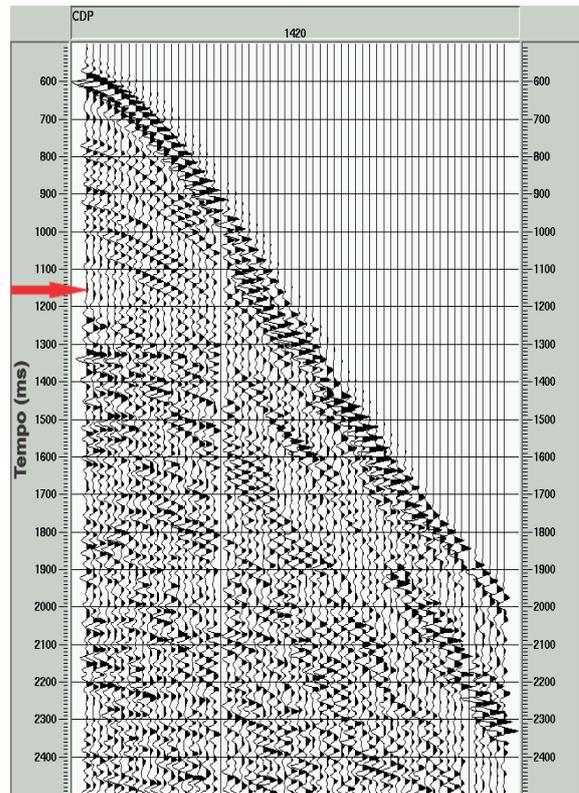
Figura 6.8 - Resultados do CMP 1420 após a aplicação dos fluxos: B, Figura 6.8(a), C, Figura 6.8(b), D, Figura 6.8(c), e E, Figura 6.8(d), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.

(a) CMP 1420 - $f - k$ (b) CMP 1420 - $\tau - p$ 

(c) CMP 1420 - Radon

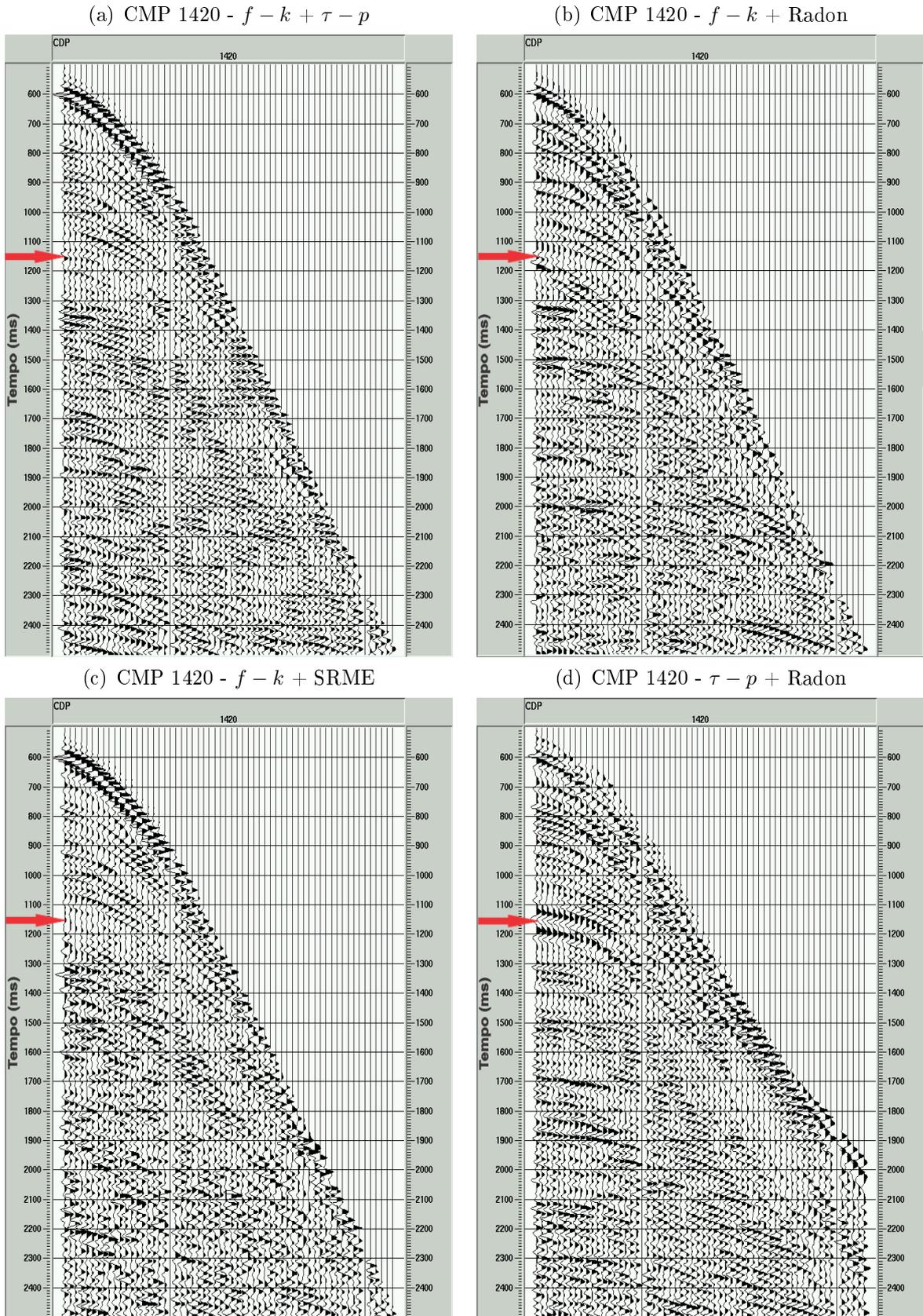


(d) CMP 1420 - SRME



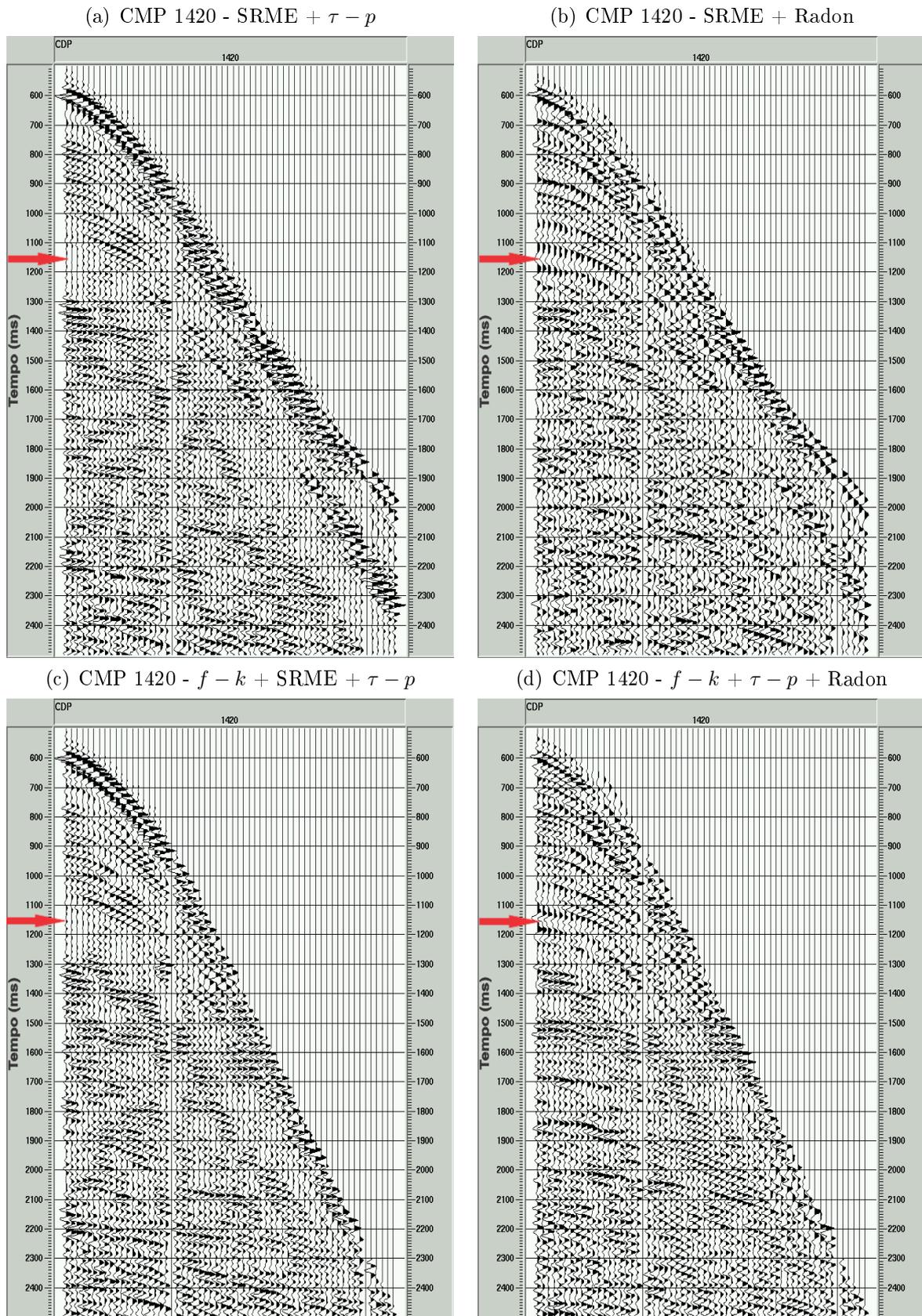
Fonte: Do autor.

Figura 6.9 - Resultados do CMP 1420 após a aplicação dos fluxos: F, Figura 6.9(a), G, Figura 6.9(b), H, Figura 6.9(c) e I, Figura 6.9(d), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.



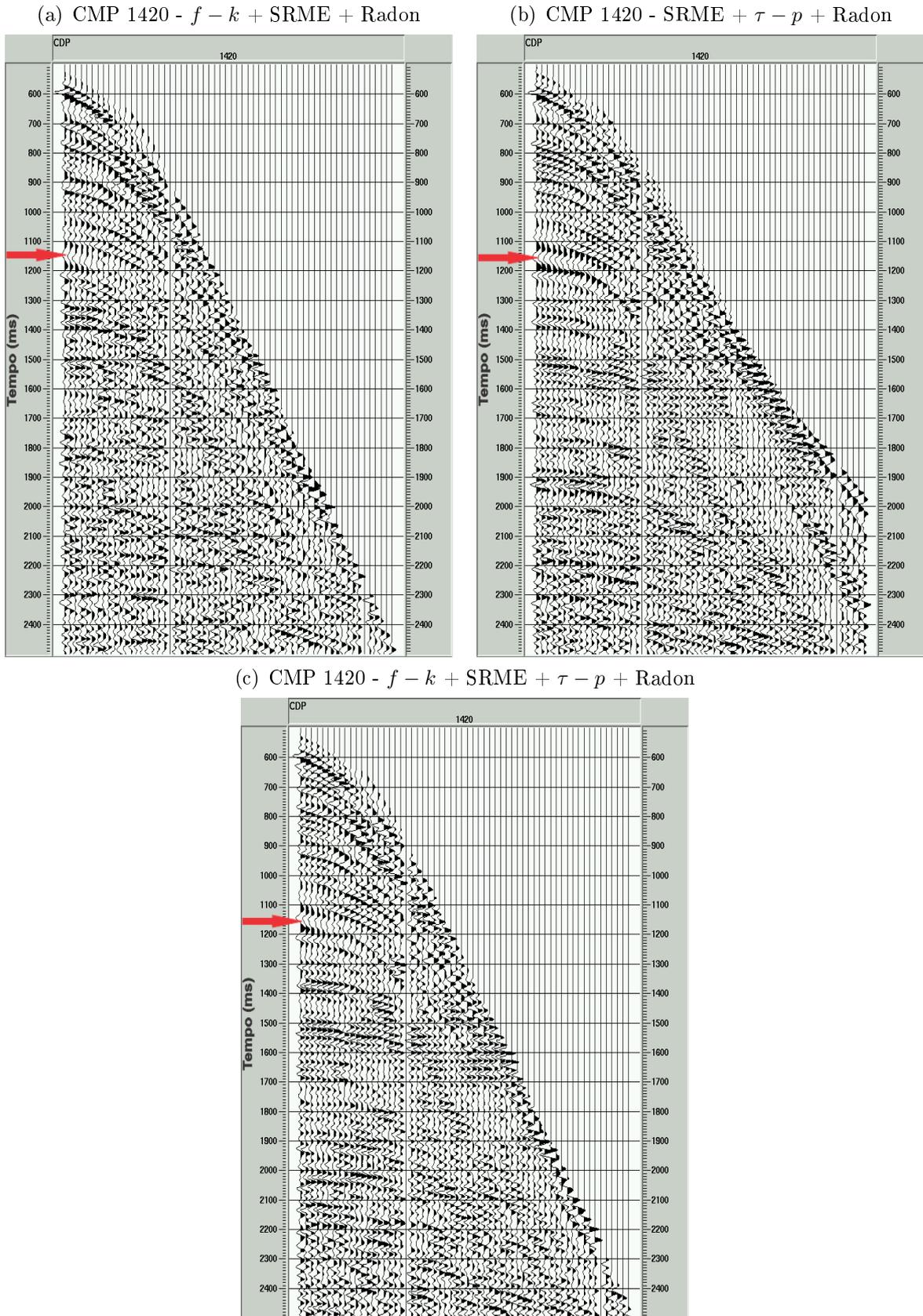
Fonte: Do autor.

Figura 6.10 - Resultados do CMP 1420 após a aplicação dos fluxos: J, Figura 6.10(a), K, Figura 6.10(b), L, Figura 6.10(c) e M, Figura 6.10(d), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.



Fonte: Do autor.

Figura 6.11 - Resultados do CMP 1420 após a aplicação dos fluxos: N, Figura 6.11(a), O, Figura 6.11(b) e P, Figura 6.11(c), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.



Fonte: Do autor.

Nas Figuras de 6.12 a 6.15, são apresentados os resultados da aplicação dos Fluxos de B a P ao CMP 2820. Através destas Figuras verifica-se que:

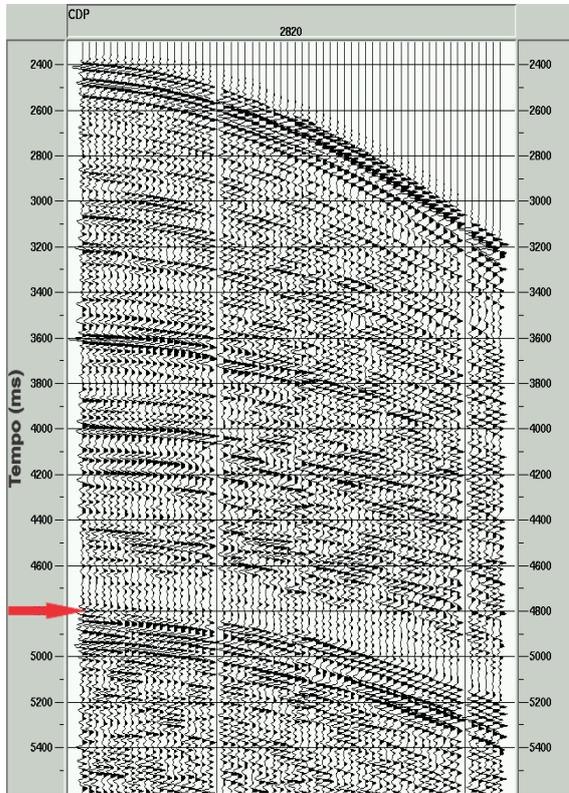
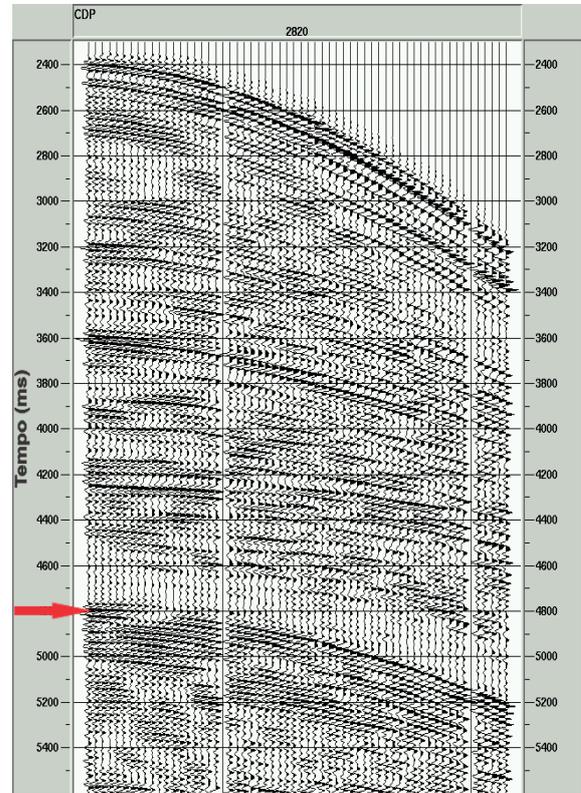
- Após a aplicação da filtragem $f - k$ a reflexão múltipla foi atenuada, mas também se percebe que a amplitude das reflexões primárias também foram atenuadas, principalmente para grandes afastamentos apresentando vestígios para pequenos afastamentos (comparação entre as Figuras 6.7(b) e 6.12(a)).
- Após a aplicação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ quase nada da reflexão múltipla é atenuada (comparação entre as Figuras 6.7(b) e 6.12(b)).
- Após a aplicação da filtragem Radon a reflexão múltipla sofre uma atenuação acentuada para grandes afastamentos. Além disso, parte das reflexões primárias é perdida. Isso corre para grandes afastamentos e para eventos rasos. Essa perda se deve ao percentual do estiramento que é silenciado devido a correção NMO aplicada antes da filtragem Radon (comparação entre as Figuras 6.7(b) e 6.12(c)).
- Após a aplicação do método SRME a reflexão múltipla teve uma atenuação, no entanto essa atenuação é pouca para grandes afastamentos. Não há perda da reflexão primária para grandes afastamentos e eventos rasos, quando comparado com o resultado anterior (comparação entre as Figuras 6.7(b) e 6.12(d)).
- Após a aplicação da combinação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem $f - k$, verifica-se que as múltiplas são atenuadas, além da perda de amplitude das primárias para pequenos afastamentos e eventos rasos (comparação entre as Figuras 6.7(b) e 6.13(a)). Não é percebida diferença entre a aplicação do Fluxo B (Figura 6.12(a)), com apenas a filtragem $f - k$, no entanto, quando comparada com o resultado da aplicação apenas da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ (Figura 6.12(b)), esta combinação apresenta resultado melhor na atenuação das múltiplas.
- Após a aplicação da combinação da filtragem Radon + filtragem $f - k$ verifica-se que as múltiplas são atenuadas, além disso, há perda de amplitude das primárias (ver Figuras 6.7(b) e 6.13(b)). Comparando este resultado com o resultado onde só foi aplicada a filtragem $f - k$ (Figura 6.12(a)) há perda de amplitude das primárias mais rasas para grandes afastamentos. Quanto é comparado este resultado com o resultado onde só foi aplicada a filtragem Radon (Figura 6.12(c)) há perda de primárias para grandes afastamentos e eventos rasos. Isso é observado nos dados cujas duas metodologias foram aplicadas conjuntamente. Com relação a atenuação das múltiplas de superfície a aplicação das metodologias combinadas se mostra melhor que aplicação das metodologias em separado.

- Após a aplicação da combinação do método SRME + filtragem $f - k$ verifica-se que as múltiplas são atenuadas de maneira satisfatória, ficando algum vestígio para grandes afastamentos, além disso, há alguma perda de amplitude das primárias (ver Figuras 6.7(b) e 6.13(c)). Quando esse resultado é comparado com o resultado onde só o método SRME foi usado (Figura 6.12(d)) ou só a filtragem $f - k$ foi usada (Figura 6.12(a)), a aplicação das duas metodologias combinadas atenua melhor as múltiplas que as mesmas em separado.
- Após a aplicação da combinação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon verifica-se que pequenas parcelas ou frações das múltiplas são atenuadas, há, entretanto por volta do tempo 4600ms, a presença de artefato (um aumento de amplitude do sinal, que difere do sinal original), ver Figuras 6.7(b) e 6.13(d). Acredita-se que isso se deva a transformação do dado do domínio $\tau - p$ para o domínio tempo-afastamento, uma vez que esse mesmo artefato aparece no resultado da aplicação apenas da filtragem Radon (ver Figura 6.12(c)). Além disso, há vestígio das múltiplas para grandes afastamentos e perda de reflexão primária para grandes afastamentos e eventos rasos decorrentes do uso da filtragem Radon. Esse resultado é melhor que o resultado da aplicação apenas da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ (ver Figura 6.12(b)) e melhor que o resultado da aplicação apenas da filtragem Radon (ver Figura 6.12(c)).
- Após a aplicação da combinação do método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ tem-se que parte da múltipla é atenuada restando vestígios para grandes afastamentos (comparar Figuras 6.7(b) e 6.14(a)). Esse resultado é melhor que o resultado obtido da aplicação apenas da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ (Figura 6.12(b)) e não apresenta diferenças significativas do resultado obtido da aplicação apenas do método SRME (Figura 6.12(d)).
- Após a aplicação da combinação do método SRME + filtragem Radon tem-se que múltipla é quase toda atenuada, entretanto há perda de reflexão primária para grandes afastamentos, além do aparecimento de artefatos (comparar Figuras 6.7(b) e 6.14(b)). Comparando esse resultado, com o resultado obtido só com a aplicação do método SRME (Figura 6.12(d)) ou só com a aplicação da filtragem Radon (Figura 6.12(c)) verifica-se que esse resultado atenua melhor as múltiplas, apresentando pequenos vestígios para grandes afastamentos.
- Após a aplicação da combinação do método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem $f - k$, tem-se que múltipla é quase toda atenuada, entretanto, há presença de artefatos, além da perda de reflexão primária para grandes afastamentos e eventos rasos (comparar Figuras 6.7(b) e 6.14(c)).

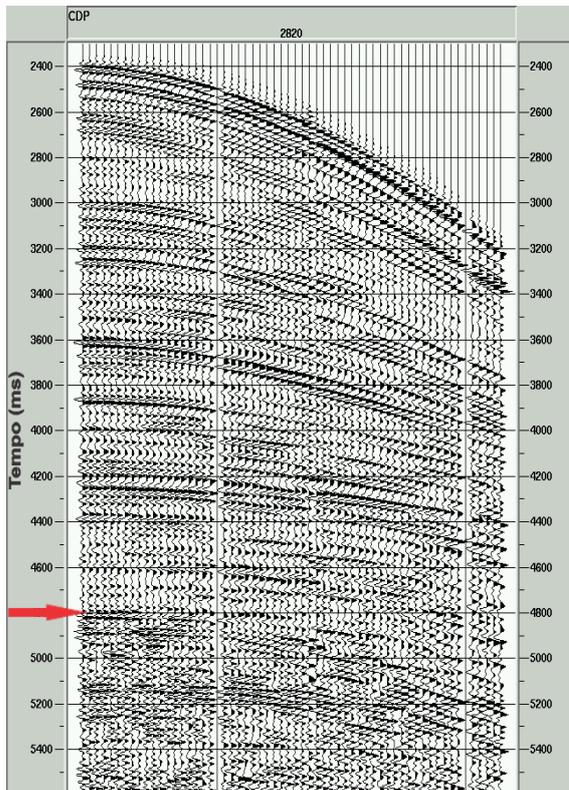
- Após a aplicação da combinação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon + filtragem $f - k$, tem-se que múltipla é quase toda atenuada, existem vestígios para pequenos afastamentos, além da perda de amplitude de primárias mais rasas e a grandes afastamentos (comparar as Figuras 6.7(b) e 6.14(d)). Esse resultado comparado com o resultado só da filtragem $f - k$ (Figura 6.12(a)), atenua mais as múltiplas. Quanto comparado com o resultado só com a aplicação da filtragem Radon (Figura 6.12(c)), há perda de amplitude de primária para eventos mais rasos e grandes afastamentos. Quanto comparado com o resultado da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ (Figura 6.12(b)), atenua melhor as múltiplas. Quanto às combinações, verifica-se que há melhora em relação ao resultado da combinação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem $f - k$ (Figura 6.13(a)), melhora em relação ao resultado da combinação da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon (Figura 6.13(d)) e há perda de amplitude das primárias para grandes afastamentos em relação ao resultado da combinação da filtragem Radon + filtragem $f - k$ (Figura 6.13(b)).
- Após a aplicação da combinação do método SRME + filtragem Radon + filtragem $f - k$, tem-se que múltipla é quase toda atenuada, há, no entanto, perda de amplitude de primárias mais rasas (comparar as Figuras 6.7(b) e 6.15(a)). Esse resultado é melhor se comparado com o resultado da filtragem $f - k$ (Figura 6.12(a)), com o resultado do método SRME (Figura 6.12(d)) e com o resultado da filtragem Radon (Figura 6.12(c)), além de ser melhor que as combinações de apenas dois desses métodos (Figuras 6.13(c), 6.13(b) e 6.14(b)).
- Após a aplicação da combinação do método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon, tem-se que múltipla é quase toda atenuada, há, no entanto, perda de amplitude de primárias mais rasas (comparar as Figuras 6.7(b) e 6.15(b)). Esse resultado é melhor se comparado com o resultado do método SRME (Figura 6.12(d)), com o resultado da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ (Figura 6.12(b)) e com o resultado da filtragem Radon (Figura 6.12(c)), além de ser melhor que as combinações de apenas dois desses métodos (Figuras 6.14(a), 6.14(b) e 6.13(d)).
- Após a aplicação da combinação do método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon + filtragem $f - k$, tem-se que múltipla é quase toda atenuada, há, no entanto, perda de amplitude de primárias mais rasas (comparar as Figuras 6.7(b) e 6.15(c)). Esse resultado é melhor se comparado com o resultado da filtragem $f - k$ (Figura 6.12(a)), com o resultado do método SRME (Figura 6.12(d)), com o resultado da deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ (Figura 6.12(b)) e com o resultado da filtragem Radon (Figura 6.12(c)), além de ser

melhor que as combinações de apenas dois desses métodos (Figuras 6.13(c), 6.13(a), 6.13(b), 6.14(a), 6.15(a) e 6.14(d)), e por fim melhor que as combinações de apenas três desses métodos (Figuras 6.14(c), 6.15(a), 6.14(d) e 6.15(b)).

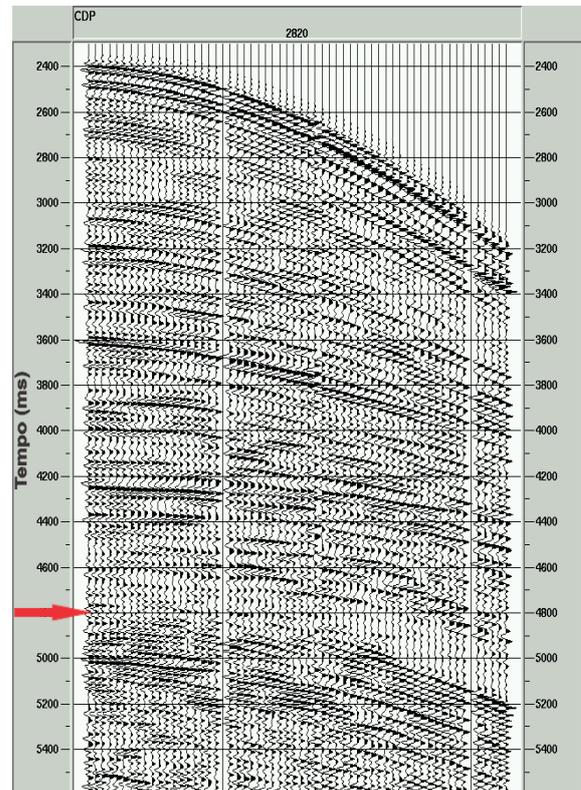
Figura 6.12 - Resultados do CMP 2820 após a aplicação dos fluxos: B, Figura 6.12(a), C, Figura 6.12(b), D, Figura 6.12(c) e E, Figura 6.12(d), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.

(a) CMP 2820 - $f - k$ (b) CMP 2820 - $\tau - p$ 

(c) CMP 2820 - Radon

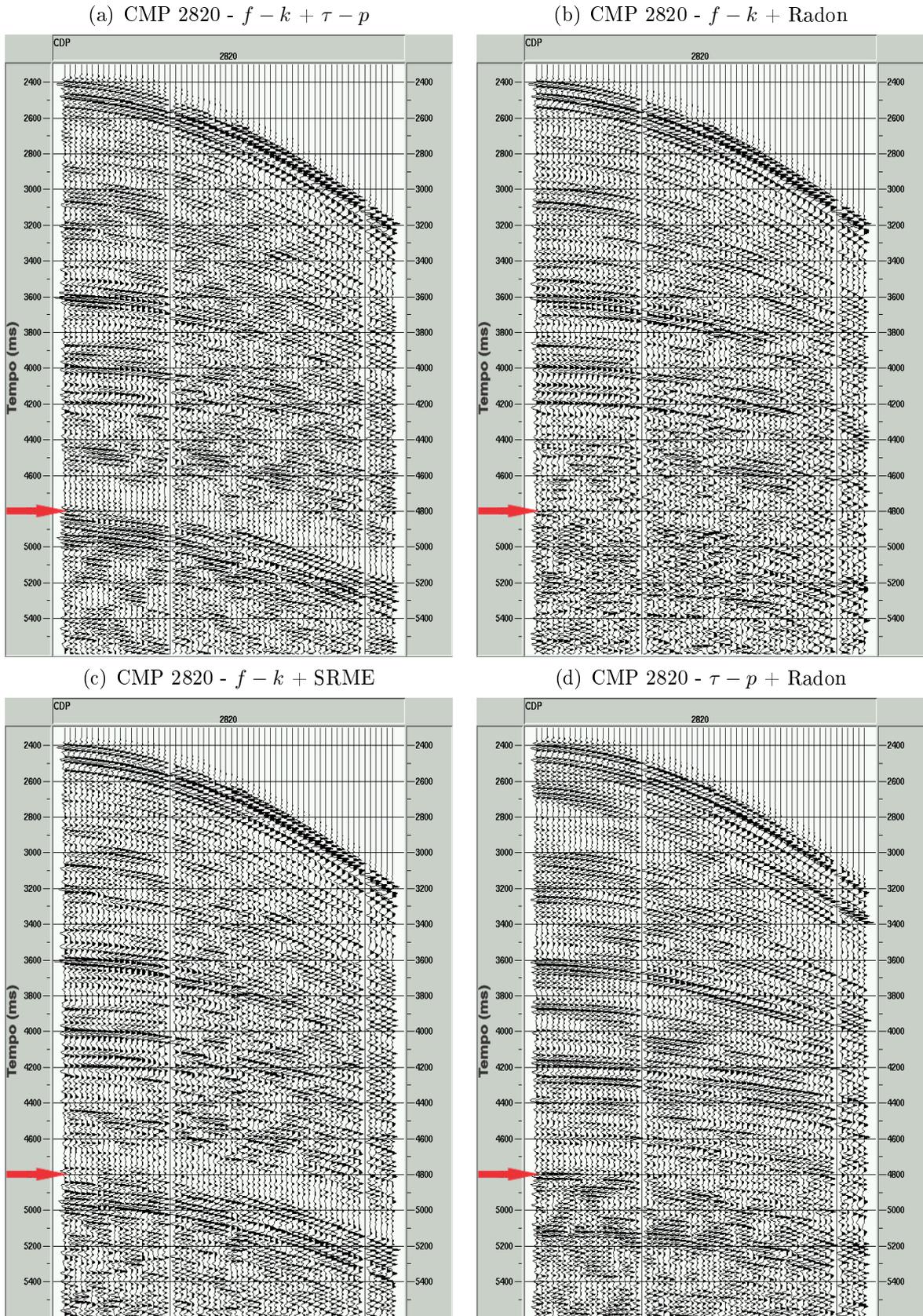


(d) CMP 2820 - SRME



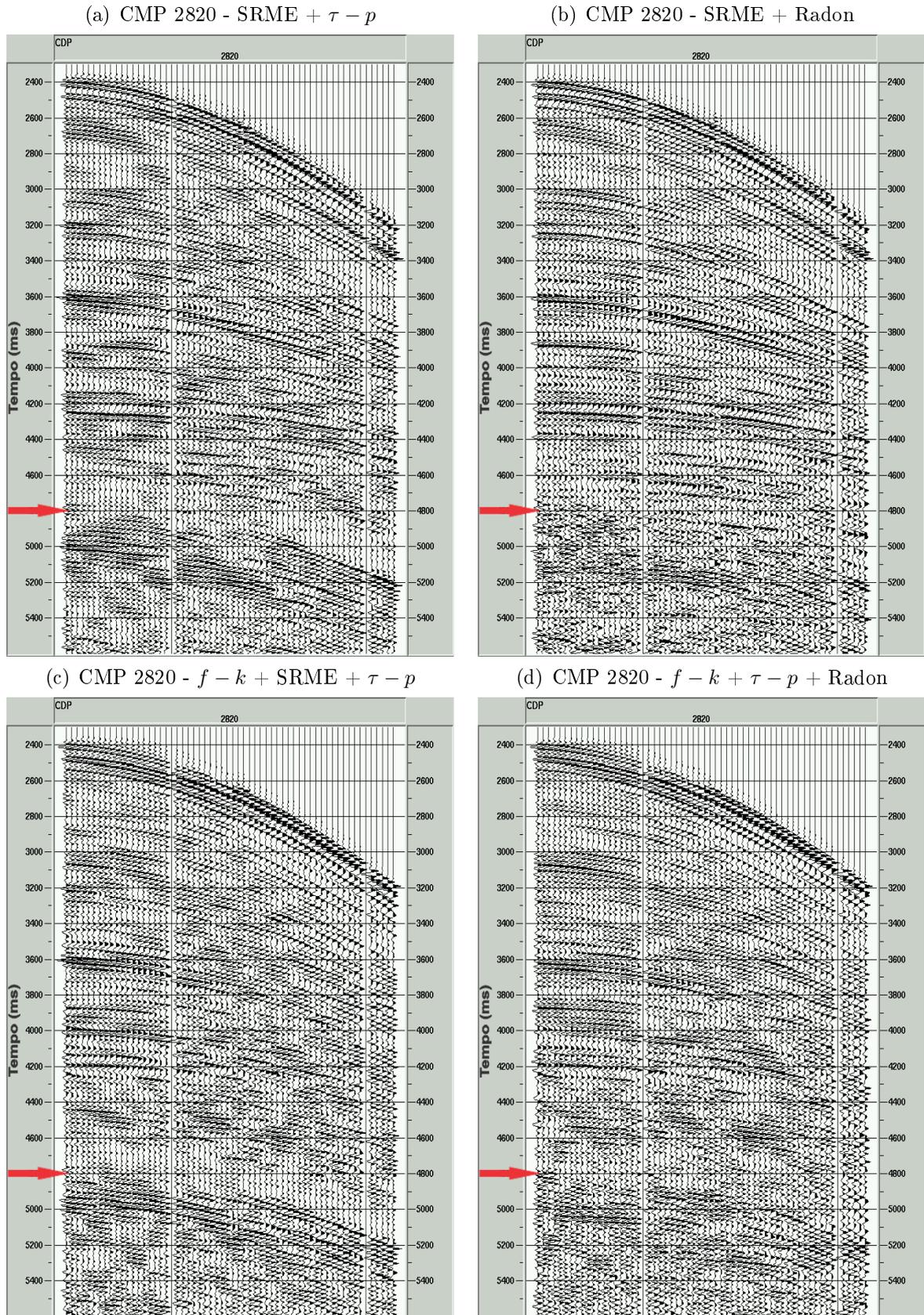
Fonte: Do autor.

Figura 6.13 - Resultados do CMP 2820 após a aplicação dos fluxos: F, Figura 6.13(a), G, Figura 6.13(b) H, Figura 6.13(c) e I, Figura 6.13(d), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.



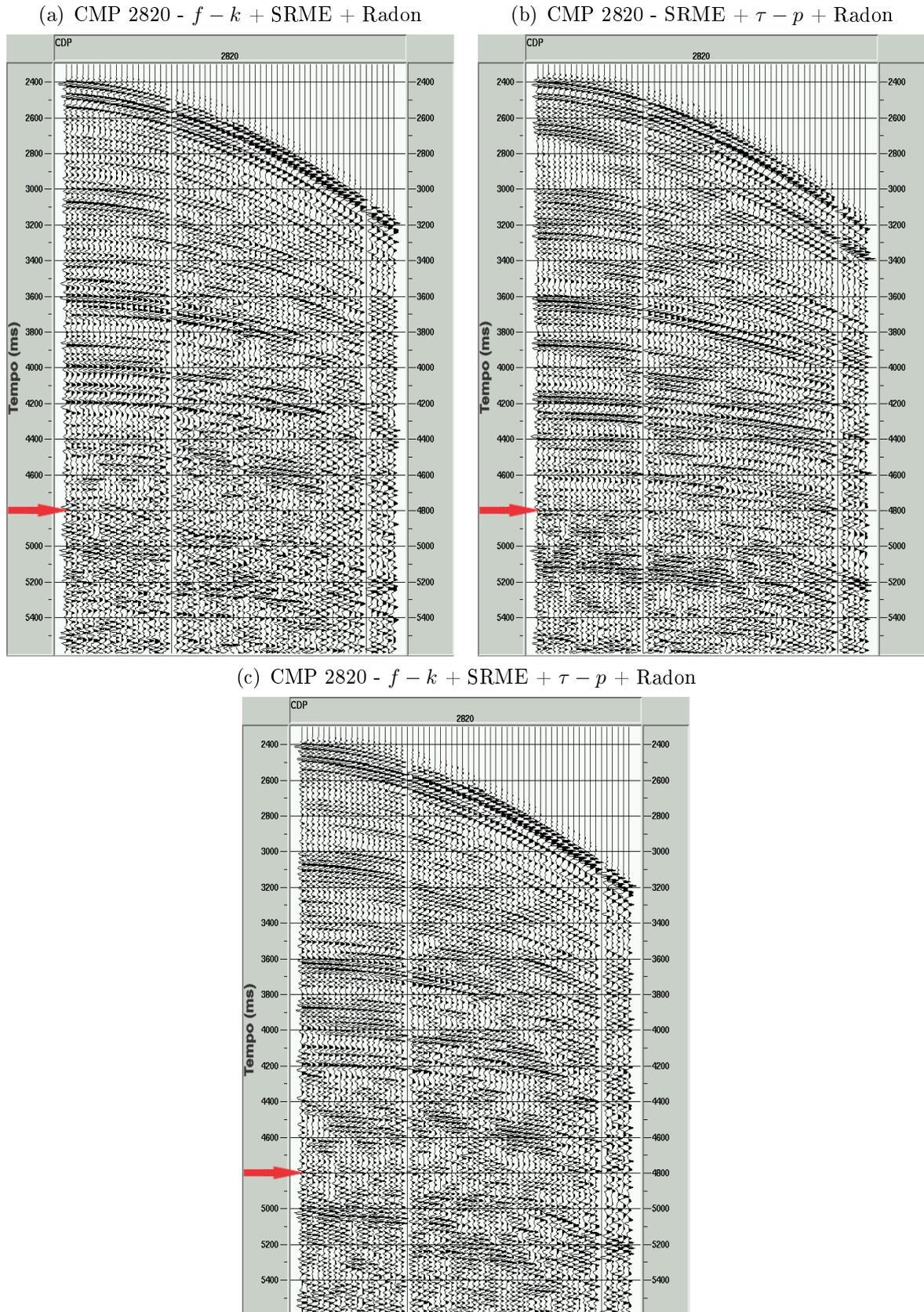
Fonte: Do autor.

Figura 6.14 - Resultados do CMP 2820 após a aplicação dos fluxos: J, Figura 6.14(a), K, Figura 6.14(b), L, Figura 6.14(c) e M, Figura 6.14(d), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.



Fonte: Do autor.

Figura 6.15 - Resultados do CMP 2820 após a aplicação dos fluxos: N, Figura 6.15(a), O, Figura 6.15(b) e P, Figura 6.15(c), respectivamente para atenuação de múltiplas de superfície. A seta vermelha identifica o início das múltiplas.



Fonte: Do autor.

6.3 ANÁLISE DOS DADOS ORGANIZADOS EM AFASTAMENTO MÍNIMO

Para efeito de análise de como as quatro metodologias atuam separadamente na atenuação das múltiplas de superfície são mostrados os dados organizados em afastamento mínimo no estado bruto (Figura 6.16) e após a aplicação do $f-k$, (Figura 6.17), a aplicação do Radon (Figura 6.18), a aplicação da deconvolução preditiva (Figura 6.19) e o SRME (Figura 6.20).

De acordo com essas Figuras verifica-se que: há muito pouco efeito na atenuação de múltipla na filtragem $f - k$. Após a filtragem Radon, verifica-se uma atenuação discreta das múltiplas, essa atenuação é mais evidente na região que vai dos CMP's 1350 até 2400, do que para a região a partir do CMP 2400 em diante. Após a aplicação da deconvolução preditiva, verifica-se o melhor resultado para a atenuação das múltiplas usando as metodologias separadas. A deconvolução preditiva não é efetiva para a região mais profunda, a partir do CMP 2700. O resultado após o SRME apresenta o segundo melhor resultado para atenuação das múltiplas para toda a região que vai dos CMP's 1350 a 3270.

Em alguns trabalhos, como em (HONGTU et al., 2009), é comum encontrar a aplicação do SRME e filtragem Radon combinados. Isto se deve ao fato de que: o SRME apresenta bons resultados na atenuação de múltiplas para grandes afastamentos mas falha em atenuar múltiplas para pequenos afastamentos. Compare por exemplo as Figuras 6.20 e 6.21, onde o dado está organizado em afastamento comum de 150m e 1050m respectivamente. Já a filtragem Radon apresenta resultado inverso, ou seja, é efetiva na atenuação de múltiplas em pequenos afastamentos, mas falha para grandes afastamentos, compare as Figuras 6.18 e 6.22, onde o dado está organizado em afastamento comum de 150m e 1050m, respectivamente.

A Figura 6.23 mostra o dado organizado em afastamento mínimo após a aplicação do SRME + Radon.

Neste trabalho analisamos a aplicação de outras metodologias em conjunto de SRME e Radon. Nossos melhores resultados, são apresentados em afastamento mínimo nas Figuras 6.24 e 6.25. Comparando os dois melhores resultados observamos que a metodologia empregada atenua a múltipla na região mais profunda do dado, compreendida entre os CMP's 1350 e 3270, mas perde em resolução.

De acordo com as análises acima os melhores resultados foram obtidos para os fluxos O (aplicado o método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon) e P (aplicado o método SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon + filtragem $f - k$).

A estes dados foi aplicada a correção de amplitude e a deconvolução impulsiva. Em seguida foi realizada uma nova análise de velocidade RMS (Figura 6.26). Em seguida a migração Kirchhoff pré-empilhamento em tempo foi aplicada aos dados resultantes do fluxo O (Figura 6.28) e do fluxo P (Figura 6.29).

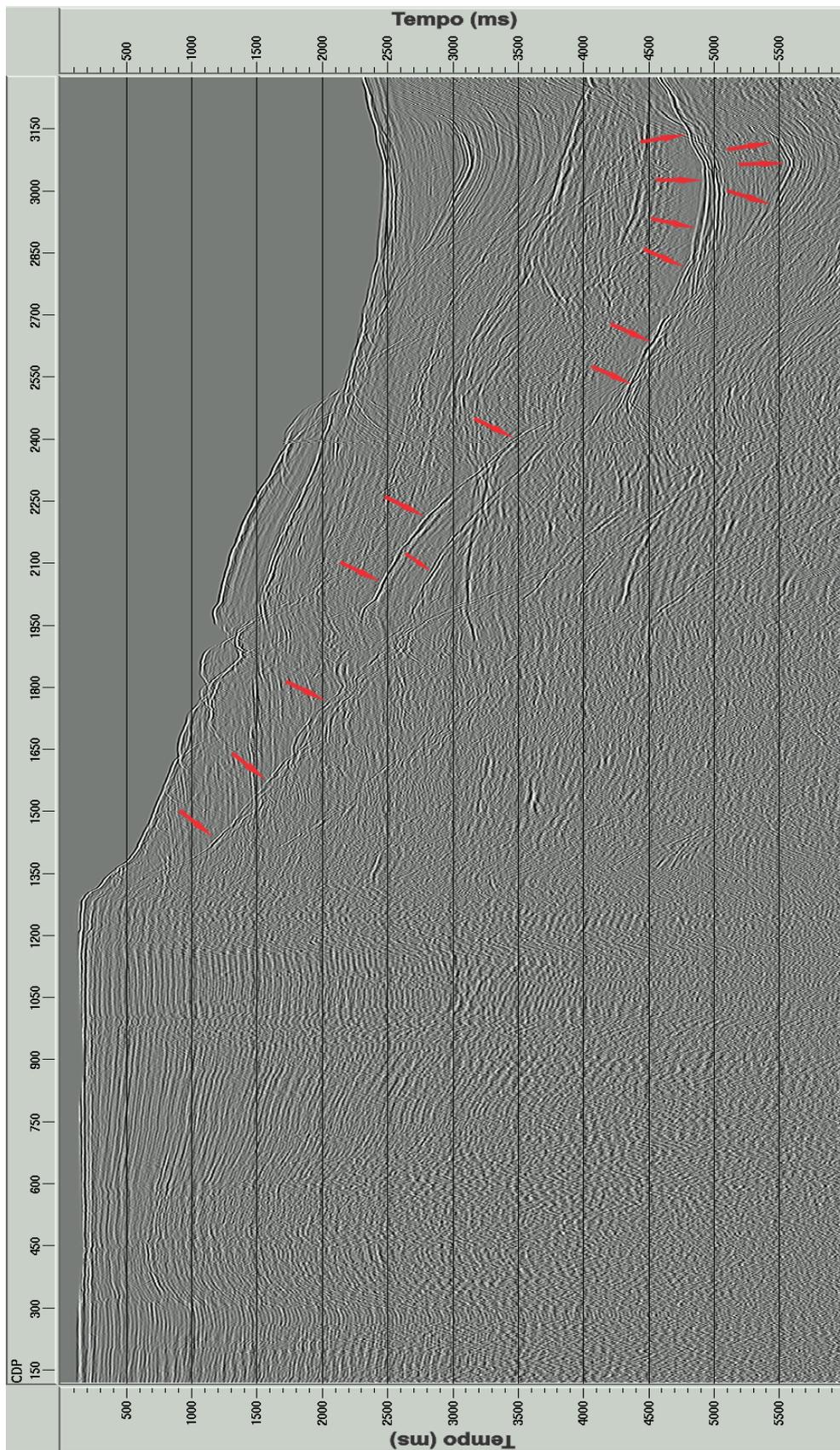
Para efeito de comparação é também calculada a migração Kirchhoff pré-empilhamento em tempo aos dados resultantes do processamento convencional, fluxo A (Figura 6.27).

De acordo com as Figuras 6.28, 6.29 e 6.27, o melhor resultado é proveniente da migração do dado do fluxo O quando comparado com a migração do dado proveniente do fluxo P. As múltiplas de ordem superior presentes na região compreendida entre os CMP's 1250 a 1550 presentes na migração dos dados provenientes do processamento convencional (Figura 6.27) são quase todas atenuadas para o dado migrado do fluxo O. Verifica-se ainda que a imagem migrada do dado proveniente do fluxo P apresenta perda de resolução na região antes ocupada pela múltipla de superfície de primeira ordem. Além disso, nota-se artefatos a partir do tempo de 4000ms, acredita-se que esses artefatos são gerados nas metodologias que realizam o mapeamento dos dados de um domínio para o outro (Filtragem $f - k$ e Filtragem Radon), como já comentado nas análises do 6.

De acordo com as Figuras acima claramente verifica-se que o melhor resultado para atenuação das múltiplas de superfície é obtido com o fluxo O. Os resultados migrados para ambos os fluxos Figuras 6.28 e 6.29 não trazem melhora na resolução da região mais rasa do dado compreendida entre os CMP's 1 a 1200. Isto deve-se ao fato que nesta região as múltiplas de superfície estão interagindo com múltiplas de outros tipos gerando assim múltiplas complexas que as metodologias discutidas são incapazes de tratar.

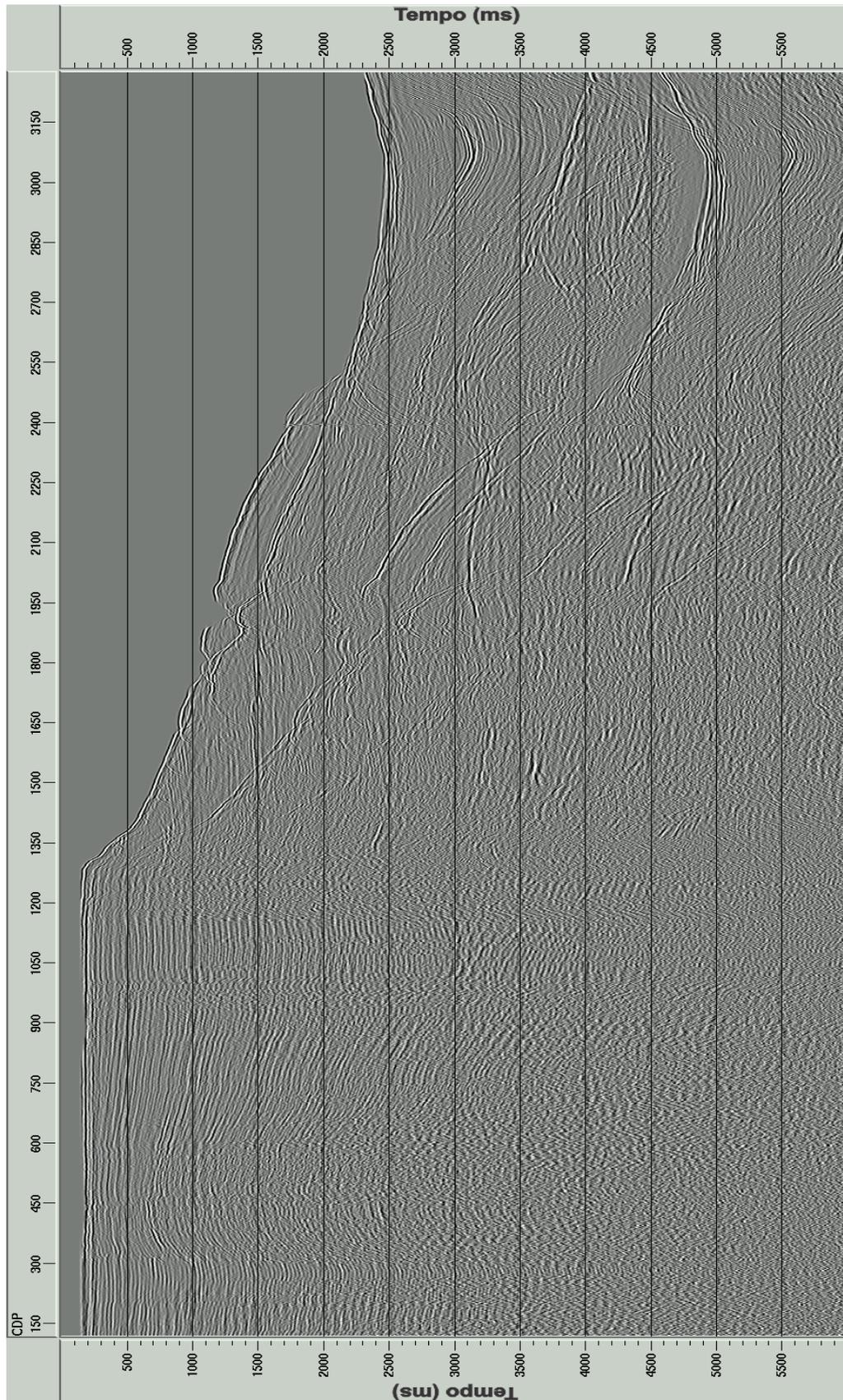
Pode ser observado que houve uma melhora na resolução da imagem, onde aplicou-se o fluxo O, para eventos na porção rasa da seção até o tempo de 1500ms, na porção intermediária da seção até o tempo de 3500ms e na porção profunda da seção até o tempo de 4500ms. E para o fluxo P, para eventos na porção rasa da seção até o tempo de 2000ms, na porção intermediária da seção até o tempo de 3500ms e na porção profunda da seção até o tempo de 4500ms. Também notam-se artefatos devido as metodologias que utilizam a transformação de domínio (Filtragem $f-k$ e Filtragem Radon), como já foi observado nas análises deste capítulo. Para ambos os fluxos percebe-se que as múltiplas foram completamente atenuadas.

Figura 6.16 - Dado bruto organizado em afastamento mínimo (150m). As múltiplas de superfície são facilmente identificadas na parte mais profunda do dado, identificadas pelas setas vermelhas, a partir do CMP 1352 e tempo de 1000ms. As múltiplas possuem a inclinação aparente maior que a inclinação do fundo oceânico, como era de se esperar (VERSCHUUR, 2006).



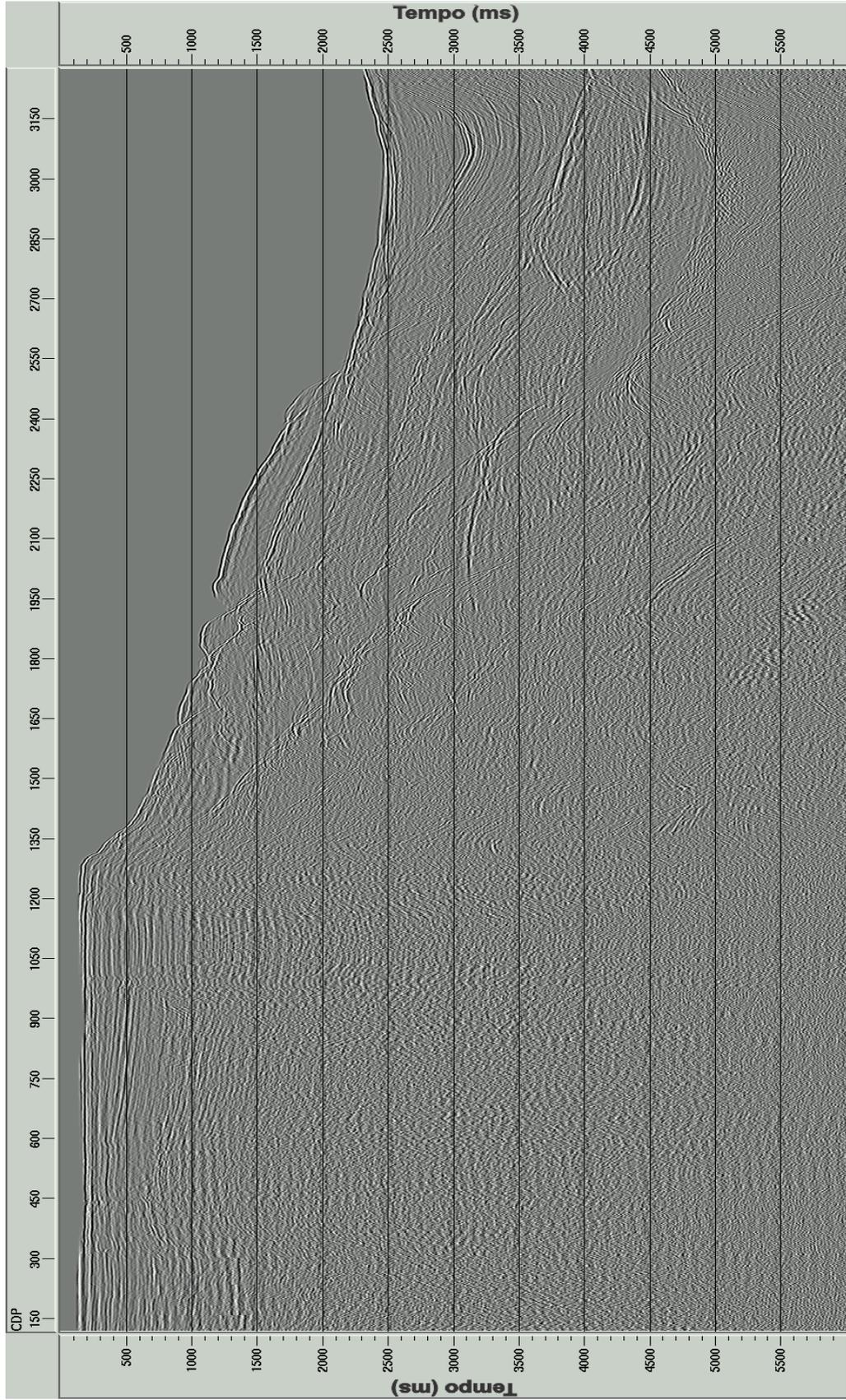
Fonte: Do autor.

Figura 6.17 - Dado organizado em afastamento mínimo (150m) após a filtragem $f-k$, de acordo com o fluxo B, Figura 6.1. Não se verifica a atenuação das múltiplas de superfície.



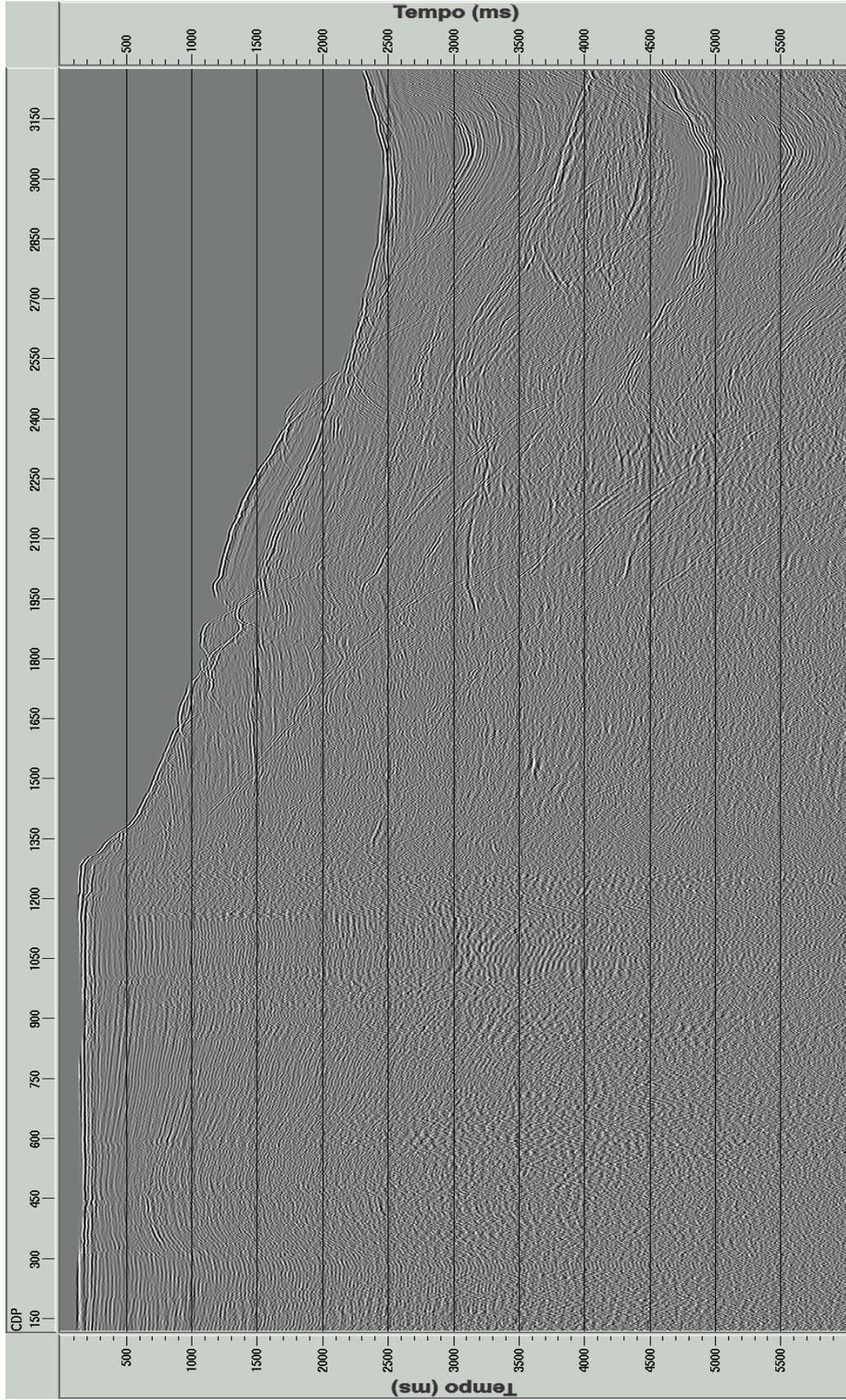
Fonte: Do autor.

Figura 6.18 - Dado organizado em afastamento mínimo (150m) após a filtragem Radon. Verifica-se uma atenuação discreta das múltiplas maior para na região que vai até o CMP 2400 que para a região do CMP 2400 em diante.



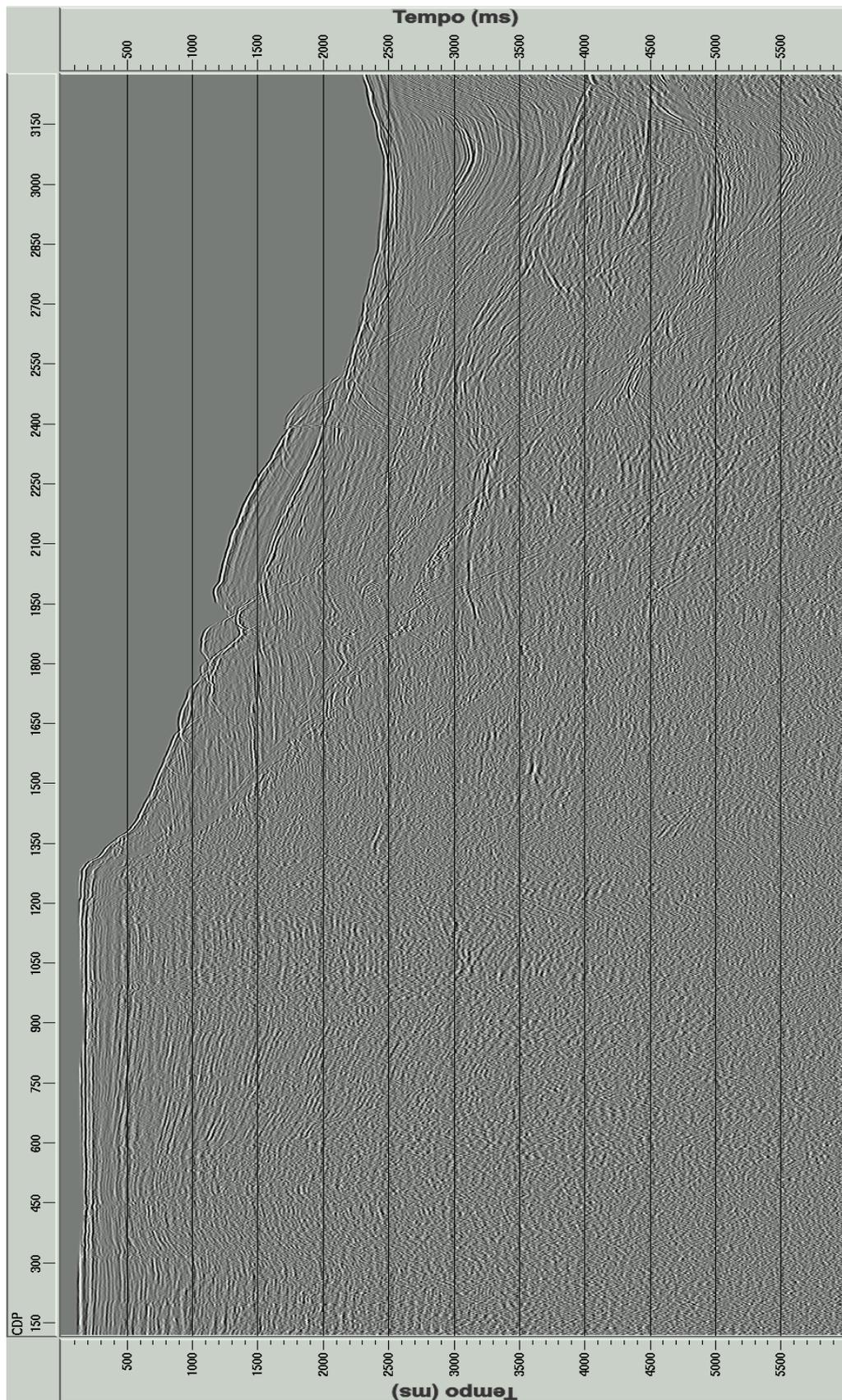
Fonte: Do autor.

Figura 6.19 - Dado organizado em afastamento mínimo (150m) após a deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$. As múltiplas são mais atenuadas comparado com os resultados da filtragem $f - k$ e Radon. A deconvolução não é efetiva para a região a partir do CMP 2700.



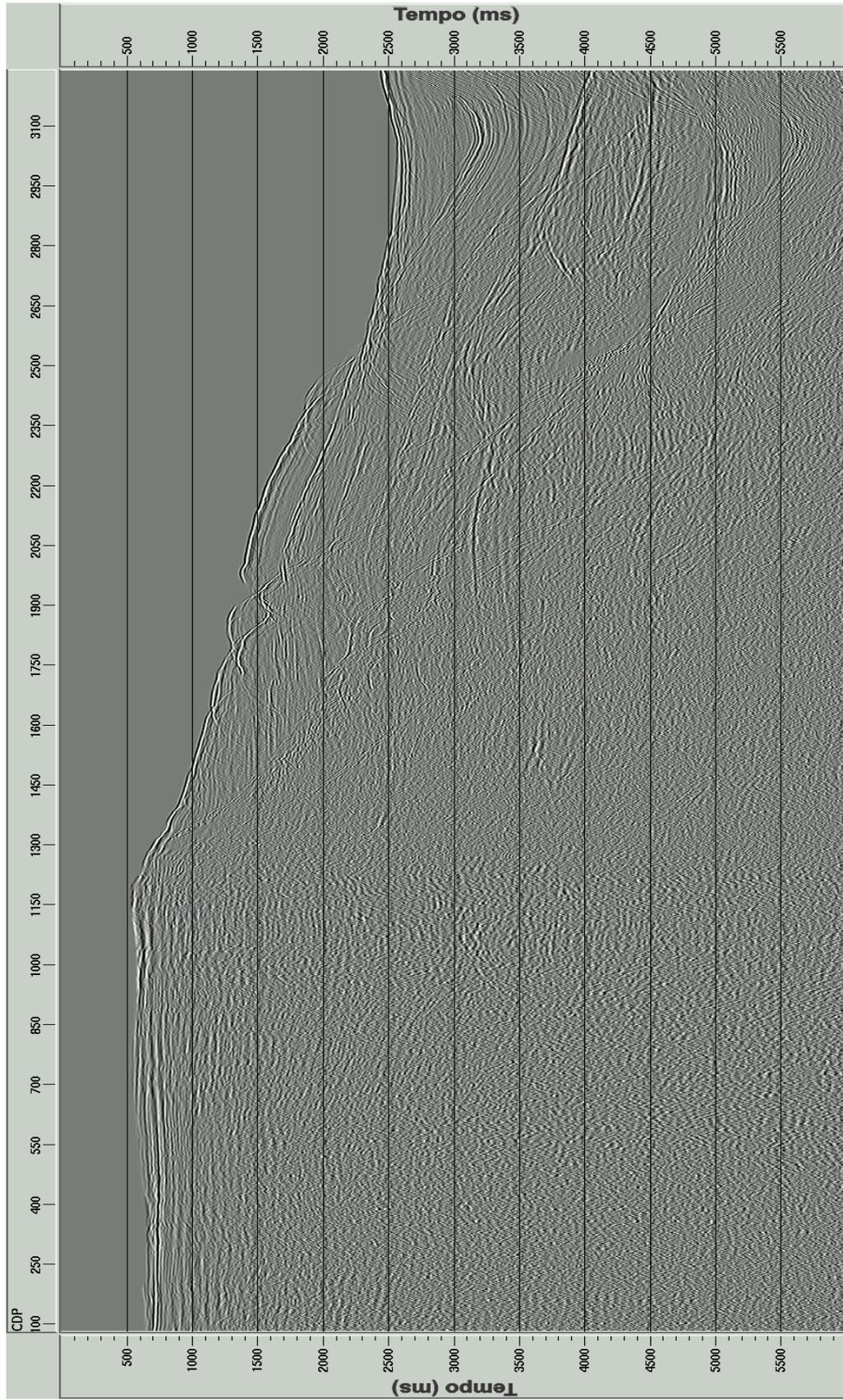
Fonte: Do autor.

Figura 6.20 - Dado organizado em afastamento mínimo (150m) com aplicação do SRME - As múltiplas são parcialmente atenuadas para a região que vai do CMP 1200 até 3270.



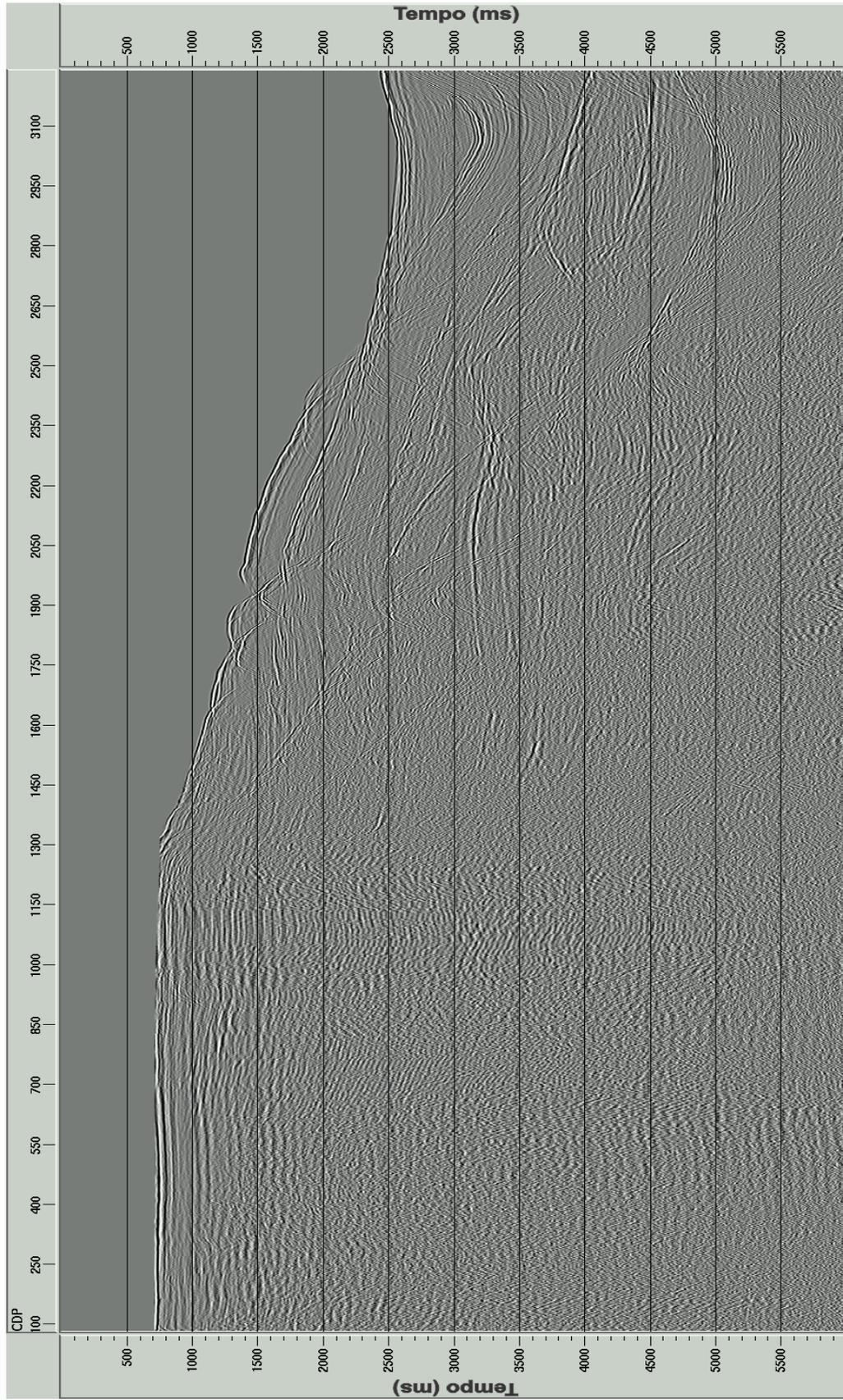
Fonte: Do autor.

Figura 6.21 - Dado organizado em afastamento de 1050m com aplicação do SRME.



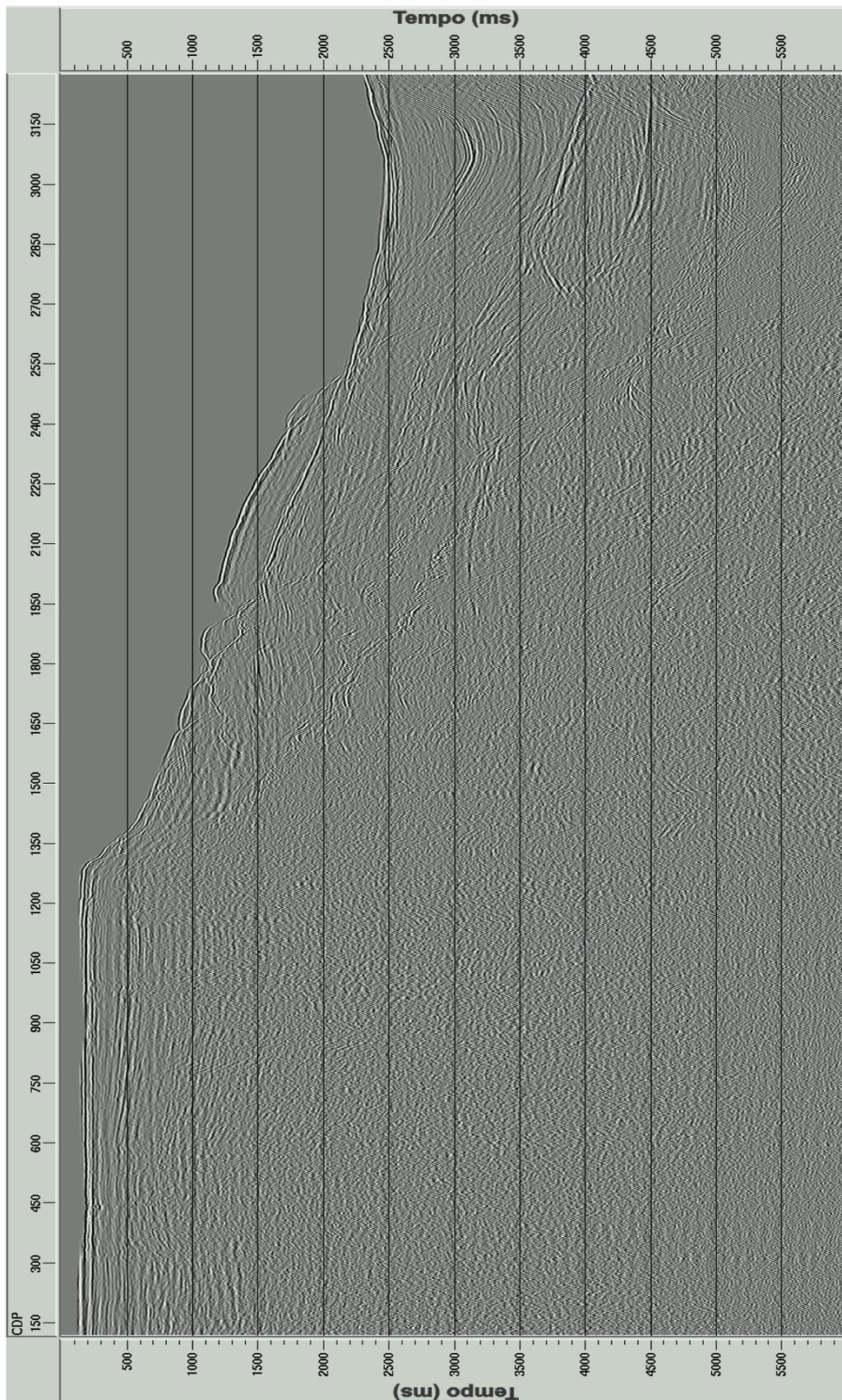
Fonte: Do autor.

Figura 6.22 - Dado organizado em afastamento de 1050m com aplicação do Radon.



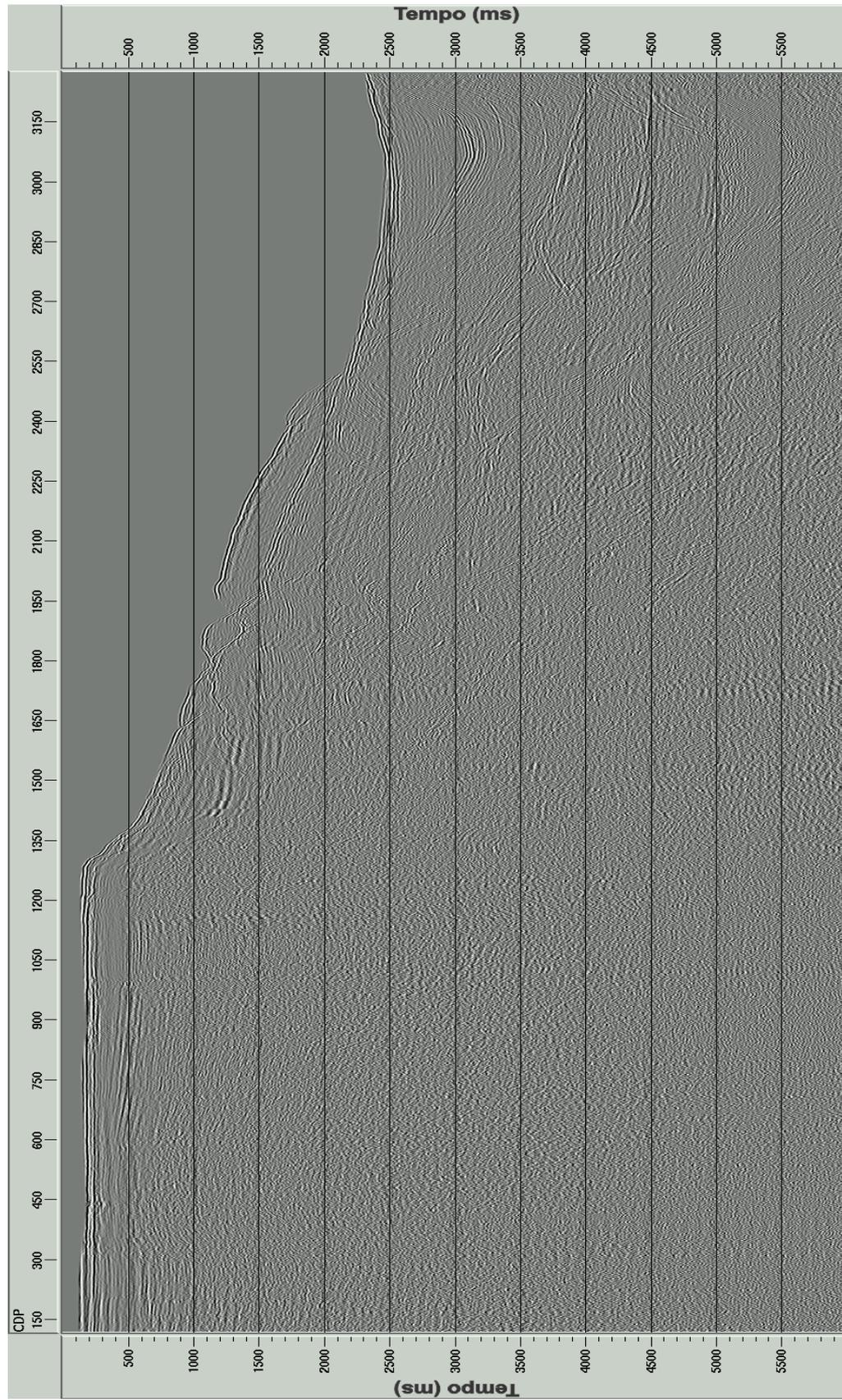
Fonte: Do autor.

Figura 6.23 - Dado organizado em afastamento mínimo (150m) após a aplicação do SRME e Radon.



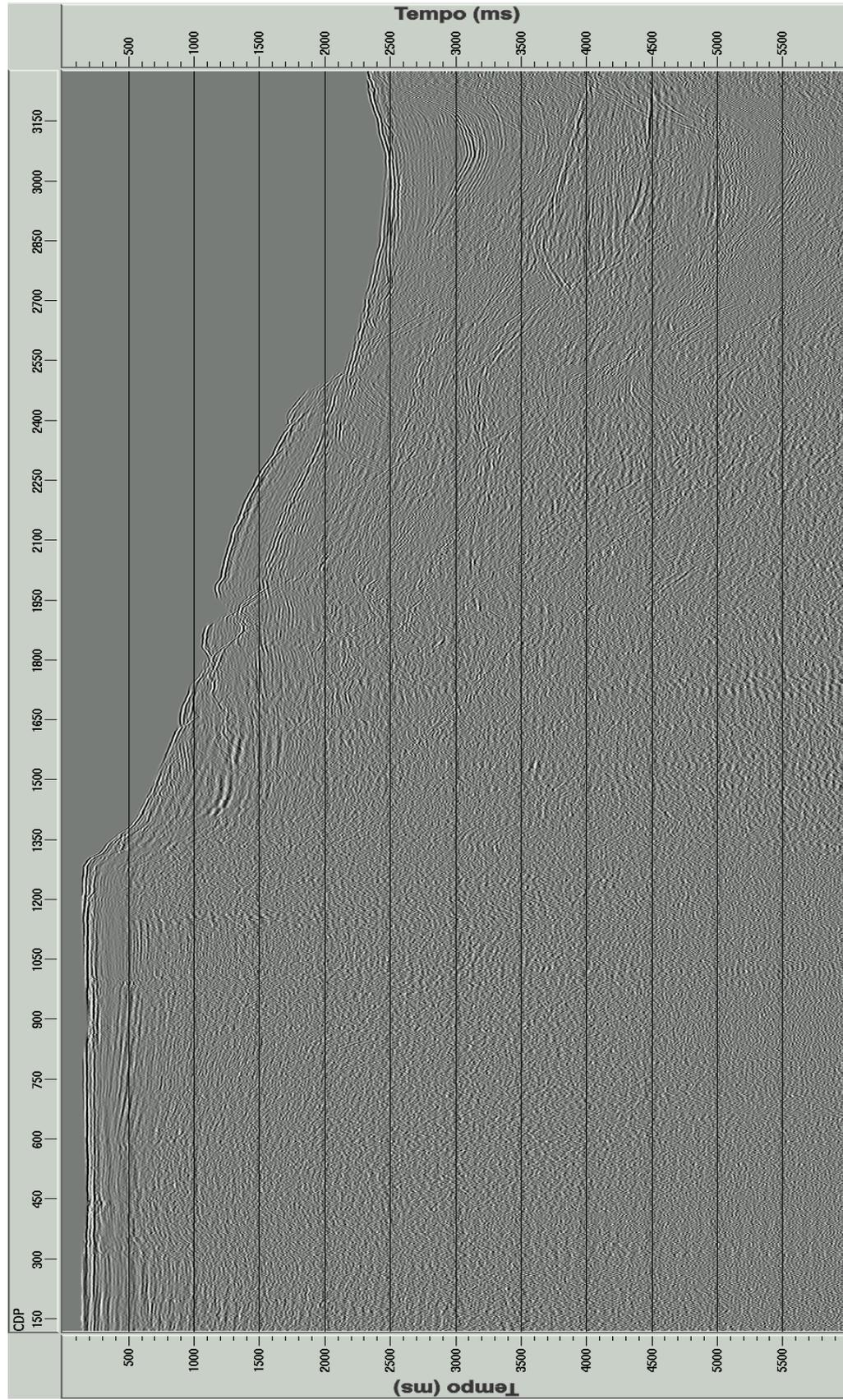
Fonte: Do autor.

Figura 6.24 - Dado organizado em afastamento mínimo (150m), com o melhor resultado, Fluxo O (Figura 6.3).



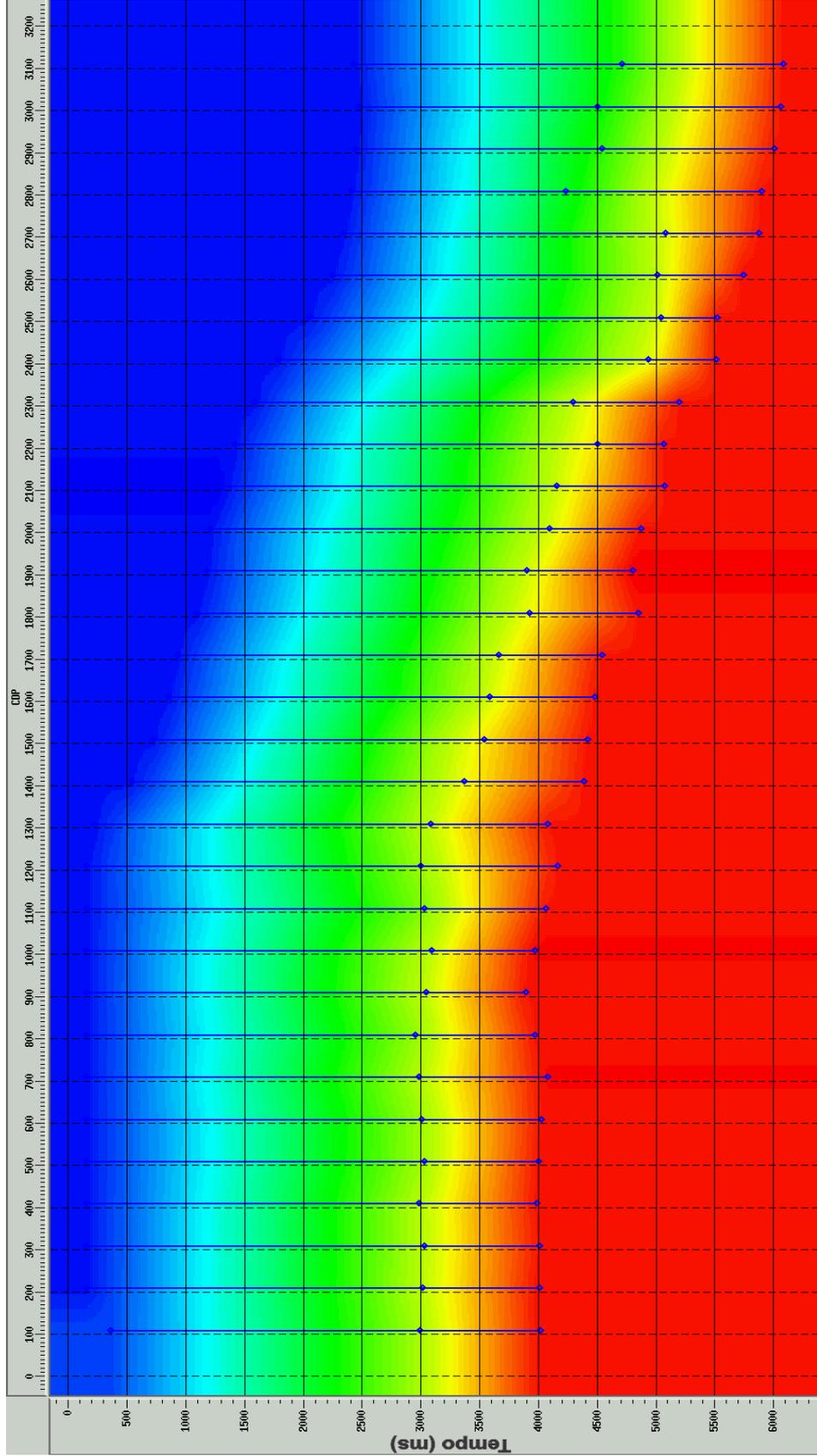
Fonte: Do autor.

Figura 6.25 - Dado organizado em afastamento mínimo (150m), com o melhor resultado, Fluxo P (Figura 6.3).



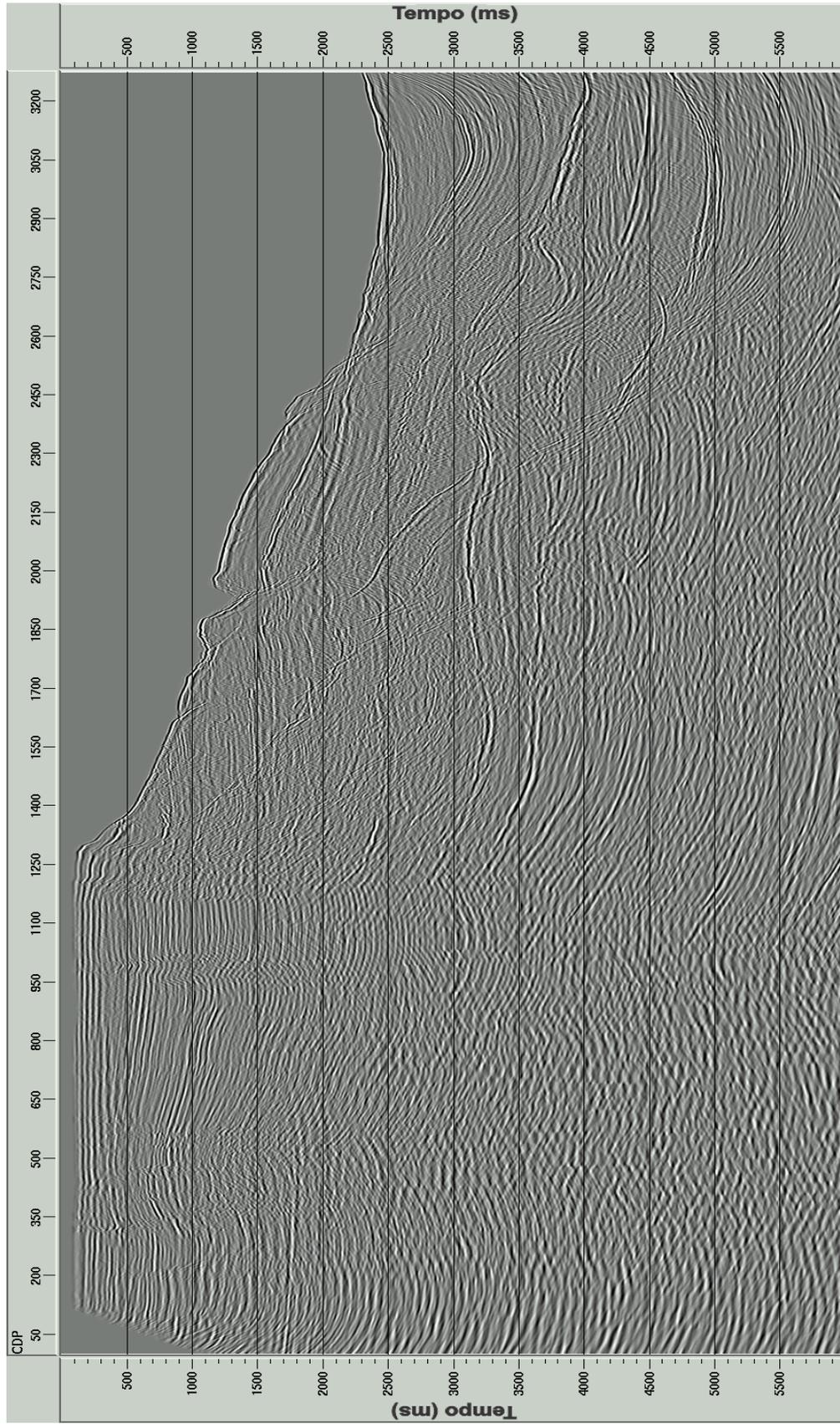
Fonte: Do autor.

Figura 6.26 - Na Figura 6.26 é mostrado o mapa de velocidades interpoladas a partir das velocidades estimadas. A estimativa foi feita a cada 100 CMP's, marcados pelos pontos em azul na Figura 6.26. De acordo com o mapa as velocidades RMS variam de 1480 m/s até 4000m/s.



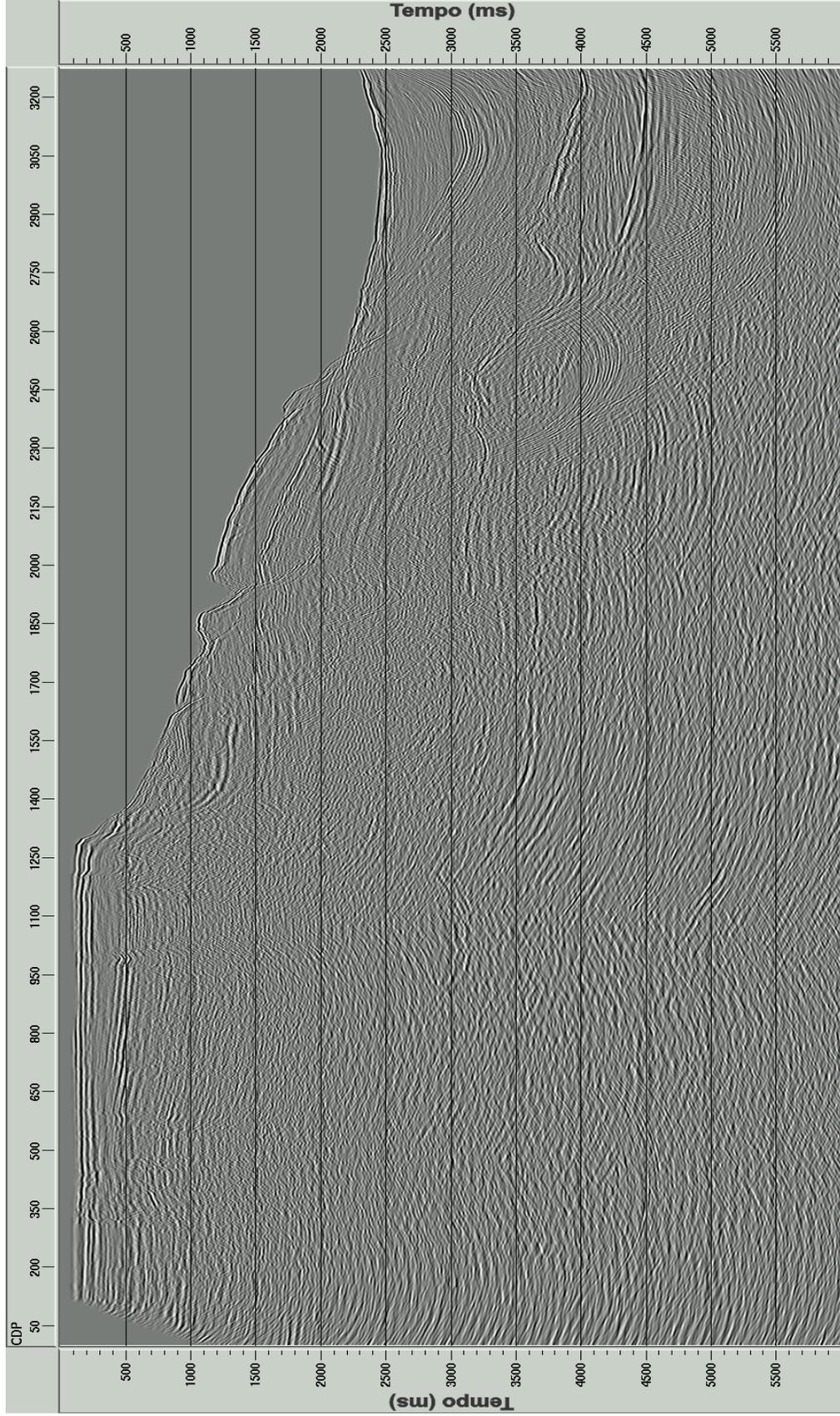
Fonte: Do autor.

Figura 6.27 - Seção migrada pré-empilhamento resultante do processamento convencional. Foi aplicado ganho de 500ms.



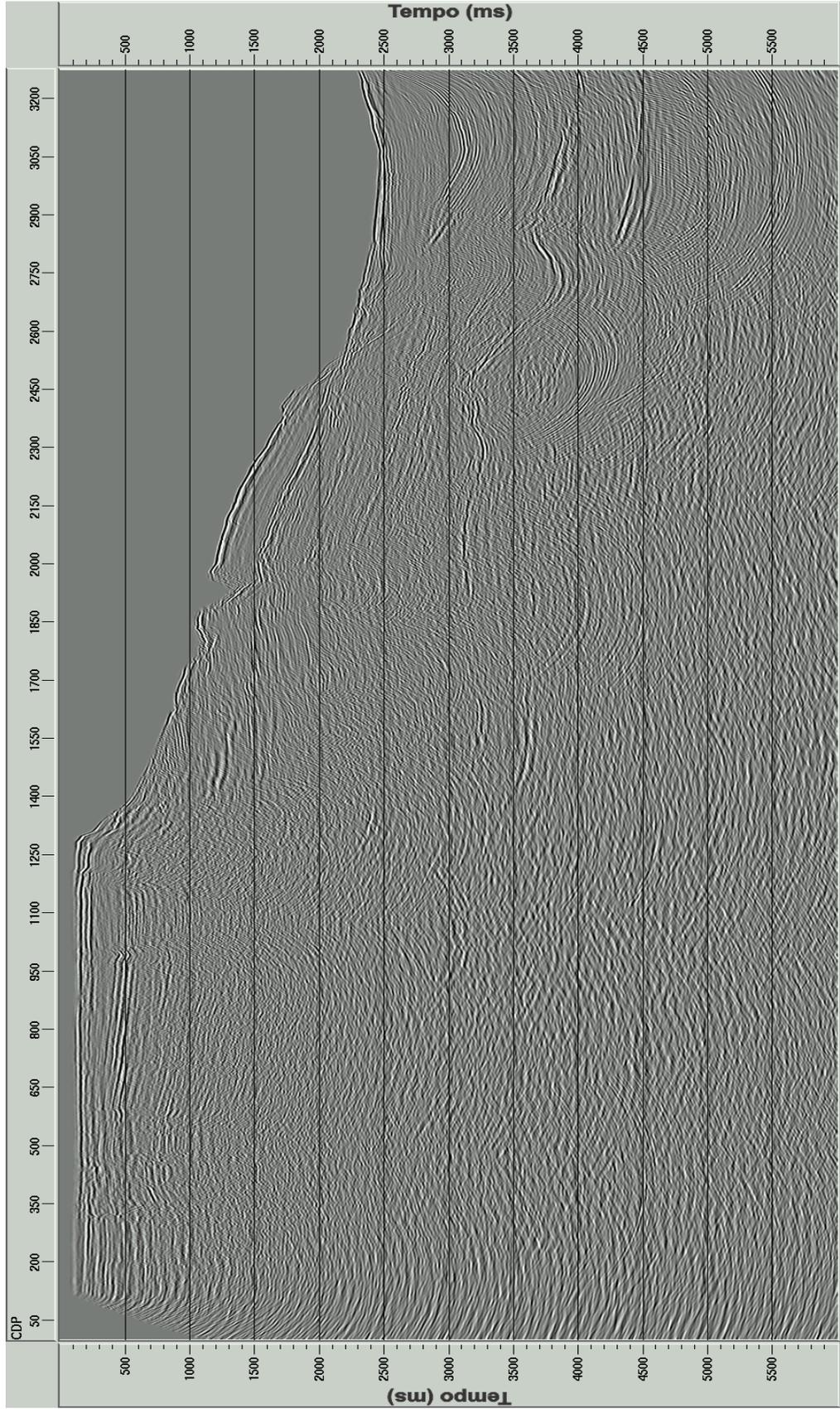
Fonte: Do autor.

Figura 6.28 - Seção migrada pré-empilhamento resultante do fluxo que combina SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon. Foi aplicado ganho de 500ms.



Fonte: Do autor.

Figura 6.29 - Seção migrada pré-empilhamento resultante do fluxo que combina SRME + filtragem $f - k$ + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon. Foi aplicado ganho de 500ms.



Fonte: Do autor.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma análise de metodologias para a atenuação de múltiplas de superfície aplicadas a um dado marinho real 2D da bacia do Jequitinhonha. O dado foi adquirido na região de quebra de talude continental e caracteriza-se pela presença de fortes múltiplas de superfície.

As metodologias aplicadas para a atenuação de múltiplas de superfície consistiam: na filtragem $f - k$, o SRME, a deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ e a filtragem Radon parabólica. Com objetivo de determinar um fluxo ótimo para atenuação de múltiplas de superfície, essas metodologias foram aplicadas separadamente e combinadas.

Foram obtidos os seguintes resultados:

- A maior dificuldade em se aplicar as metodologias que baseiam-se da diferença de moveout entre primárias e múltiplas residiu na dificuldade de se estimar o modelo de velocidade em sub-superfície para o dado utilizado (de quebra do talude) que apresenta grande variação lateral. Nesse sentido as metodologias que baseiam-se na periodicidade e preditividade da múltipla e que por tanto não precisam do modelo de velocidade (pelo menos não tão apurado, ver discussão no capítulo 4) levam vantagem.
- O mapeamento direto e inverso do dado de um domínio para outro gerou alguns artefatos no resultado final.
- Para uma aplicação eficaz do SRME há necessidade de mais de uma iteração. A maior dificuldade de se aplicar o SRME reside no fato da múltipla predita não ‘casar’ com a múltipla existente no dado (ver metodologia do SRME, capítulo 4, fator A) e assim quando a múltipla predita é subtraída do dado essa incompatibilidade gera o que é chamado de ‘cicatriz’ no dado. Para se reduzir esse efeito há necessidade de mais de uma iteração do SRME, e assim o fator A , que é fator a ser ponderado na múltipla predita é melhor estimado.
- A aplicação das metodologias de: filtragem $f - k$, deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$, SRME e filtragem Radon, isoladas se mostrou insatisfatória de maneira geral. Na ordem da menos eficaz para a que gerou os melhores resultados tem-se: filtragem $f - k$, transformada de Radon parabólica, o método SRME e deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$.

- De uma maneira geral as metodologias que baseiam-se na periodicidade e preditividade das múltiplas (deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ e o método SRME) tiveram melhor performance que as metodologias que baseiam-se na diferença de comportamento espacial entre primárias e múltiplas (filtragens $f - k$ e Radon).
- Foram testadas diferentes combinações dessas quatro metodologias. As metodologias combinadas apresentam resultados melhores que a aplicação das metodologias isoladas. O melhor resultado foi obtido pela combinação do SRME + deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ + filtragem Radon parabólica nessa ordem, aplicado a parte mais profunda do dado.
- Não se obteve resultados satisfatórios na parte mais rasa do dado.

Uma vez que a parte mais rasa do dado apresenta múltiplas complexas resultante da mistura de diferentes tipos de múltiplas que não só as múltiplas de superfície, como sugestão de trabalhos futuros propõe-se uma melhor abordagem do problema para a atenuação de múltiplas da parte rasa desse dado.

REFERÊNCIAS

- ABBAD, B.; URSIN, B.; PORSANI, M. J. A fast, modified parabolic radon transform. *Society of Exploration Geophysicists*, v. 76, n. 1, p. V11–V24, Jan. 2011.
- ALAM, M. A.; AUSTIN, J. A. *Multiple attenuation using slant stacks*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1981. 70 p.
- ALVAREZ, G.; BIONDI, B.; GUITTON, A. Attenuation of specular and diffracted 2d multiples in image space. *Society of Exploration Geophysicists*, v. 72, n. 5, p. V97–V109, Sep. 2007.
- ANSTEY, N. A. Part I: the sectional auto-correlogram. *Geophysical Prospecting*, Amsterdam, v. 14, p. 389–411, Jun. 1966.
- ANSTEY, N. A.; NEWMAN, P. Part II: the sectional retro-correlogram. *Geophysical Prospecting*, Amsterdam, v. 14, p. 411–426, Jun. 1966.
- BAARDMAN, R. H. et al. Estimation of primaries by sparse inversion using dual-sensor data. *Society of Exploration Geophysicists - Expanded Abstracts*, Denver, v. 29, p. 3468–3472, 2010.
- BERKHOUT, A. J. *Seismic migration: imaging of acoustic energy by wave field extrapolation. A theoretical aspects*: Developments in solid earth geophysics. 2. ed. [S.l.]: Elsevier Science Publishing Co., 1984. 286 p.
- BERKHOUT, A. J.; VERSCHUUR, D. J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part I: Theoretical considerations. *Society of Exploration Geophysicists*, The Netherlands, v. 62, n. 5, p. 1586–1595, Sep. 1997.
- CLAERBOUT, J. F. *Imaging the earth's interior*. 1. ed. Palo Alto, California: Blackwell Scientific Publications, 1985. 398 p. Disponível em: <<http://sepwww.stanford.edu>>. Acesso em: 11 jan. 2011.
- DIEBOLD, J. B.; STOFFA, P. L. The travelttime equation, tau-p mapping, and inversion of common midpoint data. *Society of Exploration Geophysicists*, v. 46, n. 3, p. 238–254, Mar. 1981.
- DRAGOSET, B. Introduction to air guns and air-gun arrays. *The Leading Edge*, Houston, v. 19, n. 8, p. 892–897, Aug. 2000.
- DUARTE, O. O. *Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia*. 4. ed. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2009. 383 p. (23).
- DUNCAN, G.; BERESFORD, G. Slowness adaptative f-k filtering of prestack seismic data. *Society of Exploration Geophysicists*, v. 59, n. 1, p. 140–147, Jan. 1994.

- EMBREE, P.; BURG, J. P.; BACKUS, M. M. Wide-band velocity filtering - the pie-slice process. *Society of Exploration Geophysicists*, v. 28, n. 6, p. 948–974, Dec. 1963.
- HAMPSON, D. Inverse velocity stacking for multiple elimination. *Canadian Society of Exploration Geophysicists*, Calgary, Alberta, v. 22, n. 1, p. 44–55, Dec. 1986.
- HONGTU, L.; ZHI, H.; XIANGYU, G. Cascade multiple suppression techniques in deepwater application. *Chinese Petroleum Society / Society of Exploration Geophysicists - Expanded Abstracts*, 2009.
- HOUSTON, L. M. Multiple suppression using a local coherence filter. *Society of Exploration Geophysicists*, v. 63, n. 2, p. 652–659, Mar. 1998.
- IKELLE, L. T.; AMUNDSEN, L. *Introduction to petroleum seismology*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2005. 679 p. Disponível em: <<http://www.petroleumgeophysics.com>>. Acesso em: 11 jan. 2011.
- LANDRØ, M.; AMUNDSEN, L. Mariner seismic sources. *GEO Expro Magazine*, London, n. 01, p. 32, Feb. 2010.
- LOKSHANOV, D.; HELLE, H. Efficient f-k modeling approach in multiple elimination. *Society of Exploration Geophysicists - Expanded Abstracts*, v. 11, p. 1077–1080, 1992.
- MAYNE, W. H. Seismic surveying. *US Patent*, San Antonio, Texas, n. 2732906, Jan. 1956. Application Jul. 1950.
- MAYNE, W. H. Common reflection point horizontal data stacking techniques. *Society of Exploration Geophysicists*, v. 27, n. 6, p. 927–938, Dec. 1962.
- MENDONÇA, R. N. A. *Atenuação de reflexões múltiplas em dados sísmicos reais utilizando a técnica de remoção de múltiplas relacionadas à superfície livre - SRME*. Belém, Pará, 2009: Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica, 2009. 63 p.
- MOHRIAK, W. U. Bacias sedimentares da margem continental brasileira. Brasília, DF. Serviço Geológico do Brasil - CPRM, p. 87–165, 2003.
- OLIVEIRA, A. S.; SANTOS, J. R. S. B.; LIMA, G. R. True-velocity Radon filter. *Society of Exploration Geophysicists - Expanded Abstracts*, v. 26, p. 2530–2534, 2007.
- RILEY, D. C.; CLAERBOUT, J. F. 2-D multiple reflections. *Society of Exploration Geophysicists*, Stanford, California, v. 41, n. 4, p. 592–620, Aug. 1976.
- SABLON, R. et al. On the accuracy of data-driven free surface multiple prediction. *Society of Exploration Geophysicists - Expanded Abstracts*, v. 30, p. 3505–3509, 2011.
- SCHULTZ, P. S.; CLAERBOUT, J. F. Velocity estimation by wavefront synthesis. *Society of Exploration Geophysicists*, v. 43, p. 691–712, 1978.
- SHAW, S.; MA, N.; WUENSCHER, M. On the accuracy of data-driven free surface multiple prediction. *Society of Exploration Geophysicists - Expanded Abstracts*, v. 30, p. 3495–3499, 2011.

- STOFFA, P. L. Tau-p. an alternative domain for filtering, velocity analysis and imaging. *Society of Exploration Geophysicists - Expanded Abstracts*, n. 8, p. 551–554, 1989.
- TANER, M. T. Long period sea floor multiples and their suppression. *Geophysical Prospecting*, Houston, Texas, v. 28, n. 1, p. 30–48, Feb. 1980.
- TATHAM, R. H. Tau-p filtering. In: _____. *Tau-p. A plane wave approach to the analysis of seismic data*. [S.l.]: Ed. Kluwer Academic Publishers and Stoffa, P. L., 1989. v. 8, p. 35–70.
- TATHAM, R. H.; KEENEY, J. W.; NOPONEN, I. Application of the tau-p transform (slant-stack) in processing seismic reflection data. *Australian Society of Exploration Geophysicists*, v. 14, n. 4, p. 162–172, Dec. 1983.
- TAVARES, C. T. *Processamento de dados sísmicos em uma linha 2D da bacia do camamu*. Belém, Pará, 2009: Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica, 2009. 67 p.
- THORSON, J. Reconstruction of a wavefield from slant stack. *Stanford Exploration Project*, n. 14, 1978. Disponível em: <<http://sepwww.stanford.edu/>>. Acesso em: 11 jan. 2011.
- TREITEL, S.; GUTOWSKI, P. R.; WAGNER, D. E. Plane-wave decomposition of seismograms. *Society of Exploration Geophysicists*, v. 47, n. 10, p. 1375–1401, Oct. 1982.
- VERSCHUUR, D. J. *Seismic multiple removal techniques*. The Netherlands: European Association of Geoscientists and Engineers, 2006. 191 p.
- VERSCHUUR, D. J.; BERKHOUT, A. J. Surface-related multiple elimination. practical aspects. *Society of Exploration Geophysicists - Expanded Abstracts*, New Orleans, n. 11, p. 1100–1103, 1992.
- VERSCHUUR, D. J.; BERKHOUT, A. J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion. part I. practical aspects and examples. *Society of Exploration Geophysicists*, The Netherlands, v. 62, n. 5, p. 1596–1611, Sep. 1997.
- VERSCHUUR, D. J.; BERKHOUT, A. J.; WAPENAAR, C. P. A. Wavelet estimation by prestack multiple elimination. *Society of Exploration Geophysicists - Expanded Abstracts*, Dallas, n. 8, p. 1129–1132, 1989.
- VERSCHUUR, D. J.; BERKHOUT, A. J.; WAPENAAR, C. P. A. Adaptive surface-related multiple elimination. *Society of Exploration Geophysicists*, The Netherlands, v. 57, n. 9, p. 1166–1177, Sep. 1992.
- WU, M.; WANG, S. A case study of f-k demultiple on 2D offshore seismic data. *The Leading Edge*, v. 30, p. 446–450, 2011.
- YILMAZ, O. *Seismic data analysis. Processing, inversion, and interpretation of seismic data*. 2. ed. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2001. 2027 p.
- ZHOU, B.; GREENHALGH, S. A. Wave-equation extrapolation-based multiple attenuation: 2-D filtering in the f-k domain. *Society of Exploration Geophysicists*, v. 59, n. 9, p. 1377–1391, Sep. 1994.

APÊNDICE

APÊNDICE A – TRANSFORMADA PARA O DOMÍNIO $\tau - p$

Aplicar ao dado no domínio tempo-afastamento a transformada de Fourier 2D é uma das maneiras de se decompor o campo de onda em suas componentes de onda plana. Cada onda plana tem uma única frequência e viaja com um único ângulo, em relação a vertical. Uma outra maneira de decompor o campo de onda sísmico em suas componentes de onda plana é através da transformada para o domínio $\tau - p$ (transformação também conhecida como slant-stack¹). Esta transformação, mapeia o dado do domínio tempo-afastamento para o domínio $\tau - p$. No slant-stack o eixo do afastamento é substituído pelo eixo do parâmetro do raio, p . O parâmetro do raio é o inverso da velocidade de fase horizontal. Um grupo de traços com uma “faixa” de valores de p é chamado de família slant-stack (YILMAZ, 2001).

A transformação do dado do domínio tempo-afastamento é realizada em dois passos: primeiro uma correção linear, LMO, é aplicada aos dados através da transformação para a coordenada definida por (SCHULTZ; CLAERBOUT, 1978):

$$\tau = t - px \quad , \quad (\text{A.1})$$

em que p é o parâmetro do raio, x é o afastamento, t é o tempo de trânsito duplo e τ é o tempo para $p = 0$. Em seguida o dado é somado sobre o eixo do x por:

$$S(p, \tau) = \sum_x P(x, \tau + px) \quad , \quad (\text{A.2})$$

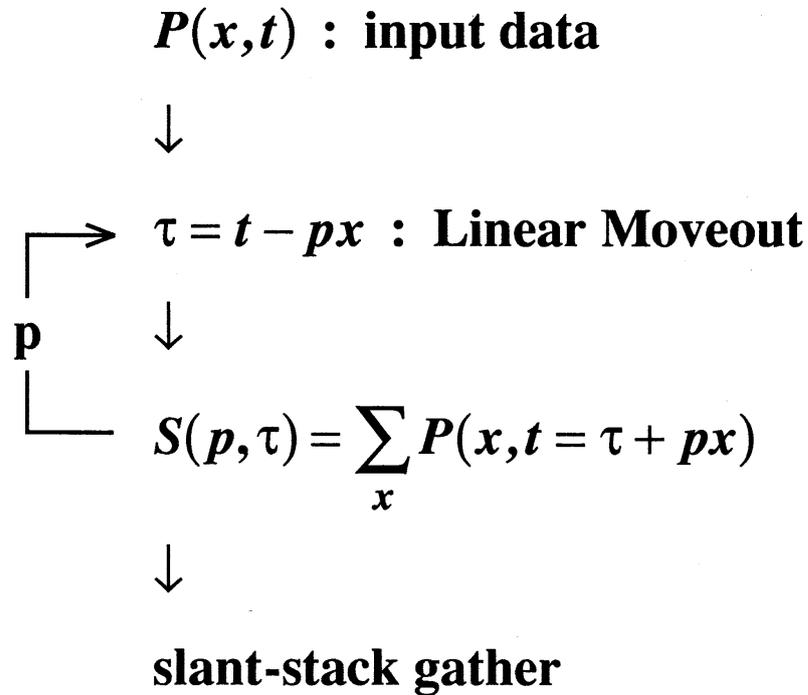
em que $S(p, \tau)$ representa a onda plana com parâmetro do raio $p = \sin\theta/v$.

Repetindo a correção LMO para uma faixa de valores de p e realizando a soma na equação A.2, uma completa família slant-stack é construída. Na Figura A.1 é mostrada o fluxograma de construção da família slant-stack. Na prática uma família slant-stack é conhecida como família $\tau - p$. Ela consiste de todas as componentes inclinadas dentro de um range de valores de p especificados no afastamento do dado original (YILMAZ, 2001). (fazer essa Figura em português)

O mapeamento do domínio tempo-afastamento para o domínio $\tau - p$ é reversível (THORSON, 1978). Primeiro é aplicada a correção linear no domínio $\tau - p$ (YILMAZ,

¹Slant-stack: empilhamento oblíquo). Essa transformada foi proposta por Schultz e Claerbout (1978), na qual os traços pertencentes a uma família de traços de reflexão sísmica são empilhados, sucessivamente, com taxas crescentes de inclinação (DUARTE, 2009).

Figura A.1 - Fluxograma para transformar o dado do domínio tempo-afastamento no domínio $\tau - p$ (YILMAZ, 2001).



Fonte: (YILMAZ, 2001).

2001):

$$t = \tau + px \quad . \quad (\text{A.3})$$

Então, somam-se os dados no domínio $\tau - p$ sobre o eixo do parâmetro do raio p para obtenção de (YILMAZ, 2001):

$$P(t, x) = \sum_p S(p, t - px) \quad . \quad (\text{A.4})$$

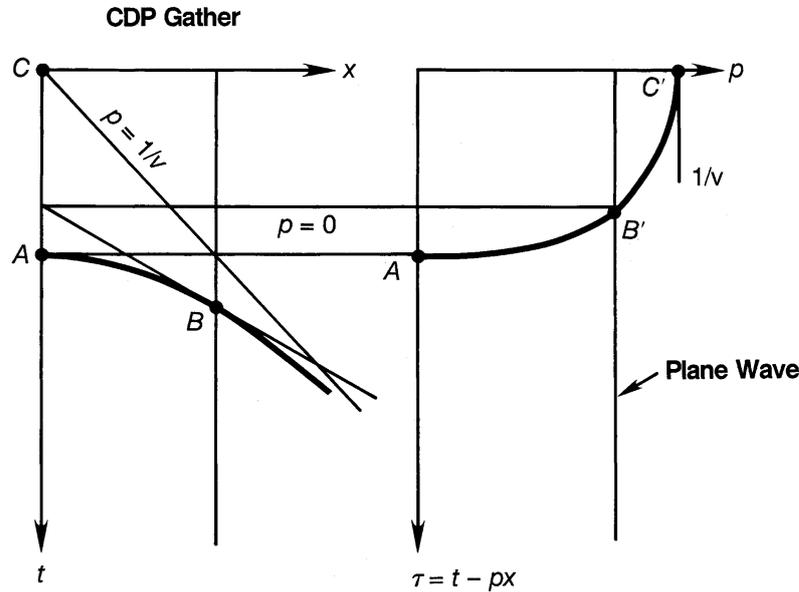
Para se restaurar as amplitudes propriamente, uma filtragem ρ é aplicada antes do mapeamento inverso. Isso é feito pela multiplicação do espectro de amplitude para cada traço do slant-stack por um valor absoluto da frequência (YILMAZ, 2001).

Uma descrição esquemática do mapeamento da onda plana apresentada nas equações A.1 e A.2 é mostrada na Figura A.2 (YILMAZ, 2001):

De acordo com a Figura A.2, dada a reta $p = 0$, é feita a soma das amplitudes do dado ao longo desta reta. A reta $p = 0$ intercepta a hipérbole de reflexão em seu ápice A , logo a soma ao longo da reta só tem contribuição do ponto A .

Este ponto, no domínio tempo-afastamento, é mapeado no ponto A' no domínio $\tau - p$

Figura A.2 - A hipérbole da família CMP no domínio tempo-afastamento mapeia em uma elipse no domínio $\tau - p$ (YILMAZ, 2001).



Fonte: (YILMAZ, 2001).

. Para outro valor de p a hipérbole, no domínio tempo-afastamento, é interceptada em B que é mapeada em B' , no novo domínio. A maior contribuição para a soma ao longo da trajetória oblíqua vem da área tangencial ao ponto B . Esta zona de tangência é chamada de zonal de Fresnel (YILMAZ, 2001).

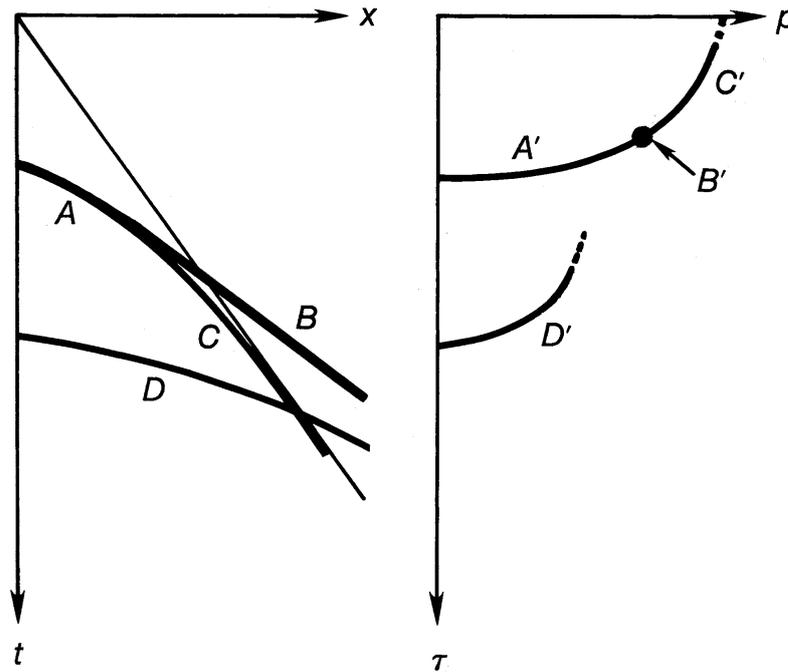
A zona de Fresnel é mais larga para altas velocidades e eventos profundos. A soma sobre o eixo do afastamento após a correção LMO estará confinada a zona de Fresnel. A trajetória inclinada necessária para a soma ao longo de $p = 1/V$ é a assintótica da hipérbole. Esta trajetória corresponde ao raio que viaja a 90° com a vertical. A energia ao longo da assintótica é mapeada em C' no eixo p . Usando o mapeamento descrito previamente, correção linear seguido da soma sobre o eixo do afastamento para um range de valores de p (equações A.1 e A.2), as trajetórias hiperbólicas no domínio $t - x$ são mapeadas em elipses no domínio $\tau - p$. Na realidade, nunca se registra uma hipérbole com extensão infinita nem um traço zero-offset. Assim a trajetória elíptica no domínio $\tau - p$ nunca é completa de A' a C' (YILMAZ, 2001).

Um outro exemplo do mapeamento slant-stack é mostrado na Figura A.3. Nessa Figura as reflexões subcríticas² A e D são mapeadas na região de baixos valores de p . Enquanto que, a reflexão acima do ângulo crítico, C , é mapeada na região de altos valores de p . Idealmente um evento linear no domínio do afastamento como a refração B é

²Aquelas cujo ângulo de incidência é menor que o ângulo crítico.

mapeada em um ponto no domínio slant-stack. Da mesma forma, um evento linear no domínio slant-stack é mapeado em um ponto no domínio do afastamento (YILMAZ, 2001).

Figura A.3 - Várias chegadas em uma família CMP com a corresponde família $\tau - p$. Os eventos A , B , C e D são mapeados em A' , B' , C' e D' respectivamente (YILMAZ, 2001).



Fonte: (YILMAZ, 2001).

O slant-stack em si é apenas o lugar onde os traços sísmicos estão organizados no domínio $\tau - p$, não representando uma etapa de processamento, entretando muitas técnicas de processamento sísmico apresentam melhores resultados quando aplicado nesse domínio. Abaixo são mostrados as etapas básicas da utilização do slant-stack no processamento (YILMAZ, 2001):

1. Ao dado no domínio $t - x$ é aplicada a correção LMO para um valor de p . Em seguida é feita a soma sobre o eixo x . A etapa anterior é repetida para um range de valores de p , resultando em uma família slant-stack.
2. Em seguida é feita a aplicação de um processo particular no domínio slant-stack (filtragem de mergulho, deconvolução).
3. Antes da aplicação da transformação slant-stack inversa, é aplicado aos dados a filtragem ρ no domínio slant-stack.

4. Então, a aplicação da correção linear inversa para um valor específico do afastamento e soma sobre o range de p (equações A.3 e A.4). A etapa anterior é repetida para todos os afastamentos. O dado resultante estará no domínio $t - x$.