



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**COMPARAÇÃO DOS FILTROS DE VELOCIDADE E DO OPERADOR
WHLP-CRS NA ATENUAÇÃO DE MÚLTIPLAS**

EDSON COSTA CRUZ

**BELÉM – PARÁ - BRASIL
2004**

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

**COMPARAÇÃO DOS FILTROS DE VELOCIDADE E DO OPERADOR
WHLP-CRS NA ATENUAÇÃO DE MÚLTIPLAS**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

EDSON COSTA CRUZ

COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

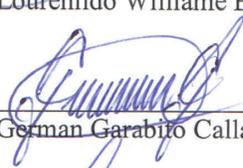
Data da aprovação: 20/04/2004

Conceito: 8,5 (Excelente)

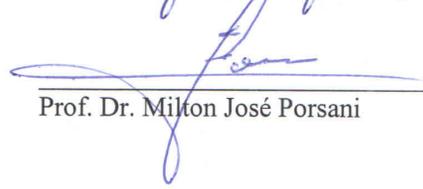
COMITÊ DE DISSERTAÇÃO



Prof. Dr. Lourenildo Willame Barbosa Leite (Orientador)



Prof. Dr. German Garabito Callapino



Prof. Dr. Milton José Porsani

BELÉM – PARÁ - BRASIL

2004

Aos meus pais, minha esposa e
aos meus filhos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Lourenildo W. B. Leite pela confiança em mim creditada, pela sua inequívoca competência profissional, constante paciência e irrestrita disponibilidade de tempo na orientação dessa Dissertação, e pela franca amizade ao longo do período de realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. German Garabito Callapino pelo valioso apoio durante a elaboração desta Dissertação.

Ao Prof. Dr. Jessé Carvalho Costa pelas sugestões na elaboração desta Dissertação.

Ao Prof. Dr. Milton José Porsani por participar desta banca examinadora.

A todos os amigos do Mestrado e Doutorado do prédio do CPGf.

A todos meus familiares pela compreensão pelos dias, noites e fins de semana que não pude estar presente.

Aos membros da Banca examinadora pelas sugestões para a realização de um bom trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro investido através de bolsa de pesquisa.

Ao Curso de Pós-Graduação de Geofísica da UFPa, coordenado pelo Prof. Dr. Lourenildo W. B. Leite, que deu o suporte acadêmico para a elaboração deste trabalho. Assim como a todo o corpo de professores e funcionários do Curso e do Departamento de Geofísica.

A todas as pessoas que não foram citadas nominalmente, mas que tiveram uma contribuição de forma direta ou indireta durante o período que se seguiu a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA		i
AGRADECIMENTO		ii
RESUMO		1
ABSTRACT		2
1. INTRODUÇÃO		3
2. MODELO GEOLÓGICO		7
3. MODELO SÍSMICO		9
3.1. GEOMETRIAS DO LEVANTAMENTO E DO PROCESSAMENTO		9
3.2. CONTEÚDO DA SEÇÃO SÍSMICA		9
3.3. FORMA DA EQUAÇÃO DE ONDA		11
3.4. SEQUÊNCIA DOS MODELOS		13
3.4.1. Interfaces plano-horizontais – 1D		13
3.4.2. Interfaces plano-inclinadas – 2D		15
3.4.3. Interfaces curvas – 2D		17
4. OPERADOR DE EMPILHAMENTO CRS EM 2D		19
4.1. ONDAS HIPOTÉTICAS NIP E N		19
4.2. APROXIMAÇÕES HIPERBÓLICA E PARABÓLICA DO TEMPO DE TRÂNSITO		21
4.3. ALGORITMO DO EMPILHAMENTO		25
5. O OPERADOR WHLP-CRS		28
6. FILTRO DE VELOCIDADE $\omega-k$		41
6.1. DEFINIÇÃO FORMAL NO DOMÍNIO TEMPO-ESPAÇO		41
6.2. TRANSFORMADA DE FOURIER 1D E 2D		43
6.3. ANÁLISE DO CONTEÚDO DE UM FILTRO		46
6.4. FILTROS BANDA-PASSANTE E DE REJEIÇÃO		48
6.5. CONTAMINAÇÃO DE FREQUÊNCIA POR AMOSTRAGEM		49
7. RESULTADOS E CONCLUSÕES		58
7.1. DADOS SINTÉTICOS		58
7.2. CONCLUSÕES GERAIS		67
REFERÊNCIAS		68
APÊNDICES		73
APÊNDICE A	Simbologia utilizada	74
APÊNDICE B	Comandos utilizados no pacote de programa SU-CWP	76

RESUMO

A motivação geológica deste trabalho reside no imageamento de estruturas de bacias sedimentares da região Amazônica, onde a geração e o acúmulo de hidrocarboneto estão relacionados com a presença de soleiras de diabásio. A motivação sísmica reside no fato de que essas rochas intrusivas possuem grandes contrastes de impedância com a rocha encaixante, o que resulta em múltiplas, externas e internas, com amplitudes semelhantes as das primárias. O sinal sísmico das múltiplas podem predominar sobre o sinal das reflexões primárias oriundas de interfaces mais profundas, o que pode dificultar o processamento, a interpretação e o imageamento da seção sísmica temporal.

Neste trabalho, estudamos a atenuação de múltiplas em seções sintéticas fonte-comum (FC) através da comparação de dois métodos. O primeiro método resulta da combinação das técnicas Wiener-Hopf-Levinson de predição (WHLP) e o de empilhamento superfície-de-reflexão-comum (CRS), e denominando WHLP-CRS, onde o operador é desenhado exclusivamente no domínio do tempo-espaco. O segundo método utilizado é o filtro de velocidade ($\omega-k$) aplicado após o empilhamento superfície-de-reflexão (CRS), onde o operador é desenhado exclusivamente no domínio bidimensional de frequência temporal-espacial.

A identificação das múltiplas é feita na seção de afastamento-nulo (AN) simulada com o empilhamento CRS, e utiliza o critério da periodicidade entre primária e suas múltiplas. Os atributos da frente de onda, obtidos através do empilhamento CRS, são utilizados na definição de janelas móveis no domínio tempo-espaco, que são usadas para calcular o operador WHLP-CRS.

O cálculo do filtro $\omega-k$ é realizado no domínio da frequência temporal-espacial, onde os eventos são selecionados para corte ou passagem. O filtro ($\omega-k$) é classificado como filtro de corte, com alteração de amplitude, mas não de fase, e limites práticos são impostos pela amostragem tempo-espaco.

Em termos práticos, concluímos que, para o caso de múltiplas, os eventos separados no domínio $x-t$ não necessariamente se separam no domínio $\omega-k$, o que dificulta o desenho de um operador $\omega-k$ semelhante em performance ao operador $x-t$.

ABSTRACT

The geological motivation of this work is the imaging of sedimentary basin structures of the Amazon region, where the generation and accumulation of hydrocarbons is related to the existence of diabase sills. The seismic motivation is the fact that these intrusive rocks present a great impedance contrast with respect to the host rock, what gives rise to external and internal multiples, with primary-like amplitudes. The seismic signal of the multiples can predominate over the primary reflection signals from deeper interfaces, making difficult the processing, interpretation and imaging of seismic sections.

In this work we study the attenuation of multiples in common shot (CS) sections by the comparison of two methods. The first one is the combination of the Wiener-Hopf-Levinson (WHLPL) and the common reflection surface (CRS) stacking techniques, here called WHLPL-CRS, where the operator is exclusively designed in the space-time domain. The second method is a velocity filter (ω - k), applied after the CRS stacking, where the operator is exclusively designed in the frequency-wavenumber domain.

The identification of the multiples is performed on the zero-offset (ZO) section simulated by the CRS stacking, using the periodicity between primaries and its multiples. The wavefront attributes, obtained through CRS stacking, are inserted on movable space-time windows, used to calculate the WHLPL-CRS operator.

The ω - k filter calculations are performed in the frequency-wavenumber domain, where the events of interest are selected for cutting or passage. The ω - k filter is classified as a cut-off filter, with amplitude alteration and preservation of phase, the limits of it are imposed by a space-time sampling.

In practical aspects we conclude that for the case of multiples, separated events on the x - t domain are not necessarily separated on the ω - k domain, which raise difficulties in the designing of a ω - k operator with a similar performance when compared to the x - t operator.

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho de dissertação objetivamos especificamente um estudo comparativo de duas técnicas de atenuação de múltiplas; uma desenha no domínio tempo-espaço e a outra no domínio da bifreqüência temporal-espacial. Para isto, fazemos uso de métodos desenvolvidos na instituição local (Garabito 2001; Alves 2003) e em instituições internacionais (Seismic Unix, Colorado School of Mines; Seis88 da Universidade de Praga, Checoslováquia). Conseqüentemente, para alcançar os objetivos, tivemos que estudar teorias de desenho de filtros no domínio $t-x$ (Wiener-Hopf-Levinson) e no domínio $\omega-k$ (filtro de velocidade) da transformada de Fourier 2D.

Muita das bacias sedimentares brasileiras de interesse a exploração de petróleo se caracterizam pela presença de soleiras de diabásio Eiras & Ribeiro (2003). Nas bacias sedimentares da região Amazônica, os geólogos e geoquímicos consideram as soleiras como diretamente relacionadas à geração e ao acúmulo de hidrocarbonetos Eiras (1998). As altas impedâncias sísmicas dos contatos (sedimento/intrusiva) causam grande espalhamento de energia do sinal sísmico, que fica dividido entre transmissão e reflexão, e estas interfaces geram múltiplas que possuem grandes amplitudes e que podem obscurecer informações sísmicas desejadas, e provenientes de estruturas que estão abaixo das soleiras.

A necessidade do estudo de métodos de atenuação de reflexões múltiplas em dados sísmicos nestas Bacias visa melhorar a imagem sísmica do subsolo. Esta necessidade nos levou a analisar métodos para melhorar as condições de interpretação das rochas geradoras e das estruturas armazenadoras de hidrocarbonetos (óleo e gás) na região.

A atenuação de múltiplas continua como um problema clássico no processamento e interpretação de seções da sísmica de reflexão. Em meios estratificados com presença de soleiras, existe a preocupação de que múltiplas podem dominar e obscurecer as primárias das camadas mais inferiores e, conseqüentemente, dificultar a interpretação da seção. Um número especial do periódico "The Leading EDGE" (1999) é dedicado ao assunto de reconhecimento e atenuação de múltiplas, onde é discutida a não existência de uma técnica de reconhecimento e atenuação de múltipla que seja aplicada a todos os casos possíveis, devido à diversidade da geologia responsável pela geração das múltiplas.

O problema de atenuação de múltiplas na configuração afastamento-nulo (AN) é abordado por uma metodologia clássica, onde o operador de predição é calculado na seção AN que contém

efeitos do processamento, como o estiramento e a deformação do pulso devido ao empilhamento. Como estes efeitos comprometem o desempenho do operador de atenuação de múltiplas, há uma tendência de calcular estes operadores na configuração fonte-comum (FC) utilizando as amplitudes próprias do sinal, o que resulta em uma performance melhor do operador de deconvolução.

Os métodos clássicos para identificação e atenuação de múltiplas foram organizados em quatro categorias por (Weglein, et al., 1997), como apresentadas a seguir:

(I) Métodos baseados na discriminação das velocidades aparentes que exploram a diferença entre as “hipérboles” dos tempos de trânsito das primárias e suas múltiplas. Entre eles podemos citar o de empilhamento de dados PMC (Schneider et al 1965; Schoenberger, 1996; Lu et al, 1999). Um método já clássico que destacamos é o filtro ω - k aplicado após a correção de sobre-tempo-normal (NMO), sendo ele baseado na função velocidade das primárias (Yilmaz, 1994; Jiao et al., 1999). Outros trabalhos baseados no princípio de discriminação de velocidades foram apresentados por Maeland (1997), (Godfrey et al., 1998) e Manuel (1999). Estes métodos são considerados como não eficazes para os casos de refletores profundos, ou de estruturas geológicas complexas cujas curvas de tempos de trânsito diferem da forma de hipérboles simples.

(II) Métodos baseados na periodicidade das múltiplas utilizando operadores de predição e aplicação de convolução. O exemplo mais representativo é o método Wiener-Hopf-Levinson de predição (WHLP), onde o operador é calculado a partir da função autocorrelação do traço sísmico Peacock & Treitel, (1969). Em seções FC, o filtro WHLP é aplicado no domínio τ - p (Taner, 1980; Carrion, 1986). Na teoria clássica do filtro WHLP, o traço sísmico é considerado estacionário, a refletividade uma série aleatória de impulsos, e o meio formado por camadas plano-horizontais (Silvia & Robinson, 1979). Outros métodos que se baseiam na periodicidade temporal das múltiplas são descritos por Schoenberger & Houston (1998), Vershuur & Berkhout (1997), (Dragoset et al., 1998), Fowler (1998), Robinson (1998) e Gasparotto (1999).

(III) Métodos baseados na equação de onda. Entre eles podemos citar Berryhill & Kim (1986); Wiggins (1988); Jiao (1999); Lokshtanov (1998); Lokshtanov (1999); Jakubowicz (1998). Outros trabalhos utilizando este princípio são Vershuur & Berkhout (1998) e (Dragoset et al., 1999). Estes métodos requerem muita informação a priori para aplicação prática.

(IV) Métodos baseados na matriz covariância dos dados pré-empilhamento ou pós-empilhamento.

O filtro de velocidade ω - k tem sido amplamente usado na sismica de reflexão para prospecção, com o objetivo de separar reflexões primárias das ondas de superfície e de outras formas de ruídos coerentes (Embree, et al., 1963; Fail & Grau, 1963; Wiggins, 1966; Clement, 1973). Nesta técnica, a seção sísmica t - x (tempo-espço) é transformada para o domínio ω - k (frequência temporal-espacial), que permite agrupar eventos segundo a velocidade da fase (c) aparente ($\omega=ck$). A banda-passante (ou banda de rejeição) que forma o “leque” é limitada por bordas que demarcam as velocidades mínimas (c_{min}) e máxima (c_{max}) de corte ideal. Quanto mais estreito o leque, mais seletivo é o filtro, porém isto causa efeitos indesejáveis na saída do filtro.

O uso de um passa-banda na forma de leque introduz um efeito artificial: uma interface abrupta de corte no plano ω - k cria uma descontinuidade no espectro (função tipo retangular), e esta descontinuidade produz um prolongamento (efeito do lobos laterais) no domínio t - x (função seno-cardinal) Jerri (1977).

Com o intuito de melhorar a qualidade dos resultados, escolhe-se normalmente uma janela mais ampla seguido de suavização na faixa de rejeição (Christie et al., 1983). No entanto, esta suavização em 2D é sobre ω e k simultaneamente e não é um procedimento tão simples de implementar como em 1D. No filtro 2D ótimo no sentido dos quadrados-mínimos apresentados por Seeman & Horowicz (1983), o efeito dos lobos laterais permanece como um problema.

Treitel et al. (1967) introduziu o uso do filtro de velocidade como uma forma de separar as ondas acedentes e descendentes no processo VSP. Técnicas alternativas no domínio t - x para o ataque a este problema foram apresentadas por Kennett & Ireson (1981) e Hardage (1983).

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além do capítulo Introdução, o corpo desta dissertação é constituído por mais seis capítulos descritos a seguir:

No capítulo 2 é apresentado o modelo geológico, utilizando como exemplo a bacia sedimentar do Solimões.

No capítulo 3 é apresentada uma revisão teórica sobre a geometria do levantamento, o conteúdo da seção sísmica e a forma da equação da onda e tipos de modelo sísmico.

No capítulo 4 é apresentada as principais fórmulas de aproximação do tempo de trânsito e o algoritmo de simulação de seção afastamento-nulo com os parâmetros β_0 , K_N e K_{NIP} do CRS.

No capítulo 5 é apresentado os conceitos do filtro de Wiener-Hopf-Levinson de predição e o novo método WHLP-CRS proposto neste trabalho de dissertação. Também é mostrado o fluxograma do WHLP-CRS e detalhes na aplicação das janelas móveis.

No capítulo 6 é apresentado os conceitos do filtro de velocidade $\omega-k$, a transformada de Fourier 1-D e 2-D e os efeitos da contaminação de frequência por amostragem 2-D.

No capítulo 7 são apresentados resultados comparativos do filtro de velocidade $\omega-k$ e do operador WHLP-CRS na atenuação de múltiplas em seções fonte-comum com dados sintéticos e algumas conclusões das comparações feitas entre os dois processos de atenuação de múltiplas, e indica as perspectivas para a melhora do algoritmo. Apresentamos também as contribuições deste trabalho de dissertação.

2. MODELO GEOLÓGICO

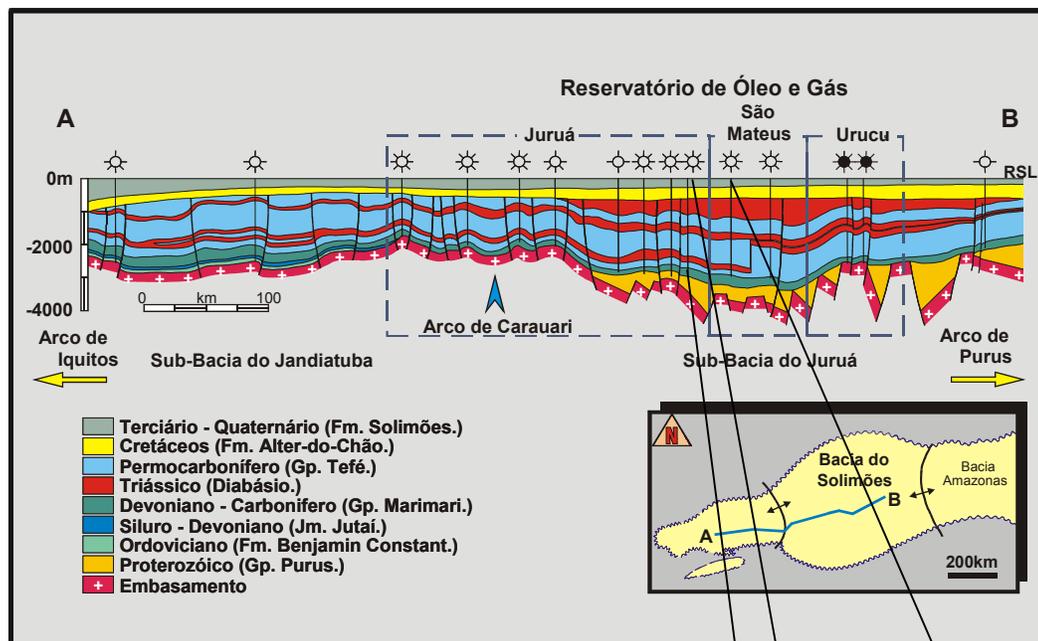
O preenchimento sedimentar das bacias intracratônicas da Amazônia Brasileira é composto por seqüências paleozóicas recobertas por seqüências mesozóica e cenozóica. As seqüências paleozóicas estão dobradas e falhadas, e intrudidas por diques e soleiras de diabásio Eiras (1998). Estas rochas intrusivas possuem velocidades sísmicas relativamente muito mais altas do que as rochas sedimentares encaixantes, variando de 4000 m/s a 6000 m/s, sendo a Bacia Sedimentar do Solimões um exemplo típico desta descrição (Figura 2.1). Estas propriedades são transferidas para os modelos utilizados para simulações. As seqüências mesozóicas e cenozóicas apresentam poucas perturbações tectônicas e estão sub-horizontalizadas. As velocidades sísmicas nestas seqüências sedimentares variam entre 1700 m/s e 2300 m/s.

A geração e o acúmulo de hidrocarbonetos nas bacias sedimentares da região Amazônica estão diretamente relacionados com as soleiras de diabásio. As altas impedâncias dos contatos (sedimento/intrusiva) causam grande diminuição de amplitude no sinal sísmico transmitido, e as múltiplas desta interface possuem grandes amplitudes que podem obscurecer as informações desejadas abaixo das soleiras. Este é o motivo para a necessidade de estudos e para o desenvolvimento de métodos de atenuação de múltiplas nestas Bacias, com o objetivo de melhorar a imagem sísmica do subsolo, e dar melhor condição de interpretação das rochas geradoras e das estruturas armazenadoras de hidrocarbonetos (óleo e gás).

Uma descrição física real e detalhada de formações geológicas para propagação de onda sísmica deve considerar várias situações, tais como: camadas finas, descontinuidades e curvatura de interfaces, porosidade, fluidos, geometrias complexas, dispersão, absorção interna e anisotropia. Depois disto, a descrição física com base na forma da equação de onda, e finalmente a participação da teoria da comunicação (filtros, ruídos, mensagem) para completar e refinar a descrição do problema em estudo.

As premissas básicas e fundamentais admitidas para os modelos geofísico-geológicos no presente trabalho são: (1) a fonte é 2D (linha), pontual no espaço e não-impulsiva no tempo; (2) o meio é 2D, e formado por uma seqüência de camadas com interfaces curvas e limitado por dois semi-espacos infinitos; (3) as camadas são individualmente homogêneas e isotrópicas, e caracterizadas por espessura variável; (4) não é admitido o fenômeno de absorção inelástica; (5) as seções sísmicas sintéticas são geradas segundo a teoria do raio, através do programa SEIS88.

Seção Geológica Longitudinal à Bacia do Solimões (Eiras, 1998)



After Eiras,

Espessura		
300		
350		
410		
370		
180		
610		
200		
85		
120		

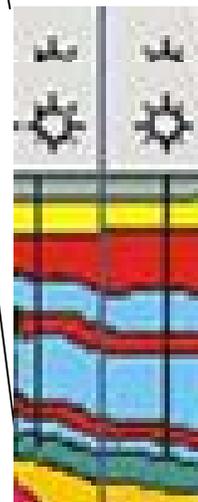


Figura 2.1. Seção geológica da Bacia do Solimões. Modelo de velocidade referente a um trecho da Bacia do Solimões. Detalhes da seção geológica utilizada para simulação da seção sísmica. (Eiras 1998).

3. MODELO SÍSMICO

Neste capítulo descrevemos a geometria utilizada no levantamento e no processamento, o conteúdo da seção sísmica e a evolução dos modelos diretos para o cálculo do tempo de trânsito.

3.1. GEOMETRIA DO LEVANTAMENTO E DO PROCESSAMENTO

Nos experimentos sísmicos, consideramos as fontes e receptores distribuídos ao longo de uma linha que coincide com o eixo x do sistema de coordenadas com uma origem definida num ponto arbitrário. O levantamento é realizado na configuração fonte-comum (FC), e em seguida os dados podem ser classificados para outras configurações, tais como afastamento-comum (AC), ponto-médio-comum (PMC) e receptor-comum (RC). A Figura 3.1 ilustra as direções destes painéis, conhecido como o cubo de dados: (t, x_m, h) .

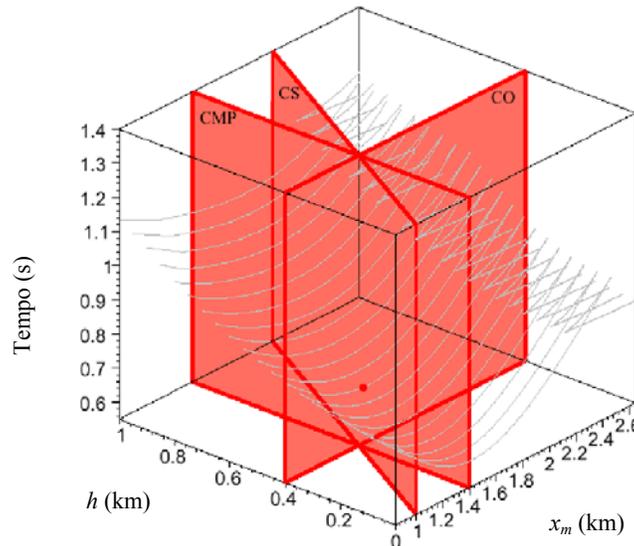


Figura 3.1. Ilustração das direções de seções no cubo de dados de multicobertura. Seções de diferentes arranjos: afastamento-comum (CO=AC), fonte-comum (CS=FC) e ponto-médio-comum (CMP=PMC). As linhas representam a superfície de definição do operador de empilhamento CRS para um ponto $P_0(x_0, t_0)$. (Höcht, 2002).

3.2. CONTEÚDO DA SEÇÃO SÍSMICA

O modelo convolucional é muito conveniente para a representação de traços sísmicos que compõe uma seção temporal. Fazemos a expressão como dependente do parâmetro horizontal do raio p . (inclusive o efeito da distância fonte-receptor) e o resumimos à forma (Robinson, 1984):

$$s(t, p) = m(t, p) + r(t) = w(t) * \varepsilon(t, p) + r(t), \quad (3-1)$$

onde $w(t)$ representa o pulso-fonte efetivo, $\varepsilon(t, p)$ é a função refletividade, $m(t, p)$ é a função sinal-mensagem e $r(t)$ é o ruído aditivo não contabilizado em $\varepsilon(t, p)$ e em $w(t)$.

Com o objetivo de completar a descrição, o pulso-fonte efetivo, $w(t)$, pode ser descrito por várias componentes ao longo da sua trajetória na forma (Robinson, 1984):

$$w(t) = w_O(t) * w_F(t) * w_A(t) * w_I(v, t) * w_E(t). \quad (3-2)$$

Nesta equação estão representados os efeitos do pulso-fonte original $w_O(t)$ (assinatura da fonte), de múltiplas (incluindo fantasmas) $w_F(t)$, da atenuação inelástica $w_A(t)$, de instrumento de registro $w_I(t)$, e de divergência esférica $w_E(t)$. As componentes tempo-variantes são $w_O(t)$, $w_F(t)$ e $w_I(t)$, e as componentes tempo-invariantes são $w_A(t)$ e $w_E(t)$. As componentes $w_F(t)$, $w_A(t)$ e $w_E(t)$ são consideradas fisicamente de fase-mínima, e as componentes $w_O(t)$ e $w_I(t)$ não são necessariamente de fase-mínima. Todas estas componentes podem ser analisadas individualmente, e filtros de passagem ou de rejeição desenhados especificamente. Para os métodos de deconvolução que se baseiam nos princípios de fase-mínima e de tempo-invariante, as componentes consideradas como fontes potenciais de distorção de fase são, portanto, $w_A(t)$, $w_E(t)$, $w_O(t)$ e $w_I(t)$. Todas estas componentes do pulso podem ser teoricamente submetidas a seus correspondentes operadores inversos [$w_A^{-1}(t)$, $w_F^{-1}(t)$, $w_I^{-1}(t)$ e $w_E^{-1}(t)$].

O ruído pode ser descrito por uma componente ambiental [com uma parte aleatória, $r_{aa}(t)$, e uma parte coerente, $r_{ac}(t)$], e por uma componente relacionada à fonte sísmica [com uma parte aleatória, $r_{fa}(t)$, e uma parte coerente, $r_{fc}(t)$] que são submetidas à convolução com pulsos filtrantes na forma:

$$r(t) = p_{va}(t) * [r_{aa}(t) + r_{ac}(t)] + p_{vf}(t) * [r_{fa}(t) + r_{fc}(t)]. \quad (3-3)$$

A componente filtrante mais efetiva em $p_{va}(t)$ e $p_{vf}(t)$ é o instrumento (sensor).

Para descrever a componente ruído, um dos conceitos mais comum é o de ruído branco onde $\delta(t)$ é a função delta de Dirac (função impulso), σ_r^2 é a variância definida através da autocorrelação estocástica na forma:

$$\phi_{rr}(t, \tau) = E\{r(t), r(t + \tau)\} = \sigma_r^2 \delta(t, \tau). \quad (3-4)$$

A autocorrelação estocástica para as funções no domínio temporal utiliza o princípio da ergodicidade que, por definição é expresso por:

$$\phi_{rr}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} r(\tau)r(\tau-t)d\tau. \quad (3-5)$$

De outra forma seria necessário uma distribuição temporária $p_r(t)$ para contemplar a relação hipotética da autocovariância:

$$\phi_{rr}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(\tau)r(\tau-t)p_r(\tau)d\tau. \quad (3.6)$$

A expressão espectral é dada segundo a forma:

$$\Phi_{rr}(f) = \sigma_r^2. \quad (3-7)$$

3.3. FORMA DE EQUAÇÃO DE ONDA

O entendimento prático do fenômeno de propagação de onda elástica no presente estudo é limitado à teoria do raio e à equação de onda na forma acústica. Uma vez que não distinguimos as componentes, interpretar o fenômeno como a propagação de uma pressão fica bem natural.

A derivação da equação geral da elastodinâmica segundo em Aki & Richards (1980) para um meio homogêneo e isotrópico é obtida ao inserir a lei de Hooke na equação do movimento válida para pequenas deformações dada por:

$$\rho \ddot{\bar{u}} = (\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot \bar{u}) - \mu\nabla \times (\nabla \times \bar{u}), \quad (3-8)$$

onde \bar{u} é o deslocamento da partícula no meio elástico, λ e μ representam os parâmetros de Lamé e ρ a densidade do meio.

As soluções para esta equação dependem do problema e do modelo a ser estudado, e incluem desde a forma fechadas simples até os métodos numéricos. A imensa literatura no assunto descreve problemas específicos, por exemplo, o de Lamb, o de Pekeris, o de Love, o de Rayleigh, o de Cagniard, o de Sommerfeld e o da Refletividade Aki & Richards (1980).

A decomposição de Helmholtz leva a equação de onda elástica para as formas de potenciais $[\phi = \phi(x, y, z, t)]$ de deslocamentos:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 \phi, \quad (3-9)$$

simplificado no sistema Cartesiano.

A propagação acústica, cuja condição do meio é estabelecido por $\mu = 0$, a pressão $P = P(x, y, z, t)$ substitui ϕ na equação (3-9), e também o potencial de velocidade da partícula (ϕ), a relação entre velocidade (\dot{u}_i) e pressão (P) é dada por:

$$\dot{u}_i = -\frac{1}{\rho} \partial_i P, \quad \dot{\bar{u}} = -\frac{1}{\rho} e P = -k \nabla \cdot \bar{u} \quad (3-10)$$

Para os potenciais de deslocamento (ψ), a relação entre deslocamento (u_i) e pressão (P) é dada por:

$$u_i = +\frac{\partial \psi}{\partial x_i} \quad e \quad P = -\lambda \nabla^2 \psi. \quad (3-11)$$

Segundo Aki & Richards (1980), a teoria do raio se baseia na proposta de separar os efeitos espaciais, $f(\underline{r})$, dos temporais, $U(t)$, na propagação de onda, o que resulta numa aproximação de alta frequência para a equação de onda a partir da forma tensão-deslocamento. A expressão é:

$$\underline{u}(\underline{r}, t) = f(\underline{r})U[t - T(\underline{r})], \quad [\underline{r} = (x, y, z), \quad \underline{r} = (r_i)]. \quad (3-12)$$

São necessárias outras argumentações para organizar o modelo, sendo aplicadas aproximações matemáticas de conseqüência para que $T(\underline{r})$ satisfaça uma equação do tipo eiconal, e para que raios possam ser introduzidos. A solução geométrica geral da equação (3-8) em meios heterogêneos para ondas compressoriais, em termos de coordenadas de raios para a componente longitudinal tem a forma fisicamente conveniente, é:

$$\underline{u}(\underline{r}, t) = \left(\frac{1}{\rho(\underline{r})\alpha(\underline{r})} \right)^{1/2} \frac{1}{R(\underline{r}, \underline{\xi})} F(\underline{\xi})U[t - T(\underline{r})]. \quad (3-13)$$

$R(\underline{r}, \underline{\xi})$ representa o fator de espalhamento geométrico, $F(\underline{\xi})$ representa o fator de irradiação da fonte, e $T(\underline{r})$ satisfaz a integral ao longo do raio:

$$T(\underline{r}, \underline{\xi}) = \int_{\underline{\xi}}^{\underline{r}} \frac{|ds|}{\alpha(\underline{r})}. \quad (3-14)$$

A solução da equação (3-9) sob a condição monocromática, cuja dependência temporal é $\exp(-i\omega t)$, tem a forma:

$$\phi = A(\underline{r})e^{iW(\underline{r})}, \quad (3-15)$$

onde $A(\underline{r})$ e $W(\underline{r})$ são a amplitude e a fase da onda e leva às duas equações de propagação descrita por raios:

$$(\nabla W)^2 = \eta^2, \quad (\text{eiconal}), \quad (3-16)$$

$$2\nabla A \cdot \nabla W + A\Delta W = 0, \quad (\text{transporte}). \quad (3-17)$$

O meio prático mais simples é o verticalmente heterogêneo, e neste múltiplos eventos sísmicos se propagam na subsuperfície, e a identificação de alguns eventos na superfície é realizada pelas propriedades cinemáticas, enquanto outros eventos são identificados pelas propriedades dinâmicas. Em consequência disto, os atributos da frente de onda deve incluir parâmetros cinemáticos e dinâmicos.

A teoria do raio é muito conveniente para servir de base ao problema direto para os métodos de imageamento. O método de traçamento de raios usa cinco atributos da frente de onda no processo de propagação da frente de onda. Com relação a um ponto em subsuperfície, os atributos são $\mathfrak{T} = \{T(\underline{r}), \nabla\tau, \gamma, R, R(\underline{r}, \underline{\xi})\}$, sendo $T(\underline{r})$ o tempo de percurso entre dois pontos do meio, $\nabla\tau$ é o gradiente do tempo de percurso na direção da propagação, γ é o ângulo de partida do raio conectando dois pontos, R é o raio de curvatura da frente de onda, e $R(\underline{r}, \underline{\xi})$ é o fator de espalhamento geométrico. Os atributos, $T(\underline{r})$, $\nabla\tau$ e γ são relacionados às propriedades cinemáticas, e os atributos R e $R(\underline{r}, \underline{\xi})$ são relacionados às propriedades dinâmicas (Portugal, 2002).

3.4. SEQUÊNCIA DE MODELOS

Os problemas geológicos são sempre no domínio 3D; no entanto, o ataque a estes problemas por técnicas geofísicas pode ser através de uma descrição 1D, 2D, ou 3D, a ser entendido individualmente para o trio fonte-meio-registro. Nesta seção descrevemos os modelos formados por interfaces plano-horizontais, plano-inclinadas e com curvaturas, calculamos o tempo de trânsito da primária e sua múltipla, o raio de curvatura da frente de onda e o ângulo de emergência.

3.4.1. Interfaces plano-horizontais

Iniciamos a descrição com o modelo mais básico (Hubral e Krey, 1980), que é formado por camadas plano-horizontais, homogêneas e isotrópicas, uma fonte pontual, afastamento-nulo e o

espalhamento da energia obedece uma descrição dependente do tempo-duplo de trânsito para cada interface, t_n . O tempo-duplo de propagação, $[T(x)]$, é dado por:

$$T(x=0) = 2 \sum_{n=1}^N \frac{d_n}{v_n}, \quad (3-18)$$

O raio de curvatura da frente de onda resulta em:

$$R_0(x=0) = \frac{1}{v_1} \sum_{n=1}^N t_n v_n^2, \quad (3-19)$$

e onde v_n é a velocidade e e_n a espessura relativas a camada n .

O afastamento fonte-receptor, $[X(p)]$, e o tempo-duplo, $[T(p)]$, podem ser expressos separadamente em termos do parâmetro horizontal do raio (p) por:

$$T(p) = 2 \sum_{i=1}^k \frac{\Delta t_i}{\sqrt{1 - p^2 v_i^2}}, \quad X(p) = 2 \sum_{i=1}^k \frac{v_i^2 p \Delta t_i}{\sqrt{1 - p^2 v_i^2}}, \quad (3-20)$$

onde $p = \text{sen } \theta_1 / v_1$, (θ_1 é o ângulo de partida, $\theta \leq |\pi/2|$) e Δt_i é o tempo-simples de percurso vertical na camada. (Figura 3.2).

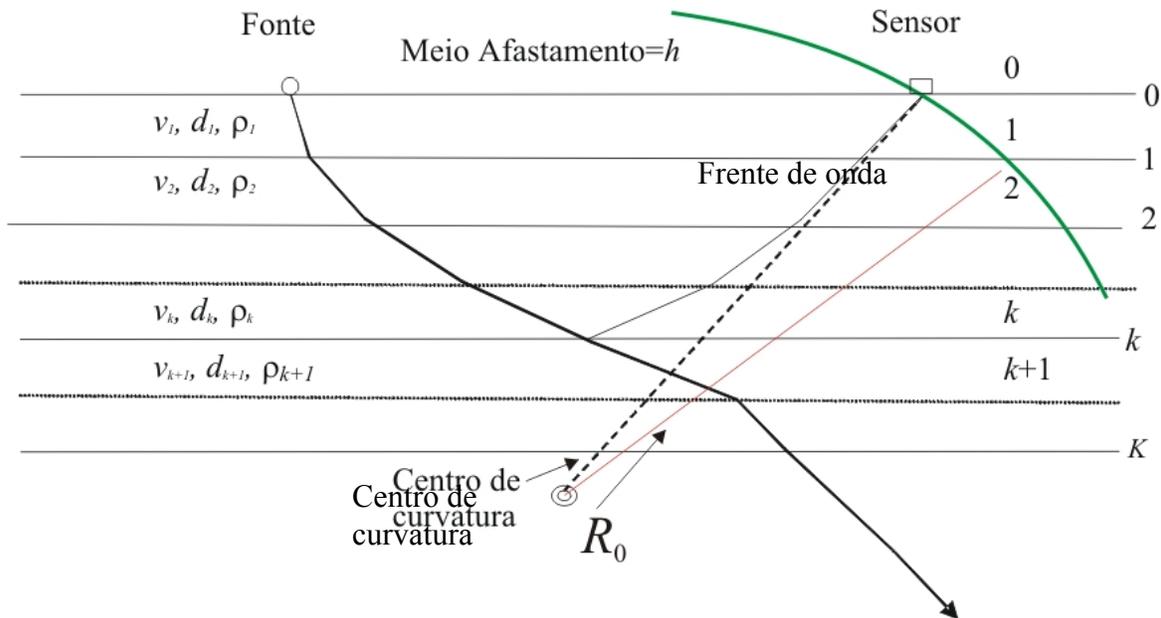


Figura 3.2. Sistema Cartesiano. Seqüência de camadas plano-horizontais (homogêneas e isotrópicas) entre dois semi-espacos (1D). A numeração indica as camadas e interfaces.

Na combinação $X(p)$ e $T(p)$, o atributo fundamental da frente de onda se resume ao raio de curvatura, dado por (Figura 3.4):

$$R_0(x) = \frac{\sqrt{1-p^2v_1^2}}{pv_1} \left[x^2 + 2x \sum_{i=1}^k d_i \left(\frac{pv_i}{\sqrt{1-p^2v_i^2}} \right) \right]^{1/2}. \quad (3-21)$$

A correção de sobre-tempo normal ao AN, expressa pela lei hiperbólica relaciona o tempo ao afastamento, fonte-receptor, é dada por:

$$T^2(x) = T_0^2 + \frac{x^2}{v_{RMS}^2}, \quad (3-22)$$

onde v_{RMS} é a velocidade média-quadrática para camadas horizontais. (Taner e Koehler, 1969, Sheriff & Geldart, 1982,v.1,p.86).

3.4.2. Interfaces plano-inclinadas 2D

Iniciamos com o caso de uma camada sobre o semi-espaço, sendo a interface uniformemente inclinada (Figura 3.3). O tempo duplo de trânsito na geometria PMC, obedecendo a lei hiperbólica, é dado por:

$$T^2(x) = T_0^2 + \frac{4h^2 \cos^2(\theta)}{v_1^2}. \quad (3-23)$$

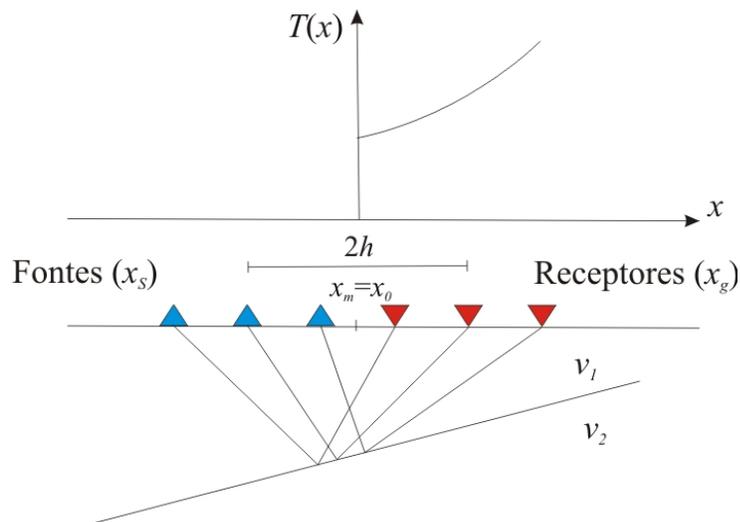


Figura 3.3. Ilustração de uma camada inclinada sobre um semi-espaço infinito com configuração PMC.

O caso se torna mais geral para varias camadas com mergulhos arbitrários, sendo as homogêneas e isotrópicas. As equações aplicáveis para o modelo 2D, válidas para pequenos afastamentos, baseadas nos atributos da frente de onda (Figura 3.4), são:

$$T(x) = T(0) + \frac{\text{sen}(\beta_0)}{v_1} x + \frac{\text{cos}^2(\beta_0)}{2v_1 R_0} x^2 + \dots \quad (\text{aproximação parabólica}), \quad (3-24a)$$

$$T^2(x) = \left\{ T(0) + \frac{\text{sen}(\beta_0)}{v_1} x \right\}^2 + \frac{T(0) \text{cos}^2(\beta_0)}{v_1 R_0} x^2 + \dots \quad (\text{aproximação hiperbólica}). \quad (3-24b)$$

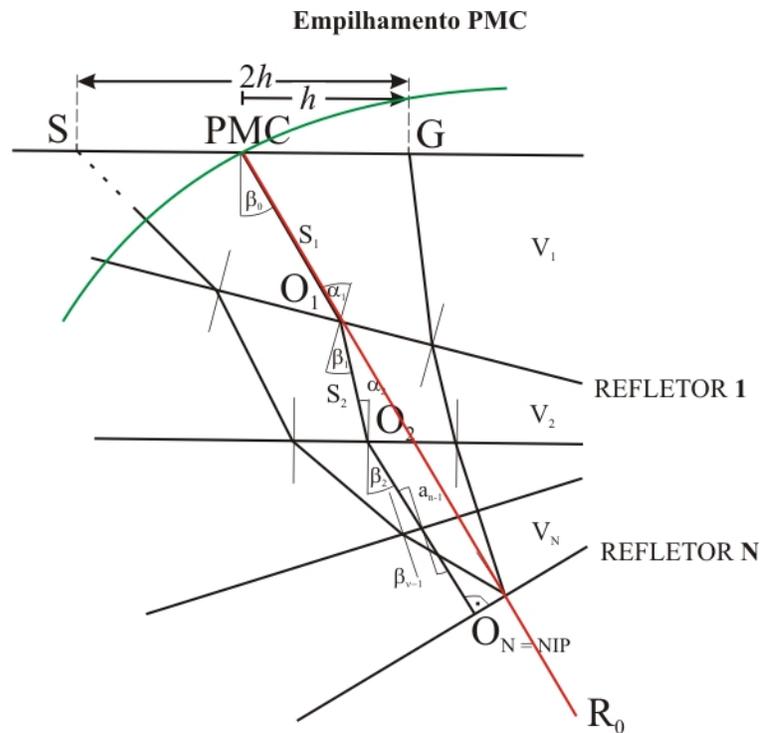


Figura 3.4. Modelo 2D de camadas plano-inclinadas mostrando o raio normal (NIP) e uma trajetória PMC para o afastamento $2h$, S=fonte, G=geofone. (Redesenhado de Hubral, 1980)

O raio de curvatura da frente de onda na superfície de observação é dado por:

$$R_0 = \frac{2}{v_1} \sum_{n=1}^N v_n^2 \Delta t_n \prod_{k=1}^{n-1} \frac{\text{cos}^2(\alpha_k)}{\text{cos}^2(\beta_k)}. \quad (3-25)$$

O empilhamento hiperbólico ao AN é sintetizado por:

$$T^2(h) = T_0^2 + \frac{h^2}{v_{NMO}^2}, \quad v_{NMO}^2 = \frac{2v_1 R_0}{T(0) \text{cos}^2(\beta_0)}, \quad (3-26)$$

sendo v_{NMO} a velocidade teórica da correção de sobre-tempo-normal (NMO).

3.4.3. Interfaces curvas – 2D

O modelo direto de camadas curvas é resumido em Hubral & Krey (1980). Novamente, a filosofia básica para o cálculo do tempo de trânsito utiliza os atributos da frente de onda para os modelos 2D. As condições são para pequeno afastamento fonte-geofone; o raio de curvatura da frente de onda é relativo ao ponto de incidência normal (NIP); e v_1 é constante (Figura 3.5).

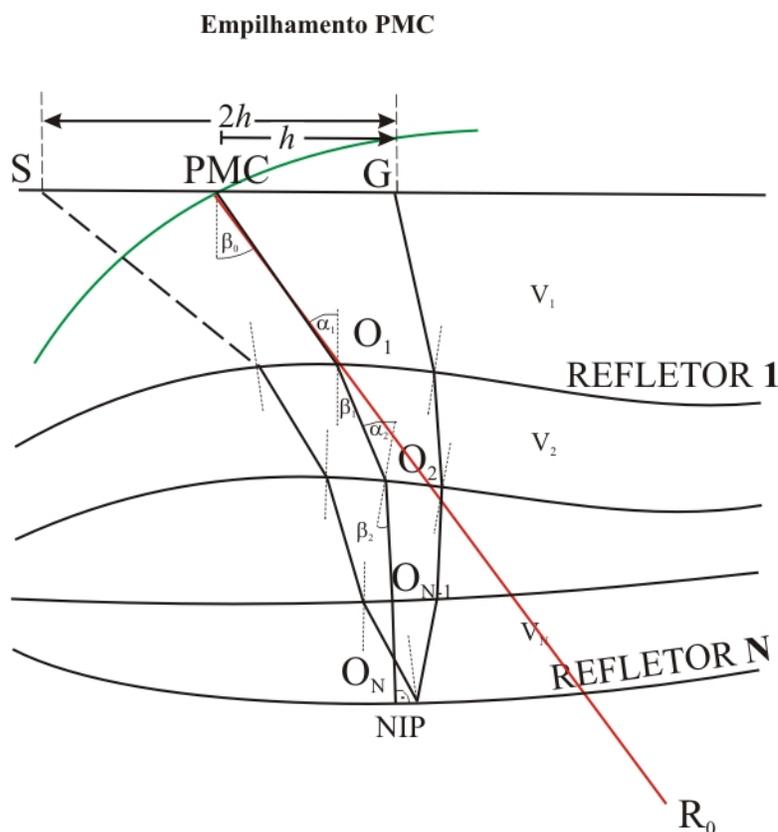


Figura 3.5. Modelo 2D de camadas curvas mostrando no raio de incidência normal (NIP) e uma trajetória PMC para o afastamento $x=2h$. (Redesenhado de Hubral, 1980)

O raio de curvatura das superfícies refletoras participa das equações do tempo de trânsito. Para o caso 2D é resumido em Hubral & Krey (1980), o perfil tem uma direção coincidente com a direção dos mergulhos não uniformes, e o raio de curvatura difere da equação relativamente simples para o caso anterior. Para 3 camadas o raio é dado por:

$$R_0 = \frac{1}{v_1} \left[s_1 v_1 + \left(\frac{\rho}{v_1 \cos^2 \alpha_1} \frac{1}{R_{F,1}} + \left\{ s_2 v_2 \frac{\cos^2 \alpha_1}{\cos^2 \beta_1} + \left[\frac{\rho_2 \cos^2 \beta_1}{v_2 \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2} \frac{1}{R_{F,2}} + \left(s_3 v_3 \frac{\cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2}{\cos^2 \beta_1 \cos^2 \beta_2} \right)^{-1} \right]^{-1} \right\}^{-1} \right)^{-1} \right].$$

O tempo-duplo de percurso hiperbólico é o mesmo dado no caso anterior, expressas pelas equações 3-24 e 3-26.

O trio de atributos associados ao raio normal $X_0 R X_0$ pode ser calculado pela teoria do raio, uma vez que o traçamento de um raio normal com relação a uma determinada interface permite calcular diretamente o ângulo de emergência β_0 , as curvaturas das frentes de ondas hipotéticas NIP e N (Hubral & Krey, 1980).

A lei da transmissividade é utilizada para calcular o raio de curvatura de uma frente de onda NIP a partir da posição inicial sobre um ponto do refletor $R_{i, inicial}^{(NIP)} = 0$. Para a onda N

$R_{i, inicial}^{(N)} = R_{i, F}$, onde $R_{i, F}$ é o raio de curvatura da interface no ponto de incidência normal. O raio de curvatura da frente de onda, que se propaga dentro de uma camada ao longo do raio normal, é calculado pela lei:

$$R_{i, P_2} = R_{i, P_1} + v_i \Delta t_i, \quad (3-27)$$

onde R_{i, P_1} e R_{i, P_2} são os raios de curvaturas das frentes de ondas nos pontos sucessivos P_1 e P_2 , respectivamente. A distância $v_i \Delta t_i$ corresponde ao segmento reto do raio que une os pontos inicial e final dentro da i -ésima camada homogênea. Sendo v_i a velocidade e Δt_i o tempo-simples de trânsito do raio na i -ésima camada, a curvatura de uma frente de onda (NIP ou N) transmitida é dada por:

$$\frac{1}{R_{i, T}} = \frac{v_{i+1} \cos^2 \alpha_i}{v_i \cos^2 \beta_i} \frac{1}{R_{i, I}} + \frac{1}{\cos^2 \beta_i} \left(\frac{v_{i+1}}{v_i} \cos \alpha_i - \cos \beta_i \right) \frac{1}{R_{i, F}}, \quad (3-28)$$

onde α_i e β_i são os ângulos de incidência e transmissão do raio central na interface i , respectivamente. As velocidades v_{i+1} e v_i correspondem, respectivamente, às camadas inferior e superior com relação a interface i , cujo raio de curvatura no ponto de incidência (ou de transmissão) é $R_{i-1, F}$. As curvaturas R_{NIP} e R_N são referenciados à superfície no ponto P_0 .

4. OPERADOR DE EMPILHAMENTO CRS EM 2D

Apresentamos neste capítulo um resumo da teoria do empilhamento CRS, com o objetivo de esclarecer a forma de estimar os atributos da frente de onda utilizados para realizar o deslocamento tempo-espacial das janelas móveis para a deconvolução de múltiplas. Também é resumido o fluxograma computacional para implementação prática do empilhamento sísmico.

4.1. ONDAS HIPOTÉTICAS NIP E N

O empilhamento CRS é atrativo por não apresentar uma restrição forte quanto a presença de interfaces com curvatura, e de ser relativamente independente do modelo de velocidades. Os atributos da frente de onda no método CRS são estimados diretamente dos dados em multicobertura (Jäger et al., 2001).

O método CRS é elegantemente descrito com base na teoria paraxial do raio. O operador CRS corresponde à equação do tempo-duplo de trânsito, função dos atributos cinemáticos de duas frentes de ondas hipotéticas: (1) a onda ponto-de-incidência-normal (NIP), (2) a onda refletor-explosivo (ou onda-normal, N) Hubral (1983). A onda NIP se propaga de forma ascendente a partir de uma fonte (pontual em 3D, linha em 2D) localizada no ponto de reflexão R do refletor (Figura 4.1). A onda N é ascendente a partir do refletor incluindo o ponto R , e interpretada como uma frente de onda inicial com curvatura igual à curvatura local do refletor (3D ou 2D), no ponto NIP.

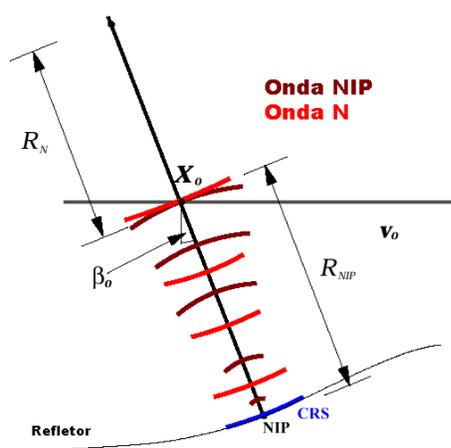


Figura 4.1. Visualização da geometria dos parâmetros do operador de empilhamento CRS. O ângulo de emergência vertical β_0 define a orientação angular no CRS (linha azul). O raio de curvatura da onda NIP contém informações da distância do ponto de incidência normal ao ponto de observação X_o . O raio de curvatura da onda N contém informações da curvatura do refletor.

Os três atributos cinemáticos das ondas hipotéticas NIP e N usados no empilhamento CRS, relacionadas ao raio normal emergente no ponto $x_m = X_0$ são: O ângulo de emergência (β_0) da onda observada; a curvatura K_{NIP} (ou o raio de curvatura $R_{NIP} = 1/K_{NIP}$) da onda NIP, e a curvatura K_N (ou o raio de curvatura $R_N = 1/K_N$) da onda N.

Para simples visualização, em um meio simples, homogêneo e isotrópico, limitado abaixo por uma interface curva, β_0 define a orientação angular da onda emergente, R_{NIP} fornece a distância do ponto R (no refletor) ao ponto X_0 (na superfície) e K_N a curvatura do refletor no ponto R (Figura 4.2).

Para um meio heterogêneo, a interpretação dos atributos das ondas NIP e N não é simples, direta e intuitiva como para um meio homogêneo, porém continua associado com a orientação, a distância e a curvatura do refletor. As curvaturas K_{NIP} e K_N , medidas no ponto de emergência X_0 , são interpretadas como aproximações circulares das frentes de ondas NIP e N, respectivamente, para um modelo 2D.

Para um modelo sintético constituído por camadas homogêneas separadas por interfaces curvas, os três atributos cinemáticos (β_0 , R_{NIP} e R_N) das ondas hipotéticas NIP e N fazem parte da teoria paraxial do raio. O traçamento de um raio normal para uma determinada interface serve para determinar o ângulo de emergência β_0 vertical na superfície de observação no ponto X_0 . A forma de calcular as curvaturas das frentes de ondas hipotéticas NIP e N é realizada na direção ascendente a partir do ponto de incidência normal sobre o refletor, ao longo do raio normal, levando em conta a transformação das frentes de ondas (NIP e N) através da transmissão entre as camadas; isto é, a partir do ponto R numa interface até atingir o ponto de observação X_0 .

Os tempos de trânsito parabólico e hiperbólico 3D dos raios na vizinhança de um raio central definido são obtidos com uma expansão de segunda ordem em série de Taylor com base na teoria paraxial do raio (Schleicher et al., 1993). Em meios 2D, a aproximação do tempo hiperbólico em função dos atributos cinemáticos das ondas hipotéticas NIP e N é abordado em (Tygel et al., 1997).

A Figura 4.2 é uma apresentação esquemática do modelo sísmico contendo um refletor curvo Σ , um raio central definido como sendo afastamento fonte-receptor nulo ($X_0 R X_0$), e um

raio de reflexão primária $SR'G$. R é o ponto de incidência normal, S é fonte, G é o receptor e X_0 é o ponto de emergência do raio central.

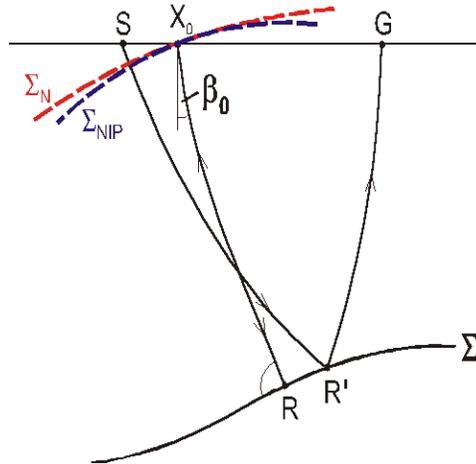


Figura 4.2. Representação geométrica do sistema sísmico com um refletor Σ , um raio central de incidência normal X_0RX_0 e um raio paraxial de reflexão primária $SR'G$. A curva azul representa a frente de onda NIP (Σ_{NIP}), e a curva de cor vermelha representa a frente de onda N (Σ_N). Como os raios estão curvos, admite-se um gradiente suave de velocidade.

4.2. APROXIMAÇÕES HIPERBÓLICA E PARABÓLICA DO TEMPO DE TRÂNSITO

No método de empilhamento-de-reflexão-comum (CRS) é baseado na teoria paraxial do raio (Schleicher et al., 1993). O operador CRS é uma função dos atributos cinemáticos de duas frentes de ondas hipotéticas descritas acima. O operador corresponde a equação da aproximação dos tempos de trânsito de reflexões primárias relativos à vizinhança de um raio central (raio normal) para configurações arbitrárias (Tygel et al., 1997) é dado por duas expressões:

Parabólico:

$$t(x, h; \beta_0; K_{NIP}, K_N, v_0, t_0) = t_0 + \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) + \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0} \left(\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right);$$

(4-1a)

Hiperbólico:

$$t^2(x, h; \beta_0; K_{NIP}, K_N, v_0, t_0) = \left(t_0 + \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} \left(\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right);$$

(4-1b)

onde t_0 é o tempo-duplo de trânsito ao longo do raio central na configuração AN, e v_0 é a velocidade próxima a superfície ao redor de X_0 .

A relação entre as coordenadas do levantamento é dada por:

$$x_m = \frac{(x_G + x_S)}{2} \quad \text{e} \quad h = \frac{(x_G - x_S)}{2}, \quad (4-2)$$

para o ponto-médio (x_m) e o meio-afastamento (h), onde x_S e x_G são as coordenadas horizontais da fonte e do receptor, respectivamente (Figura 4.3). A coordenada $X_0 = (x_0, t_0)$ é o ponto de emergência do raio central com fonte-receptor coincidentes, na coordenada espacial x_0 e na coordenada temporal t_0 . A expressão para o tempo de trânsito é dada em função de v_0 conhecida a priori, e é considerada como independente do modelo de macro-velocidades do meio, e portanto aplicável a meios heterogêneos.

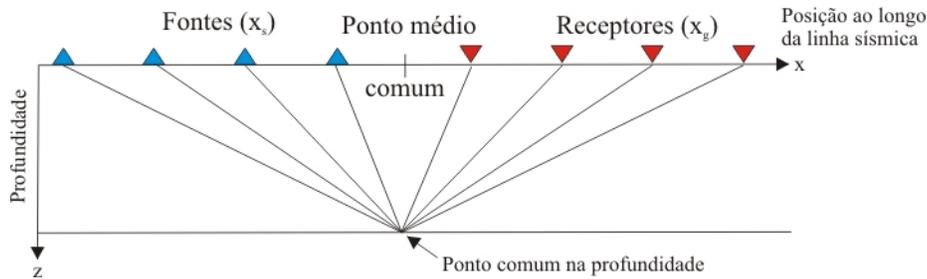


Figura 4.3. Ilustração da geometria do levantamento PMC, mostrando a distribuição de fontes a esquerda e receptores a direita com relação ao ponto médio.

O ponto imagem $P_0 = (t_0, x_0)$ na seção AN a ser simulada, conhecido os três atributos β_0 , R_{NIP} e R_N . Para cada ponto $P_0 = (t_0, x_0)$ o operador CRS empilha os eventos sísmicos contidos na superfície temporal de reflexão comum $t(x_m, h; \beta_0, R_N, P, R_N)$ do dado de multicobertura, simulando assim a seção AN.

A Figura 4.4 ilustra uma superfície de empilhamento calculada com a aproximação hiperbólica para o tempo-duplo de trânsito, onde foi utilizado um modelo sintético composto por duas camadas sobre um semi-espaco (parte inferior da Figura 4.4). Na parte superior desta figura consta as curvas dos tempos de trânsito das reflexões primárias no domínio (x_m, h) (curvas de cor azul) correspondentes ao segundo refletor em geometria PMC. As linhas de cor vermelha

formam a superfície de empilhamento (operador CRS, trajetórias de empilhamento) correspondente ao ponto de amostragem P_0 , o que equivale hipoteticamente a uma reflexão primária no ponto R localizado sobre a segunda interface. Esta figura mostra que a técnica superfície de reflexão comum, baseada na teoria paraxial, é uma boa aproximação da resposta cinemática de uma reflexão sobre uma interface curva, baseada na teoria do raio.

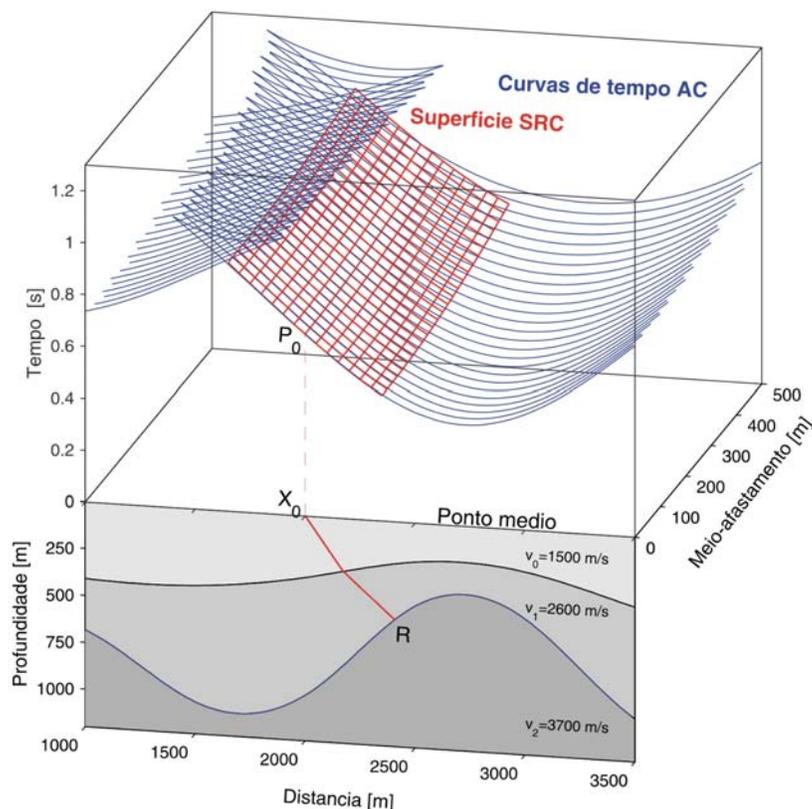


Figura 4.4. **Parte inferior:** Modelo composto por três camadas homogêneas. O raio de ZO (ou de incidência normal) tem cor vermelha. **Parte superior:** Superfície de cobertura múltipla (linhas em azul) correspondente às reflexões da segunda interface. As linhas de cor vermelha definem a superfície de empilhamento CRS, ao ponto de reflexão R , calculada através da aproximação hiperbólica do tempo-duplo de trânsito (Garabito, 2001).

o empilhamento parcial a 1D, realizada ao longo da trajetória $t(h)$ ou $t(x_m)$.

Para a condição $R_N = R_{NIP}$, os atributos cinemáticos estão vinculados a um ponto de difração em subsuperfície, e a aproximação do tempo de trânsito é dada por:

$$\text{Parabólica: } t(x_m, h) = t_0 + \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) + \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0 R_{NIP}} [(x_m - x_0)^2 + h^2]; \quad (4-3a)$$

$$\text{Hiperbólica: } t^2(x_m, h) = \left(t_0 + \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{NIP}} [(x_m - x_0)^2 + h^2]. \quad (4-3b)$$

Para a condição $x_m = x_0$, (o que equivale a não ter empilhamento ao longo de x_m) as equações dos tempos na configuração CMP dependem de dois atributos β_0 e R_{NIP} :

$$\text{Parabólica: } t(h) = t_0 + \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0} \frac{h^2}{R_{NIP}}; \quad (4-4a)$$

$$\text{Hiperbólica: } t^2(h) = t_0^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} \frac{h^2}{R_{NIP}}. \quad (4-4b)$$

Para um modelo com velocidade constante, $R_{NIP} = v_0 t_0 / 2$, e a aproximação hiperbólica do tempo de trânsito corresponde à fórmula de correção NMO, e $v_{NMO} = v_0 / \cos \beta_0$. Fazendo $q = \cos^2 \beta_0 / R_{NIP}$ obtemos as expressões para o tempo de trânsito dependente do parâmetro q :

$$\text{Parabólica: } t(h) = t_0 + \frac{qh^2}{v_0}; \quad (4-5a)$$

$$\text{Hiperbólica: } t^2(h) = t_0^2 + \frac{2 t_0 qh^2}{v_0}. \quad (4-5b)$$

Aplicando para a condição de $h=0$ obtém-se a aproximação hiperbólica para a configuração afastamento nulo (AN) dado por (Garabito, 2001):

$$t(x_m, h) = t_0 + \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) + \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0 R_{NIP}} [(x_m - x_0)^2 + h^2]; \quad (4-6)$$

4.3. ALGORITMO DO EMPILHAMENTO

Um dos problemas na simulação de uma seção AN consiste da determinação dos atributos da frente de onda (β_0 , R_{NIP} e R_N) para cada ponto imagem P_0 da seção AN a partir dos dados de multicobertura. O cálculo da superfície de empilhamento é feita com a expressão (4-1b).

Os três atributos cinemáticos são determinados simultaneamente por meio de otimização global, sendo a função-objeto de minimização (negativo da maximização), o cubo de medidas de coerência (semblance) resultante da varredura do empilhamento sobre a seção sísmica utilizando o critério de similaridade introduzindo o conceito da medida de coerência semblance, cuja expressão é dado por Sguazzero & Vesnaver (1987):

$$S(v, t_0) = \frac{\sum_{t=t_0-\delta/2}^{t_0+\delta/2} \left[\frac{1}{N_x} \sum_{x=x_0}^x \bar{p}(x, t; v) \right]^2}{\sum_{t=t_0-\delta/2}^{t_0+\delta/2} \frac{1}{N_x} \sum_{x=x_0}^x [\bar{p}(x, t; v)]^2}. \quad (4-6)$$

Os dados são de cobertura múltipla, e o empilhamento é realizado por somatório na superfície definida pelo operador CRS. Em outras palavras, a determinação de β_0 , R_{NIP} e R_N é formulada como um problema de maximização da medida semblance avaliada em pontos do espaço tridimensional ($NxMxP$) definido por: $-\pi/2 < \beta_0 < +\pi/2$ e $-\infty < R_{NIP}, R_N < +\infty$.

O máximo global é obtido com algoritmo de otimização global, condicionado às características da função-objeto, e requer um elevado esforço computacional, que se torna maior devido à busca global ser feita para cada ponto da seção AN.

A obtenção dos atributos da frente de onda segue estratégias diferentes de acordo com os autores. Seguindo Garabito (2001), na para a primeira etapa, o algoritmo de otimização adotado foi o simulação-de-resfriamento (“simulated annealing”, SA) para a busca bidimensional β_0 e R_{NIP} . Na segunda etapa é feita a busca unidimensional do atributo, R_N . Na terceira etapa, a solução inicial é o trio de atributos resultante da primeira e segunda etapa, sendo utilizado o algoritmo de otimização local quase-Newton (Gill et al., 1981).

O fluxograma computacional é apresentado na Figura 4.5 é composto de duas etapas. A primeira etapa consta da busca global bidimensional onde, para cada ponto imagem P_0 da seção AN a ser simulada, são determinados dois parâmetros (β_0 e R_{NIP}) utilizando a expressão 4-3b. Para isto, o algoritmo SA é aplicado sobre a função-objeto semblance em uma busca bidimensional. Os parâmetros iniciais são gerados aleatoriamente dentro do espaço de busca definido para cada parâmetro, e o resultado da otimização é a dupla de atributos correspondendo ao mínimo global.

A segunda etapa consta da busca global unidimensional onde, com o ângulo de emergência β_0 inicial conhecido para cada ponto de imagem P_0 da seção AN a ser simulada, o terceiro parâmetro R_N é determinado utilizando a equação (4-1) e por meio da aplicação do método SA. A busca global unidimensional é realizada na seção AN resultante da etapa 1 e, neste caso, o cubo semblance utilizado para calcular as curvas de empilhamento depende dos parâmetros (β_0 e R_N).

A terceira etapa consta da busca local tridimensional onde, como resultados das duas etapas anteriores, obtém-se as seções dos 3 atributos β_0^0 , R_{NIP}^0 e R_N^0 , relativos a cada ponto imagem da seção AN. Para determinação simultânea dos 3 melhores valores dos atributos (β_0 , R_{NIP} e R_N) é aplicado o algoritmo de otimização local quase-Newton. Nesta etapa, o modelo direto para a minimização do semblance é dado pela fórmula geral (4-1) que calcula o operador de empilhamento CRS. As seções trio-de-atributos ótimos resultantes desta etapa são utilizados para produzir a seção AN simulada.

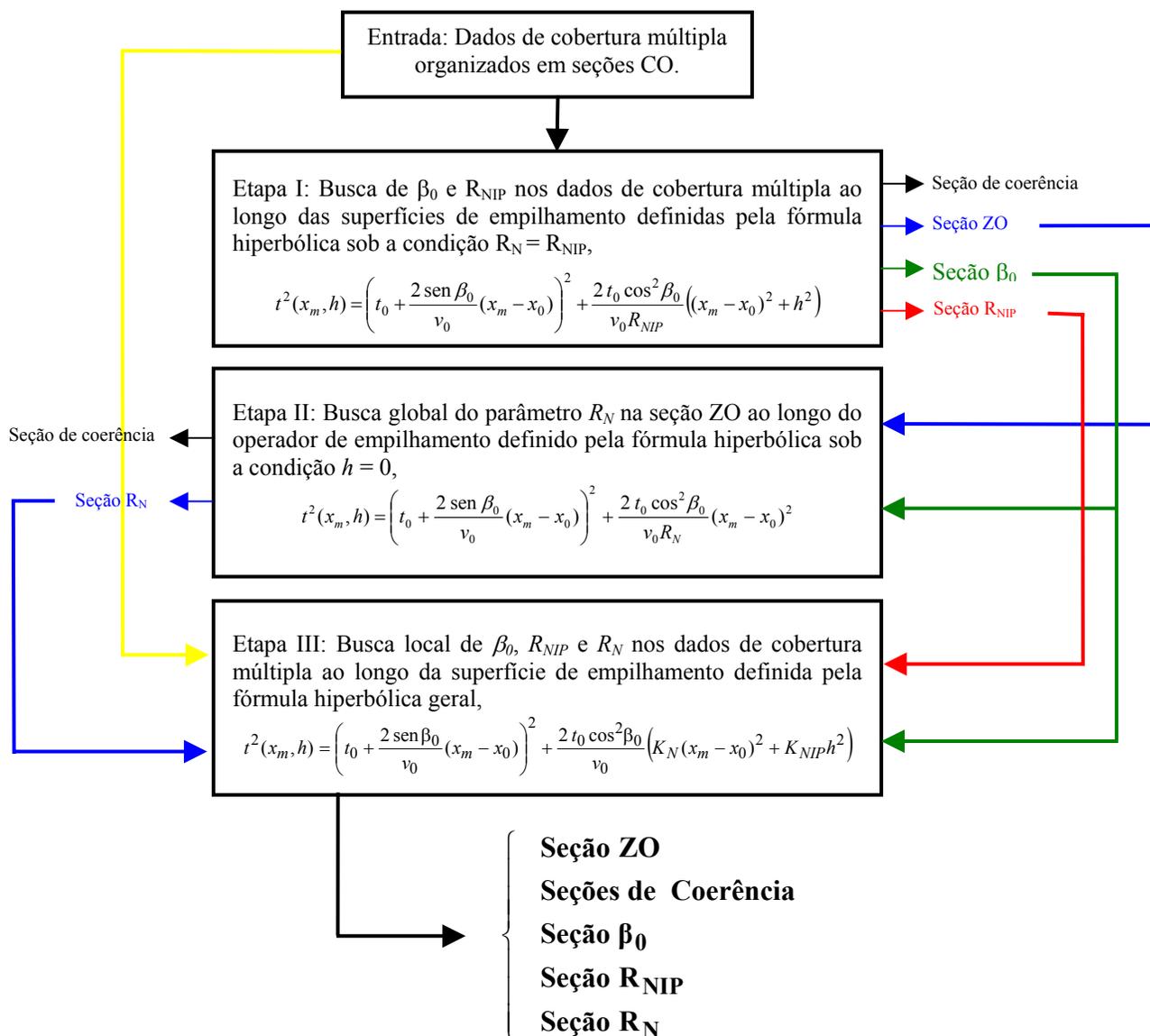


Figura 4.5. Fluxograma simplificado do processamento CRS. Como resultados finais são geradas os seguintes produtos: 1 seção ZO=AN, 1 seção semblance e 1 seção para cada um dos três parâmetros β_0 , R_{NIP} e R_N , totalizando 5 painéis (Garabito, 2001).

5. O OPERADOR WHLP-CRS

O objetivo deste capítulo é apresentar um resumo da teoria do operador de predição WHL e a sua combinação com o operador de empilhamento CRS para gerar o operador de atenuação de múltiplas em seções FC. O método WHL de deconvolução de múltiplas é baseado no princípio de periodicidade entre a múltipla e sua primária, e ele envolve o cálculo de autocorrelação em janelas móveis que se deslocam no domínio tempo-espaco para introduzir a periodicidade necessária na múltipla a ser atenuada (Alves, 2003).

Para realizar a tarefa de atenuação de múltiplas, o principio é aplicar uma técnica que faça a predição da múltipla a partir de informações disponíveis da primária, e em seguida extrair a múltipla da seção sísmica.

A operação de filtragem tempo-variante generalizada aos processos não-estacionários é representada pela integral:

$$y(t, \sigma) = \int_{t_0}^T h(\tau, \sigma) g(t, \tau) d\tau, \quad (-\infty < t < +\infty, t_0 \leq \sigma \leq T). \quad (5-1)$$

Nesta, $g(t, \tau)$ é a entrada, $y(t)$ é a saída e $h(\tau, \sigma)$ é o operador tempo-variante que deve satisfazer a equação integral do primeiro tipo denominada Wiener-Kolmogorov:

$$\phi_{zg}(t, \sigma) = \int_{t_0}^T h(\tau, \sigma) \phi_{gg}(t, \tau) d\tau, \quad (5-2)$$

onde $z(t)$ é desejado. A filtragem tempo-invariante, $h(t)$, para os processos estacionários é representada pela integral:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) g(t - \tau) d\tau, \quad (5-3)$$

que deve satisfazer a equação integral do primeiro tipo Wiener-Hopf (WH):

$$\phi_{zg}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \phi_{gg}(t - \tau) d\tau. \quad (5-4)$$

$\phi_{zg}(t)$ e $\phi_{gg}(t)$ são, respectivamente, as funções correlação cruzada e autocorrelação teóricas estocásticas, sendo considerado que $g(t)$ seja um sinal aleatório estacionário, e $z(t)$ é o desejado.

A abordagem do processo de deconvolução é feita na forma discretizada e diretamente a partir da formulação das equações WHL descrita, entre outros, por Robinson & Treitel (1969). Os

coeficientes do filtro ótimo são obtidos a partir do ajuste entre as funções z_k (sinal desejado) e y_k (saída real) no sentido dos mínimos-quadrados, sendo que a função objeto é a expectância dos desvios:

$$e(h_j) = E\left\{(z_k - y_k)^2\right\}, \quad (5-5)$$

para ser minimizada em função dos coeficientes h_j . Isto significa buscar a variância mínima, uma vez que $E\{z_k - y_k\} = 0$. A saída real do filtro, y_k , é dada pela convolução do operador de filtragem, h_k , com o observado, g_k , segundo a equação:

$$y_k = \sum_{i=0}^{P-1} h_i g_{k-i}, \quad (k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \Delta t=1). \quad (5-6)$$

A operação teórica do cálculo de $E\{\cdot\}$ faz com que a aleatoriedade desapareça, e a função $e(h_j)$ passa a ser considerada como não-aleatória, com os conceitos de cálculo diferencial e integral sendo aplicáveis. Para minimização, o critério é que as derivadas parciais com relação aos vários h_j sejam nulas, o que significa também estar próximo da solução, isto é:

$$\frac{\partial e(h_j)}{\partial h_j} = 0. \quad (5-7)$$

A operação matemática acima resulta nas equações normais:

$$\sum_{i=0}^{P-1} h_i \phi_{gg}(j-i) = \phi_{zg}(j), \quad (j=0, 1, 2, \dots, P-1). \quad (5-8)$$

Esta equação é denominada Wiener-Hopf-Levinson (forma discretizada), e a sua solução determina os coeficientes h_i que minimiza a função erro, cujo valor $e(h_j)$ pode ser calculado.

$\phi_{zg}(i)$ é a parte unilateral positiva da correlação cruzada teórica entre o sinal de entrada e o sinal desejado. O princípio aplicado para obter a aplicação WHL permite estabelecer várias operações, e o interesse presente é o de predição. A estrutura matricial correspondente às equações (5-8) tem a forma:

$$\begin{bmatrix} \phi_{gg}(0) & \phi_{gg}(-1) & \phi_{gg}(-2) & \cdots & \phi_{gg}(-P+1) \\ \phi_{gg}(1) & \phi_{gg}(0) & \phi_{gg}(-1) & \cdots & \phi_{gg}(-P+2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_{gg}(P-1) & \phi_{gg}(P-2) & \phi_{gg}(P-3) & \cdots & \phi_{gg}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(0) \\ h(1) \\ \vdots \\ h(P-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{zg}(0) \\ \phi_{zg}(1) \\ \vdots \\ \phi_{zg}(P-1) \end{bmatrix}. \quad (5-9)$$

A matriz acima é simétrica-par, e o desejado é $z_k = g_{k+T}$. Sendo assim, z_k é uma predição de g_k na distância T , e com isto:

$$\phi_{zg}(k) = \sum_i z_i g_{i-k} = \sum_i g_{i+T} g_{i-k} = \sum_i g_i g_{i-(k+T)} = \phi_{gg}(k+T). \quad (5-10)$$

A equação (5-9) passa a ter a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \phi_{gg}(0) & \phi_{gg}(1) & \phi_{gg}(2) & \cdots & \phi_{gg}(P-1) \\ \phi_{gg}(1) & \phi_{gg}(0) & \phi_{gg}(1) & \cdots & \phi_{gg}(P-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{gg}(P-1) & \phi_{gg}(P-2) & \phi_{gg}(P-3) & \cdots & \phi_{gg}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(0) \\ h(1) \\ \vdots \\ h(P-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{gg}(T) \\ \phi_{gg}(T+1) \\ \vdots \\ \phi_{gg}(T+P-1) \end{bmatrix}. \quad (5-11)$$

h_k é denominado de operador de predição, e h_k^* é o operador erro-de-predição definido por:

$$h^* = 1, \overbrace{0, 0, \dots, 0}^{T-1 \text{ zeros}}, -h_0, -h_1, -h_2, \dots, -h_{N-1}. \quad (5-12)$$

Pelo exposto acima, filtro WHLP é aplicado apenas em seções AN, onde teoricamente há periodicidade temporal entre a primária e suas múltiplas. Por exemplo, o modelo de interfaces plano-horizontais. A extensão do método convencional WHLP admite modelos com interfaces plano-inclinadas e com curvaturas. A atenuação das múltiplas é realizada na seção FC, sendo o operador calculado com as amplitudes reais do sinal, independentemente da escala.

Na estratégia WHL-CRS, a equação normal WHL (5-8) é modificada para que o operador de predição seja calculado e aplicado com a informação limitada por $W_1(x_m, h; T_{hyp})$ e $W_2(x_m, h; T_{hyp})$ dentro da seção de cobertura múltipla. $W_1(x_m, h; T_{hyp})$ e $W_2(x_m, h; T_{hyp})$ são os limites superior e inferior das janelas móveis que se deslocam no tempo-espaço com base no modelo teórico tempo-duplo de trânsito $T_{hyp} = T_{hyp}(x_m, h; T_0, K_n, K_{nip}, \beta_0, V_0)$ e têm como objetivo introduzir a periodicidade entre a primária e sua múltipla.

A atenuação de múltipla com o operador WHLP é realizada na configuração FC com o auxílio dos atributos do operador de empilhamento CRS. Para isto, a equação 5.9 é modificada de modo que, para cada x_m e h , calcula-se um operador de predição com a informação janelada por $W_2(x_m, h; T_{hyp})$ e $W_1(x_m, h; T_{hyp})$ pela expressão:

$$\sum_{k=0}^{N-1} h_k \phi_{gg}(l-k; x_m, h, T_{hyp}) = \phi_{gg}(l+T; x_m, h, T_{hyp}), \quad (5-13)$$

onde $W_1 \leq l \leq W_2$, e o operador calculado é posteriormente aplicado na própria janela. Para que haja periodicidade entre primária e múltipla foi adotado:

$$W_2(x_m, h; T_{hyp}) - W_1(x_m, h; T_{hyp}) = 2T + 2C, \quad (5-14)$$

onde T é a periodicidade, C é o comprimento do pulso. A aplicação do filtro WHLP-CRS é explicada com auxílio do fluxograma da Figura 5.1.

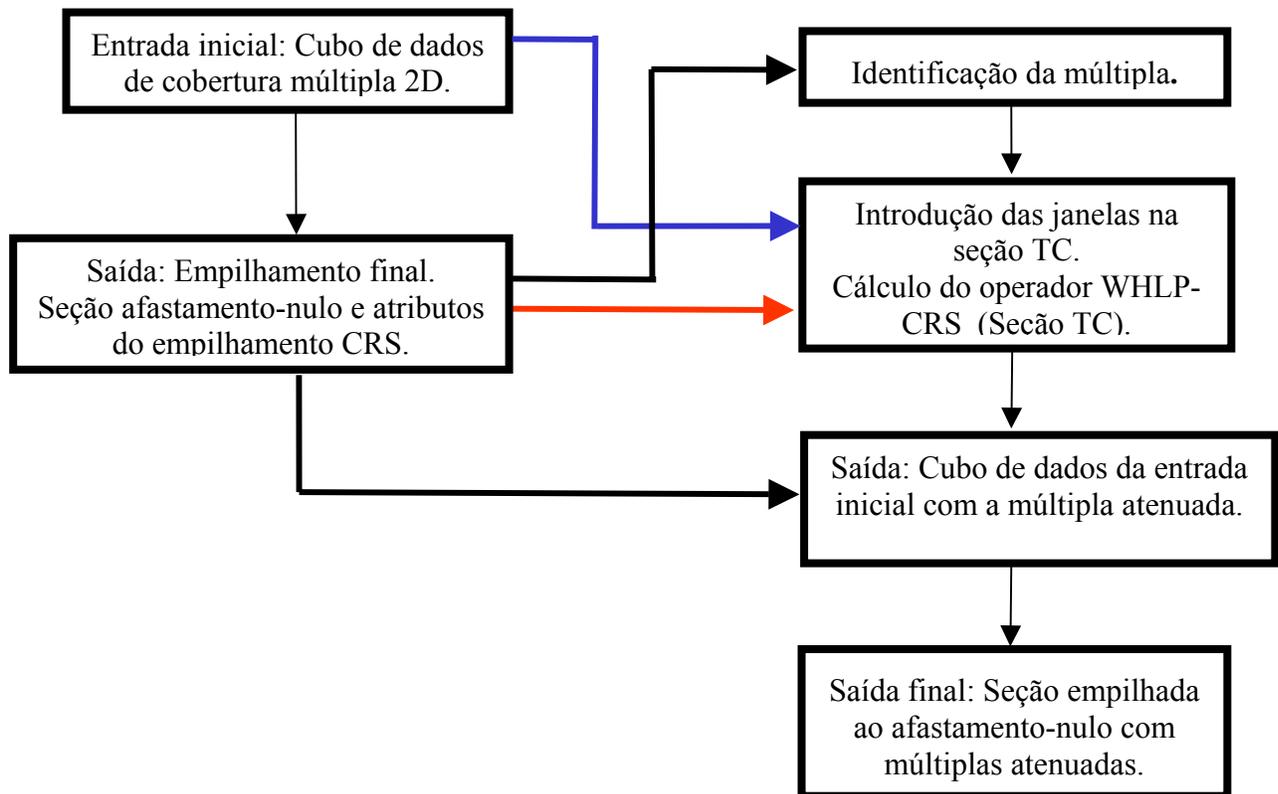


Figura 5.1. Fluxograma simplificado de processamento para atenuação de múltiplas com o método WHLP-CRS (Alves,2003).

Para enfatizar as limitações da teoria clássica do operador WHLP, a Figura 5.2 mostra as seções FC e de AN de um meio formado por uma camada horizontal sobre um semi-espço. Exibimos autocorrelações das seções, e as saídas do operador WHLP sem o uso de janelas móveis. Podemos observar que sem o uso de janelas móveis, o resultado só é satisfatório em traços próximos da fonte devido à periodicidade temporal.

Com o objetivo de explicar o funcionamento das janelas móveis, a Figura 5.3-a mostra a seção afastamento-variável (Figura 5.3-a) onde são destacados os traços 1, 30, 70 e 100 utilizados para ilustrar os detalhes da autocorrelação, da correlação cruzada, da janela de passagem e do operador erro de predição calculado dentro das janelas móveis. A Figura exhibe também os limites superiores e inferiores das janelas móveis e a saída do operador WHLP utilizando janelas móveis. Observa-se uma boa atenuação das múltiplas.

A Figura 5.4 ilustra a supressão da múltipla de primeira ordem do quinto traço da seção da Figura 5.3-a. Neste caso, a dimensão da janela de entrada é igual a dimensão da janela de saída.

As Figuras 5.5 e 5.6 exibem detalhes da autocorrelação, da correlação cruzada, do operador WHLP e o resultado na supressão da múltipla de primeira ordem, sendo a entrada os trechos janelados dos traços 1, 30, 70 e 100 destacados na Figura 5.3-a. A Figura 5.5 ilustra a autocorrelação, os limites da janela de passagem, a correlação cruzada e o operador erro de predição completo. A Figura 5.6 exhibe os traços selecionados na Figura 5.3-a, destacando os trechos janelados em vermelho e a saída do operador WHLP, sendo a entrada os trechos janelados destacados em vermelho na Figura 5.6-esquerda.

A atenuação de múltiplas com o operador WHLP-CRS é mostrado aqui com um modelo simples formado de uma camada sobre um semi-espaco. A resposta ao impulso deste modelo está na Figura 5.7, e nas figuras 5.8, 5.9 e 5.10 os parâmetros K_{nip} , K_n e β_0 para este modelo. A identificação e seleção da múltipla são realizadas na autocorrelação da seção AN calculada com o operador CRS (Figura 5.11).

No empilhamento CRS, a múltipla pode ser analisada como um evento primário (Figura 5.12). O empilhamento do dado de cobertura múltipla com a múltipla atenuada com o operador WHLP-CRS gera uma seção de AN sem múltipla como mostra a Figura 5.13.

A expressão “atenuação de múltiplas” significa o processo para suprimir (ou retirar) os fenômenos de eco (múltiplas) sísmicos. Por identificação de múltiplas denominamos o processo de reconhecimento da múltipla, que no presente caso é realizado visualmente na seção de afastamento-nulo (AN), acoplado com a marcação da múltipla na seção autocorrelação da seção AN. Por predição de múltipla denominamos o processo de calcular, com base num modelo determinístico, a posição temporal-espacial do eco no traço. A palavra “predição” no filtro WHLP (WHL) tem origem no contexto em que a distância de predição (T) representa a periodicidade entre a primária e sua(s) múltiplas(s).

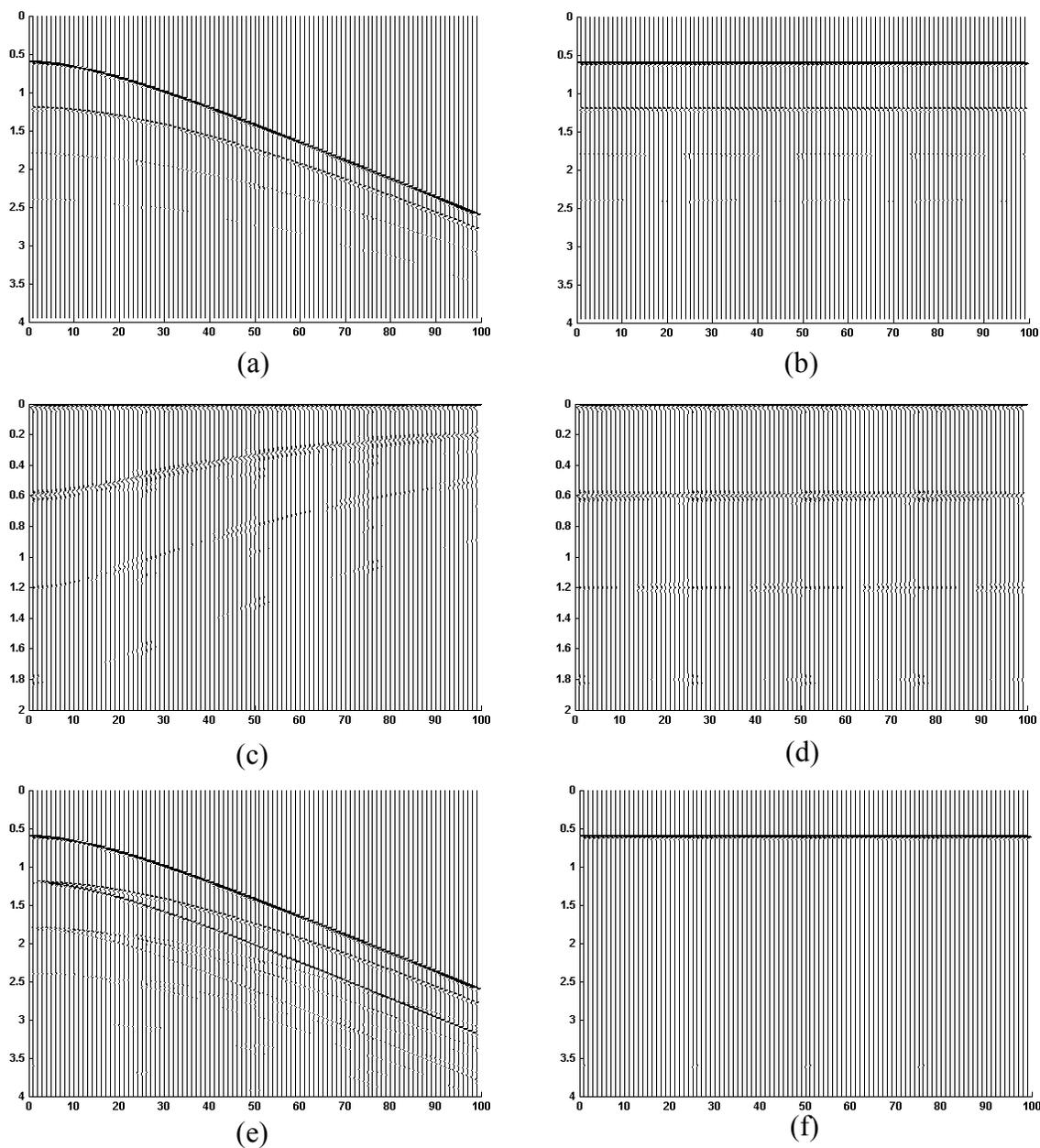


Figura 5.2 (a) Seção sísmica FC. (b) Seção AN.(c) Autocorrelação da seção FC (item a). (d) Autocorrelação da seção AN (item b). (e) O resultado do operador WHLP sendo a entrada a seção FC (seção a). (f) Resultado do operador WHLP sendo a entrada a seção AN (seção b). Não há uso de janelas móveis nas supressões das múltiplas. $v_1 = 2000 \text{ m/s}$, $v_2 = 4500 \text{ m/s}$, $e_1 = 800 \text{ m}$, $\Delta x = 50 \text{ m}$, $\Delta t = 2 \text{ ms}$. O resultado do operador WHLP em seção afastamento-variável não é bom devido não haver periodicidade nas múltiplas. O resultado em seções AN é bom devido haver periodicidade nas múltiplas.

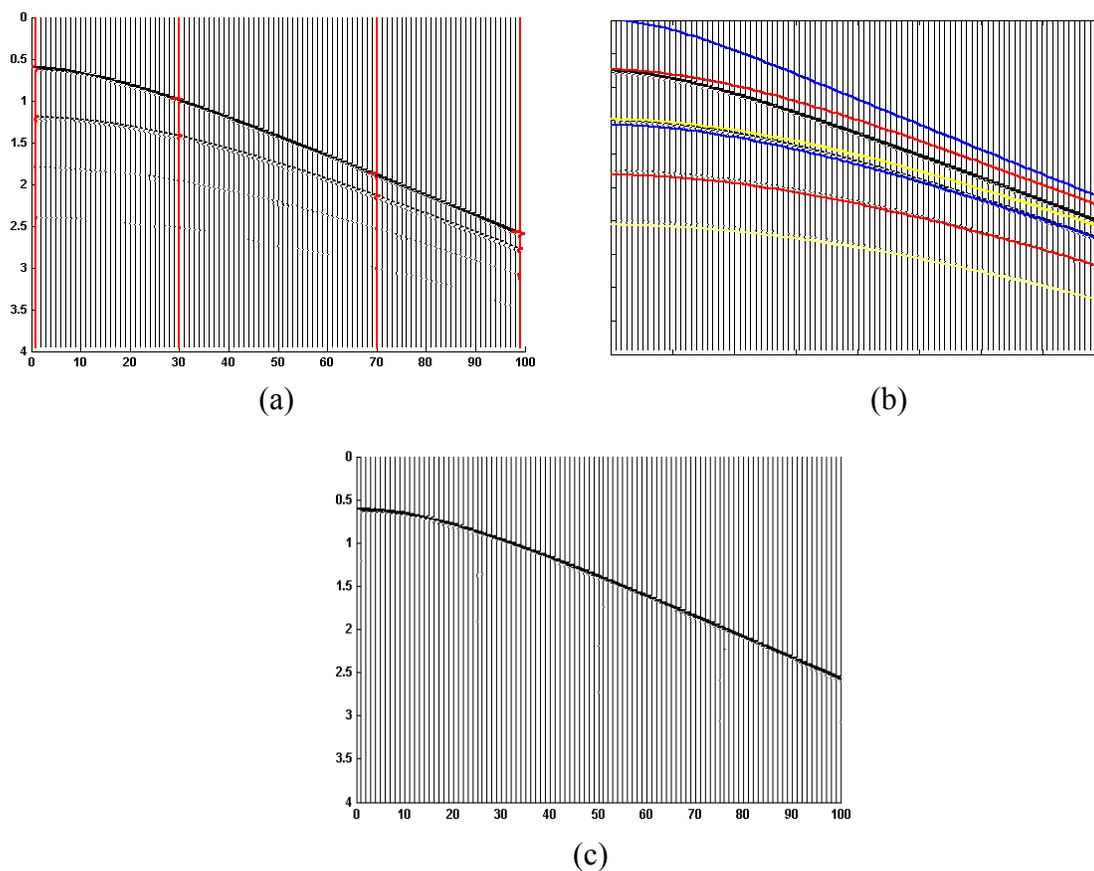


Figura 5.3. (a) Seção sísmica FC. Os traços (1, 30, 70 e 100) em vermelho são utilizados para ilustrar detalhes na autocorrelação, na correlação cruzada, janela de passagem e no OEP. (b) Seção sísmica FC e os limites superiores e inferiores das janelas móveis. As linhas azuis são para a supressão da múltipla de primeira ordem, as linhas vermelhas para a de segunda ordem e as amarelas para as múltiplas de terceira ordem. (c) O resultado do operador WHLP com as janelas móveis é bom devido a janela móvel introduzir de modo satisfatório a periodicidade necessária entre a primária e a sua múltipla.

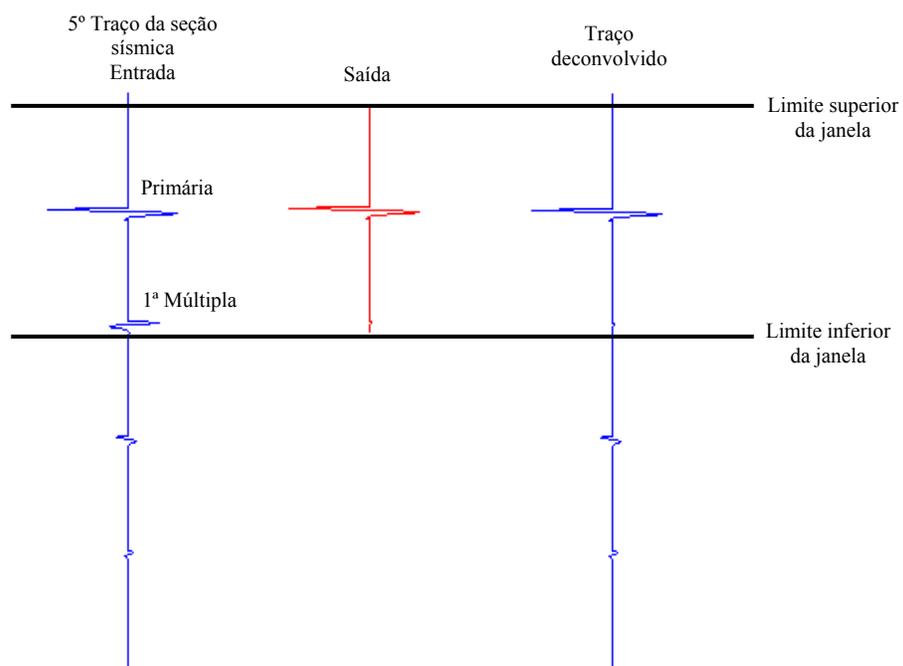


Figura 5.4. Mecanismo de janelamento para atenuação da múltipla de primeira ordem no quinto traço da seção sísmica da Figura 5.3-a. Na supressão da primeira múltipla, a dimensão da janela de entrada é igual a da janela de saída. Observamos o efeito da supressão da múltipla.

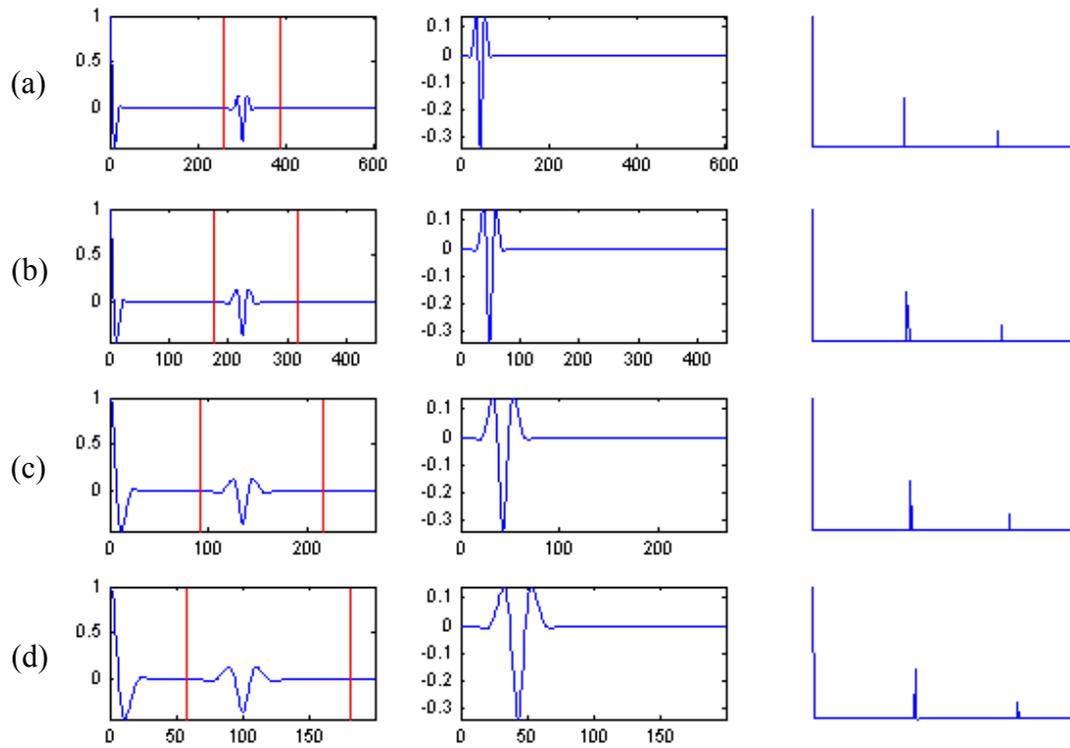


Figura 5.5. Coluna esquerda: Autocorrelação dos traços janelados (Figura 5.6- coluna esquerda). As linhas vermelhas são os limites das janelas de passagem. Coluna central: Correlação cruzada obtida com informações da janela de passagem. Coluna direita: OEP completo. A seqüência corresponde a da Figura 5.6. A densidade de eventos no trecho janelado influencia na forma do operador WHLP.

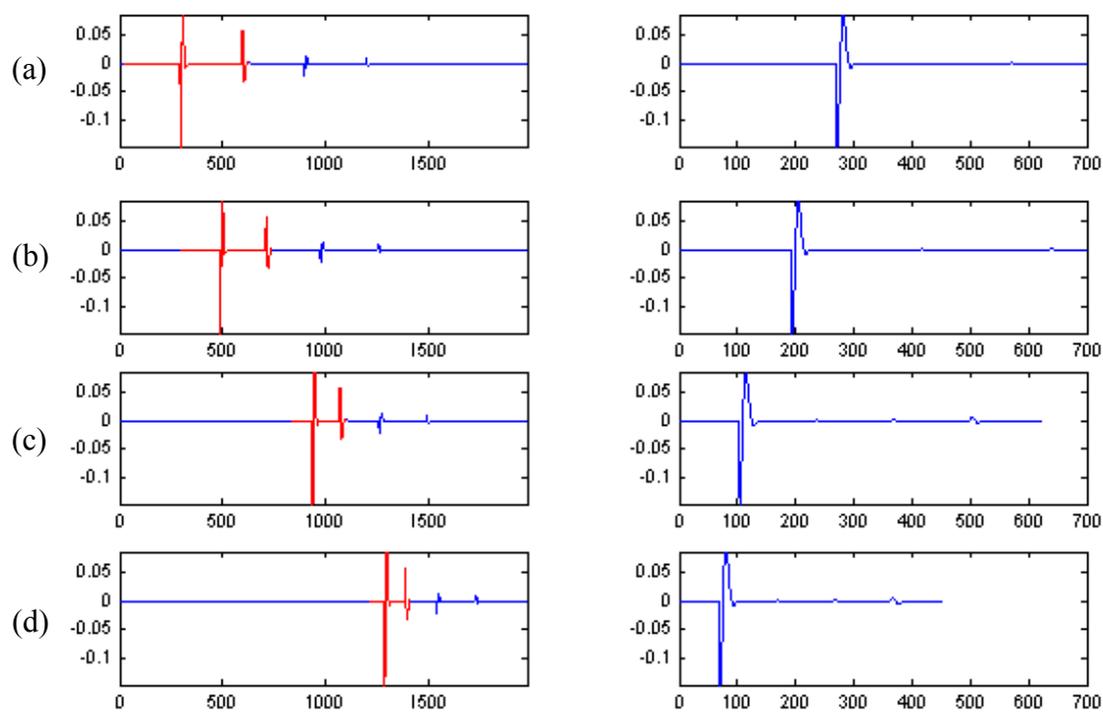


Figura 5.6. Coluna esquerda: Traços 1, 30, 70 e 100 da seção da Figura 5.3-a. Em vermelho estão os trechos janelados que contém informações da primária e sua primeira múltipla. Coluna direita: Saída da deconvolução da informação janelada, onde observamos o efeito da supressão da múltipla. O número de pontos na entrada do filtro é o mesmo na saída.

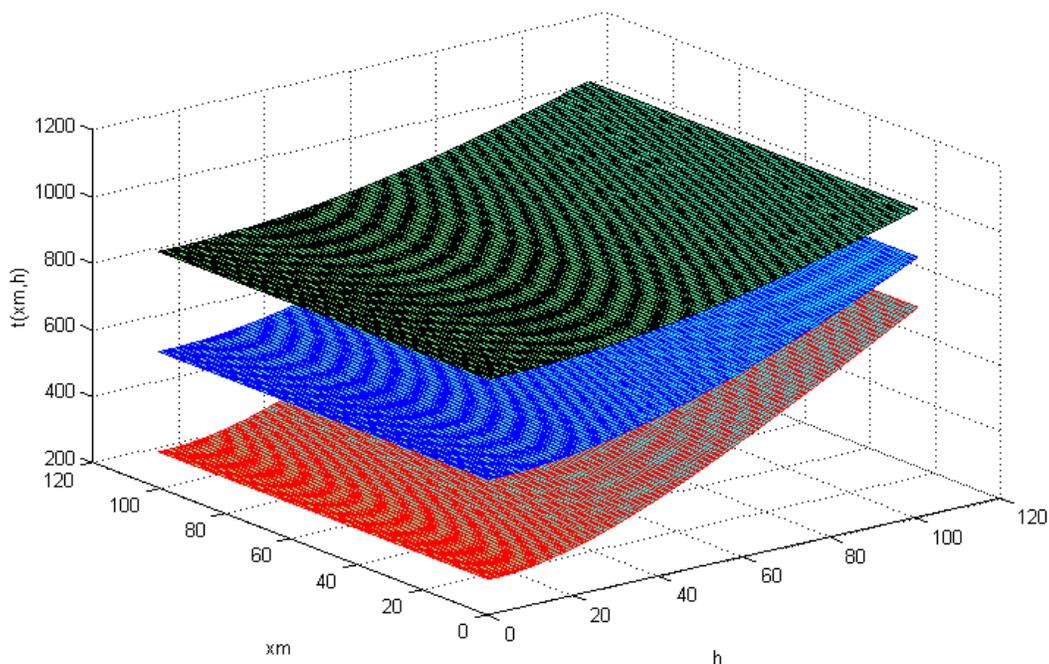


Figura 5.7. Tempo de trânsito da resposta ao impulso. A superfície vermelha representa a primária e as superfícies azul e verde representam as múltiplas de primeira e segunda ordem. h é o meio afastamento fonte-receptor e x_m representa o ponto médio. $v_1 = 2000 \text{ m/s}$, $v_2 = 4500 \text{ m/s}$, $e_1 = 800 \text{ m}$, $\Delta x = 50 \text{ m}$, $\Delta t = 2 \text{ ms}$.

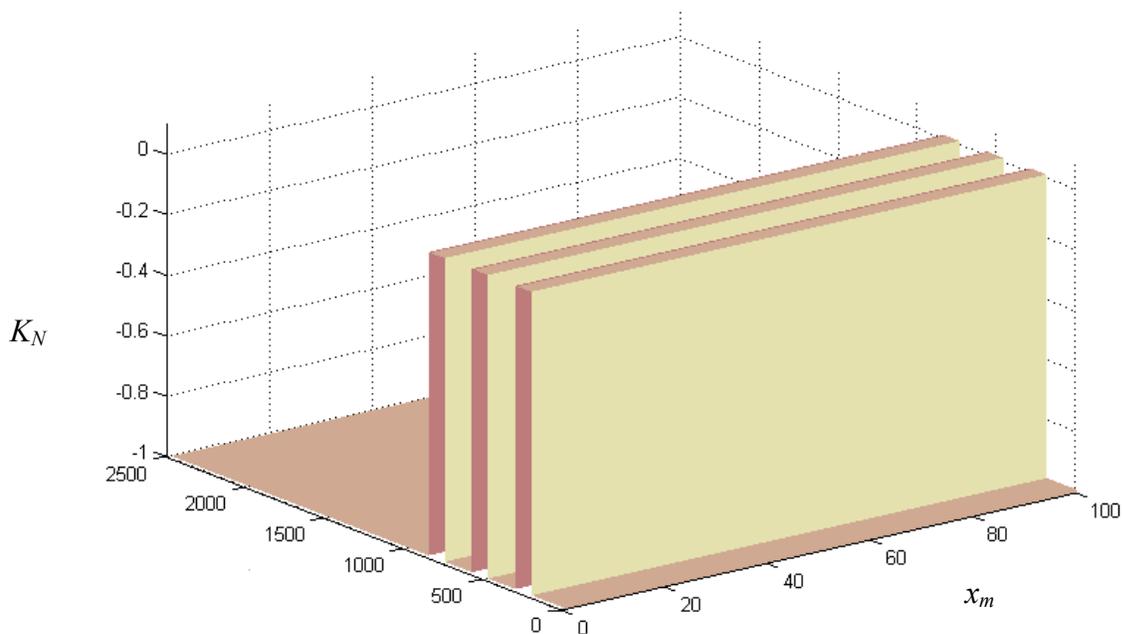


Figura 5.8. Parâmetro K_N (em km) para o empilhamento da seção da Figura 5.7 na obtenção da seção AN.

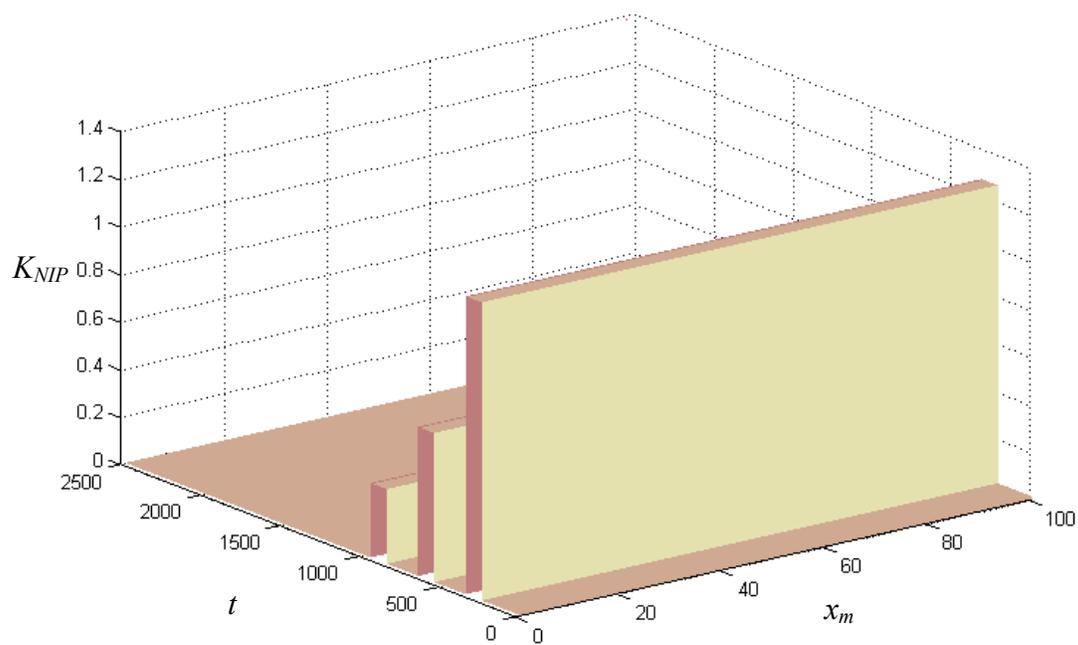


Figura 5.9. Parâmetro K_{NIP} (em km) para o empilhamento da seção da Figura 5.7 na obtenção da seção AN.

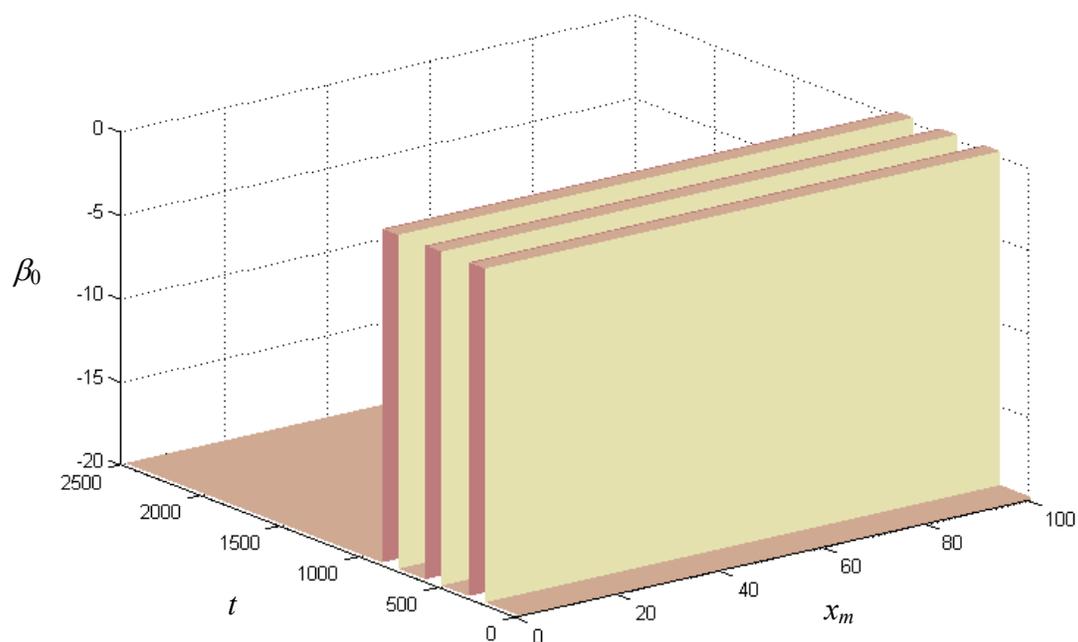


Figura 5.10. Parâmetro β_0 (em km) para o empilhamento da seção da Figura 5.7 na obtenção da seção AN.

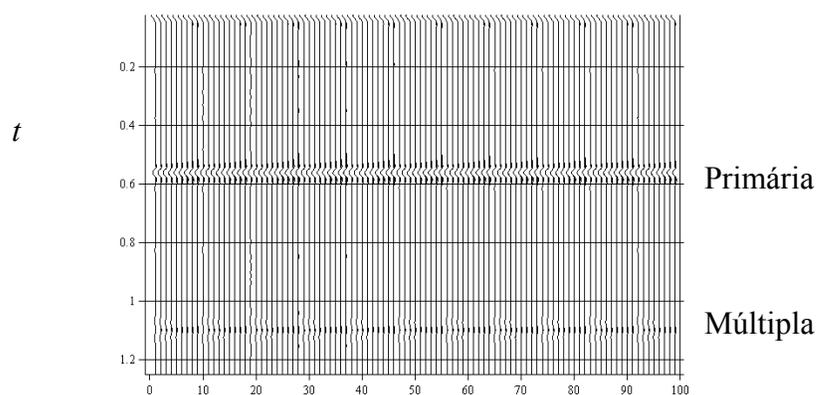


Figura 5.11. Autocorrelação da seção AN onde foi feita a identificação e seleção da múltipla a ser atenuada no dado pré-empilhado de múltipla no dado de cobertura contínua.

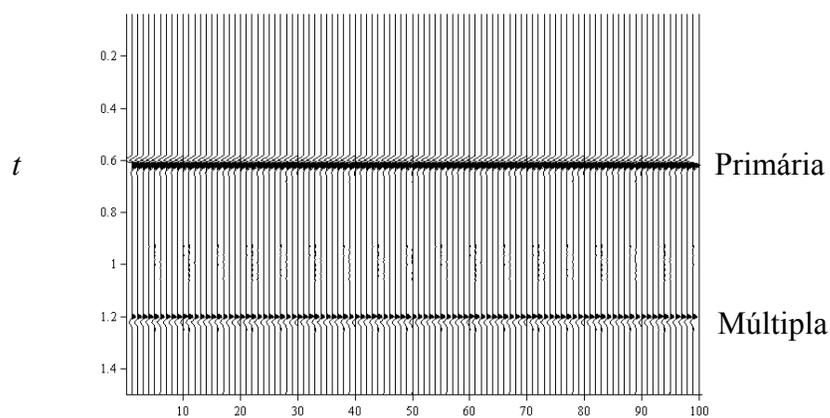


Figura 5.12. Seção AN obtido com o operador CRS, sendo a entrada as seções não tratadas com o operador WHLP-CRS.

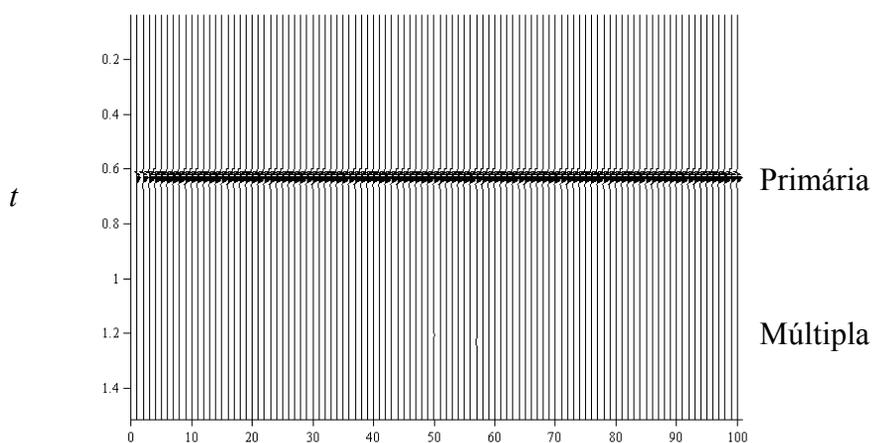


Figura 5.13. Seção AN obtido com o operador CRS, sendo a entrada as seções tratadas com o operador WHLP-CRS.

6. FILTRO DE VELOCIDADE ω - k

Em quase todas aplicações de um filtro na forma discretizada, a maior dificuldade encontrada está diretamente relacionada com a quantidade de coeficientes para definir o filtro. Por outro lado, a performance da aplicação do filtro a uma certa operação é melhorada com o aumento do número de coeficientes. Sendo assim, o objetivo no desenho de um filtro é encontrar o melhor operador de dimensão finita que mais aproxima a saída a uma resposta desejada.

6.1. DEFINIÇÃO FORMAL DO FILTRO NOS DOMÍNIO TEMPO-ESPAÇO

Convolução 1D e 2D. Um filtro unidimensional (1D) na forma discretizada temporal pode ser organizado como uma seqüência de coeficientes em-linha (forma vetorial) de uma amostragem posicionada com relação a uma determinada origem no eixo do tempo. Os coeficientes do filtro são associados com a posição de cada amostra da série temporal, e a saída do filtro é associada com a origem (Figura 6.1) do sistema de referência. A saída do filtro em um tempo específico t é posicionada colocando a origem da seqüência do filtro no ponto t da série temporal, e a computação é feita através de uma combinação linear dos valores de amplitude da série temporal que coincidem com a posição das amostras do operador. Esta combinação linear é, certamente, dependente das magnitudes dos coeficientes do filtro. A série temporal é totalmente filtrada através das avaliações sucessivas para todas as posições possíveis do filtro sobre a série temporal. Observe-se aqui que, sendo esta filtragem um processo discretizado, a ordem destas avaliações não é importante. (Wiggins, 1966).

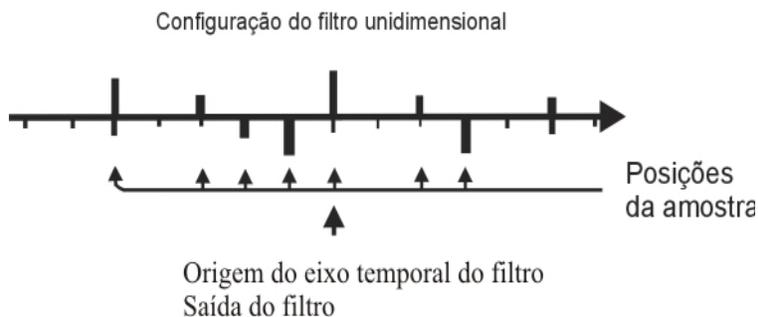


Figura 6.1. Representação gráfica dos coeficientes do filtro unidimensional, no domínio do tempo indicando coeficientes a esquerda e a direita da origem.

Uma visão semelhante pode ser estendida para o processo de filtragem bidimensional (forma matricial). Em aplicações sísmicas, um das dimensões representa tempo, e a outra distância. Podemos organizar o filtro discretizado 2D (tempo-espço) como uma seqüência planar de pontos amostrados e localizados com relação a uma determinada origem no plano tempo-espço (Figura 6.2). Um coeficiente do filtro é associado com cada posição da amostragem, e a saída do filtro é relacionada com a origem. A saída do filtro com relação a uma posição específica (x, t) do processo planar é encontrada colocando a origem da seqüência 2D do filtro no ponto (x, t) , e calculando a combinação linear (baseado nos coeficientes do filtro) dos valores planares da série temporal-espacial que coincidem com as posições dos coeficientes do filtro. O processo total de filtragem é realizado pela avaliação sucessiva da saída do filtro, produzindo para todas as posições possíveis do processo na qual a origem do filtro pode ser colocada. Novamente, a avaliação do processo discretizado é completamente dependente da computação em cada ponto, e a ordem das avaliações das saídas do filtro é imaterial.

Sem perda de generalidade, restringimos as possíveis posições de um filtro para as interseções de uma malha retangular.

Configuração do filtro dimensional

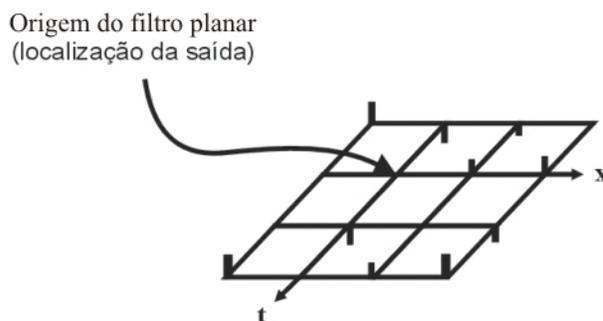


Figura 6.2. Representação gráfica dos coeficientes do filtro bidimensional. As coincidências das barras verticais com a malha representam uma amostra. As alturas das barras representam os coeficientes do filtro.

Os processos descritos acima são realizações físicas do princípio da convolução. Matematicamente, a convolução de um sinal $f(t)$ e de um sistema $h(t)$ é dada por:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)h(t - \tau)d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)f(t - \tau)d\tau, \quad (6-1)$$

onde $g(t)$ é a saída no domínio do tempo (sismograma). Um exemplo da representação canônica da operação acima é dada na Figura 6.3.

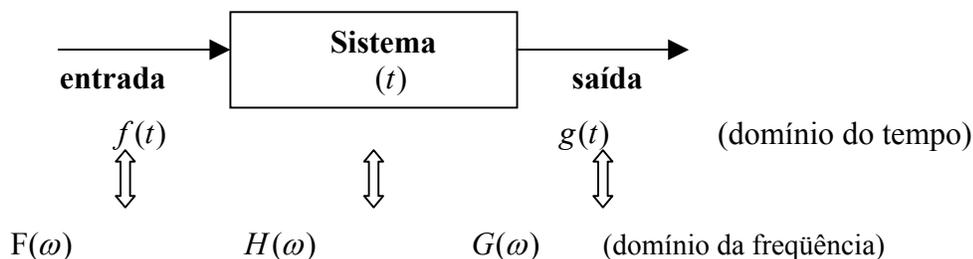


Figura 6.3. Representação canônica da convolução de um sinal $f(t)$ em um sistema $h(t)$.

A forma discretizada correspondente a equação (6.1) é segundo a aproximação a integral de Riemann nas formas:

$$g_k = \Delta t \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} f_n h_{k-n} = \Delta t \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} h_n f_{k-n}, \quad (-\infty < k < +\infty). \quad (6-2)$$

Quando se menciona que um filtro discretizado é convolvido com um sinal, é sempre possível se visualizar de forma semelhante às figuras descritas acima.

Freqüentemente é desejável examinar as propriedades de um filtro em termos da sua resposta a entradas senoidais; isto é, examinar o filtro segundo a transformada de Fourier. Na realidade, historicamente, filtros foram sempre projetados visando inicialmente a resposta desejada e especificada no domínio da transformada de Fourier (domínio da freqüência).

6.2. TRANSFORMADA DE FOURIER 1D E 2D

Consideremos um sinal unidimensional com as amplitudes, h_i , ($i=1, \dots, n$) localizados nas coordenadas temporais (t_j , $j=1, \dots, n$). Por exemplo, na Figura 6.1, $g_j=(-5, -3, -2, -1, 0, 2, 3, 5)$ e $n=8$. A transformada de Fourier 1D contínua em ω e discretizada não uniformemente em t para esta função é expressa por:

$$H(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} \Delta t_n h_n e^{-i\omega t_n}, \quad t_n = n\Delta_n. \quad (6-3)$$

Na discretização uniforme (Δt constante) a expressão é dada por:

$$H_p = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} h_n e^{-i \frac{2\pi}{N} pn} . \quad (6-4)$$

Considerando que se restringe a posição (t_j) das amostras de um sinal a múltiplos inteiros de um incremento de tempo Δt , a transformada de Fourier é periódica com um ciclo de comprimento $\pi/\Delta t$ (Bracewell, 1965). Por esta razão, tem-se que restringir a nossa atenção e análise ao ciclo centrado na origem do eixo das freqüências. Além disso, com a finalidade de normalizar as unidades associadas com a variável independente ω , pode-se medir freqüência em quantidades de Nyquists. Esta medida é formulada de maneira que π Nyquists é associado com a freqüência $1/2\Delta t$. Estas relações são ilustradas na Figura 6.4.

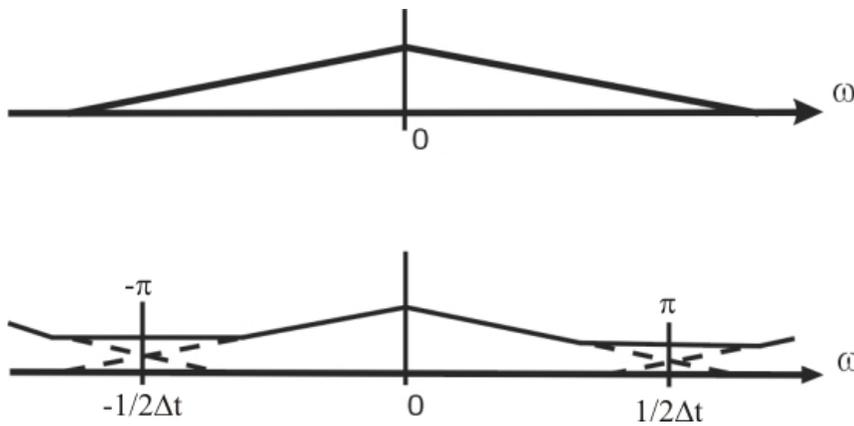


Figura 6.4. (Em cima) Resposta de amplitude e relação com a amostragem em intervalos uniformes Δt . (Em baixo) Ilustração do efeito de contaminação por amostragem (“aliasing”) no domínio do tempo, sobre a resposta de amplitude de um filtro.

A transformada de Fourier 2D para um sinal bidimensional tem propriedades semelhantes à transformada para o caso unidimensional. Considerando o sinal bidimensional com as amplitudes $f_{i,j}$ ($i=1, m; j=1, n$) localizados nas coordenadas (x_i, t_j) ($j = 1, \dots, n$), a transformada de Fourier contínua em ω e discretizada em t do sinal é calculada não uniformemente por:

$$F(\omega, k) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \Delta t \Delta x f_{mn} e^{i(\omega t_m - k x_n)}. \quad (6-5)$$

Na discretização uniforme, a transformada de Fourier, 2D tem a forma:

$$F_{pq} = \Delta t \Delta x \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_{mn} e^{i\left(\frac{2\pi}{M} pm - \frac{2\pi}{N} qn\right)}. \quad (6-6)$$

Como notado anteriormente, a posição da amostra (x_i, t_j) é restrita às intersecções de uma malha retangular. Isto é, as posições da amostra são múltiplos inteiros dos valores de incrementos que normalmente são feitos uniformes Δx e Δt . Esta escolha de posição das amostras leva a uma periodicidade em ambas as direções ω e k no plano (ω, k) . A periodicidade na direção de k é $\pi/\Delta x$ e na direção de ω é $\pi/\Delta t$. Novamente, normaliza-se estas coordenadas de forma que k e ω sejam medidas em termos de Nyquists. Assim a frequência $1/2\Delta x$ é comparada a π Nyquists na direção de k , e $1/2\Delta t$ é comparado a π Nyquists na direção de ω .

Uma vez que a transformada de Fourier 2D de uma função real é centro-simétrica (a parte real é par e a parte imaginária é ímpar) é suficiente que apenas a parte superior do plano ω - k seja ilustrada nos exemplos. Estas propriedades são ilustradas na Figura 6.4.

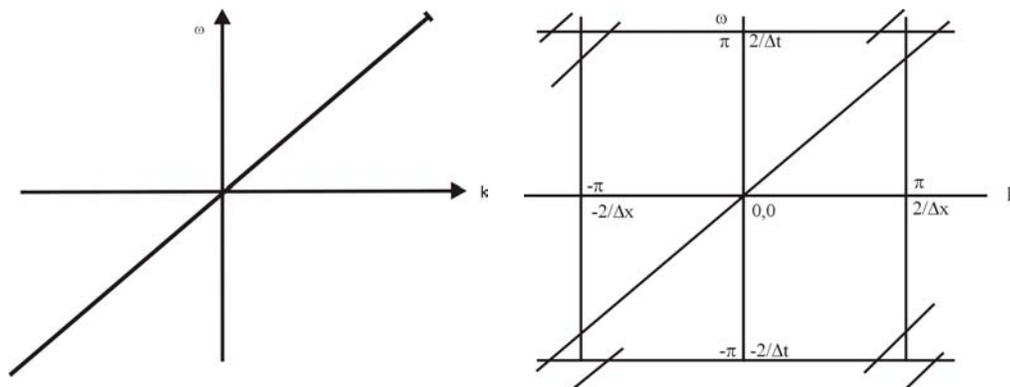


Figura 6.4. Ilustração da janela no domínio da frequência para análise do efeito de amostragem de uma função bidimensional hipotética.

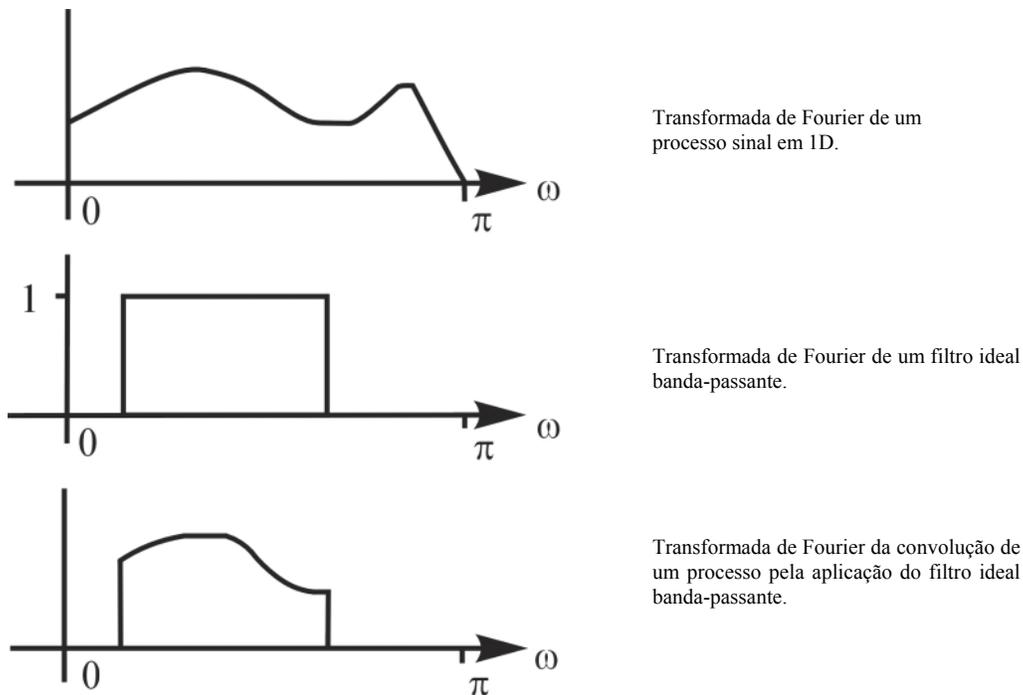


Figura 6.5. Ilustra a aplicação da transformada de Fourier a uma filtragem.

Uma das razões para se examinar a transformada de Fourier de um filtro é a forma particularmente simples que o processo de convolução apresenta no domínio da transformada de Fourier. Dois processos em convolução no domínio tempo-espaco é equivalente à multiplicação de suas transformadas no domínio da transformada de Fourier. Esta propriedade é ilustrada para um processo unidimensional na Figura 6.5. A resposta do filtro ilustrada é chamada de filtro banda-passante. O uso de um filtro para isolar uma faixa particular de frequências é uma das idéias mais antigas nas aplicações de filtro. Estende-se esta idéia para uma formulação bidimensional.

6.3. ANÁLISE DO CONTEÚDO DE UM FILTRO

Coefficientes do filtro bidimensional para uma configuração especial de $D(\omega, k)$ foram publicado por Fail & Grau (1963) e (Embree et al., 1963).

Considere-se um filtro hipotético com coeficientes f_{mn} localizado nas coordenadas (x_j, t_j) . A transformada uniforme de Fourier deste filtro é expressa pela equação (6-5):

$$F(\omega, k) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \Delta t_m \Delta x_n f_{mn} e^{i(\omega t_m - k x_n)},$$

onde retira-se os coeficientes Δx para simplificação, sendo $D(\omega, k)$ a resposta espectral bidimensional desejada do filtro, pode-se, então, formular uma medida da diferença $\Delta(\omega, k) = F(\omega, k) - D(\omega, k)$ como um erro no sentido médio-quadrático expresso por:

$$\varepsilon(f_{mn}) = \int_{-\pi-\pi}^{+\pi+\pi} [F(\omega, k) - D(\omega, k)] \overline{[F(\omega, k) - D(\omega, k)]} d\omega dk, \quad (6-7)$$

onde $\overline{\Delta(\omega, k)}$ indica o complexo conjugado de $\Delta(\omega, k)$. O problema é minimizar o valor de ε . Este valor mínimo pode ser determinado igualando a zero a derivada de ε em relação aos coeficientes f_{pq} :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial f_{pq}} = 0, \quad (p=1, \dots, M) \quad (q=1, \dots, N). \quad (6-8)$$

onde os índices pq reúne a seqüência dos coeficientes (m, n) . Realizando as operações apropriadas, tem-se que para $D(\omega, k)$ fixo:

$$0 = \int_{-\pi-\pi}^{+\pi+\pi} \frac{\partial F(\omega, k)}{\partial f_{pq}} [F(\omega, k) - D(\omega, k)] d\omega dk, \quad (l=1, \dots, n), \quad (6-9a)$$

$$0 = \int_{-\pi-\pi}^{+\pi+\pi} e^{i(\omega t_p - kx_q)} [F(\omega, k) - D(\omega, k)] d\omega dk, \quad (6-9b)$$

$$0 = 4\pi^2 f_{pq} - \int_{-\pi-\pi}^{+\pi+\pi} D(\omega, k) e^{i(\omega t_p - kx_q)} d\omega dk, \quad (6-9c)$$

que conduz ao resultado coerente onde os coeficientes do filtro são determinados pela transformada de Fourier da resposta desejada:

$$f_{pq} = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi-\pi}^{+\pi+\pi} \overline{D(\omega, k)} e^{i(\omega t_p - kx_q)} d\omega dk. \quad (6-10)$$

A medida de erro quadrático aplicada é plenamente de bom senso. Esta integral pode ser avaliada analiticamente para algumas configurações de $D(\omega, k)$. Restringe-se aqui $D(\omega, k)$ à forma de um filtro banda-passante, plano-limitada por um polígono.

Substituindo a solução acima encontrada na equação (6.5) que define o erro ε , acha-se um resultado para a estimativa do erro dada por:

$$\varepsilon = \int_{-\pi-\pi}^{+\pi+\pi} D(\omega, k) \overline{D(\omega, k)} d\omega dk - \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N f_{pq}^2 \quad (6-11)$$

Esta propriedade para o desenho de um filtro é especialmente atrativa porque o valor de um coeficiente f_{pq} não é afetado por quaisquer dos outros coeficientes. Esta independência dos valores dos coeficientes do filtro permite uma procura eficiente de valores que diminuam o erro médio-quadrático (ε) de um valor o mais alto possível, e a equação (6.11) mostra que os coeficientes com maior magnitude resolvem esta propriedade. Sendo assim, para minimizar o erro quadrático esperado para uma determinada quantidade de coeficientes arbitrariamente especificados para o filtro, pode-se computar coeficientes para todos os pontos possíveis da malha e localizados dentro de limites amplos, então escolher n posições da malha cujos coeficientes tenham maior magnitude.

6.4. FILTRO BANDA-PASSANTE E DE REJEIÇÃO ÓTIMOS

Freqüentemente é desejável melhorar a resposta de um filtro dentro de certas áreas do plano $\omega-k$ às custas da resposta em outras áreas do plano. Por exemplo, se admite que o espectro de maior ruído é concentrado em uma área particular e pode-se desenhar um filtro que tenha sua maior capacidade de rejeição na área do ruído.

Para expressar este princípio, define-se uma função peso $W(\omega, k)$ sobre o plano $\omega-k$. Os valores relativos de $W(\omega, k)$ numa região particular do plano expressa a importância daquela área. Normalmente, $W(\omega, k)=1$ na região de passagem e $W(\omega, k)=0$ na região de rejeição, o que equivale a uma função do tipo retangular no domínio da frequência.

A expressão para o erro quadrático esperado passa a ter a forma dada por:

$$\varepsilon = \int_{-\pi-\pi}^{+\pi+\pi} \int_{-\pi-\pi}^{+\pi+\pi} W(\omega, k) [F(\omega, k) - D(\omega, k)] \overline{[F(\omega, k) - D(\omega, k)]} d\omega dk \quad (6-12)$$

De forma semelhante ao desenvolvido anterior, podemos determinar os coeficientes de um filtro através da operação $\frac{\partial \varepsilon}{\partial f_i} = 0$, para encontrar uma solução em termos de um

conjunto de equações simultâneas na forma:

$$\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_{mn} R_{m-p, n-q} = G_{pq} . \quad (6-13)$$

Onde:

$$R_{m-p, n-p} = \int_{-\pi-\pi}^{+\pi+\pi} \int_{-\pi-\pi}^{+\pi+\pi} W(\omega, k) e^{i[\omega(t_m-t_p)-k(x_n-x_q)]} d\omega dk . \quad (6-14a)$$

$$G_{pq} = \int_{-\pi-\pi}^{+\pi+\pi} \int_{-\pi-\pi}^{+\pi+\pi} W(\omega, k) D(\omega, k) e^{i(\omega t_p - k t_p)} d\omega dk . \quad (6-14b)$$

Substituindo as equações (6.14) na expressão para o erro quadrático esperado (6.11) temos que:

$$\varepsilon = \int_{-\pi-\pi}^{+\pi+\pi} \int_{-\pi-\pi}^{+\pi+\pi} W(\omega, k) D(\omega, k) \overline{D(\omega, k)} d\omega dk - \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_{mn} G_{mn} . \quad (6-15)$$

A solução das equações simultâneas (6.13) pode ser simplificada consideravelmente, se observado que R_{ji} é uma função de (t_m-t_p) e (x_n-x_q) . Isto é, $R_{ji}=R_{ij}$ é uma função centro-simétrica. Usando esta observação, a equação (6.13) pode ser resolvida através de métodos convencionais, por exemplo, técnicas recursivas como apresentadas por Wiggins & Robinson (1965).

O termo do erro quadrático esperado para as especificações dadas não é uma função simples dos parâmetros do desenho, com é o caso para o filtro banda-passante. Neste caso, tem-se que computar a equação simultânea (6.13) para cada forma de filtro a ser examinada.

6.5. CONTAMINAÇÃO DE FREQUÊNCIA POR AMOSTRAGEM

A contaminação de frequência pode ser descrita como a sobreposição lateral de termos individuais de espectros repetidos de uma função amostrada (partes real e imaginária). Isto acontece quando uma função de dimensão $J=1,2,\dots$, de banda limitada, é amostrada em qualquer uma das dimensões num intervalo que exceda $1/2f_{\max} = \Delta t$, onde f_{\max} é a maior componente de frequência na dimensão amostrada. O resultado da contaminação de frequência para $J>1$ pode ser surpreendente a alguém acostumado a analisar funções unidimensionais amostradas (Yilmaz, 1987, seção 1.6). No caso de duas dimensões é conveniente considerar a contaminação em termos de um espectro repetido, ou

periódico. Apresenta-se inicialmente detalhes da aproximação para uma dimensão, e depois estende-se para duas dimensões.

A amostragem de uma função contínua, banda-limitada, $a(x)$, em uma dimensão pode ser expressa como a multiplicação da função contínua pela função amostragem, que consiste de uma série infinita de impulsos unitários. Woodward (1953) introduziu a notação para representar a repetição periódica de uma função aperiódica $s(x)$ na seguinte forma:

$$s_{\Delta x}(x) = \text{Rep}_{\Delta x} s(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} s(x - m\Delta x), \quad (6-16a)$$

onde Δx é o período de repetição. É importante considerar a substituição de $s(x)$ pela função delta de Dirac, $\delta(x)$, que tem a seguinte propriedade:

$$\delta(x) = 0 \text{ para } x \neq 0, \text{ e } \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1,$$

e uma série infinita de impulsos de unidade do intervalo de Δx são expressos como:

$$\delta_{\Delta x}(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x - m\Delta x). \quad (6-16b)$$

A amostragem de uma função contínua $a(x)$ com um intervalo uniforme Δx pode ser expressa matematicamente pela multiplicação de $a(x)$ por $\delta_{\Delta x}(x)$. Assim, temos:

$$a_m = a(x)\delta_{\Delta x}(x), \quad (6-17)$$

onde a_m é a versão amostrada de $a(x)$, tem-se o par $a(x) \leftrightarrow A(k)$. Uma vez que, a multiplicação no domínio do espaço, ou no domínio do tempo, é equivalente à convolução no domínio de frequência, pode-se examinar o efeito da amostragem através da convolução da transformada de Fourier de $a(x)$ com a transformada de Fourier de $\delta_{\Delta x}(x)$.

Uma outra forma de funções especiais são as funções Pente-fino (intervalo Δx) e Pente-grosso (intervalo $1/\Delta x$), úteis para expressar a transformada de Fourier na função Rep. A função Pente é definida por Woodward (1953) como o produto convolucional:

$$\text{Pen}_{1/\Delta x} s(k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} s(m/\Delta x)\delta(k - m/\Delta x). \quad (6-18)$$

A operação $\text{Pen}_{1/\Delta x}s(k)$ indica a repetição periódica (com período $1/\Delta x$) do espectro $s(k)$. A transformada de Fourier de $\text{rep}_{\Delta x}s(x)$ pode ser escrita usando a função Pente-grosso na forma:

$$\text{Rep}_{\Delta x}s(x) \leftrightarrow \left| \frac{1}{\Delta x} \right| \text{Pen}_{1/\Delta x}s(k) = \left| \frac{1}{\Delta x} \right| \sum_{m=-\infty}^{\infty} s(m/\Delta x) \delta(k - m/\Delta x), \quad (6-19)$$

onde \leftrightarrow denota o par de transformadas. Substituindo $s(x)$ por $\delta(x)$, e sendo a transformada de $\delta(x)$ igual a 1, temos que:

$$\text{Rep}_{\Delta x}\delta(x) \leftrightarrow \left| \frac{1}{\Delta x} \right| \text{Pen}_{1/\Delta x}1 = \left| \frac{1}{\Delta x} \right| \sum_{m=-\infty}^{\infty} 1 \cdot \delta(k - m/\Delta x). \quad (6-20)$$

A convolução de $(1/\Delta x)\text{Pen}_{1/\Delta x}1$ com $A(k)$ resulta em A_k , a transformada da função amostrada a_m . Assim, temos que:

$$A_k = A(k) * \left| \frac{1}{\Delta x} \right| \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(k - m/\Delta x), \quad (6-21)$$

onde $(*)$ denota convolução.

O espectro resultante para $A(k)$ é a soma dos espectros repetidos no intervalo de frequência onde os espectros de repetição se sobrepõem. Esta distorção do espectro original $A(k)$ é chamado contaminação de frequência por amostragem (“aliasing”). Mostra-se o caso especial em que $a(x)$ é uma função real, de modo que $|A(k)|$ é simétrico-par, e a faixa de sobreposição espectral está centrada com relação à frequência $k'_N = (1/2\Delta x')$, que é chamada a frequência de Nyquist.

A frequência de Nyquist é também chamada de frequência de dobramento, ou de viés, uma vez que (no caso de dados reais) as componentes da frequência de $A(k)$ acima de k'_N e abaixo de k'_N parecem estar refletidas, ou dobradas, aproximadamente ao redor de k'_N e $-k'_N$. No caso geral quando $a(x)$ é complexo, os coeficientes de $|A(k)|$ não são simétricos, e o alcance de frequência de sobreposição espectral não é centrada ao redor de k'_N . Sendo assim, no caso geral, o conceito de contaminação de frequência, como a reflexão, ou de dobramento de frequências maior do que k_N , e menor do que $-k'_N$, ao redor de k_N e $-k_N$, não é válida. Esta distinção é talvez sem importância para um geofísico que trabalha

apenas com dados reais (levantamento sísmico, gravimétrico e magnetométrico). Porém, deveria ser de interesse para os geofísicos que trabalham com dados complexos obtidos nos métodos eletromagnéticos de exploração.

O desenvolvimento para obter A_k é ilustrado na Figura 6.5., onde $a(x)$ banda limitada em $\pm k_1$ ciclo/unidade de comprimento, e representa a interpretação gráfica do resultado acima (6-19).

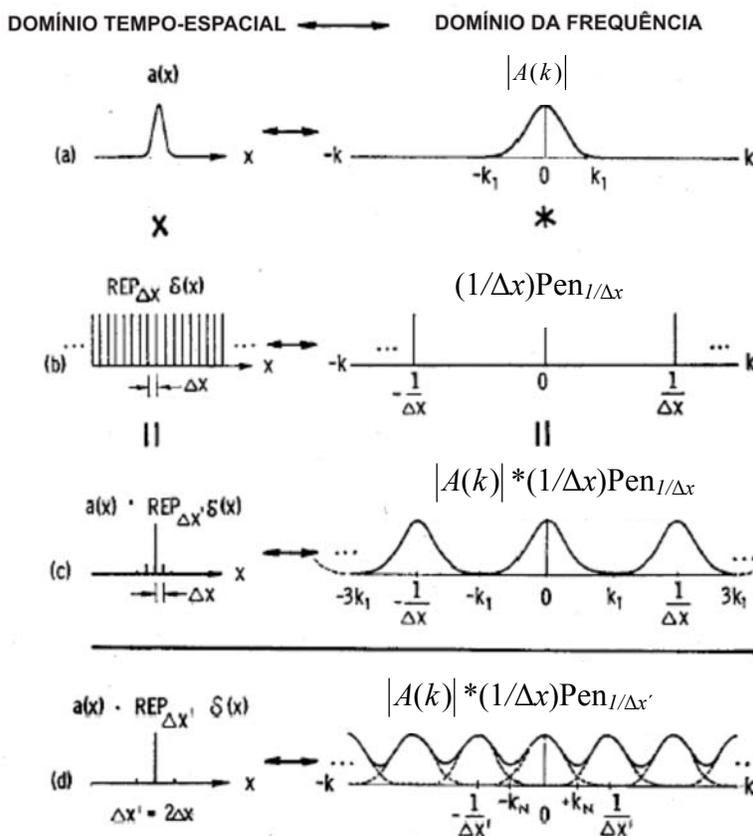


Figura 6.5. (a) Ilustração de uma função banda-limitada contínua $a(x)$ e sua transformada $A(k)$. A função Rep e sua transformada são mostradas em (b) A função amostrada e sua transformada são mostradas em (c). A convolução de $A(k)$ com $(1/\Delta x)\text{Pen}_{1/\Delta x}$ resulta na repetição de $A(k)$ com um período $1/\Delta x$. Quando aumentamos o espaçamento de amostragem Δx , o período $1/\Delta x$ diminui e quando $(1/2\Delta x) < k_1$, o espectro de amplitude se sobrepõe. em (d) ilustra a sobreposição para o intervalo de amostragem $\Delta x'$ igual a duas vezes ao intervalo Δx original.

A contaminação de frequência bidimensional é comparado ao desenvolvimento em uma dimensão. Define-se uma função de repetição bidimensional por:

$$\text{Rep}_{\Delta x \Delta y}(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(x - m\Delta x, y - n\Delta y) \quad (6-22)$$

A equação (6-22) representa a repetição periódica de uma função bidimensional contínua $s(x, y)$. A função se repete em intervalos Δx nas direções $\pm x$ e Δy nas direções $\pm y$. Ao substituir $s(x, y)$ na equação (6-22) por um delta de Dirac bidimensional a função $\delta(x, y)$, definida por (Clement, 1973):

$$\begin{aligned} \delta(x, y) &= 0 \quad (x^2 + y^2 \neq 0) \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x, y) dx dy &= 1 \end{aligned}$$

Tem-se que:

$$\text{Rep}_{\Delta x \Delta y} \delta(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - m\Delta x, y - n\Delta y). \quad (6-23)$$

A função $\text{Rep}_{\Delta x \Delta y} \delta(x, y)$ é uma função amostragem bidimensional formada de impulsos unitários nos intervalos Δx e Δy , nas direções x e y , respectivamente.

Mantendo a mesma analogia, a função bidimensional Escova, tem a forma:

$$\text{Esc}_{1/\Delta x 1/\Delta y}(k, l) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(m/\Delta x, n/\Delta y) \delta(k - m/\Delta x, l - n/\Delta y). \quad (6-24)$$

Aqui convenientemente, os símbolos k e l se referem às componentes da frequência nas direções x e y , respectivamente. Substituindo $S(k, l)$ pela transformada de Fourier de $\delta(x, y)$ que é 1, temos que:

$$\text{Esc}_{1/\Delta x 1/\Delta y} 1 = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} 1 \cdot \delta(k - m/\Delta x, l - n/\Delta y). \quad (6-25)$$

A transformada de Fourier de $\text{Rep}_{\Delta x \Delta y} \delta(x, y)$ pode ser expressa agora em função dos termos da função Escova na forma:

$$\begin{aligned} \text{Rep}_{\Delta x \Delta y} \delta(x, y) &\leftrightarrow \left| \frac{1}{\Delta x \Delta y} \right| \text{Esc } 1/\Delta x, 1/\Delta y I \\ &= \left| \frac{1}{\Delta x \Delta y} \right| \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(k - m/\Delta x, l - n/\Delta y) \end{aligned} \quad (6-26)$$

O par de transformada é ilustrado na Figura 6.6.

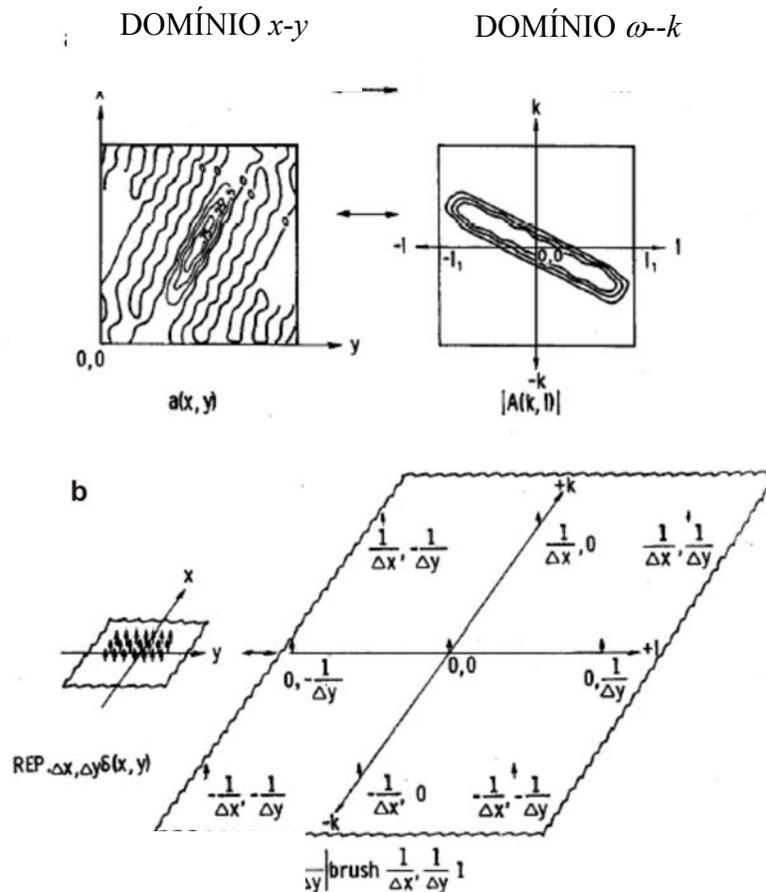


Figura 6.6. (a) Função $a(x, y)$ contínua bidimensional e seu espectro $A(k, l)$. (b) Função $\text{Rep}_{\Delta x \Delta y} \delta(x, y)$ e seu espectro $\left| \frac{1}{\Delta x \Delta y} \right| \text{Esc } 1/\Delta x, 1/\Delta y$, contínuo.

Um caso especial é que $a(x, y)$ seja considerado uma função bidimensional contínua de banda limitada nas frequências $k = \pm k_1$ e $l = \pm l_1$. Para ilustração, usa-se uma função contínua radialmente simétrica. A função e sua transformada de Fourier são desenhadas na

Figura 6.4. $a(x, y)$ pode ser amostrada multiplicando-se pela função de amostragem $\delta_{\Delta x \Delta y}(x, y)$. Assim, a função amostrada $a_{m\Delta x n\Delta y}$ é escrita na forma:

$$a_{m\Delta x n\Delta y} = a(x, y)\delta_{\Delta x \Delta y}(x, y). \quad (6-27)$$

Análogo ao desenvolvimento em uma dimensão, pode-se investigar o efeito no domínio da frequência resultante da amostragem no domínio espacial (Figura 6.7), através da convolução da transformada de $a(x, y)$ com a transformada da função Escova, escrita na forma:

$$A_{k,l} = A(k, l) * \left| \frac{1}{\Delta x \Delta y} \right| \text{Esc}_{1/\Delta x, 1/\Delta y}. \quad (6-28)$$

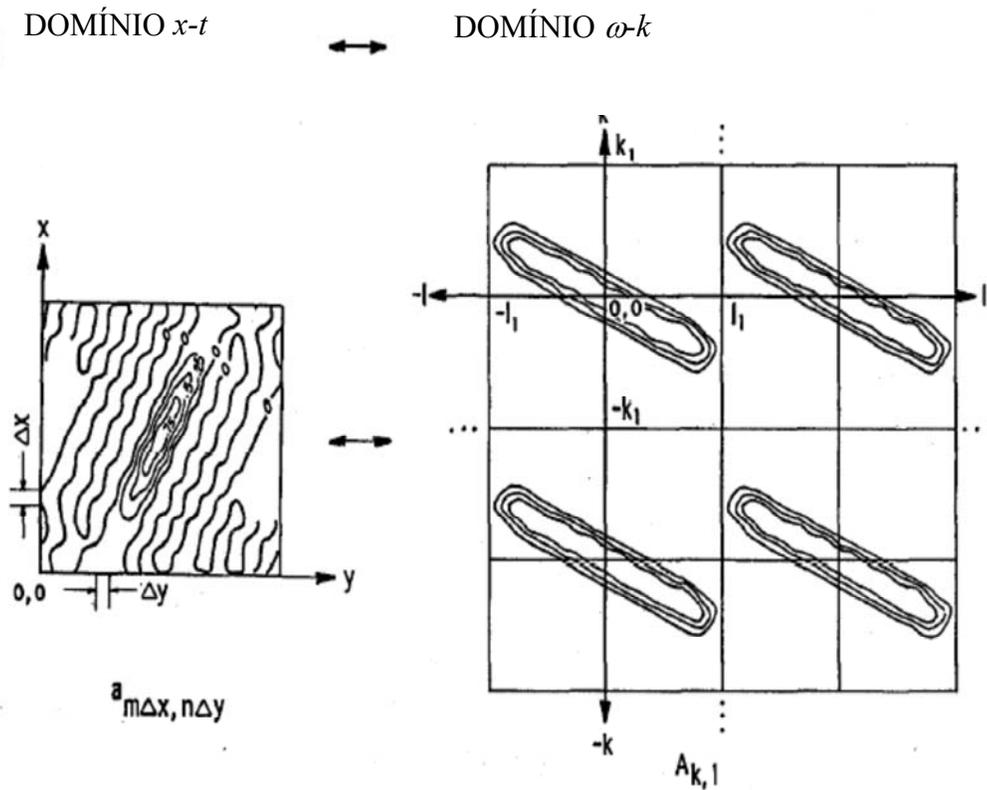


Figura 6.7: Função bidimensional amostrada $a_{m\Delta x n\Delta y}$ e seu espectro de amplitude bidimensional periódico, $A_{k,l}$. Para finalidade de ilustração, os valores discretos $a_{m\Delta x n\Delta y}$ e $A_{k,l}$ estão desenhadas em linha de contorno.

$A_{k,l}$ está ilustrado na Figura 6.7, e representa uma função bidimensional periódica que consiste de $A(k, l)$ repetido em intervalos $1/\Delta x$ e $1/\Delta y$ nas direções k e l . À medida que as componentes espectrais mais altas do que k_1 e l_1 forem menores do que $1/2\Delta x$ e $1/2\Delta y$ respectivamente, os espectros repetidos não se sobrepõem. Se Δx ou Δy aumenta tal que $k_1 > (1/2\Delta x)$ ou $l_1 > (1/2\Delta y)$, há sobreposição do espectro repetido, e a contaminação de frequência acontece. Um exemplo construído de contaminação bidimensional em frequência pela amostragem de $a(x, y)$ em intervalos $\Delta x' = 2\Delta x$ e $\Delta y' = 2\Delta y$ é ilustrado na Figura 6.8. Temos agora que $k_1 > k'_N = (1/2\Delta x')$ e $l_1 > l'_N = (1/2\Delta y')$, e a energia de $a(x, y)$ nas frequências maiores que l'_N e k'_N aparecem dentro da transformada nas frequências menores que k'_N e l'_N . A contaminação não pode ser vista como uma simples reflexão ou dobramento ao redor das linhas de frequência de Nyquist k'_N e l'_N , mas consideradas como sobreposição de espectros repetidos. O conceito de frequência de Nyquist ainda é útil no sentido de que k_N e l_N são, por definição, fixados pelos intervalos de amostragem no domínio do espaço Δx e Δy . Para evitar contaminação de frequência devido amostragem de uma função contínua de banda limitada às frequências k_1 e l_1 , os intervalos de amostragem devem ser selecionados de forma que:

$$\Delta x \leq \frac{1}{2k_1} \quad e \quad \Delta y \leq \frac{1}{2l_1}.$$

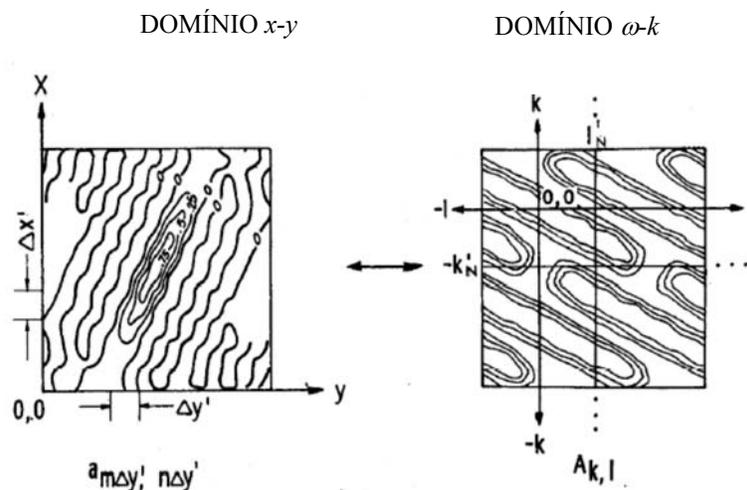


Figura 6.8. Contaminação de frequência da função $a_{m\Delta x', n\Delta y'}$ com intervalo de amostragem $\Delta x' = 2\Delta x$ e $\Delta y' = 2\Delta y$. Onde deveria ter apenas um lobo por quadrante Figura 6.7, tem-se interferência lateral dos lobos.

Peterson e Middleton (1962) estenderam o teorema da amostragem no tempo, que eles denominam de forma mais completa por Whittaker-Kotelnikov-Shannon, de funções unidimensionais banda limitada, para funções multidimensionais. Eles mostraram que a função, cujo espectro é restrito a uma região do domínio espectral, pode ser reconstruída a partir das amostras de uma malha periódica com espaçamento de amostra devida. A malha mais eficiente (isto é, aquela que requer uma menor quantidade de pontos amostrados por unidade de volume) não é em geral retangular, nem tão pouco é uma função unívoca de reconstrução associada a uma certa malha.

7. RESULTADOS E CONCLUSÕES

7.1. DADOS SINTÉTICOS

Neste capítulo comparamos a saída do filtro de velocidade após a saída do empilhamento CRS, com a saída do operador WHLP-CRS para atenuação de múltiplas em seções fonte-comum em dados sintéticos. Os modelos da subsuperfície são formados por interfaces plano-inclinadas e com curvatura. Para esta avaliação, utilizamos vários modelos sintéticos e selecionamos para apresentação um resultado relevante de atenuação de uma múltipla interna relativa a uma camada de alta velocidade com interfaces curvas simulando situações geológicas típicas, como a apresentada no capítulo 2.

O modelo utilizado é formado por 4 camadas homogêneas e isotrópicas sobre um semi-espaço, e velocidades que variam de 1750 m/s a 4150 m/s, com uma camada de alta velocidade (6300 m/s) é utilizado para representar uma soleira de diabásio (Figura 7.1).

As seções fonte-comum foram geradas pelo programa SEIS88 para gerar os sismogramas e traçamento de raios, e a aplicação do filtro de velocidade foi feita com o pacote de processamento sísmico Seismic Unix (SU).

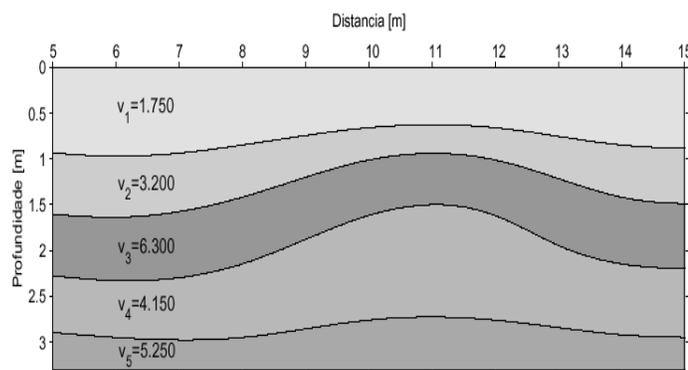


Figura 7.1. Modelo da subsuperfície composto por 4 camadas sobre um semi-espaço, e velocidades que variam de 1750 até 4150 m/s, com uma camada de alta velocidade (6300 m/s) servindo para representar uma soleira de diabásio. Os dados sintéticos foram gerados com um programa de traçamento de raio. Foram computados 201 seções de fonte-comum, cada uma com 72 traços sendo o intervalo 50 metros entre receptores e entre tiros consecutivos. O sinal fonte efetivo utilizado é representado pela função Gabor com intervalo de amostragem de 4 ms. Os dados contêm reflexões primárias associadas a cada interface e uma reflexão múltipla associada com a camada de alta velocidade.

Um dos conceitos básicos para o desenho de um filtro de corte é a informação a priori quanto há separação do evento a ser cortado; isto é, se o evento se apresenta mais separado diretamente no domínio da observação (tempo-espaço), ou se ele se apresenta mais individualizado no domínio bi-espectral. Desenhamos um experimento, como mostrado nas Figuras 7.2 ,7.3 e 7.4, onde cada painel temporal contém apenas um evento (primária ou múltipla) com seus respectivos espectros, com o objetivo de verificar por comparação a desejada distribuição do evento no domínio tempo-espaço e no domínio bi-espectral, e analisar a separação. Este tipo de experimento é básico e fundamental para ver a possibilidade efetiva da performance dos operadores de deconvolução, que no caso presente trata-se da atenuação de múltiplas.

O resultado do empilhamento CRS foi obtido com o programa segundo Callapino (2001) para produzir as seções AN e os atributos β_0 , R_{NIP} e R_N mostrados na Figura 7.5. A seção simulada com as múltiplas atenuadas foram obtidas com o processamento de Alves (2003). Na Figura 7.6 apresentamos duas situações: em “a” (com ganho) a múltipla está presente, e em “b” a múltipla está atenuada utilizando o operador WHLP-CRS. Na figura 7.7 temos duas outras situações: em “a” (com ganho) a múltipla está presente com seu respectivo espectro antes da aplicação do filtro de velocidade, e em “b” a múltipla está atenuada utilizando o filtro de velocidade, e mostra o respectivo espectro após a aplicação do filtro. Conclui-se pela análise dos espectros que eles tenham aparência distintas, a atenuação da múltipla não tem sucesso.

A Figura 7.8 (a,b) (seção NA com ganho) mostra com mais nitidez a atenuação no domínio temporal da múltipla juntamente com a sua primária quando ambas se encontram na mesma janela tempo-espaço. Na janela onde a primária e a múltipla estão muito próximas, o filtro de velocidade destrói muita informação da primária juntamente com a múltipla.

O modelo utilizado é descrito na Figura 7.1.A análise dos resultados é feita com base na seguinte sistemática: (1) Comparação entre painéis diretamente relacionados; (2) comparação entre painéis nos domínios tempo-espaço e freqüência temporal-espacial; (3) traçado da diferença entre painéis na freqüência; (4) traçado de superposição de informações dos painéis de bi-freqüência ($\omega - k$); (4) traçado do filtro no domínio $\omega - k$, que transforma uma seção $\omega - k$ mais complexa (ampla) numa seção $\omega - k$ mais simples (compacta).

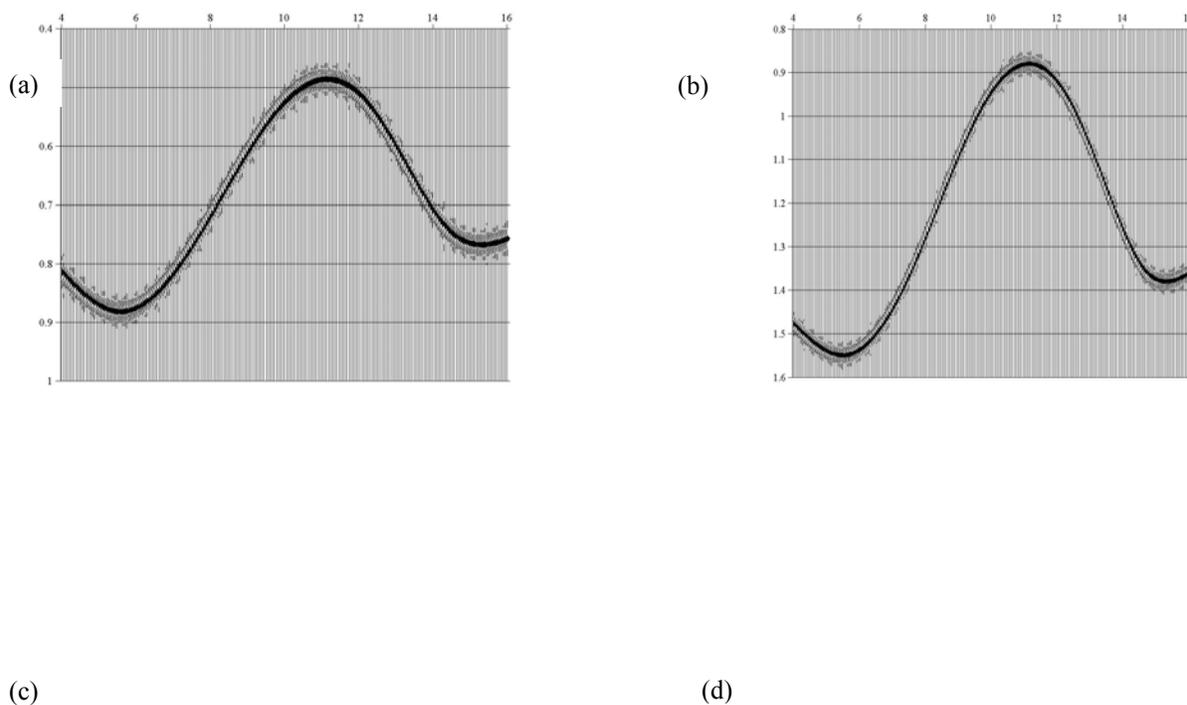


Figura 7.2. (a) Seção temporal afastamento-nulo da primária da primeira interface (velocidade da primeira camada é 1.750 km/s). (b) Seção temporal afastamento-nulo da primária da segunda interface (velocidade da segunda camada 3.200 km/s). (c) Espectro de bi-freqüência da seção (a). (d) Espectro de bi-freqüência da seção (b). Observamos pelo desenho das retas (parâmetros utilizados no SU: $-0.25, -0.15, 0.15, 0.25$ s/km), que o conteúdo espectral da primária da primeira interface é mais compacta do que o conteúdo da segunda interface, porém se superpõe e não apresentam uma região dominante para separação.

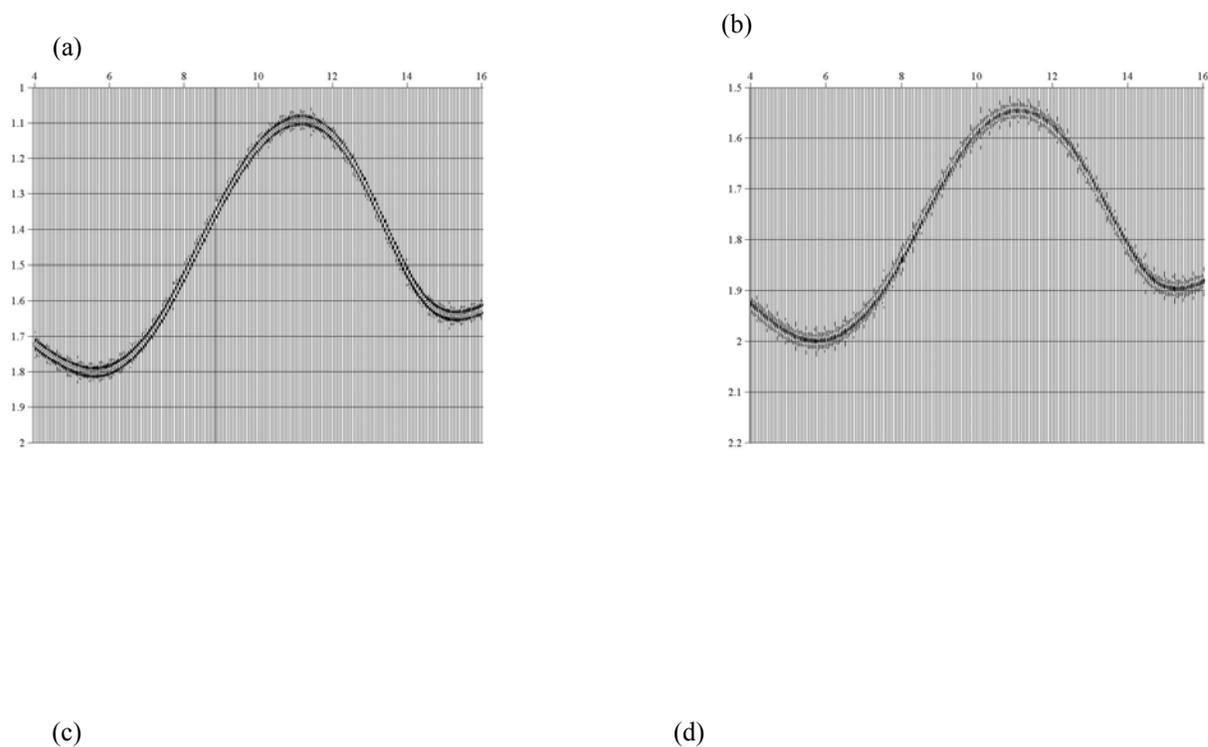


Figura 7.3. (a) Seção temporal afastamento-nulo da primária da terceira interface (velocidade da terceira camada é 6.300 km/s). (b) Seção temporal afastamento-nulo da primária da quarta interface (velocidade da quarta camada é 4.150 km/s). (c) Espectro de bi-freqüência da seção (a). (d) Espectro de bi-freqüência da seção (b). Observamos pelo desenho das retas (parâmetros utilizados no SU: $-0.25, -0.15, 0.15, 0.25$ s/km) que o conteúdo espectral da primária da quarta interface é mais compacta do que o conteúdo da terceira interface, porém se superpõe e não apresentam uma região dominante para separação.

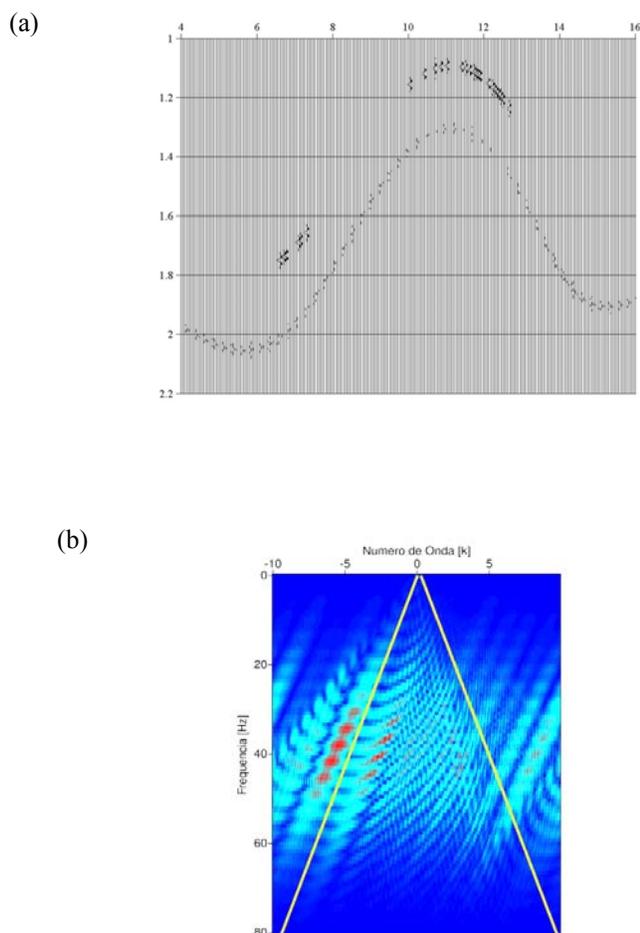


Figura.7.4. (a) Seção temporal afastamento-nulo da múltipla relacionada com a camada de alta velocidade. (b) Espectro de bi-freqüência da múltipla. Observamos que a múltipla encontra-se muito ampla suas informações se misturam com as informações das primárias, devido ao fato de que informações no domínio $t-x$ não estão necessariamente separadas no domínio $\omega-k$, e vice-versa. Em ambos os métodos, $t-x$ e $\omega-k$, múltiplas e primárias conflitantes são simultaneamente atenuadas. A análise feita tem o objetivo de verificar através de tentativa e erro até onde podemos aplicar o corte linear do filtro sem que haja comprometimento das informações das primárias.

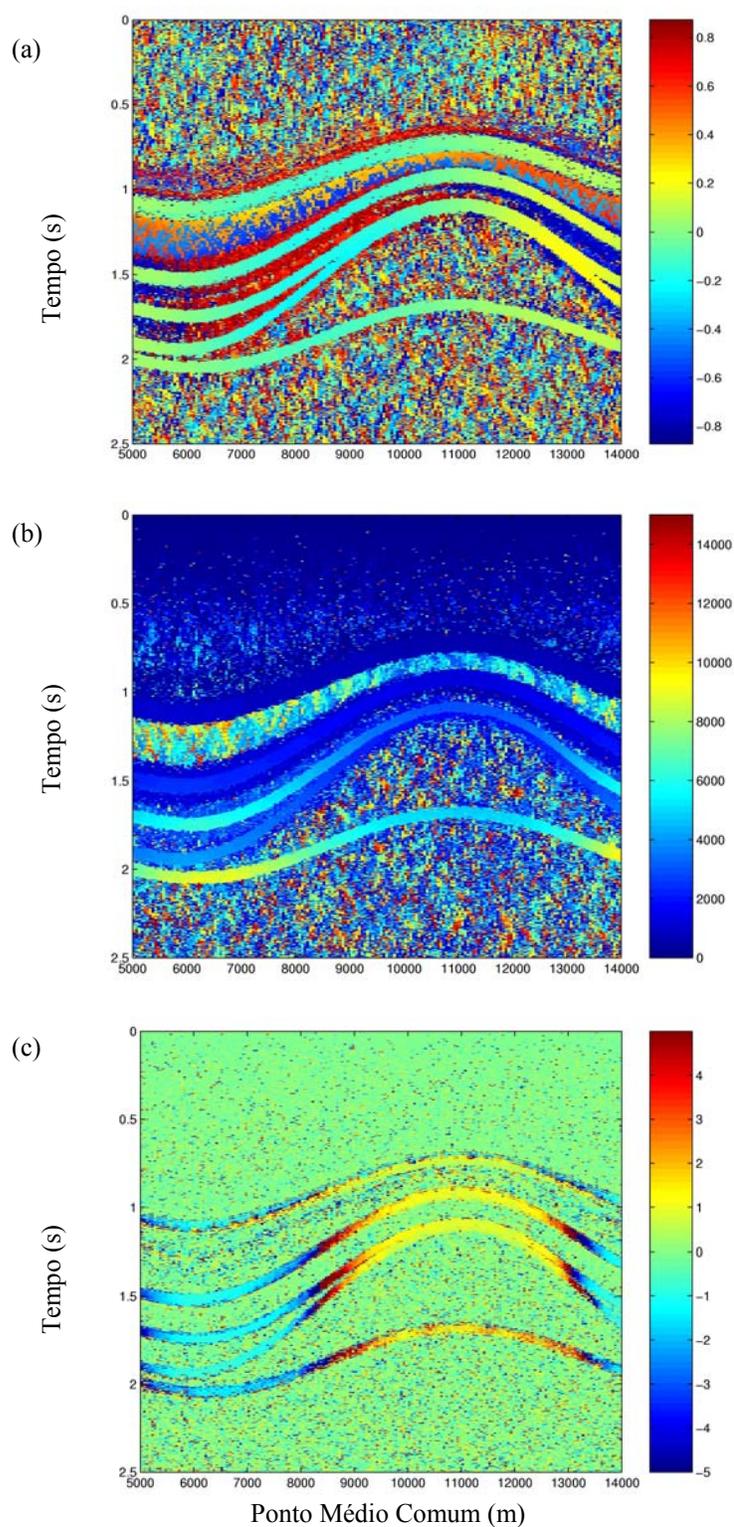


Figura 7.5. Seções AN dos atributos (a) β_0 , (b) R_{NIP} e (c) R_N utilizadas pelo operador de empilhamento CRS na obtenção das seções AN mostradas na seqüência. Observamos a informação das 4 reflexões primárias do modelo (Figura 7.1) e de uma múltipla.

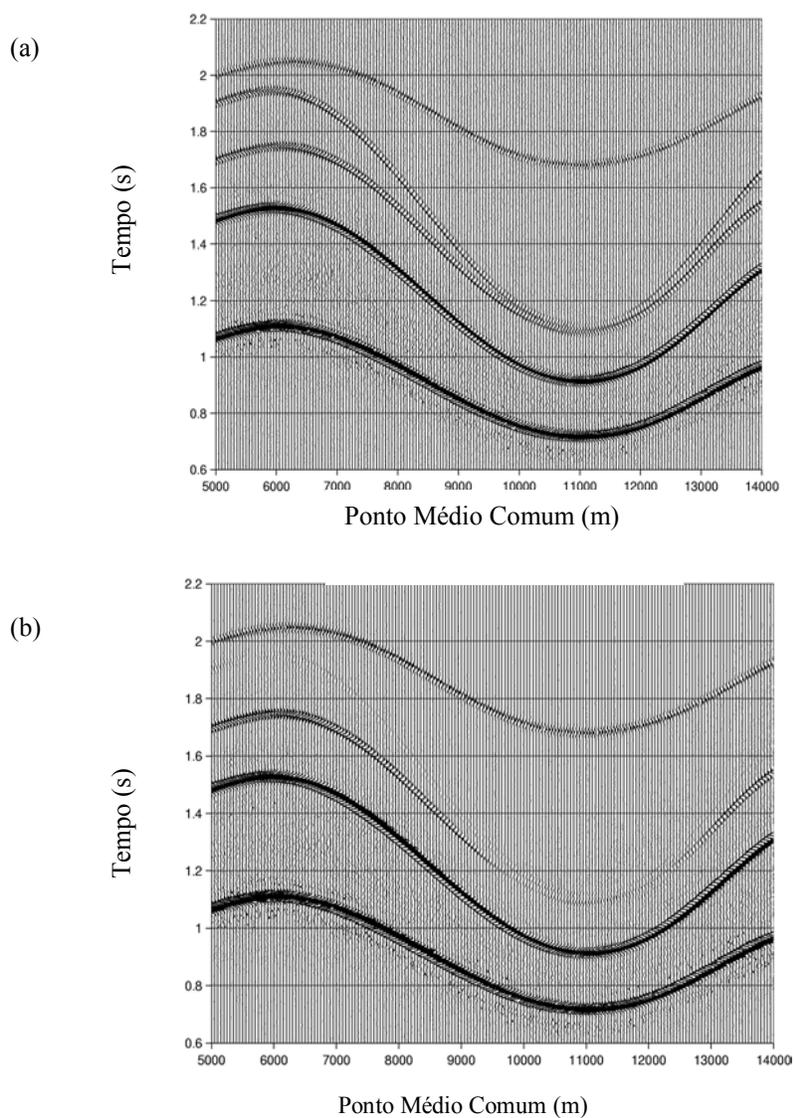


Figura 7.6. (a) Seção temporal AN (com ganho), resultante do empilhamento CRS, mostrando a múltipla antes da aplicação do operador WHLP-CRS. (b) Seção temporal AN (com ganho) resultante do empilhamento CRS com a múltipla atenuada. Observamos a boa atenuação da múltipla, e que o resíduo deixado após a atenuação é pequeno como indicado na seção AN com ganho. Na região, onde a primária e a múltipla estão muito próximas, o operador WHLP-CRS atenua a primária juntamente com a múltipla.

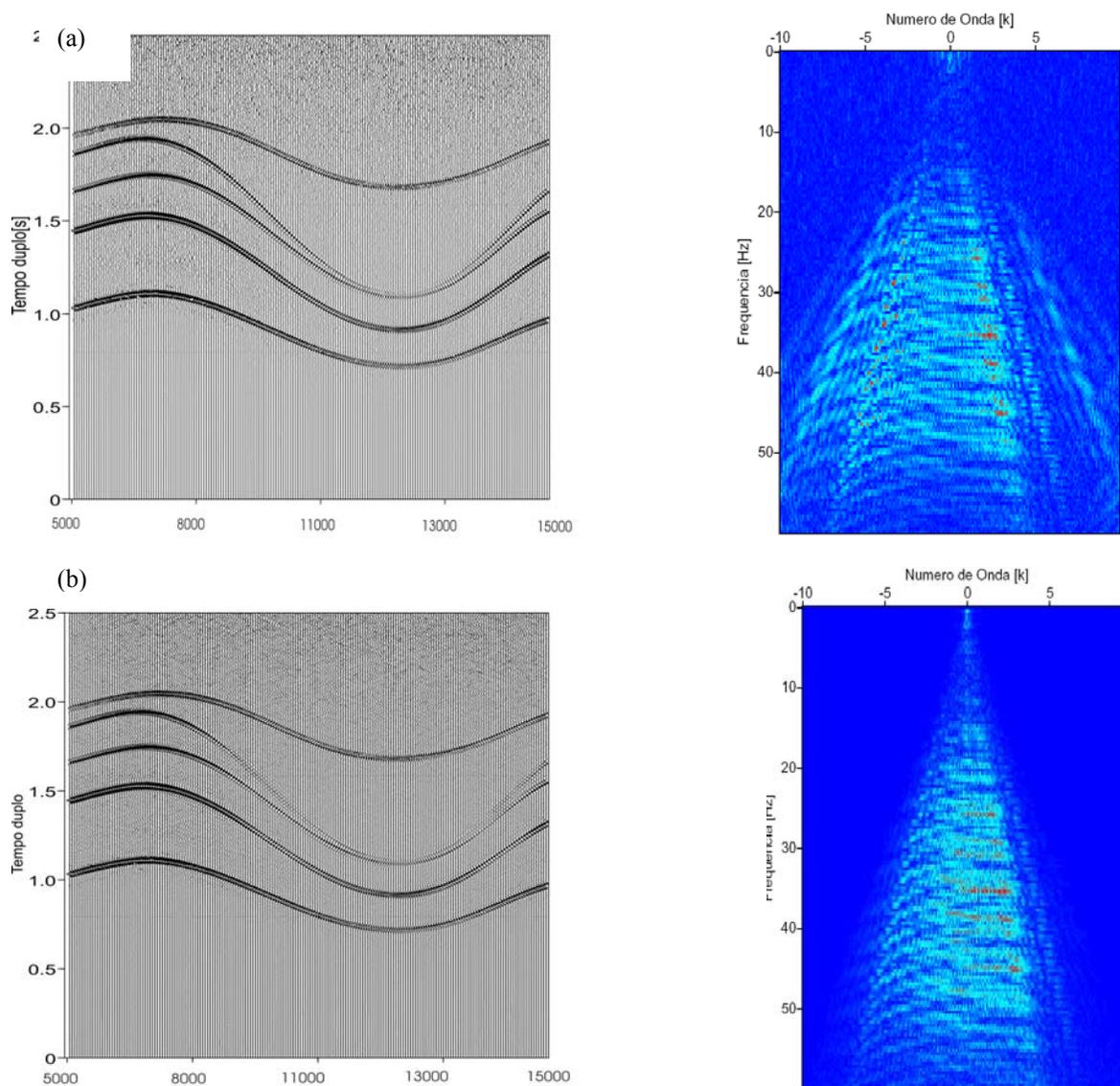


Figura 7.7. (a) Seção AN (com ganho) resultante do empilhamento CRS, com a múltipla presente e antes da aplicação do filtro $\omega-k$, e a direita o respectivo espectro de amplitude. (b) Seção AN (com ganho) resultante do empilhamento CRS com a múltipla atenuada, e a direita o respectivo espectro de amplitude obtido após a aplicação do filtro $\omega-k$. Os dois espectros parecem distintos, e observamos uma fraca atenuação nos locais onde a inclinação da múltipla é mais acentuada. Onde a múltipla não possui inclinação em $(t-x)$ a atenuação não acontece. Na região, onde a primária e a múltipla estão muito próximas, o filtro $\omega-k$ atenua a primária juntamente com a múltipla como também aconteceu com o operador WHPL-CRS.

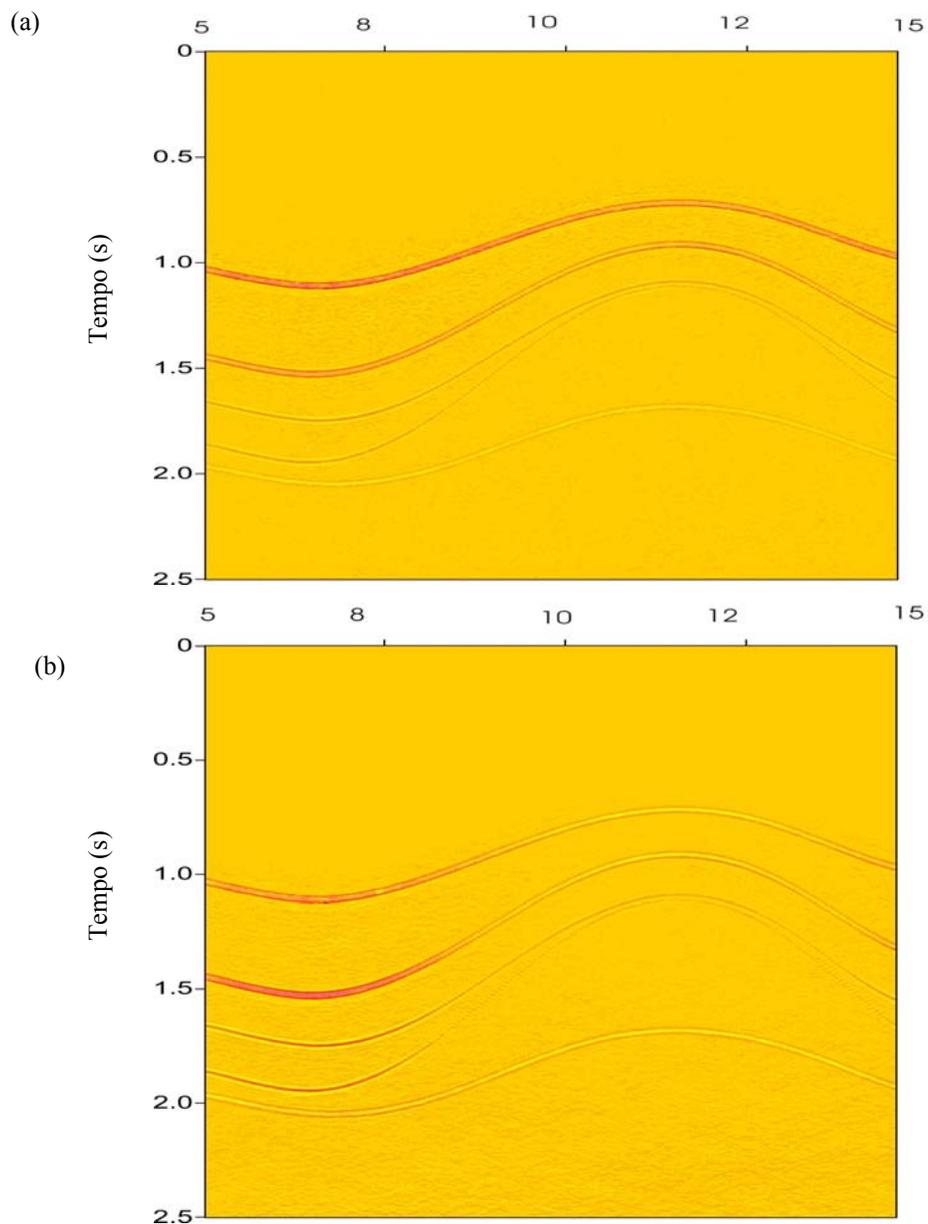


Figura 7.8. (a) Outra forma de apresentação da Seção AN (com ganho) da Figura 7.4 onde temos primárias e múltipla antes da aplicação do filtro de velocidade. (b) da Seção AN (com ganho) com as primárias e a múltipla posterior a aplicação do filtro de velocidade. Esta repetição tem por objetivo apresentar outra forma de visualização de uma seção, e através do processamento da imagem utilizando o comando SUXIMAGE do pacote SU.

7.2. CONCLUSÕES GERAIS

No que se segue, procuramos resumir e emitir conclusões sobre os resultados obtidos dos diferentes experimentos realizados em forma interativa.

- (a) Para o presente estudo, fica demonstrado a superioridade dos filtros desenhados no domínio $t-x$ sobre os filtros de corte linear desenhados no domínio $\omega-k$.
- (b) O desenho dos filtros de atenuação de múltiplas no domínio $t-x$ é muito mais efetivo do que no domínio $\omega-k$, uma vez que a informação no domínio $x-t$ é melhor separada do que no domínio $\omega-k$.
- (c) As tentativas de atenuar múltiplas pós-empilhamento, geradas em interfaces curvas, através do filtro $\omega-k$ de bordas linear por tentativa-e-erro não é efetivo; no entanto, o exercício serve para mostrar as limitações do método.
- (d) Os filtros no domínio $t-x$ (WHL) são limitados às condições impostas pela função autocorrelação $\phi_{xx}(\tau)$ traço-a-traço, enquanto que os filtros ideais de corte no domínio $\omega-k$ são limitados pela reta $\omega = ck$, cuja inclinação é ditada pela velocidade aparente c que separa os eventos.
- (e) Informações separadas no domínio $t-x$ não estão necessariamente separadas no domínio $\omega-k$, e vice-versa.
- (f) Em ambos os métodos, $t-x$ e $\omega-k$, múltiplas e primárias conflitantes são simultaneamente atenuadas, o que é coerente, mas os efeitos obtidos nos dois domínios não são iguais.
- (g) O filtro no domínio $t-x$ opera traço-a-traço segundo janelas $t-x$ móveis, enquanto que o filtro no domínio $\omega-k$ opera em toda a janela $\omega-k$. Estas duas operações não são equivalentes no sentido em que o filtro $h(t,x)$ não equivale ao filtro $H(\omega, k)$.
- (h) Os experimentos foram realizados com o mínimo possível de contaminação por amostragem. Δt e Δx .
- (i) A possibilidade de usar os atributos do CRS para desenhar bordas não-lineares para o filtro $\omega-k$ teria que ser inovadora no sentido de que a relação $c = c(\beta; R_{NIP}; R_N)$ ainda é para ser construída para as condições do problema.

REFERÊNCIAS

- ALVES, F. J. C. 2003. *Atenuação de Múltiplas pelo Método WRLP-CRS*. Belém, UFPa CG. (Tese de Doutorado).
- AKI, K. & RICHARDS, P.G. 1980. *Quantitative Seismology*. New York, WH Freeman and Company.
- BERKHOUT, A. J. & VERSCHUUR, D. J. 1997. Estimation of multiple scattering by iterative inversion. Part I: Theoretical considerations. *Geophysics*, 62 (5): 1586-1595.
- BERKHOUT, A. J. & VERSCHUUR, D. J. 1998. Wave theory based multiple removal, an overview. *In: ANN INTERNAT. SEG MEETING, 71. Expand. Abstract, San Antonio, Texas.*
- BERRYHILL, J. R. & KIM, Y.C., 1986. Deep-water peg-legs and multiples: Umulation and suppression. *Geophysics*. 51 (12): 2177-2184.
- BRACEWELL, R., 1965. *The Fourier transformation and its applications*. New York, USA, McGraw-Hill Book Company.
- CARRION, P. M. 1986, A layer-strippingn technique for suppression of water-bottom multiple reflection. *Geophysical Prospecting*, 34: 330-342.
- CERVENY, V.; MOLOTKOV, I. A.; PSENCIK, I. 1977. *Ray Method in Seismology*. Praga, Univerzita Karlova.
- CHRISTIE, P. A. F.; HUNGHEES, V. J.; KENNETT, B. L. N. 1983. Velocity filtering of seismic reflection data. *First Break*, 1: 9-24.
- CLEMENT, W. G. 1973. Basic principles of two-dimensional digital filtering. *Geophysical Prospecting*, 21: 125-145.
- CORONA, A.; MARCHESI, M.; MARTINI, C.; RIDELA, S. 1987. Minimizing multimodal functions of continuous variables with 'Simulated Annealing' algorithm. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 13 (3): 262-280.
- DRAGOSET, B. 1998. A practical approach to surface multiple attenuation. *In: ANN. INTERNAT. SEG MEETING, 71. Expand Abstract, San Antonio, Texas.*
- DRAGOSET, B.; GÜLÜNAY, N.; PATTBERG, D. 1999. Processing issues in applying surface multiple attenuation to a 3-D Gulf of Mexico data set. *In: ANN. INTERNAT. SEG MEETING, 71. Expand Abstract, San Antonio, Texas.*

- EIRAS, J. F. 1998. Tectônica, Sedimentação e Sistemas Petrolíferos da Bacia do Solimões, Estado do Amazonas. In: Searching for Oil and Gas in the Land of Giants. *The Search Magazine*, Edição Especial sobre o Brasil. Schlumberger, Argentina S.A.
- EIRAS, J. F. & RIBEIRO, J. W. F. 2003. Sistema petrolífero ígneos-sedimentares. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS*, 2. Rio de Janeiro.
- EMBREE, P.; BURG, J. P. & BACKUS, M. M. 1963. Wide-band velocity filtering. *Geophysical*, 28: 948-974.
- FAIL, J. P. & GRAU, G. 1963. Les filtres en éventail. *Geophysical Prospecting*, 11: 131-163.
- FOWLER, P. J. 1998. A comparative overview of dip moveout methods. In: *ANN. INTERNAT. SEG MEETING*, 71. *Expand Abstract*, San Antonio, Texas.
- GARABITO, G. C. 2001. *Empilhamento sísmico por superfície de reflexão comum: um novo algoritmo usando otimização global e local*. Belém, UFPa CG. (Tese de Doutorado).
- GASPAROTTO, F. A. 1999. *Multiple prediction for velocity analysis*. In: *ANN. INTERNAT. SEG MEETING*, 71. *Expand Abstract*, San Antonio, Texas.
- GILL, P.E.; MURRAY, W.; WRIGHT, M.H. 1981. *Practical optimization*. New York, USA, Academic Press, Inc. 401p.
- GODFREYF, R. J., KRISTIANSEN, P.; ARMSBERGER, B. 1998. *Imaging the for a given ghost*. In: *ANN. INTERNAT. SEG MEETING*, 71. *Expand Abstract*, San Antonio, Texas.
- HARDAGE, B. A. 1983. *Vertical Seismic Profiling*. Geophysical press.
- HÖCHT, G. 2002. *Traveltime Approximations for 2D and 3D Media and Kinematic Wavefield Attributes*. University of Karlsruhe, Institute of Geophysics. (Doctor Thesis).
- HUBRAL, P. 1983. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, 48 (8): 1051-1062.
- HUBRAL, P. & KREY, T. 1980. *Interval Velocities from Seismic Reflection Time Measurements*. Houston. Western Geophysical Company.
- HUBRAL, P. H. W. 1980. *Interval velocities from seismic reflection time measurements*. Houston. SEG Publishing.
- JÄGER, R.; MANN, J.; HUBRAL, P. 2001 Common-reflection-surface stack: Image and attributes. *Geophysics*, 66 (1):97-109.
- JAKUBOWICZ, H. 1998. *Wave equation prediction and removal of interbed multiples*. In: *ANN. INTERNAT. SEG MEETING*, 71. *Expand Abstract*, San Antonio, Texas.

- JERRI, A.N 1977. *The Shannon sampling theorem-Its various extensions and applications: A tutorial review*. Proceedings of the IEEE, 65, (11).
- JIAO, J. 1999. *Midpoint-offset surface multiple attenuation*. In: ANN. INTERNAT. SEG MEETING, 71. Expand Abstract, San Antonio, Texas.
- JIAO, J.; NEGUT; D. & LINK, B. 1999. *Multiple attenuation using eigenvalue decomposition*. In: ANN. INTERNAT. SEG MEETING, 71. Expand Abstract, San Antonio, Texas.
- KENNETT, P. & IRESON, R. L. 1981. *The VSP as an interpretation tool for structural and stratigraphic analysis*. Assoc. Expl. Geophysics.
- KNEIB, G. & BARDAN, V. 1997. 3D targeted multiple attenuation. *Geophysical Prospecting*. 45: 701-714.
- LEITE, L. W. B. 1998. *Introdução a Análise Espectral em Geofísica*. Belém. FADESP/CNPq.
- LEVIN, F. K. 1971. Apparent velocity from dipping interface reflections. *Geophysics*, 36 (3): 510-516.
- LOKSHTANOV, D. 1998. Multiple suppression by data-consistent deconvolution. In: ANN. INTERNAT. SEG MEETING, 71. Expand Abstract, San Antonio, Texas.
- LOKSHTANOV, D. 1999. Suppression of water-layer multiples from deconvolution to wave equation approach. In: ANN. INTERNAT. SEG MEETING, 71. Expand Abstract, San Antonio, Texas.
- LU, W.; ZHANG, X. & LI, Y. 1999. Multiple removal based on signal reconstruction from stacking velocity. In: ANN. INTERNAT. SEG MEETING, 71. Expand Abstract, San Antonio, Texas.
- MAELAND, E. 1997. Focusing analysis of seismic data with peg-leg multiples. *Geophysics*, 62 (1): 177-182.
- MAKHOUL, J. 1978. Linear prediction: a tutorial review. In CHILDERS, D. G. (ed), "Modern Spectral Analysis", IEEE Press, 99-118.
- MANUEL, C. D. 1999. Attenuation of multiple reflections via prestack Kirchhoff depth migration. In: ANN. INTERNAT. SEG MEETING, 71. Expand Abstract, San Antonio, Texas.
- MESKÓ, A. 1984. *Digital Filtering: Application in Geophysical Exploration for Oil*. Londres, Inglaterra. Pittman Advanced Publishing Program.

- PEACOCK, K. L. & TREITEL, S. 1969. Predictive deconvolution: Theory and practice. *Geophysics*, 34: 155-169.
- PETERSON, D. P. & MIDDLETON, D. 1962. Sampling and reconstruction of wave-number limited function in N-dimensional Euclidean spaces. *Information and Control*, 5: 279-323.
- PORTUGAL, R. S. 2002. *Construção de imagens sísmicas em verdadeiras amplitudes por dados de reflexões*: Formulação matemática e construção de algoritimo. Campinas, UNICAMP IMECC. (Tese de Doutorado)
- ROBINSON, E. 1984. Seismic Inversion and Deconvolution. Amsterdam. *Geophysical Press*. Part A: Classical Methods.
- ROBINSON, E. A. 1998. Model-driven predictive deconvolution. *Geophysics*, 63 (2): 713-722.
- ROBINSON, E. A. & TREITEL, S. 1969. Principles of digital wiener filtering. *Geophysical Prospecting*, 15 (3): 311-333.
- SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. 1993. Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media: *Geophysical Prospecting*, 41 (4): 495-514.
- SCHNEIDER, W. A.; PRINCE, E. R. J. & GILLES, B. F. 1965. A new data-processing technique for multiple attenuation exploiting normal moveout. *Geophysics*, 30: 348-362.
- SCHOENBERGER, M. 1996. Optimum weighted stack for multiple suppression. *Geophysics*, 61: 891-901.
- SCHOENBERGER, M. & HOUSTON, L. M. 1998. Stationarity transformation of multiple to multiples to improve the performance of predictive deconvolution. *Geophysics*, 63 (2): 723-737.
- SEEMAN, B. & HOROWICZ, L. 1983. Separation of upgoing and downgoing acoustic waves in a stratified medium. *Geophysics*, 48: 555-568.
- SEG, *The Leading EDGE*. 1999. *Special Issue on Multiple Deconvolution*. Volume 18, número 1.
- SGUAZZERO, P. & VESNAVER, A. 1987. *A comparative analysis of algorithms for stacking velocity estimation Deconvolution an Inversion*. Oxford, Blackwell Scientific publications.

- SHERIFF, R. E. & GELDART, L.P. 1982. History, Theory and Data Acquisition. *Exploration seismology*, 1.
- SILVIA, M.T. & ROBINSON, E. A. 1979. *Deconvolution of Geophysical Time Series in the Exploration for Oil and Natural Gas*. Amsterdam. Elsevier Scientific Publishing Co.
- SUPRAJITNO, M. & GREENHALG, A. 1985. Separation of upgoing and downgoing waves in vertical seismic profiling by contour-slice filtering. *Geophysics*, 50: 950-962.
- TANER, M. T. 1980. Long-period sea-floor multiples and their suppression. *Geophysical Prospecting*, 28: 30-48.
- TANER, M. T. & KOEHLER, F. 1969. Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity functions. *Geophysics*, 34 (6): 859-881.
- TREYTEL, S.; SHANKS, J. L. & FRAISER, C. W. 1967. Some aspects of fan filtering. *Geophysics*, 32: 789-800.
- TYGEL, M.; MUELLER, T.; HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J. 1997. Eigenwave based multiparameter traveltime expansions. *IN: ANNUAL MEETING*, 67. Soc. Expl. Geophys. 1770-1773.
- VERSHUUR, D. J. & BERKHOUT, A. J. 1997. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, part II: Practical aspects and examples. *Geophysics*, 62 (5): 1596-1611.
- WEGLEIN, A. B.; GASPAROTTO, F. A.; CARVALHO, P. M.; STOLT, R.H. 1997. Na inverse-scattering series method for attenuating multiples in seismic reflection data. *Geophysics*, 62: 1975-1989.
- WIGGINS, J. W. 1988. Attenuation of complex water-bottom multiples by water-equation-based prediction and subtraction. *Geophysics*, 53 (12): 1527-1534.
- WIGGINS, R. A. 1966. ω -k filter design. *Geophysical Prospecting*, 14: 427-440.
- WIGGINS, R. A.; ROBINSON, E. A., 1965. Recursive solutions to the multichannel filtering problem. *Journal of Geophysical Research*, 70 (8): 1885-1891.
- WOODWART, P. M., 1953. *Probability and information theory with applications to radar*: New York, Pergamon Press.
- YILMAZ, O. 1987. *Seismic Data Processing*. Tulsa, USA. Society of Exploration Geophysics.
- ZHOU, B & GREENHALGH, S. A. 1994. Wave-equation extrapolation-based multiple attenuation: 2-D filtering in the f-k domain. *Geophysics*, 59: 1377-1391.

APÊNDICES

A: Simbologia utilizada

Tabela de símbolos e siglas utilizados no presente trabalho e suas descrições.

SÍMBOLOS	DESCRIÇÕES
AS	Simulação-de-esfriamento
CMP/PMC	Ponto-médio-comum
CR/RC	Receptor-comum
CS/FC	Fonte-comum
CO/AC	Afastamento-comum
CRS	Superfície-de-reflexão-comum
ECRS	Empilhamento por superfície-de-reflexão-comum
N	Onda hipotética gerada com a explosão do refletor
NIP	Onda hipotética de origem no ponto de incidência normal
OEP	Operador erro-de-predição
ZO/NA	Afastamento-nulo
g_k	Traço sísmico observado
$g(t)$	Saída do filtro
H	Meio afastamento fonte-receptor
h_k	Operador-de-predição
h_k^*	Operador erro de predição
k, i, j, l, m, n	Contadores subscritos
K_N	Curvatura da onda N
K_{NIP}	Curvatura da onda NIP
P	Parâmetro horizontal do raio, vagarosidade horizontal
P	Pressão
Pen	Função pente, função periodizada
P_0	Ponto de imagem na seção NA
Rep	Função repetição, função periodizada
R_N	Raio de curvatura da onda N
R_{NIP}	Raio de curvatura da onda NIP

R_0	Raio da frente de onda
$r(k)$	Ruído aditivo
\bar{r}	Vetor posição de observação coordenadas (x,y,z)
s_k	Sinal mensagem
t_0	Tempo normal de referência
t_n	Tempo-duplo de trânsito de cada camada
$T(p)$	Tempo duplo de trânsito em função do parâmetro horizontal do raio
$u(t)$	Deslocamento temporal da partícula
v_n	Velocidade na camada n
v_{RMS}	Velocidade média-quadrática
v_{NMO}	Velocidade de correção sobre-tempo-normal
X	Direção de propagação, coordenada horizontal
x_m	Ponto médio
x_g	Coordenada horizontal do geofone
x_s	Coordenada horizontal da fonte
x_0	Ponto de referência
$X(p)$	Afastamento em função do parâmetro horizontal do raio
w_k	Pulso-fonte
z_k	Saída desejada
α	Velocidade da onda P
β	Velocidade da onda S
β_0	Ângulo de emergência ao longo do raio central
$\varepsilon(k, p)$	Função refletividade do meio
ϕ_{gg}	Função autocorrelação da componente observada
ϕ_{zg}	Função correlação cruzada entre componentes desejada e observada
ϕ_{rr}	Função autocorrelação da componente ruído
λ, μ	Constantes elásticas de Lamé
ρ	Densidade
$\underline{\xi}$	Vetor posição da fonte

B: Comandos utilizados no pacote de programas SU-CWP.

Tabela de comandos e suas utilizações no presente trabalho.

COMANDOS	UTILIZAÇÕES
SUGAIN	Aplica vários tipos de ganhos aos dados sísmicos.
SUADDNOISE	Adiciona ruído aos dados sísmicos.
SUSPECFK	Gera o espectro no domínio $f-k$.
SUDIPFILT	Filtra os dados pela inclinação da seção.
SUXWIGB	Cria sismogramas que compõem os dados da seção sísmica.
SUXIMAGE	Cria imagem dos dados da seção sísmica.
SUADDHEAD	Adiciona o cabeçalho no arquivo de dados na forma binária.
TRANSP	Transpõe os dados de uma matriz.
A2B	Transforma os dados do formato ASCII para o formato binário.
SURANGE	Mostra toda a informação dos dados da seção sísmica.
SUSHW	Monta os dados do cabeçalho.

PROGRAMA DESENVOLVIDO**COMENTÁRIOS**

<code>#!/bin/sh</code>	cabeçalho do script.
<code>echo "f-k Filter Test"</code> <code>indata=seczo.su</code> <code>anteriormente</code> <code>tpow=2.0</code> <code>d2=0.05 # CMP spacing in km</code> <code>rm -f tmp*</code>	imprime o título dado na tela introduz o dado do arquivo seczo.su gerado escala dos parâmetros. espaçamento CMP entre fonte e sensores. remove os arquivos temporários.
<code>#-----</code> <code># Show the original Shotplot and Spectrum first..</code> <code>#-----</code> <code>sugain <\$indata tpow=\$tpow >tmp0</code>	comentário do programa (dados originais). correção de amplitude (ganho).
<code>suxwigb <tmp0 xbox=10 ybox=10 wbox=400 hbox=600 \</code> <code>antes do filtro.</code> <code>label1="Travelttime [s]" label2="Offset [m]" \</code> <code>title="Original Shot Gather" \</code> <code>verbose=0 perc=90 key=offset &</code>	cria a seção-figura do dado original com ganho
<code>suspecfk <tmp0 dx=\$d2 </code> <code>suximage xbox=420 ybox=10 wbox=400 hbox=600 \</code> <code>label1="Frequency [Hz]" label2="Wavenumber [k]" \</code> <code>title="f-k Spectrum before Filtering" \</code> <code>cmap=hsv2 legend=1 unit=Amplitude \</code> <code>verbose=0 x1beg=0 x1end=125 \</code> <code>bclip=2e09 wclip=0 &</code>	cria o espectro $f-k$. gera a figura do espectro antes do filtro

```

#-----
# f-k Filter Test...
#-----
ok=false
while [ $ok = false ]
do
rm -f tmp1
if [ $selection ]
then
echo "f-k Filter Test"
echo "Press A to add a FK filter"
echo "Press S to start over"
>/dev/tty
read choice1
case $choice1 in
[sS]) cp tmp0 tmp1
echo "-> Using original data";;
[aA]) cp tmp2 tmp1
echo "-> Using filtered data";;
esac
else
cp tmp0 tmp1
fi
echo "Select the filter slopes:"
echo "Input: a,b,c,d - a:=cut b:=pass"
echo " c:=pass d:=cut"
echo "Where a < b < c < d; slopes between b band c pass"
>/dev/tty
read slopes
sudipfilt <tmp1 d2=$d2 slopes=$slopes amps=0,1,1,0 >tmp2
origem e a saída do dado filtrado(filtro de passagem)

#-----
# Plot the filtered data...
#-----
suxwigb <tmp2 xbox=10 ybox=10 wbox=400 hbox=600 \
label1="Traveltime [s]" label2="Offset [m]" \
title="f-k Filtered Data" key=offset \
verbose=0 key=offset perc=90 &

#-----
# Plot the spectrum of the filtered data...
#-----
suspecfk <tmp2 dx=$d2 |
suximage xbox=420 ybox=10 wbox=400 hbox=600 \
label1="Frequency [Hz]" label2="Waveenumber [k]" \
title="f-k Spectrum" grid1=dot grid2=dot \
legend=1 x1beg=0 x1end=120 bclip=2e09 wclip=0 \
cmap=HSV2 verbose=0 &

#-----
# Plot the rejected data...
#-----
sudipfilt <tmp2 d2=$d2 \
slopes=$slopes amps=1,0,0,1 |
rejeição).
suxwigb xbox=830 ybox=10 wbox=400 hbox=600 \
label1="Traveltime [s]" label2="Offset [m]" \
title="Rejected Data" key=offset \
verbose=0 perc=90 &

```

entrada das variáveis da inclinação da reta que passa na

Comentário do programa (dado filtrado).

exibe o dado filtrado.

cria o espectro $f-k$ do dado que foi filtrado.
gera a figura do espectro após a aplicação do filtro.

inversão das variáveis de inclinação e saída do dado (filtro de rejeição).
gera a figura com o dado rejeitado.

```
#-----  
# Go back or exit..  
#-----  
  
echo "Press 1 for more f-k filter testing"  
echo "Press 2 for PS output of current file and EXIT"  
>/dev/tty  
read selection  
case $selection in  
    1) clear  
ok=false;;  
    2) pause exit  
    ok=true;;  
esac  
done  
rm -f tmp*  
exit
```