

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

**EMPILHAMENTO PELO MÉTODO SUPERFÍCIE
DE REFLEXÃO COMUM 2-D COM TOPOGRAFIA
E INTRODUÇÃO AO CASO 3-D**

TESE APRESENTADA POR
PEDRO ANDRÉS CHIRA OLIVA

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

Data de Aprovação : 27/01/03

COMITÊ DE TESE:

Dr. Peter Hans Werner Hubral (Orientador)

Dr. João Carlos Ribeiro Cruz (Co-orientador)

Dr. Martin Tygel

Dr. Lourenildo Willame Barbosa Leite

Dr. Djalma Manoel Soares Filho

BELÉM
2003

T CHIRA OLIVA, Pedro Andrés. **Empilhamento pelo Método Superfície de Reflexão Comum 2-D com Topografia e Introdução ao Caso 3-D.** Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 2003, p. 111.

Tese (Doutorado em Geofísica) - Curso de Pós -Graduação em Geofísica, CG, UFPA, 2003.

1.EMPILHAMENTO SÍSMICO 2.ONDAS HIPOTÉTICAS
3.TOPOGRAFIA DE AQUISIÇÃO 4.TÉCNICAS DE EMPILHAMENTO 5.INVERSÃO SÍSMICA. 6.PLANO DE OBSERVAÇÃO 7.PLANO DE REFERÊNCIA 8.PSEUDO-LINHAS SÍSMICAS 9.BIN.

I. HUBRAL, Peter Werner Hans, Orient.

II. CRUZ, João Carlos Ribeiro Cruz, Co-orient.

III. Título

À meus pais e irmãos, e ao meu filho
Pedro Arthur.

AGRADECIMENTOS

À empresa petrolífera AGIP (Divisão ENI - Itália) e ao Consórcio Wave Technology Inversion (WIT) pelo suporte financeiro durante o desenvolvimento do projeto “3-D Common-Reflection-Surface Stacking” na Alemanha.

Ao convênio CTPETRO-FINEP e ao CNPq pelo suporte financeiro durante o desenvolvimento da Tese.

Ao apoio do Curso de Pós-graduação em Geofísica (CPGf-UFFA) por permitir a realização deste trabalho. Ao corpo docente e funcionários do CPGf.

Ao orientador Prof. Dr. Peter Hubral pela proposição do tema desta Tese de Doutorado, e pelo convite e apoio durante a estadia no Instituto de Geofísica em Karlsruhe (IGK). Ao corpo de pesquisadores e à Secretária Sra. Claudia Payne do IGK.

Ao co-orientador, Prof. Dr. João Carlos Ribeiro Cruz, pelo apoio fornecido durante o desenvolvimento da Tese e pelas discussões frutíferas na mesma.

Ao Prof. Dr. Martin Tygel, pela importante e grata colaboração nos artigos publicados nas revistas internacionais, pelas discussões frutíferas e pela sua amizade.

Ao Prof. Dr. German Garabito pelo apoio dispensado na Tese na aplicação do método de empilhamento CRS 2-D para superfícies de medição com topografia.

Ao Prof. Dr. João Protazio pelas discussões frutíferas na parte matemática do método CRS 3-D.

Ao Prof. Dr. Lourenildo W. B. Leite pelas sugestões na Tese e pelo apoio dispensado no início de minha estadia na Alemanha.

Aos meus pais, Pedro e Ofelia, pelo apoio e por torcer pelo meu sucesso.

Aos colegas, Manuel Costa, Waldomiro Junior e Carla Lima pelas correções gramaticais.

SUMÁRIO

	p.
DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vi
LISTA DE SIGLAS EM INGLÊS	1
LISTA DE SÍMBOLOS	1
RESUMO	1
ABSTRACT	3
1 - INTRODUÇÃO	5
2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	9
2.1 MODELO SÍSMICO 2-D	9
2.2 CONFIGURAÇÕES DO LEVANTAMENTO SÍSMICO	9
3 - MÉTODO DE EMPILHAMENTO CRS 2-D PARA SUPERFÍCIE DE OBSERVAÇÃO PLANA	12
3.1 GEOMETRIA DE FRENTES DE ONDA	12
3.2 EMPILHAMENTO SÍSMICO CRS	13
3.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO EMPILHAMENTO SÍSMICO CRS	15
3.4 APLICAÇÕES DOS PARÂMETROS DO MÉTODO CRS	16
3.4.1 Modelo de velocidades	16
3.4.1.1 Inversão convencional tipo Dix	16
3.4.1.2 Inversão com interfaces planas inclinadas	16
3.4.1.3 Inversão com interfaces curvas	17
3.4.1.4 Inversão com horizontes de eventos sísmicos no domínio do tempo	19
3.4.2 Zona de Fresnel projetada	22
3.4.3 Fator de espalhamento geométrico	23

3.5	EVENTOS COM MERGULHOS CONFLITANTES	25
3.6	MÚLTIPLAS	26
3.7	REDATUMAÇÃO	27
3.8	ABERTURA CRS	28
4	- EMPILHAMENTO CRS 2-D COM TOPOGRAFIA	30
4.1	APROXIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO HIPERBÓLICO	30
5	- APLICAÇÃO DO MÉTODO CRS 2-D COM TOPOGRAFIA	38
5.1	FÓRMULAS DO PROCESSO DE EMPILHAMENTO CRS	38
5.2	ESTRATÉGIA DE BUSCA DOS PARÂMETROS CRS	38
5.3	FUNÇÃO-OBJETO DO EMPILHAMENTO CRS	39
5.4	RESULTADOS COM DADOS SINTÉTICOS	41
5.4.1	Análise da sensibilidade da função tempo de trânsito de empilhamento CRS em relação a curvatura K_0	54
6	- INVERSÃO 2-D AO MODELO DE VELOCIDADES	57
6.1	INVERSÃO TIPO DIX POR RETROPROPAGAÇÃO	57
6.1.1	Superfícies de medições transformadas	59
6.1.2	Testes com dados sintéticos	59
6.1.2.1	Estratégia de inversão 2-D	62
7	- INTRODUÇÃO AO EMPILHAMENTO CRS 3-D PARA UMA SU- PERFÍCIE DE MEDIÇÃO PLANA	67
7.1	TEORIA	67
7.1.1	Sistemas de coordenadas	67
7.1.2	Fórmulas básicas	69
7.2	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO EMPILHAMENTO CRS 3-D	73
7.2.1	Estratégia das três pseudo-linhas sísmicas	73
7.2.2	Estratégia das três aproximações dos tempos de trânsito	78
7.2.3	Estratégia da decomposição das matrizes	83
7.2.4	Estratégia das configurações arbitrárias com curvaturas esféricas	87
7.2.5	Estratégia das configurações e curvaturas arbitrárias	91
7.3	APLICAÇÃO A DADOS SINTÉTICOS	93
8	- CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	96
8.1	CONCLUSÕES	96
8.2	PERSPECTIVAS	97

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
APÊNDICES	103
APÊNDICE A - MATRIZ PROPAGADORA SUPERFÍCIE A SUPERFÍCIE	104
APÊNDICE B - DERIVAÇÃO DA APROXIMAÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO HIPERBÓLICO 2-D	106
APÊNDICE C - DERIVAÇÃO DA APROXIMAÇÃO DA FUNÇÃO TEMPO DE TRÂNSITO CRS 2-D PARA UMA SUPERFÍCIE DE MEDIÇÃO CURVA COM GRADIENTE DE VE- LOCIDADE DIFERENTE DE ZERO	108

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2.1	Coordenadas locais de um par fonte-receptor sobre uma superfície de medição suavemente curva. O sistema de coordenadas 2-D local (x_1, x_3) tem origem no ponto X_0	10
3.1	Propagação das ondas hipotéticas a)NIP e b)Normal. O raio normal inicia-se em X_0 , propaga-se ao longo das camadas, reflete no ponto R do segundo refletor e emerge na superfície de medição no mesmo ponto X_0 . β_0 é o ângulo de emergência deste raio normal com a normal à superfície de medição. R_{NIP} e R_N são os raios de curvatura das ondas NIP e N.	13
3.2	Parte inferior (frontal): meio 2-D com uma camada sob um semi-espaço. Parte superior: curvas de tempos de trânsito CO dos dados pré-empilhados e a superfície de empilhamento CRS para simular traços sísmicos ZO.	14
3.3	Inversão tipo Dix. Parte superior: Seção ZO empilhada com reflexões primárias de diferentes refletores. Parte inferior: modelo 2-D com camadas de isovelocidade com suas respectivas velocidades constantes, v_1 , v_2 e v_3 (modificado de Majer, 2000).	17
3.4	Construção do modelo isovelocidades a partir de uma inversão com interfaces planas inclinadas. R_i corresponde a pontos NIP. A interseção das interfaces com as linhas verticais em profundidade definem os pontos z_i nas interfaces e as velocidades intervalares v_i (modificado de Majer, 2000).	18
3.5	Detalhe do modelo 2-D de isovelocidades com uma interface interpolada (curva vermelha). A inversão do traço com interfaces planas determinam os pontos na profundidade $R_{i,1}$ e a interface (curva de cor azul). A interseção dos segmentos de interfaces com as linhas verticais em profundidade (x_i) produz os pontos da interface $z_{i,1}$ que são interpoladas. A interface do modelo verdadeiro é a curva de cor preta (modificado de Majer, 2000).	19

3.6	Construção do modelo de isovelocidade a partir de uma inversão de interfaces curva. R_i corresponde a pontos NIP. A interseção dos pontos das interfaces com as linhas verticais em profundidade definem os pontos z_i das interfaces e as velocidades intervalares v_i (modificado de Majer, 2000).	20
3.7	Inversão considerando horizontes de eventos sísmicos no domínio do tempo: após a refração na interface superior (cor preta), as frentes de onda NIP se focalizam nos pontos na profundidade procurados (cruzes de cor preto). Os segmentos dos raios ZO associados com os pontos em profundidade são mostrados de cor azul. Uma interface é construída por uma interpolação (curva de cor verde) ou por uma função de aproximação (curva de cor vermelha) (modificado de Majer, 2000).	21
3.8	Zona de Fresnel projetada definida pelos pontos finais dos raios normais (cor azul) e paraxiais (cor verde). A zona de Fresnel projetada é indicada na superfície pela linha vermelha, centrada no ponto X_0	23
3.9	Abertura elíptica considerada pelo método CRS. As linhas de cor preta definem o limite da zona de Fresnel projetada (modificada de Vieth, 2001).	24
3.10	Modelo 2.5-D, onde as propriedades físicas do modelo não variam na direção do eixo x_2	25
3.11	Trajetórias das ondas sísmicas: a) Ondas P direitas (raio de cor verde), b) reflexões primárias (raios de cor preto) e c) reflexões múltiplas (raios de cor vermelho).	26
3.12	Aberturas 2-D utilizadas no empilhamento CRS 2-D: a) Empilhamento CMP, b) Empilhamento ZO e c) Empilhamento CRS (modificado de Mann, 2001).	29
4.1	a) Diagrama para um raio paraxial na vizinhança de um raio de reflexão normal em um meio inhomogêneo. b) Detalhe da Figura 4.1a mostrando os sistemas de coordenadas 2-D Cartesianas local (x_1, x_3) (linhas contínuas) e centrado no raio (q_1, q_3) (linhas tracejadas) em X_0	32
4.2	Relação entre as superfícies de medição curva, com mergulho e horizontal. São apresentados os sistemas de coordenadas 2-D Cartesianas local (x_1, x_3) e global (x, z)	33

4.3	Parte inferior (frontal): Um meio 2-D com duas camadas sobre um semi-espaco. Parte superior: Curvas de tempo de trânsito CO dos dados pré-empilhados. A superfície superior de cor preta corresponde ao operador CRS para uma linha de medi�o curva.	36
5.1	Fluxograma computacional do processo de empilhamento CRS. Obt�m-se como resultados finais a se�o ZO simulada e sua respectiva se�o de coerência e as se�es dos parâmetros $(\beta_0^*, R_{NIP}, R_N)$ (modificado de Garabito, 2001).	40
5.2	Modelo 2-D constituído por quatro camadas sobre um semi-espaco. A superfície de medi�o � curva. As velocidades intervalares desde a camada superior até a inferior são 1.750 km/s, 2.400 km/s, 3.500 km/s, 4.650 km/s e 5.500 km/s para o semi-espaco.	43
5.3	Exemplo da se�o CS dos dados de cobertura múltipla do modelo da Figura 5.2. A razão sinal/ruído � 10.	43
5.4	Se�o ZO obtida por modelamento direto com ruído (razão sinal/ruído = 10), composta por reflexões primárias correspondendo ao modelo sint�tico da Figura 5.2.	44
5.5	Se�o ZO simulada com a fun�o tempo de trânsito do empilhamento CRS dada pela fórmula (4.11), para uma superfície de medi�o curva, e definido pelos parâmetros $(\beta_0^*, R_{NIP}, R_N)$	44
5.6	Se�o de coerência da se�o ZO simulada da Figura 5.5. Os valores de coerência correspondem aos máximos globais da fun�o de coerência.	45
5.7	Se�o de ângulos de emergência de raios normais de reflexão, β_0^* , obtidos a partir do processo de otimiza�o do método CRS, considerando uma superfície de medi�o curva.	45
5.8	Se�o dos raios de curvatura da onda NIP, R_{NIP} , obtidos a partir do processo de otimiza�o do método CRS, considerando uma superfície de medi�o curva.	46
5.9	Se�o dos raios de curvatura da onda N, R_N , obtidos a partir do processo de otimiza�o do método CRS, considerando uma superfície de medi�o curva.	46
5.10	Compara�o do ângulo β_0^* estimado (curvas de pontos de cor vermelho) com os valores obtidos por modelamento direto (curvas de pontos de cor azul): a)Primeira interface, b) segunda interface, c)terceira interface e d)quarta interface do modelo da Figura 5.2.	47

5.11	<p>Comparação do raio de curvatura R_{NIP} estimado (curvas de pontos de cor vermelho) com os valores exatos (curvas de pontos de cor azul): a)Primeira interface, b) segunda interface, c)terceira interface e d)quarta interface do modelo da Figura 5.2.</p>	48
5.12	<p>Curvatura da superfície de medição ao longo da linha sísmica. Apresenta mudanças de comportamento bruscos no modelo da Figura 5.2.</p>	48
5.13	<p>a) É analisada a influência do fator $p1 = K_{NIP} * \cos^2 \beta_0^*$ em relação ao fator $r = \cos \beta_0^* * K_0$ (primeiro refletor), os quais formam parte da função tempo de trânsito CRS (4.11). Observa-se que não existe muita influência do fator r em relação ao fator $p1$. Portanto será mínima a influência da curvatura K_0 (que forma parte deste fator r), na recuperação do parâmetro K_{NIP} (que forma parte do fator $p1$). b) São comparados as curvaturas K_{NIP} (primeiro refletor) e K_0. Observa-se também que a influência é mínima de K_0 em relação ao K_{NIP}.</p>	49
5.14	<p>a) É analisada a influência do fator $p1$ em relação ao fator r (quarto refletor), os quais formam parte da função tempo de trânsito CRS 4.11. Observa-se que existe muita influência do fator r em relação ao fator $p1$. Esta influência acontece nas partes onde há mudança brusca na curvatura da superfície de medição. Isto ocasiona perda na recuperação do parâmetro K_{NIP}. b)São comparados as curvaturas K_{NIP} (primeiro refletor) e K_0. Observa-se também que a grande influência de K_0 em relação ao K_{NIP}.</p>	50
5.15	<p>Comparação do raio de curvatura R_N estimados (curvas de pontos de cor vermelho) com os valores obtidos por modelamento direto (curvas de pontos de cor azul): a)Primeira interface, b) segunda interface, c)terceira interface e d)quarta interface do modelo da Figura 5.2.</p>	51
5.16	<p>a) É analisada a influência do fator $q1 = K_N * \cos^2 \beta_0^*$ em relação ao fator $r = \cos \beta_0^* * K_0$ (primeiro refletor), os quais formam parte da função tempo de trânsito CRS (4.11). Observa-se que não existe muita influência do fator r em relação ao fator $p1$. Portanto será mínima a influência da curvatura K_0 (que forma parte deste fator r), na recuperação do parâmetro K_N (que forma parte do fator $p1$). b) São comparados as curvaturas K_N (primeiro refletor) e K_0. Observa-se também que a influência é mínima de K_0 em relação ao K_N.</p>	52

5.17	a) É analisada a influência do fator q_1 em relação ao fator r (quarto refletor), os quais formam parte da função tempo de trânsito CRS 4.11. Observa-se que existe muita influência do fator r em relação ao fator q_1 . Esta influência acontece nas partes onde há mudança brusca na curvatura da superfície de medição. Isto ocasiona perda na recuperação do parâmetro K_N . b) São comparados as curvaturas K_N (primeiro refletor) e K_0 . Observa-se também que a grande influência de K_0 em relação ao K_N	53
5.18	Derivadas da função tempo de trânsito de empilhamento CRS em relação a K_0 avaliados no ponto médio $X_0 = 7.0 \text{ km}$	55
5.19	Derivadas da função tempo de trânsito de empilhamento CRS em relação a K_0 avaliados no ponto médio $X_0 = 7.85 \text{ km}$	55
5.20	Derivadas da função tempo de trânsito de empilhamento CRS em relação a K_0 avaliados no ponto médio $X_0 = 8.5 \text{ km}$	55
5.21	Derivadas da função tempo de trânsito de empilhamento CRS em relação a K_0 avaliados no ponto médio $X_0 = 9.3 \text{ km}$	56
5.22	Derivadas da função tempo de trânsito de empilhamento CRS em relação a K_0 avaliados no ponto médio $X_0 = 10.5 \text{ km}$	56
5.23	Derivadas da função tempo de trânsito de empilhamento CRS em relação a K_0 avaliados no ponto médio $X_0 = 12 \text{ km}$	56
6.1	Modelo 2-D estratificado de isovelocidades (adaptado de Hubral e Krey, 1980). A velocidade para cada camada é dada por $v_i (i = 1, \dots, N)$, que estão separadas pelas interfaces $d_i (i = 1, \dots, N)$. Observa-se o raio paraxial que se inicia na fonte S reflete no ponto O_N e retorna a superfície no receptor G . O raio normal se inicia no ponto x_m reflete no ponto O_N e retorna na superfície no mesmo ponto x_m	58
6.2	Modelo 2-D constituído de quatro camadas de isovelocidade sobre um semi-espaco separados por interfaces horizontais. A superfície de medição é curva. As velocidades de propagação das ondas P desde a camada superior até a inferior são 2 km/s, 3 km/s, 4 km/s, 4.5 km/s e 5 km/s.	60
6.3	Curvas de tempos de trânsito ZO obtidas pelo modelamento direto, referidas ao modelo da Figura 6.2.	61
6.4	Ângulos de emergência β_0^* para cada raio normal refletido no quarto refletor.	61
6.5	Curvaturas de ondas NIP correspondentes a cada refletor.	61

6.6	Tempos de trânsito CMP para o ponto-médio $x_0 = 3.5 \text{ km}$, para a) primeiro refletor, b)segundo refletor, c) terceiro refletor e d)quarto refletor no modelo da Figura 6.2.	62
6.7	Fluxograma de inversão tipo Dix para estimar as velocidades intervalares e as profundidades dos refletores.	63
6.8	Resultado de inversão tipo Dix para o modelo da Figura 6.2, mostrando as velocidades intervalares estimadas para as diferentes superfícies de medição. Se observa claramente que a solução admitindo a curvatura da superfície de medição é melhor do que as com superfície plana (inclinadas e horizontal). Os números 1 até 4 (escala a direita) são referidos a cada camada.	65
6.9	Resultado da inversão tipo Dix para o modelo da Figura 6.2, mostrando as profundidades dos refletores estimados para as diferentes superfícies de medição. Se observa claramente que a solução admitindo a superfície curva é melhor do que as com superfície plana (inclinadas e horizontal). Os números 1 até 4 (escala a direita) são referidos a cada refletor.	65
6.10	Perfil de velocidade resultante da inversão tipo Dix para duas posições X_0 . Observa-se que a solução considerando uma superfície de medição curva é melhor na recuperação das velocidades que as superfícies de medição plana.	66
7.1	Sistema de coordenadas Cartesianas local (x_1, x_2, x_3) com os vetores base ortonormal \mathbf{j}_i ($i = 1,2,3$). O sistema de coordenadas centradas no raio (q_1, q_2, q_3) com os vetores base ortonormal \mathbf{e}_i ($i = 1,2,3$). O plano de referência (plano vermelho) contém o eixo q_3 e o vetor de referência $\check{\mathbf{e}}_F$ sobre a superfície de medição. O eixo q_1 é especificado de tal forma, a estar contido no plano de referência. β_F define o azimute do vetor de referência $\check{\mathbf{e}}_F$. Observa-se o plano de observação (plano verde) formado pelo eixo q_3 e o vetor unitário $\check{\mathbf{e}}_i$ que especifica a linha sísmica i (adaptado de Chira et al., 2000).	68
7.2	Definição do vetor ponto médio \mathbf{x}_m e o vetor meio-afastamento \mathbf{h} sobre a superfície de medição plana definida pelos eixos coordenados (x_1, x_2) . Os vetores \mathbf{s} e \mathbf{g} denotam os vetores fonte e receptor relativos ao ponto X_0 , origem do sistema de coordenadas Cartesianas local.	68

7.3	Três pseudo-linhas sísmicas L1, L2, e L3 interceptando no ponto X_0 no sistema de coordenadas Cartesianas local (x_1, x_2) . Estão definidos os vetores unitários $\tilde{\mathbf{e}}_i$ ($i = 1, 2, 3$) de cada linha sísmica i ($i = L1, L2, L3$). \mathbf{s}_i e \mathbf{g}_i são as coordenadas fonte e receptor sobre estas linhas sísmicas.	69
7.4	Representação do vetor unitário \mathbf{c} do raio normal com os ângulos φ_1 e φ_2 que determinam a direção de propagação da frente de onda ao longo do raio normal (modificado de Höcht, 2002). R_{min} e R_{max} são os raios de curvatura mínimo e máximo da frente de onda (superfície verde).	71
7.5	Ilustração das ondas NIP (superfície vermelha) e N (superfície verde) propagando-se através do modelo 3-D em profundidade (modificado de Höcht, 2002). Observa-se o raio normal emergindo no ponto X_0 e o raio paraxial que se inicia em S e finaliza no ponto G .	71
7.6	Ângulo de rotação φ_F do eixo q' com relação ao eixo q_1 . O outro eixo q'_2 precisa do ângulo $\varphi_F + 90^\circ$ para coincidir com o eixo q_2 (modificado de Höcht, 2002).	72
7.7	(x, y, z) definem os eixos do sistema de coordenadas Cartesianas global. A superfície de medição é definida no plano $z = 0$. Nesta superfície de medição é definido um sistema de coordenadas Cartesianas local (x_1, x_2) com a origem no ponto X_0 . Uma distribuição areal (“bin”) também é definida ao redor do ponto X_0 . Os vetores \mathbf{s} e \mathbf{g} denotam a fonte e geofone relativos a este ponto.	74
7.8	Fluxograma computacional para a estratégia das três pseudo-linhas sísmicas. Como resultado final obtêm-se um volume de traços sísmicos com afastamento-nulo simulados, a partir dos trios paramétricos calculados para cada linha hipotética.	77
7.9	O empilhamento CMP 3-D. As fontes S_i e receptores G_i são simétricos em relação a locação de afastamento-nulo fixo X_0 .	79
7.10	O empilhamento ZO 3-D utiliza o volume de dados sísmicos simulados a partir do empilhamento CMP 3-D.	80
7.11	Fluxograma computacional para a estratégia das três aproximações dos tempos de trânsito. Como resultado final obtêm-se um volume de traços simulados com afastamento-nulo a partir das velocidades NMO calculados para cada uma das pseudo-linhas sísmicas, para cada ponto X_0 da superfície de medição plana-horizontal.	82

7.12	Fluxograma computacional da estratégia de decomposição das matrizes. Como resultado final obtém-se um volume de traços sísmicos simulados ZO, a partir de parâmetros CRS 2-D referentes a cada linha sísmica i , ($i = L1, L2, L3$) e parâmetros referentes à linha de referencia escolhida (β_F, φ_F), em cada ponto X_0 da superfície de medição plana.	86
7.13	Pontos-médios (\mathbf{x}_m) dos “bins” vizinhos ao “bin” 1, considerados como parte deste “bin”, para realizar o empilhamento CMP 3-D em relação ao ponto X_0 .	88
7.14	Fluxograma computacional da estratégia das configurações arbitrárias com curvaturas esféricas. O número de parâmetros procurados desta estratégia é reduzido a quatro, devido à condição das ondas NIP e N consideradas como esféricas.	90
7.15	Fluxograma computacional referente à estratégia das configurações e curvaturas arbitrárias. O número de parâmetros procurados desta estratégia são oito. As formas geométricas das ondas NIP e N são arbitrárias nesta estratégia.	92
7.16	Modelo 3-D constituído por duas camadas sob um semi-espaco. A superfície de medição é plana. As velocidades intervalares deste o topo até a base são 2 km/s, 3.5 km/s e 5 km/s.	94
7.17	Volume obtido pelo empilhamento CMP 3-D referido ao modelo da Figura 7.16. Neste processo foram considerados apenas os dados CMP (Cortesia de AGIP).	94
7.18	Volume obtido pelo empilhamento ZO 3-D a partir do resultado da Figura 7.17 (Cortesia de AGIP).	95
7.19	Volume ZO simulado com o método de empilhamento CRS 3-D. Este processo considera todos os dados de cobertura múltipla da Figura 7.16 (Cortesia de AGIP).	95
C.1	Modelo 2-D para uma superfície de medição curva: os raios central SRG e paraxial SRG são mostrados. O ponto inicial S , é a origem do eixo local x_{1S} e o ponto final, G , é a origem do eixo local x_{1G} . Ambos eixos são tangentes a superfície de medição na fonte S e receptor G .	111

LISTA DE SIGLAS DE TERMOS EM INGLÊS

CRS - “Common-Reflection-Surface”;

ZO - “Zero-Offset”;

NIP - “Normal-Incidence-Point”;

CMP - “Common-Midpoint”;

NMO - “Normal-Moveout”;

DMO - “Dip-Moveout”;

SA - “Simulated Annealing”;

VM - “Variable Metric”;

AVO - “Amplitude versus Offset”;

AVA - “Amplitude versus Amplitude”;

CS - “Common-shot”;

CO - “Common-offset”;

CR - “Common-receiver”;

CDP - “Common-Depth-Point”;

RMS - “Root-mean-square”.

LISTA DE SÍMBOLOS

(x, z) - Sistema de coordenadas Cartesiano global;

$x_j (j = 1, 2, 3)$ - Sistema de coordenadas Cartesiano local;

$q_j (j = 1, 2, 3)$ - Sistema de coordenadas centrado no raio;

(x_S, x_G) - Coordenadas da fonte S' e do geofone G' no sistema Cartesiano local;

v - Velocidade de propagação do campo de ondas;

ξ - Parâmetro na superfície que identifica a posição de um par fonte-receptor.;

(x_{S_0}, x_{G_0}) - Coordenadas de um par fonte-receptor fixo;

$(\Delta x_{S_0}, \Delta x_{G_0})$ - Deslocamentos em relação às coordenadas x_{S_0} e x_{G_0} ;

t - Variável independente do tempo;

x_m - Coordenada do ponto-médio no sistema Cartesiano local, tangente à superfície de medição;

x_m' - Coordenada do ponto-médio no sistema Cartesiano global;

h - Coordenada do meio-afastamento no sistema Cartesiano local, tangente à superfície de medição;

h' - Coordenada do meio-afastamento no sistema Cartesiano global;

x_0 - Coordenada Cartesiana do ponto de emergência do raio normal;

t_0 - Tempo de trânsito duplo ao longo da trajetória de um raio de reflexão normal;

X_0 - Ponto de emergência do raio ZO sobre a superfície de medição;

(t_1, t_2) - Abertura do empilhamento CMP no eixo tempo de trânsito;

(h_1, h_2) - Abertura do empilhamento CMP no eixo meio-afastamento;

(m_1, m_2) - Abertura do empilhamento ZO no eixo ponto-médio;

z_i - Coordenada vertical de pontos na profundidade da interseção do eixo vertical com as interfaces;

R - Ponto de reflexão normal;

S', G' - Par fonte-receptor na superfície de medição curva;

p_0 - projeção do vetor vazarosidade na tangente à superfície de medição;

β_0 - Ângulo de emergência do raio de reflexão normal com relação a normal à superfície de medição horizontal;

β_0^* - Ângulo de emergência do raio de reflexão normal com relação a normal à tangente em X_0 ;

$\beta_{0,i}^* (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ - Ângulo β_0^* correspondente na camada i ;

α_0^* - Ângulo de mergulho da tangente à superfície de medição curva com relação à horizontal;

K_{NIP} - Curvatura da onda NIP;

K_N - Curvatura da onda Normal;

$t(x_m, h)$ - Representação funcional da superfície de tempos de trânsito de reflexão no domínio do ponto-médio/meio-afastamento;

r_p - Metade do tamanho da zona de Fresnel projetada;

T - Período de uma onda monofreqüente;

\mathcal{L} - Fator de espalhamento geométrico 2,5-D no plano;

σ - Fator de espalhamento geométrico 2,5-D fora do plano;

\mathbf{T} - Matrix propagadora superfície a superfície 2×2 definida no sistema de coordenadas Cartesianas;

Π - Matrix propagadora 2×2 definida no sistema de coordenadas centradas no raio;

A, B, C, D - Componentes da matriz \mathbf{T} ;

P_1, P_2, Q_1, Q_2 - Componentes da matriz Π ;

K_0 - Curvatura da linha sísmica sobre a superfície de medição curva no ponto X_0 ;

t_{CMP} - Tempo de trânsito para a configuração CMP;

v_{NMO} - Velocidade NMO;

v_{RMS} - Velocidade RMS;

L - distância ao longo da trajetória do raio refletido a partir da fonte S até o refletor e do refletor até o receptor G ;

- $v_i (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ - Velocidade da propagação da onda na camada i ;
- $d_i (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ - Profundidade do refletor i ;
- $\Delta z_i (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ - Espessura de cada camada i ;
- $R_{NIP,N}$ - Raio de curvatura da frente de onda NIP que se origina no refletor N ;
- $t_{0,i} (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ - tempo ZO na interface i ;
- $v_{NMO,M}$ - Velocidade NMO para uma superfície de medição inclinada;
- $v_{NMO,H}$ - Velocidade NMO para uma superfície de medição horizontal;
- $\mathbf{j}_i (i = 1, 2, 3)$ - Base ortonormal do sistema de coordenadas Cartesiano local;
- $\mathbf{e}_i (i = 1, 2, 3)$ - Base ortonormal do sistema de coordenadas centrada no raio;
- \mathbf{x}_m - Vetor ponto-médio no sistema de coordenadas Cartesianas 2-D no plano de medição;
- \mathbf{h} - Vetor meio-afastamento no sistema de coordenadas Cartesianas 2-D no plano de medição;
- (m_x, m_y) - Componentes do vetor \mathbf{x}_m ;
- (h_x, h_y) - Componentes do vetor \mathbf{h} ;
- \mathbf{s}, \mathbf{g} - Vetores denotando as posições da fonte e receptor no superfície de medição;
- $\tilde{\mathbf{e}}_i$ - Vetor unitário da linha sísmica i ;
- β_i - Azimute correspondente a linha sísmica hipotética i ;
- $\tilde{\mathbf{e}}_F$ - Vetor unitário escolhido sobre a superfície de medição plana;
- β_F - Azimute do vetor $\tilde{\mathbf{e}}_F$;
- \mathbf{p}_0 - Projecção na superfície de medição do vetor vagarosidade do raio de reflexão normal;
- $\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0, \mathbf{D}_0$ - Matrizes 2×2 da matriz propagadora \mathbf{T}_0 4×4 referidas ao raio central ZO, apenas numa direção;
- \mathbf{A}, \mathbf{B} - Matrizes 2×2 simétricas que representam as derivadas de segunda ordem do tempo de trânsito CRS 3-D em relação às coordenadas ponto médio e meio-afastamento;
- $\underline{\mathbf{c}}$ - Vetor direção do raio de reflexão normal no ponto de emergência;
- \mathbf{c} - Vetor diretividade que representa a projecção do vetor $\underline{\mathbf{c}}$ sobre a superfície de medição no ponto de emergência;
- (φ_1, φ_2) - Ângulos de direção do raio de incidência normal;

a_{11}, a_{12}, a_{22} - Elementos da matriz \mathbf{A} ;

b_{11}, b_{12}, b_{22} - Elementos da matriz \mathbf{B} ;

c_1, c_2 - Componentes do vetor \mathbf{c} ;

$\mathbf{D}_{zyz}, \mathbf{D}_{zy}$ - Matrizes de transformação 2-D;

$\mathbf{D}_z(\varphi_1), \mathbf{D}_z(\varphi_2)$ - Matrizes de rotação 2-D;

\mathbf{M} - Matriz curvatura da onda NIP;

\mathbf{N} - Matriz curvatura da onda Normal;

m_{11}, m_{12}, m_{22} - Elementos da matriz \mathbf{M} ;

n_{11}, n_{12}, n_{22} - Elementos da matriz \mathbf{N} ;

$\mathbf{e}'_i (i = 1, 2, 3)$ - Bases do Sistema de coordenadas arbitrárias centrada no raio;

φ_F - Ângulo entre o eixo q'_1 (sistema de coordenadas arbitrárias centrada no raio) e o eixo q_1 (sistema de coordenadas centrada no raio);

R_{min}, R_{max} - Raios de curvatura mínimo e máximo correspondentes à frente de onda;

$t_{CMP,i}$ - Tempo de trânsito CMP para a linha sísmica i ;

$t_{0,i} (i = 1, 2, 3)$ - Tempos de trânsito duplos correspondentes às trajetórias do raio de reflexão normal em cada linha i ;

\mathbf{u}_i - Vetor resultante da interseção do plano de observação com o sistema (q_1, q_2) ;

$R_{NIP}^i (i = 1, 2, 3)$ - Raio de curvatura da onda NIP para cada linha i ;

$R_N^i (i = 1, 2, 3)$ - Raio de curvatura da onda Normal para cada linha i ;

\mathbf{k}_{NIP} - Vetor das curvaturas da onda NIP das três pseudo-linhas sísmicas;

\mathbf{k}_N - Vetor das curvaturas da onda Normal das três pseudo-linhas;

m - Curvatura da onda NIP esférica;

n - Curvatura da onda Normal esférica;

\mathbf{V} - Matriz inversa da velocidade NMO.

RESUMO

O método de empilhamento sísmico CRS simula seções sísmicas ZO a partir de dados de cobertura múltipla, independente do macro-modelo de velocidades. Para meios 2-D, a função tempo de trânsito de empilhamento depende de três parâmetros, a saber: Do ângulo de emergência do raio de reflexão normal (em relação à normal da superfície) e das curvaturas das frentes de onda relacionadas às ondas hipotéticas, denominadas NIP e Normal.

O empilhamento CRS consiste na soma das amplitudes dos traços sísmicos em dados de múltipla cobertura, ao longo da superfície definida pela função tempo de trânsito do empilhamento CRS, que melhor se ajusta aos dados. O resultado do empilhamento CRS é assinalado a pontos de uma malha pré-definida na seção ZO. Como resultado tem-se a simulação de uma seção sísmica ZO. Isto significa que para cada ponto da seção ZO deve-se estimar o trio de parâmetros ótimos que produz a máxima coerência entre os eventos de reflexão sísmica.

Nesta Tese apresenta-se fórmulas para o método CRS 2-D e para a velocidade NMO, que consideram a topografia da superfície de medição. O algoritmo é baseado na estratégia de otimização dos parâmetros da fórmula CRS através de um processo em três etapas: 1) Busca dos parâmetros, o ângulo de emergência e a curvatura da onda NIP, aplicando uma otimização global, 2) busca de um parâmetro, a curvatura da onda N, aplicando uma otimização global, e 3) busca de três parâmetros aplicando uma otimização local para refinar os parâmetros estimados nas etapas anteriores. Na primeira e segunda etapas é usado o algoritmo Simulated Annealing (SA) e na terceira etapa é usado o algoritmo Variable Metric (VM). Para o caso de uma superfície de medição com variações topográficas suaves, foi considerada a curvatura desta superfície no algoritmo do método de empilhamento CRS 2-D, com aplicação a dados sintéticos. O resultado foi uma seção ZO simulada, de alta qualidade ao ser comparada com a seção ZO obtida por modelamento direto, com uma alta razão sinal-ruído, além da estimativa do trio de parâmetros da função tempo de trânsito.

Foi realizada uma análise de sensibilidade para a nova função de tempo de trânsito CRS em relação à curvatura da superfície de medição. Os resultados demonstraram que a função tempo de trânsito CRS é mais sensível nos pontos-médios afastados do ponto central e para grandes afastamentos.

As expressões da velocidade NMO apresentadas foram aplicadas para estimar as velocidades e as profundidades dos refletores para um modelo 2-D com topografia suave. Para a inversão destas velocidades e profundidades dos refletores, foi considerado o algoritmo de inversão tipo Dix. A velocidade NMO para uma superfície de medição curva, permite estimar muito melhor estas velocidades e profundidades do refletores, que as velocidades NMO referidas as superfícies planas.

Também apresenta-se uma abordagem do empilhamento CRS no caso 3-D. Neste caso a função tempo de trânsito depende de oito parâmetros. São abordadas cinco estratégias de busca destes parâmetros. A combinação de duas destas estratégias (estratégias das três aproximações dos tempos de trânsito e a estratégia das configurações e curvaturas arbitrárias) foi aplicada exitosamente no empilhamento CRS 3-D de dados sintéticos e reais.

ABSTRACT

The CRS stacking method simulates ZO seismic sections from multi-coverage data and does not depend on a macro-velocity model. For 2-D medium the stacking traveltime depends on three parameters: the emergence angle of the normal ray (with respect to the measurement surface normal) and the wavefront curvatures of two hypothetical waves, called Normal-Incidence-Point (NIP) wave and Normal (N) wave.

The CRS method consists of summing the amplitudes of the seismic traces in the multi-coverage data along the surface defined by CRS stacking traveltime which fits best the data set. The result of the CRS stack is assigned to points of a grid pre-defined in the ZO section. As the result obtain a simulated ZO section. This means that for each point of the ZO section must be estimated the three optimal parameters that yield the maximum coherence between the events of seismic reflection.

In this Thesis I present formulae for the 2-D CRS method and for the NMO velocity that consider the topography of the measurement surface. The algorithm is based on the optimization strategy divided into three steps: 1) To search for the emergence angle and the curvature of the NIP wave, by applying a global optimization, 2) to search for the curvature of the N wave, by applying global optimization, and 3) to refine the initial parameters estimated in first two steps by applying local optimization. In the first two steps is used the Simulated Annealing (SA) algorithm and in the third step the Variable Metric (VM) algorithm. For the case of a measurement surface with smooth topography the curvature of this surface is included in the 2-D CRS stack formalism. This CRS algorithm implemented was applied to synthetic data set. The result is a simulated ZO section of high quality, with a high signal-to-noise ratio, and the estimative of the parameter triplet.

It is performed a sensibility analysis for the new CRS stacking traveltime with respect to the curvature in several points of the curved measurement surface. This study showed that the CRS traveltime is more sensitive for fast midpoints of the central points and larger offsets.

The expressions for the NMO velocities presented here is applied to estimate the interval velocities and the depth of the reflectors for 2-D model with a smooth topography. For the inversion of the velocities and the depth of the reflectors is considered the Dix-type inversion

algorithm. The NMO velocity for a curved measurement surface deserves to best estimate the velocities and the depths of the reflectors than NMO velocities referred to planar surfaces.

Also, I present an introduction to 3-D stack. In this case, the stacking traveltimes depends on eight parameters. These parameters can be obtained by using some parameter-search strategies that I have showed in this Thesis. The combination of the strategy of the Traveltime Approximations and the strategy of Arbitrary Curvatures is used to apply 3-D CRS stack successful in synthetic and real data sets, respectively.

1 - INTRODUÇÃO

Os métodos de imageamento sísmico têm como objetivo produzir imagens das regiões de interesse em subsuperfície, mapeando as estruturas geológicas existentes através da análise de dados sísmicos. Isto é essencial para a indústria de petróleo na procura de jazidas de hidrocarbonetos.

Dentro dos processos utilizados na indústria de petróleo para obter uma imagem da subsuperfície se tem, 1) o empilhamento, 2) a migração pré e pós-empilhamento no domínio do tempo e da profundidade. Neste trabalho será tratado exclusivamente o tópico referido ao empilhamento sísmico. O empilhamento sísmico permite simular seções sísmicas ZO a partir de dados sísmicos de cobertura múltipla. Este processo se realiza ao longo de curvas ou superfícies de tempos de trânsito que dependem de um ou mais parâmetros. Como resultado do processo de empilhamento, obtém-se uma seção empilhada e os parâmetros da função tempos de trânsito, extraídos de tal maneira que a análise de coerência realizada nos dados sísmicos produz os valores máximos de coerência.

Entre os principais métodos de empilhamento convencionais, está o conhecido método de empilhamento CMP (Mayne, 1962). Este método se caracteriza por organizar os dados em configurações CMP, onde cada uma destas configurações consiste de pares fonte-receptor localizados simetricamente em relação ao CMP. Para empilhar os dados ao longo das configurações CMP, este método considera o tempo de trânsito NMO, cuja forma é hiperbólica, e só depende só de um parâmetro, a velocidade de empilhamento ou NMO.

Recentemente a fórmula de empilhamento NMO/DMO aplicada a dados CMP, está sendo substituída por novas expressões de tempos de trânsito que usam mais de um parâmetro e abrangem uma maior parte dos dados sísmicos. Entre os principais métodos de empilhamento relacionados com estas considerações se tem o Polystack (e.g. de Bazelaire, 1988), Multifoco (Gelchinsky et al., 1999a, b; Chira, 2000) e o empilhamento CRS (Höcht, 1998; Müller, 1999; Mann et al., 1999; Jäger et al., 2001). Estes métodos têm a propriedade de que só precisam do conhecimento da velocidade perto da superfície, sendo classificados na literatura como métodos independentes do macro-modelo de velocidades (Hubral, 1999). O método de empilhamento considerado nesta Tese é o método CRS, que utiliza a aproximação paraxial dos tempos de trânsito na sua forma hiperbólica (Schleicher et al., 1993a) para simular as seções sísmicas ZO. Esta aproximação é aplicável para diversas configurações sísmicas e

depende de três parâmetros: 1) o ângulo de emergência do raio de reflexão normal em relação à normal da superfície de medição (β_0), 2) a curvatura da onda NIP, K_{NIP} e 3) a curvatura da onda Normal, K_N . As ondas hipotéticas, NIP e Normal (N) foram definidas por Hubral (1983). A onda NIP possui uma fonte pontual, localizada no ponto de incidência do raio de reflexão normal, e se propaga ascendentemente até a superfície. A onda N é originada a partir de fontes pontuais distribuídas ao longo do refletor e propaga-se ascendentemente com uma curvatura inicial igual ao do refletor considerado.

O método de empilhamento CRS consiste na soma das amplitudes dos dados sísmicos de cobertura múltipla na superfície de empilhamento, definida pela função tempo de trânsito. O resultado é colocado no ponto $P_0(x_0, t_0)$ da seção ZO que será simulada. Para isto são determinados três parâmetros (β_0, K_{NIP}, K_N) correspondentes a cada amostra da seção ZO simulada. Entre outras aplicações destes parâmetros, tem-se: 1) a determinação do modelo de velocidades (Majer, 2000; Biloti, 2001), 2) as análises AVO e AVA, como foram aplicadas por Biloti et al. (2001), 3) o cálculo das Zonas de Fresnel projetadas, 4) o cálculo do fator de espalhamento geométrico (Vieth, 2001) e 5) aberturas de empilhamento e migração, entre outras aplicações.

O método de empilhamento CRS basea-se na aproximação paraxial hiperbólica de segunda ordem do tempo de trânsito de reflexão primária, em relação a um raio central, considerando uma geometria de aquisição arbitrária. Este novo método de empilhamento tem como característica ser independente do macro-modelo de velocidades. Originalmente, o método de empilhamento CRS foi proposto considerando-se uma superfície de medição plana e horizontal. Neste trabalho de Tese busca-se estudar uma nova formulação, segundo a qual pode-se admitir a existência de uma superfície de medição com curvatura suave, considerando-se assim o efeito da topografia durante o empilhamento.

Para considerar o caso de uma topografia suave no método CRS, Chira e Hubral (2003) apresentaram a fórmula de empilhamento CRS que considera a curvatura da superfície de medição. Adicionalmente, Chira et al. (2001) apresentaram a mesma fórmula, porém, considerando o gradiente de velocidade nos pontos desta superfície de medição. Zhang et al. (2002) apresentaram a fórmula CRS para o caso de uma superfície de medição rugosa sem considerar o gradiente de velocidade.

Recentemente Gurevich et al. (2002) apresentaram uma extensão do tempo de trânsito Multifoco, para ser aplicado em dados adquiridos em áreas com topografia irregular sem a necessidade a priori das correções estáticas.

O presente trabalho tem como objetivos: 1) a simulação de seções sísmicas ZO para o caso de uma superfície de medição suavemente curva. Para realizar este objetivo é implementado o

algoritmo de Otimizações Global e Local (Garabito et al., 2001a,b), considerando a curvatura da superfície de medição suavemente curva na função tempo de trânsito CRS (Chira e Hubral, 2003). Neste caso, consideram-se como valores conhecidos a priori, a velocidade exata no ponto de emergência do raio normal, v_1 , o ângulo de mergulho α_0^* da tangente em cada ponto desta superfície, e sua curvatura K_0 , 2) estimar as velocidades e profundidades com base em um modelo 2-D sintético simples mediante o uso do algoritmo de inversão tipo Dix. Nesta inversão das velocidades e profundidades foram consideradas superfícies de medição plana e curva, e 3) fazer uma contribuição ao caso 3-D para o método CRS na determinação dos parâmetros para o empilhamento. Neste caso é considerada uma superfície de medição plana. Este trabalho de Tese é constituído pelos capítulos descritos abaixo.

Capítulo 1: Introdução.

Capítulo 2: Apresenta uma revisão teórica sobre conceitos referidos basicamente ao modelo sísmico e as configurações consideradas no levantamento sísmico.

Capítulo 3: Contém uma síntese do método CRS para o caso 2-D, onde são enfatizados os resultados obtidos do desenvolvimento do formalismo e da aplicação do mesmo.

Capítulo 4: Trata da teoria do método CRS para o caso de uma superfície de medição curva. Inicia-se com uma revisão teórica das frentes de ondas hipotéticas, consideradas na aproximação paraxial do tempo de trânsito CRS para diversas configurações.

Capítulo 5: Mostra a teoria do algoritmo de inversão tipo Dix e uma aplicação prática para um modelo sintético simples com superfície de medição curva.

Capítulo 6: Apresentação do algoritmo de empilhamento CRS para simular seções sísmicas com ZO contendo apenas reflexões primárias. São mostrados os resultados da aplicação do método CRS para um modelo 2-D com interfaces e superfície de medição curvas. Finalmente, é feito um estudo analítico da curvatura desta superfície de medição anterior através de uma análise de sensibilidade do método em função tempo de trânsito de empilhamento CRS.

Capítulo 7: Faz-se uma introdução teórica do método CRS para o caso de meios 3-D. Neste caso, só é considerado uma superfície de medição plana. Além disso, são apresentadas cinco estratégias para determinar os oito parâmetros da função tempo de trânsito de empilhamento CRS 3-D.

Capítulo 8: Conclusões e as perspectivas referidas aos casos 2-D e 3-D do método CRS tratados nesta tese.

Apêndice A: Derivação dos elementos das matrizes propagadoras, definidas nos sistemas

de coordenadas Cartesianas e centradas no raio, em relação aos parâmetros CRS 2-D e a curvatura da superfície de medição.

Apêndice B: Derivação da aproximação paraxial do tempo de trânsito na sua forma hiperbólica para o caso 2-D a partir de sua fórmula 3-D, considerando a superfície de medição plana.

Apêndice C: Derivação da aproximação paraxial do tempo de trânsito na sua forma hiperbólica para uma superfície de medição curva, considerando o gradiente de velocidade diferente de zero.

Para facilitar o entendimento de siglas consideradas no texto da Tese, o leitor está referido a ler a Lista de Siglas apresentada no início da Tese.

2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 MODELO SÍSMICO 2-D

Para o caso 2-D, é admitido que o modelo sísmico é descrito por um conjunto de camadas com distribuição arbitrária de velocidades, separadas por interfaces curvas suaves. Considera-se somente reflexões primárias $P - P$ com pares fonte-receptor dado por

$$x_S = x_S(\xi), \quad x_G = x_G(\xi), \quad (2.1)$$

sendo ξ o parâmetro na superfície que identifica a posição de um par fonte-receptor.

2.2 CONFIGURAÇÕES DO LEVANTAMENTO SÍSMICO

O levantamento sísmico 2-D na superfície de medição é realizado mediante uma sucessão repetida de fontes situadas ao longo de uma linha sísmica, gerando ondas que se propagam através das estruturas na profundidade, refletem e retornam à superfície, sendo registradas por vários receptores dispostos na mesma linha sísmica. No caso terrestre os receptores são denominados geofones e no caso marítimo são chamados de hidrofones. O registro nos receptores constituem os traços sísmicos, cuja coleção é denominada de sismogramas. A coleção de vários sismogramas formam os dados sísmicos. Para uma configuração CS que é deslocada ao longo de uma mesma linha sísmica, diferentes seções CS serão adquiridos. Os registros fornecem um conjunto de dados de cobertura múltipla, que podem ser visualizados dentro do volume (x_m, h, t) , onde x_m é a coordenada ponto-médio, h é o meio-afastamento e t o tempo de trânsito. As coordenadas x_m e h são dadas por

$$x_m = \frac{x_S + x_G}{2}, \quad h = \frac{x_G - x_S}{2}, \quad (2.2)$$

sendo x_S e x_G as projeções das coordenadas da fonte S' e do receptor G' na tangente (eixo x_1) da superfície de medição no ponto X_0 (Figura 2.1). As coordenadas x_m , h , x_S , x_G , são medidas sobre o eixo x_1 , sendo X_0 a origem do eixo x_1 (Figura 2.1).

Segundo a equação (2.1), a posição fonte-receptor é especificada por um único parâmetro, ξ . Para qualquer configuração de medida especificada em duas dimensões (Schleicher et al.,

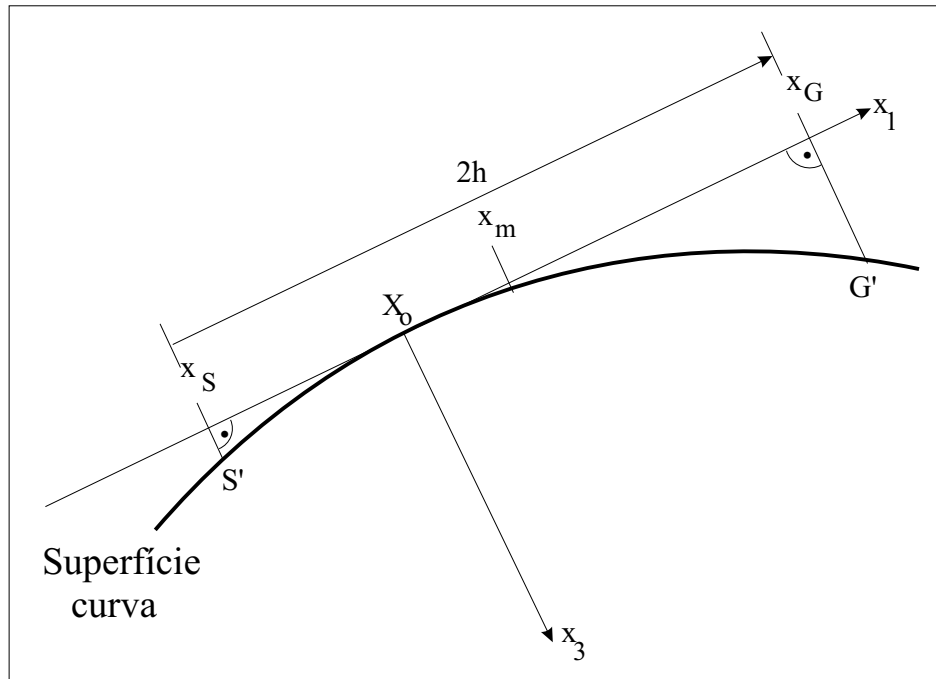


Figura 2.1 - Coordenadas locais de um par fonte-receptor sobre uma superfície de medição suavemente curva. O sistema de coordenadas 2-D local (x_1, x_3) tem origem no ponto X_0 .

1993b), se tem

$$x_S = x_{S_0} + \Gamma_S (\Delta x_{S_0}), \quad x_G = x_{G_0} + \Gamma_G (\Delta x_{G_0}), \quad (2.3)$$

onde x_{S_0} e x_{G_0} são coordenadas de um par fonte-receptor fixo. Γ_S e Γ_G são constantes que dependem somente da configuração de medida. Δx_{S_0} e Δx_{G_0} são os deslocamentos em relação às coordenadas x_{S_0} e x_{G_0} . As principais configurações são:

1. Ponto-médio comum: um par fonte-receptor é deslocado na superfície tal que a coordenada ponto médio é fixa. Esta configuração é descrita pelas equações 2.3 se $\Gamma_S = 1$ e $\Gamma_G = -1$.

2. Fonte-comum: a posição da fonte x_S é fixa em x_{S_0} e os receptores estão distribuídos ao longo da linha sísmica. Esta configuração é descrita pelas equações 2.3 se $\Gamma_S = 0$ e $\Gamma_G = 1$.

3. Afastamento-comum: um par fonte-receptor de coordenadas x_S e x_G é deslocado de tal maneira que os deslocamentos Δx_{S_0} e Δx_{G_0} são iguais. Esta configuração é descrita pelas equações 2.3 se $\Gamma_S = 1$ e $\Gamma_G = 1$. No caso particular $x_{S_0} = x_{G_0}$, se tem a configuração afastamento nulo.

4. Receptor-comum: a posição do receptor é fixa em $x_G = x_{G_0}$ e a fonte é deslocada ao longo da linha sísmica. Esta configuração é descrita pelas equações 2.3 se $\Gamma_S = 1$ e $\Gamma_G = 0$.

3 - MÉTODO DE EMPILHAMENTO CRS 2-D PARA SUPERFÍCIE DE OBSERVAÇÃO PLANA

Neste capítulo é apresentado um resumo do desenvolvimento do formalismo e da aplicação do método de Empilhamento Superfície de Reflexão Comum (CRS) para o caso de meios 2-D com raio central de configuração ZO.

3.1 GEOMETRIA DE FRENTES DE ONDA

Duas frentes de ondas hipotéticas consideradas ao longo do mesmo raio normal (fonte e receptor coincidentes) estão envolvidas na derivação da fórmula que aproxima o tempo de trânsito dos eventos de reflexão primária, para simular um traço sísmico com afastamento-nulo. Estas ondas são a onda NIP, e a onda Normal, N , as quais foram introduzidas por Hubral (1983) (Figura 3.1). Na Figura 3.1 se observa a propagação das duas ondas hipotéticas NIP e N , num meio heterogêneo formado por duas camadas homogêneas sob um semi-espço, desde o ponto de incidência normal R sobre o refletor até o ponto de observação X_0 na linha sísmica. A onda NIP é uma onda hipotética que se propaga de forma ascendente a partir de uma fonte pontual localizada no ponto R . As frentes de ondas de cor azul representam a propagação da onda NIP em diferentes instantes de tempo até atingir o ponto de emergência X_0 (Figura 3.1a). A onda N é também uma onda hipotética que se propaga a partir de fontes pontuais distribuídas ao longo do refletor, com uma frente de onda inicial cuja curvatura é a mesma do refletor considerado. As frentes de onda também de cor azul representam a propagação da onda N em diferentes instantes de tempo e também associados ao raio normal (Figura 3.1b). As curvaturas das ondas NIP e N , K_{NIP} e K_N , são aproximações circulares das suas frentes de onda.

Para meios homogêneos, o ângulo de emergência β_0 do raio normal e as curvaturas K_{NIP} e K_N , medidos em X_0 , definem a orientação, a posição e a forma do refletor. No caso de velocidade constante, o raio de curvatura da onda NIP é a distância do segmento refletor até X_0 .

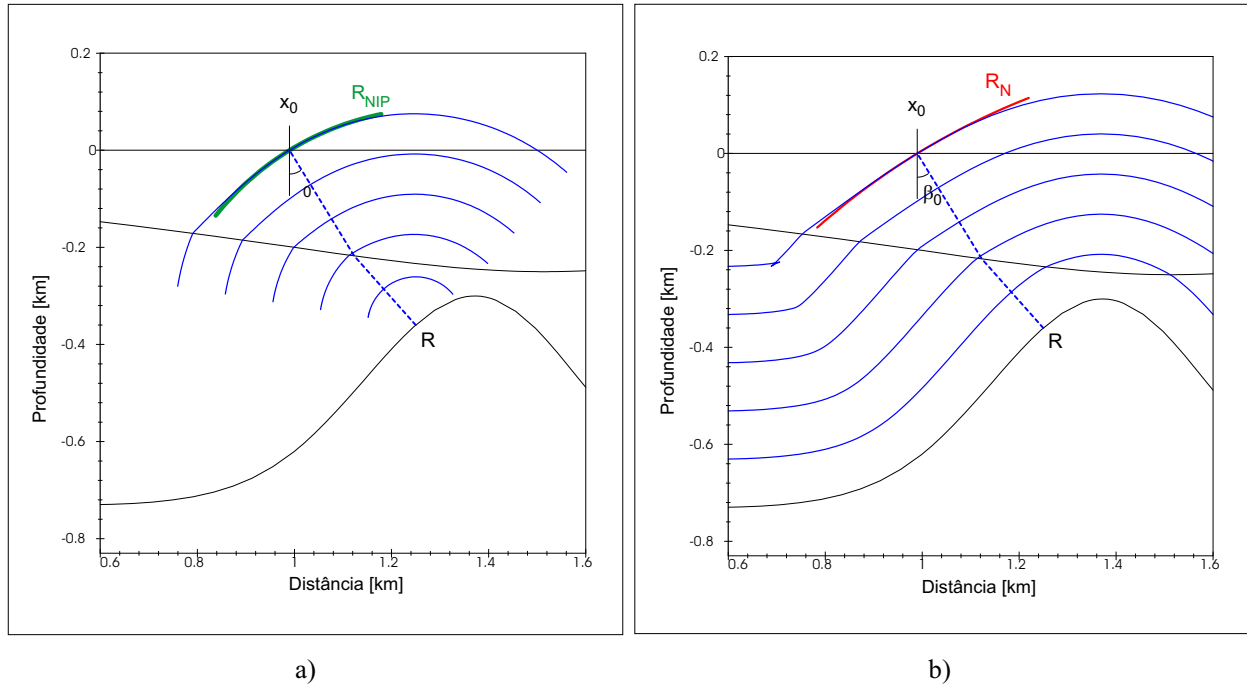


Figura 3.1 - Propagação das ondas hipotéticas a)NIP e b)Normal. O raio normal inicia-se em X_0 , propaga-se ao longo das camadas, reflete no ponto R do segundo refletor e emerge na superfície de medição no mesmo ponto X_0 . β_0 é o ângulo de emergência deste raio normal com a normal à superfície de medição. R_{NIP} e R_N são os raios de curvatura das ondas NIP e N.

3.2 EMPILHAMENTO SÍSMICO CRS

O método de empilhamento CRS permite simular seções sísmicas de afastamento-nulo (ZO). Este empilhamento CRS soma as amplitudes dos traços sísmicos ao longo de uma superfície construída pela aproximação paraxial de segunda ordem do tempo de trânsito de reflexão na forma hiperbólica (Schleicher et al., 1993a), atribuindo-se o resultado ao ponto $P_0(x_0, t_0)$ da seção ZO a ser simulada (Figura 3.2). Para meios 2-D, esta fórmula depende de três parâmetros: o ângulo de emergência do raio de reflexão normal em relação à normal da linha de medição (β_0), a curvatura da onda NIP (K_{NIP}) e a curvatura da onda Normal (K_N) (Hubral, 1983). Esta aproximação está em função das coordenadas ponto-médio (x_m) e meio-afastamento (h), e é expressa por

$$t^2(x_m, h) = \left[t_0 + \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0}{v_1} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta_0}{v_1} (K_N (x_m - x_0)^2 + K_{NIP} h^2), \quad (3.1)$$

sendo t_0 o tempo de trânsito duplo ao longo da trajetória de um raio normal, e x_0 é a coordenada do ponto P_0 no eixo x . No formalismo dado pela equação (3.1) a velocidade v_1 é considerada constante.

O método CRS 2-D dado pela equação (3.1) tem verificado êxito em dados sintéticos (Birgin et al, 1999; Garabito et al. 2001a,b; Jäger et al, 2001) e reais (Müller, 1999; Mann et al., 1999; Trappe et al., 2001; Mann, 2002).

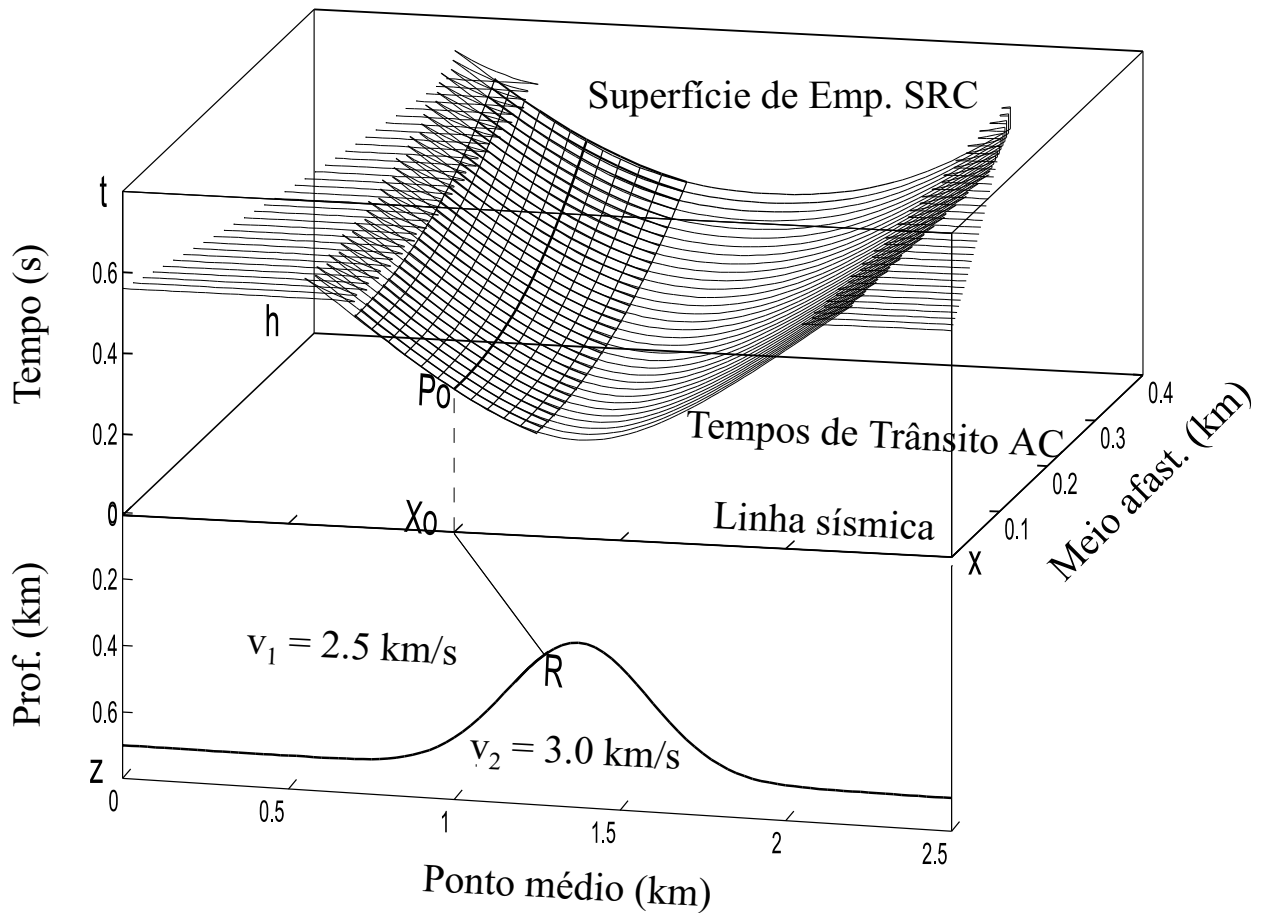


Figura 3.2 - Parte inferior (frontal): meio 2-D com uma camada sob um semi-espaço. Parte superior: curvas de tempos de trânsito CO dos dados pré-empilhados e a superfície de empilhamento CRS para simular traços sísmicos ZO.

3.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO EMPILHAMENTO SÍSMICO CRS

O método CRS para a simulação de uma seção ZO é baseado na determinação de três parâmetros (β_0, K_{NIP}, K_N), a partir de dados sísmicos de cobertura múltipla. Estes parâmetros estão associados a cada ponto de amostragem da seção sísmica ZO simulada e sua determinação é realizada através de processos de otimização e análise de coerência considerando diferentes estratégias, que envolvem processos de busca de um, dois ou três parâmetros, como apresentados a seguir.

A primeira estratégia foi desenvolvida pelo grupo de pesquisa do Instituto de Geofísica da Universidade de Karlsruhe (Alemanha) (Höcht, 1998; Jäger, 1999; Müller, 1999; Jäger et al., 2001), e se caracteriza pela estimativa dos três parâmetros iniciais, β_0 , K_{NIP} e K_N , através de processos de busca unidimensional, realizados por meio da aplicação de análise de coerência ao longo de curvas de empilhamento CMP e ZO. Isto é feito para cada parâmetro que produz o maior valor de coerência. A determinação simultânea dos valores finais dos três parâmetros é realizada por meio da aplicação do algoritmo de otimização Simplex, que utiliza como aproximação inicial os parâmetros obtidos pelas buscas unidimensionais. Este algoritmo foi aplicado com êxito em dados sintéticos (Jäger et al., 2001) e em dados reais (Mann et al., 1999; Trappe et al., 2001).

Uma segunda estratégia de otimização foi aplicada por Birgin et al. (1999) no Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação da Universidade de Campinas (Brasil). Esta estratégia é a mesma que a estratégia anterior na estimativa inicial dos parâmetros β_0 , K_{NIP} e K_N . A diferença entre estas estratégias é o tipo de otimização aplicada, pois na última estimativa a segunda estratégia utiliza o algoritmo de otimização local denominado Gradiente Projetado Espectral para a estimativa final dos parâmetros. Este algoritmo foi aplicado a dados sintéticos e tem demonstrado uma excelente performance em exatidão e eficiência.

Uma outra estratégia que será aplicada neste trabalho de Tese, foi apresentada por Garabito et al. (2001a,b), do Laboratório de Processamento Sísmico (PROSIS), Universidade Federal do Pará (Brasil). Esta estratégia combina os processos de busca global e local para a determinação dos três parâmetros do método CRS e compreende três etapas. Na primeira etapa é feita a busca dos dois parâmetros (β_0, K_{NIP}) fazendo $K_N \equiv K_{NIP}$. Na segunda etapa é realizada a busca de um parâmetro, K_N , na seção ZO simulada resultante da primeira etapa. O algoritmo de otimização global utilizado nestas etapas é o SA. Enquanto que na terceira etapa, são refinadas as determinações dos três parâmetros ótimos que melhor definem a função tempo de trânsito de empilhamento CRS, por meio da aplicação do algoritmo de

busca local denominado VM. Esta estratégia foi aplicada em dados sintéticos e reais com bons resultados.

3.4 APLICAÇÕES DOS PARÂMETROS DO MÉTODO CRS

3.4.1 Modelo de velocidades

Majer (2000) determinou o modelo de velocidades 2-D para dados sintéticos com a inversão dos tempos de trânsito e dos parâmetros CRS, derivados a partir dos dados sísmicos de reflexões primárias. Para tanto, ele aplicou diversos métodos para a inversão por retropropagação. Estes métodos são mencionados a seguir.

3.4.1.1 Inversão convencional tipo Dix

O método Dix é descrito para um meio estratificado horizontalmente formado por camadas de velocidade constante (Figura 3.3). Este método usa os tempos de trânsito ZO e as velocidades de empilhamento das reflexões primárias identificadas, a fim de estimar as velocidades intervalares e o modelo em profundidade.

Nesta Tese, este método foi utilizado para estimar as velocidades e o modelo em profundidade, considerando as velocidades NMO correspondentes às superfícies de medição planas e curvas a partir dos tempos CMP. Os detalhes deste processo são detalhados no capítulo 6.

3.4.1.2 Inversão com interfaces planas inclinadas

Nesta método são usados os tempos de trânsito ZO das reflexões primárias identificadas na seção ZO empilhada e os parâmetros K_{NIP} e β_0 para retropropagar as frentes da onda NIP e estimar o modelo 2-D de isovelocidades. É ignorado a retropropagação da frente de onda normal considerando $K_N \equiv 0$ para todas as reflexões primárias, uma vez que se assume refletores planos.

Este método é organizado em duas etapas. Na primeira etapa constrói-se um modelo de isovelocidades ao longo da linha vertical no ponto de observação X_0 na superfície, com interfaces planas inclinadas. Para a construção da n -ésima interface, associado com as reflexões primárias identificadas $P_n(x_{0,n}, t_{0,n})$ do traço ZO analisado e os parâmetros associados $K_{NIP,n}$ e $\beta_{0,n}$, é necessário considerar a transmissão da onda NIP através das n camadas de isovelocidade e a refração da frente de onda NIP nas $(n-1)$ -ésimas interfaces planas para

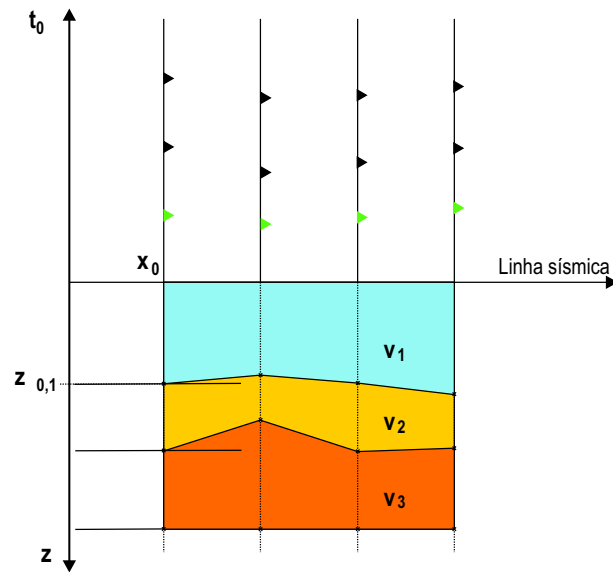


Figura 3.3 - Inversão tipo Dix. Parte superior: Seção ZO empilhada com reflexões primárias de diferentes refletor. Parte inferior: modelo 2-D com camadas de isovelocidade com suas respectivas velocidades constantes, v_1 , v_2 e v_3 (modificado de Majer, 2000).

determinar o ponto de reflexão procurado (Figura 3.4). Desta maneira, a aplicação deste método produz recursivamente os pontos na profundidade procurados, que determinam as posições das interfaces e velocidades do modelo. Na segunda etapa, as interfaces e as velocidades intervalares do modelo definem os pontos da interface z_n e as amostras da velocidade do modelo de isovelocidade. Os pontos da interface são dados pela interseção das interfaces planas e inclinadas com as correspondente linha vertical em X_0 (ver Figura 3.4).

Com os pontos na profundidade e as velocidades intervalares calculados para todos os pontos de observação da linha sísmica, as interfaces do modelo de isovelocidade são determinados por funções de interpolação (ver Figura 3.5).

3.4.1.3 Inversão com interfaces curvas

Este método é muito similar à inversão com interfaces planas descrito anteriormente, e ele usa os parâmetros K_{NIP} e β_0 para retropropagar a frente da onda NIP a partir de uma localização na superfície x_0 através das $n-1$ camadas no modelo de isovelocidades, para determinar o ponto em profundidade R_n da n -ésima interface e a velocidade intervalar v_n . O modelo é construído de segmentos de interfaces circular com curvaturas constantes em lugar

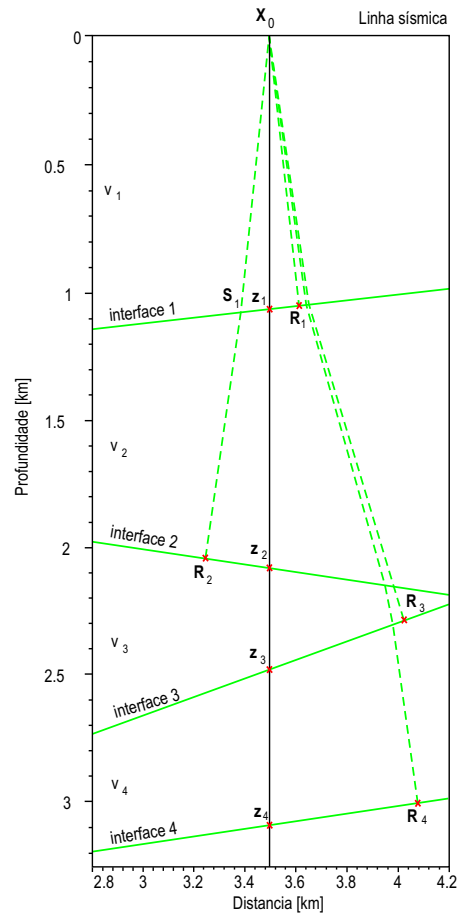


Figura 3.4 - Construção do modelo isovelocidades a partir de uma inversão com interfaces planas inclinadas. R_i corresponde a pontos NIP. A interseção das interfaces com as linhas verticais em profundidade definem os pontos z_i nas interfaces e as velocidades intervalares v_i (modificado de Majer, 2000).

de interfaces planas. As curvaturas dos segmentos de interfaces curvas são determinadas pela retropropagação das frentes de onda Normal para os pontos da interface. A construção do modelo de isovelocidades com segmentos de interfaces curva permite o processo de inversão apresentado no método anterior, porém devem ser consideradas as leis de refração para a retropropagação da frente de onda NIP.

Desta maneira a inversão das reflexões primárias identificadas P_i de um traço ZO em ordem cronológico fornece o modelo de isovelocidades e os segmentos das interfaces curvas (Figura 3.6). Enquanto que os pontos da interface do modelo de isovelocidade 2-D são dados pela interseção das interfaces curvas do modelo com a linha vertical associada.

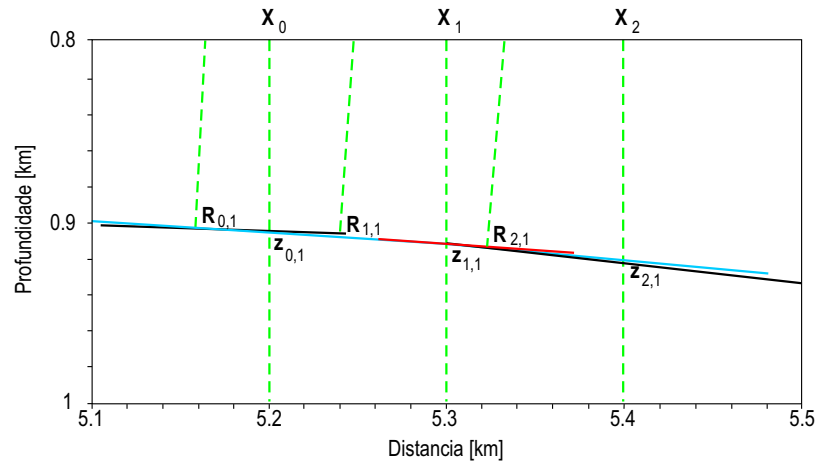


Figura 3.5 - Detalhe do modelo 2-D de isovelocidades com uma interface interpolada (curva vermelha). A inversão do traço com interfaces planas determinam os pontos na profundidade $R_{i,1}$ e a interface (curva de cor azul). A interseção dos segmentos de interfaces com as linhas verticais em profundidade (x_i) produz os pontos da interface $z_{i,1}$ que são interpoladas. A interface do modelo verdadeiro é a curva de cor preta (modificado de Majer, 2000).

Assim, os pontos da interface fornecidos para cada traço ZO ao longo da linha sísmica determinam as interfaces contínuas interpoladas do modelo de isovelocidade 2-D construído segundo as respostas de reflexão das interfaces. As amostras da velocidade pertencentes a mesma camada, podem ser usadas para a observação das variações laterais ao longo da interface ou para estimar a velocidade média da camada.

3.4.1.4 Inversão com horizontes de eventos sísmicos no domínio do tempo

Este método calcula recursivamente as interfaces desde o topo até a base do modelo. Entre duas interfaces quaisquer o método assume uma camada com velocidade constante. O processo precisa de horizontes de eventos sísmicos no domínio do tempo identificados na seção ZO que estão associados as interfaces contínuas no modelo. Um horizonte de eventos sísmicos no domínio do tempo pode ser considerado como a resposta de reflexão de uma interface particular. Um horizonte de eventos sísmicos não é necessariamente contínuo no domínio do tempo, e pode ser dividido em várias partes (e.g. triplicações dos tempos de trânsito devido a estruturas complexas). Os pontos de reflexão calculados a partir dos horizontes de eventos sísmicos selecionados, determinam os pontos das interfaces no domínio da profundidade. Para construir as interfaces contínuas é usado a aproximação polinomial e interpolação cúbica

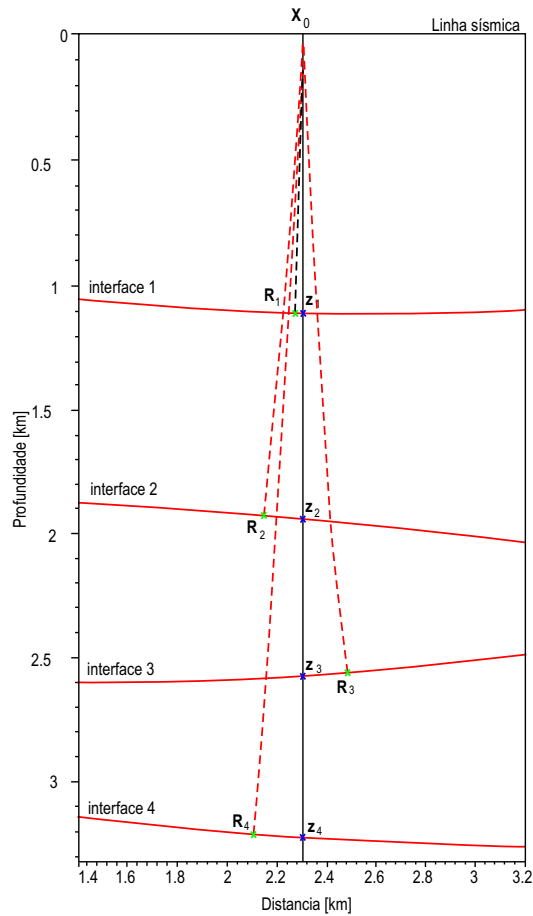


Figura 3.6 - Construção do modelo de isovelocidade a partir de uma inversão de interfaces curva. R_i corresponde a pontos NIP. A interseção dos pontos das interfaces com as linhas verticais em profundidade definem os pontos z_i das interfaces e as velocidades intervalares v_i (modificado de Majer, 2000).

(Figura 3.7).

Para cada horizonte de eventos sísmicos no domínio do tempo, o processo de inversão produz uma amostra de velocidade para a camada a ser construída.

Majer (2000) aplicou os diversos métodos anteriores a dados sintéticos. Para o caso de modelos com estruturas moderadamente complexas, os modelos de velocidades obtidos por estes diferentes métodos de inversão apresentam uma boa concordância com o modelo sintético.

Com o conhecimento a priori do modelo estratificado com interfaces contendo mergulho suave, Majer (2000) recomenda usar o método de inversão tipo Dix por este se tornar mais

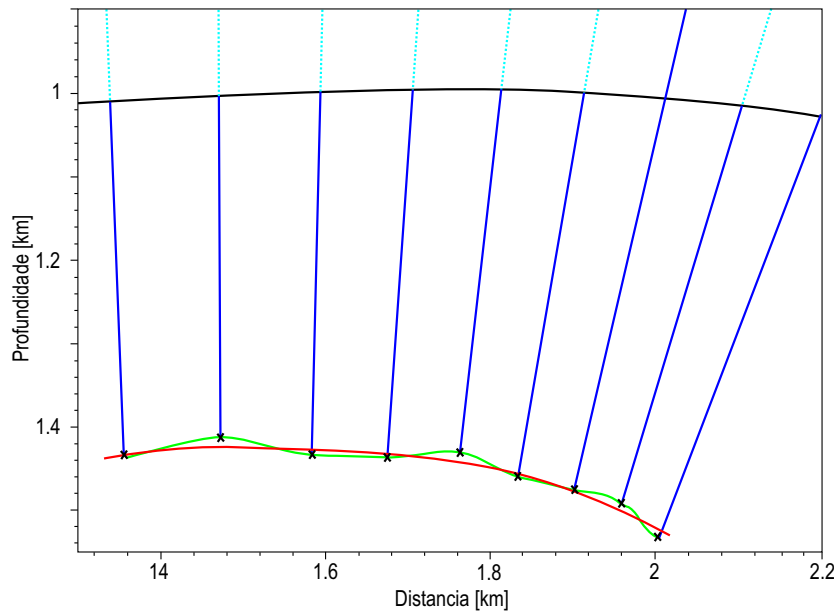


Figura 3.7 - Inversão considerando horizontes de eventos sísmicos no domínio do tempo: após a refração na interface superior (cor preta), as frentes de onda NIP se focalizam nos pontos na profundidade procurados (cruzes de cor preto). Os segmentos dos raios ZO associados com os pontos em profundidade são mostrados de cor azul. Uma interface é construída por uma interpolação (curva de cor verde) ou por uma função de aproximação (curva de cor vermelha) (modificado de Majer, 2000).

estável no caso das regiões com maior frequência das observações.

Para o caso de modelos contendo interfaces com grandes curvaturas, Majer (2000) recomenda o método de inversão com horizontes de eventos sísmicos no domínio do tempo, no entanto a desvantagem deste método é ser muito sensível e a implementação precisa do ajuste manual para determinar quais das interfaces ajustam melhor os pontos dos refletores calculados na profundidade. Este procedimento produz interfaces contínuas e suaves para modelos moderados e complexos. Isto permite construir o modelo correspondente de velocidade 2-D com alto nível de precisão.

Segundo Trappe et al. (2001) os parâmetros CRS também permitem obter um modelo de velocidades, como é usado para o empilhamento NMO convencional. De maneira reversa, um campo de velocidades de empilhamento obtido com uma análise NMO convencional pode ser usado como controle na busca dos parâmetros CRS, com a finalidade de evitar o empilhamento de múltiplas.

Biloti (2001) utilizou os parâmetros CRS obtidos com a segunda estratégia anterior, para estimar um modelo de velocidade em profundidade. O método usado está baseado no método proposto por Hubral e Krey (1980), porém a velocidade em cada camada é uma função da profundidade. Os parâmetros não conhecidos são as velocidades em cada camada e a geometria de cada interface. O modelo é construído iterativamente, começando pelas camadas mais rasas e descendo progressivamente às mais profundas. No entanto, o método tem sido aplicado para dados sintéticos com bons resultados.

3.4.2 Zona de Fresnel projetada

Hubral et al. (1993) definiram as zonas de Fresnel projetadas como a projeção sobre a superfície da terra (ou sobre a superfície de tempos de trânsito de reflexões primárias ZO) da zonas de Fresnel em profundidade. A zona de Fresnel projetada ao longo do raio de reflexão normal que emerge na superfície de medição é considerada como a abertura mínima (Figura 3.8). Segundo Vieth (2001) a metade do tamanho desta projeção é expressa por

$$r_p = \frac{1}{\cos \beta_0} \sqrt{\frac{v_1 T}{2 |K_{NIP} - K_N|}}, \quad (3.2)$$

sendo T o período de uma onda monofrequente.

Vieth (2001) usou a zona de Fresnel projetada para definir uma abertura mínima local para o empilhamento CRS 2-D em dados reais, sendo denominado como o empilhamento CRS Fresnel. A abertura usada consiste de uma elipse não rotacionada, onde o semi-eixo menor na direção CMP, para $h = 0$, corresponde ao tamanho da zona de Fresnel projetada (Figura 3.9). O semi-eixo maior é duas vezes o tamanho do semi-eixo menor. Esta abertura tem mostrado duas melhorias: 1) a resolução é superior aos empilhamentos CRS inicial e CRS otimizado, e 2) os eventos são mais contínuos que os empilhamentos CRS mencionados anteriormente. Além disso, a zona de Fresnel projetada tem dois aspectos importantes: Primeiro, o número de traços para ser empilhado para simular uma seção ZO tornar-se mínimo; segundo, o empilhamento CRS dentro da zona de Fresnel projetada produz uma melhor razão sinal/ruído.

Segundo Vieth (2001), o empilhamento CRS com Fresnel projetada tem dificuldade nas áreas com muito ruído. Isto se deve ao fato que a função tempo de trânsito de empilhamento se torna menor comparado aos empilhamentos CRS inicial e otimizado.

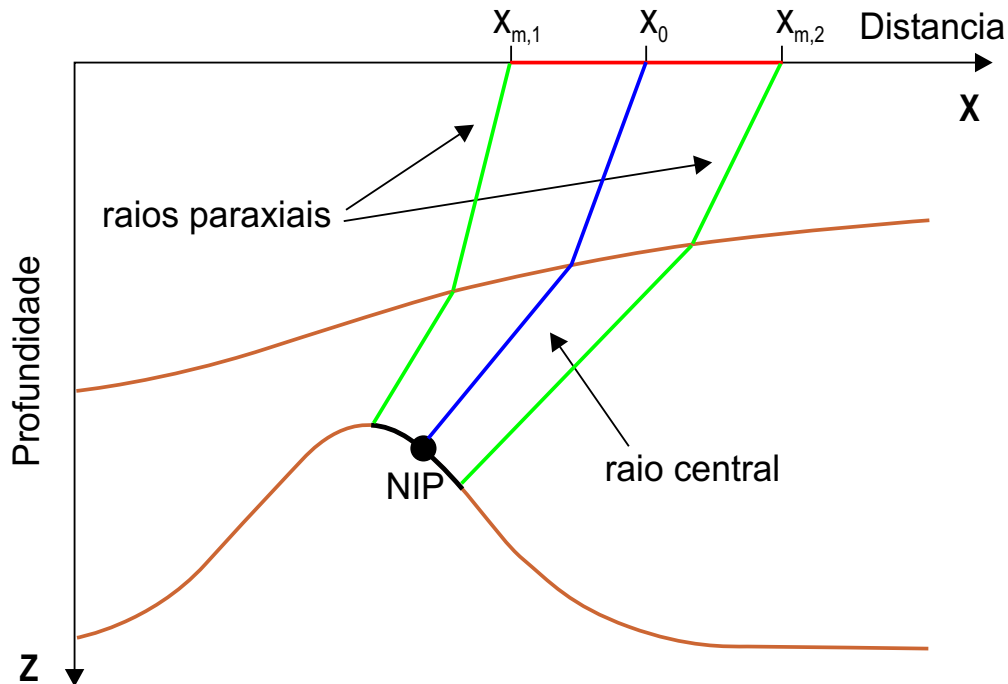


Figura 3.8 - Zona de Fresnel projetada definida pelos pontos finais dos raios normais (cor azul) e paraxiais (cor verde). A zona de Fresnel projetada é indicada na superfície pela linha vermelha, centrada no ponto X_0 .

3.4.3 Fator de espalhamento geométrico

A eliminação correta da perda pelo espalhamento geométrico (EG) nas amplitudes observadas podem ser um elemento essencial para estudos tipo AVO ou AVA.

Segundo a teoria do raio, o fator de espalhamento geométrico é formulado como o fator \mathcal{L} que aparece no denominador da expressão da amplitude. Hubral (1983) definiu que a multiplicação deste fator pela amplitude de cada reflexão primária ZO para um determinado modelo é chamado de "traço com amplitude verdadeira". Para isso é assumido que o ruído e as múltiplas tenham sido suprimidos, obtendo assim uma aproximação mais adequada para um traço de amplitude verdadeira.

Considerando o caso 2.5-D, com o sistema de coordenadas Cartesianas local (x_1, x_2, x_3) , onde se tem que as propriedades físicas do modelo não variam na direção do eixo x_2 e os eixos x_1 e x_3 são fixos e definem o plano de simetria do modelo em profundidade (Figura 3.10), com a linha sísmica na superfície da terra na direção x_1 (Bleistein, 1986). Então, o fator de espalhamento geométrico em um meio 2.5-D pode ser decomposto em contribuições no plano (x_1, x_3) e fora deste plano (Bleistein, 1986). O fator EG no plano (x_1, x_3) , \mathcal{L} , é expresso

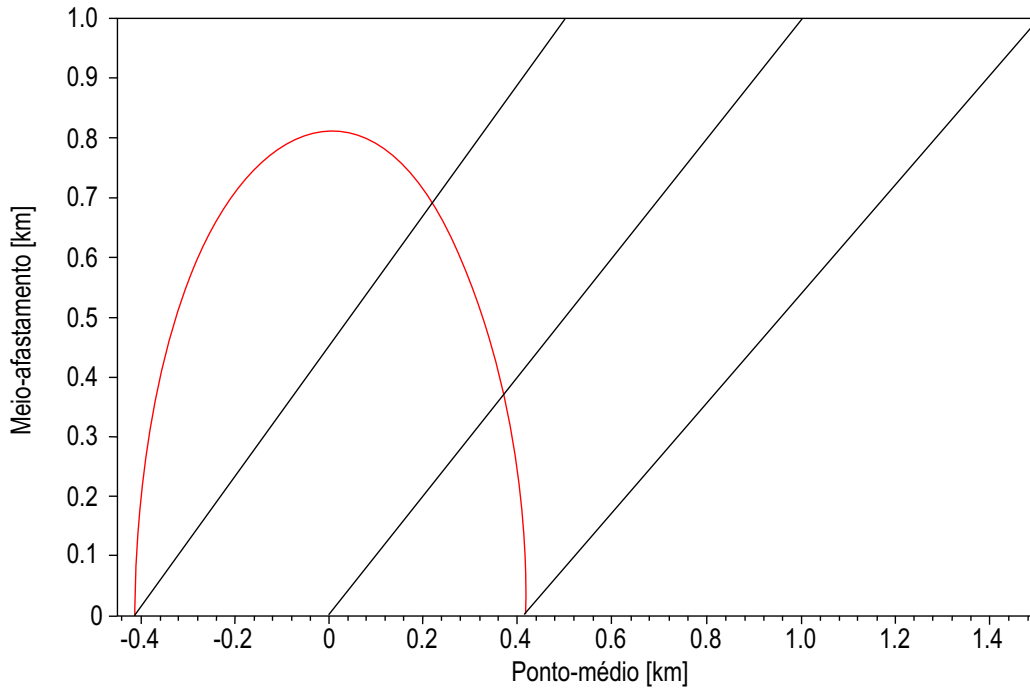


Figura 3.9 - Abertura elíptica considerada pelo método CRS. As linhas de cor preta definem o limite da zona de Fresnel projetada (modificada de Vieth, 2001).

em termos dos atributos de empilhamento CRS (Vieth, 2001) por

$$\mathcal{L} = \frac{\cos \beta_0}{v_1} |B|^{1/2} = \sqrt{\frac{2}{v_1} |K_{NIP} - K_N|^{-1}} . \quad (3.3)$$

sendo B um dos elementos da matriz propagadora \mathbf{T} (Červený, 2001).

No caso do fator EG fora do plano (x_1, x_3) , σ , é expresso por

$$\sigma = \frac{2 v_1}{K_{NIP}} . \quad (3.4)$$

O fator de espalhamento geométrico é outro atributo sísmico obtido a partir dos parâmetros do método CRS. Vieth (2001) aplicou uma função ganho arbitrária à seção ZO para dados reais (simulada com o empilhamento CRS Fresnel). Assim, ele multiplicou a seção ZO simulada com o empilhamento CRS Fresnel com o fator EG 2.5-D, expresso em termo dos parâmetros do empilhamento CRS, podendo ser considerado como uma nova função de ganho “natural”. O novo resultado do empilhamento CRS Fresnel com EG, conseguiu realçar os eventos sísmicos em pequenos e grandes tempos de trânsito, melhorando assim a resolução da imagem sísmica.

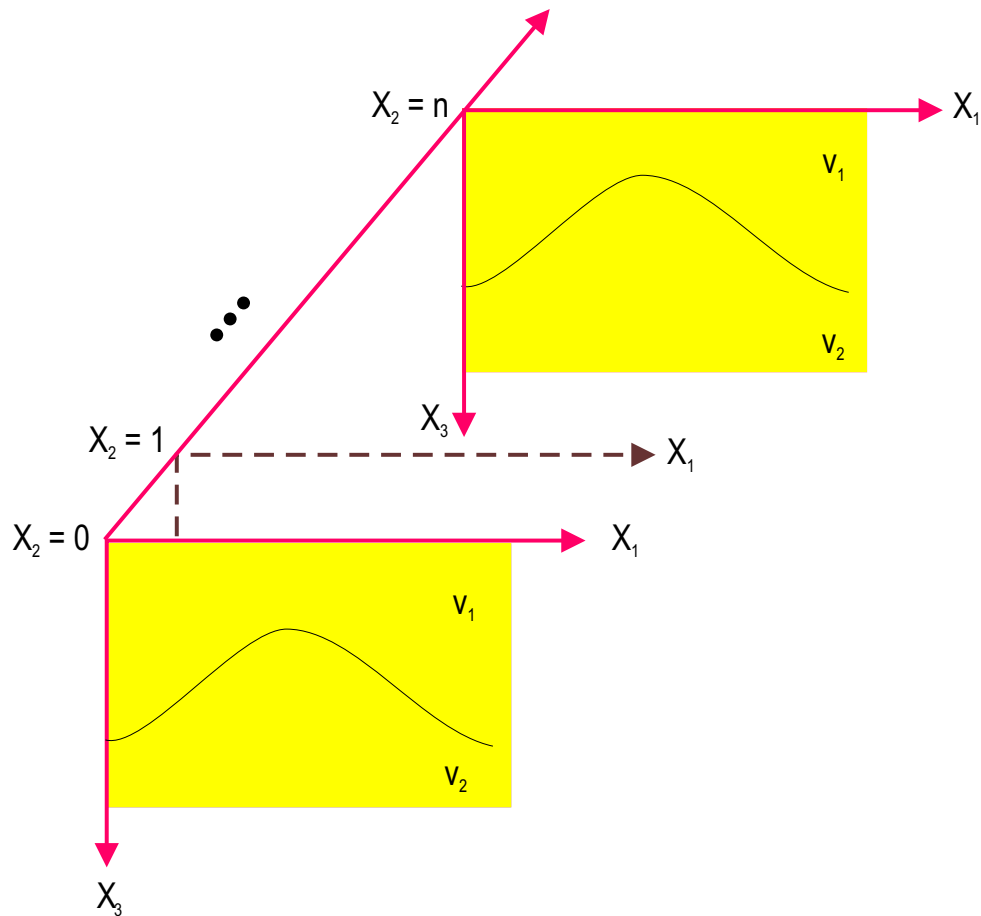


Figura 3.10 - Modelo 2.5-D, onde as propriedades físicas do modelo não variam na direção do eixo x_2 .

3.5 EVENTOS COM MERGULHOS CONFLITANTES

No caso de eventos sísmicos que se interceptam (eventos com mergulhos conflitantes), o método CRS tem obtido resultados satisfatórios.

Um ponto de amostragem (ou ponto imagem) da seção ZO não necessariamente é formado por um único evento sísmico, onde só exista um trio de parâmetros associado com esta amostragem. Portanto, a simulação correta de traços sísmicos que são constituídos por eventos que se cruzam devem considerar mais de um trio de parâmetros associados a cada ponto imagem da seção ZO a ser simulada.

Mann (2002) modificou o algoritmo de empilhamento CRS proposto por Müller (1999) para considerar os eventos com mergulho conflitantes, e aplicou isto para dados sintéticos e

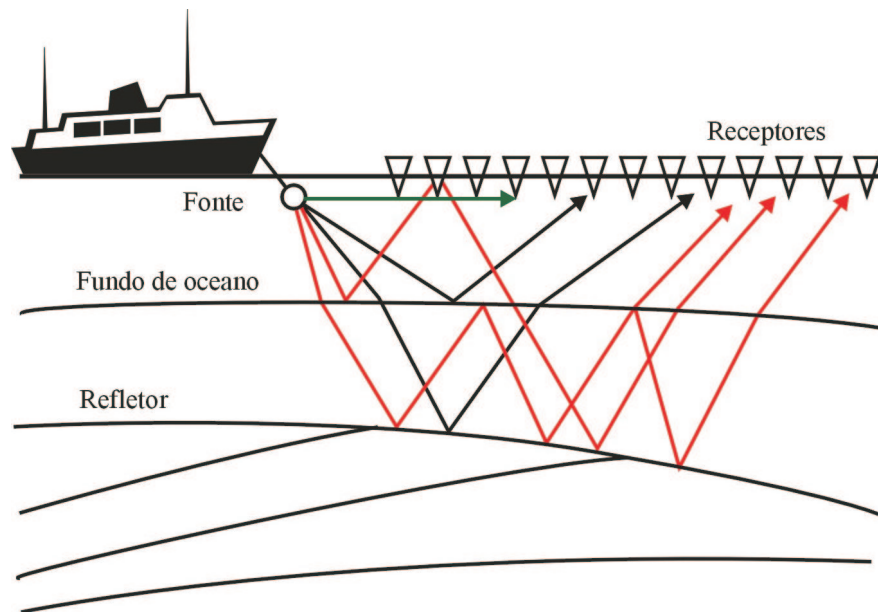


Figura 3.11 - Trajetórias das ondas sísmicas: a) Ondas P direitas (raio de cor verde), b) reflexões primárias (raios de cor preto) e c) reflexões múltiplas (raios de cor vermelho).

reais com resultados satisfatórios.

Garabito (2001) incluiu no seu algoritmo de otimização global e local a possibilidade de determinar os dois trios de parâmetros associados aos pontos de amostragem da seção sísmica ZO, onde existem interferência de eventos, e aplicou a dados sintéticos 2-D com bons resultados.

3.6 MÚLTIPLAS

O problema das reflexões múltiplas no processamento de dados sísmicos é tão antigo como o método sísmico. Existem diferentes técnicas de imageamento que estão baseadas só na suposição de que os sismogramas só incluem as reflexões primárias. Na realidade, os sismogramas incluem reflexões múltiplas que podem ser tão forte quanto as reflexões primárias desejadas, e tornam os refletores-alvos profundos ser completamente invisíveis. Então, a identificação e localização do refletor-alvo, que pode indicar por exemplo um reservatório de petróleo, dependem das múltiplas (Figura 3.11) que devem ser eliminadas ou atenuadas.

Segundo Trappe et al. (2001), a supressão de múltiplas não necessariamente precisa do processamento convencional. Alternativamente, zonas de baixa velocidade, que são atribuídas

às múltiplas, podem ser editadas no campo de velocidade obtido a partir dos parâmetros CRS.

Maciel et al. (2001) simulou reflexões múltiplas de primeira ordem com ZO usando o modelamento direto no método CRS. A estratégia usada está baseada no conhecimento do modelo, e inclui um processo recursivo para calcular os raios de curvatura (Hubral & Krey, 1980), passando-se a considerar dentro do processo recursivo uma trajetória de reflexão. Desta forma, foi incluída na última camada da trajetória uma reflexão na última interface, aplicando-se a lei de reflexão. Considera-se que uma maneira de identificar os eventos de reflexões tipo múltiplas nos resultados após do empilhamento CRS é derivar um modelo de velocidade, e aqueles eventos que repetem as mesmas velocidades, corresponderão às reflexões múltiplas (Figura 3.11).

Alves (2003) estendeu os filtros de Wiener para afastamentos arbitrários com auxílio da função tempos de trânsito CRS para a supressão de múltiplas intracamada.

3.7 REDATUMAÇÃO

Uma das formas que o método CRS tem considerado nos seus resultados é que a linha de aquisição dos dados é horizontal; isto é, fontes e receptores estão sobre uma linha reta horizontal (linha sísmica). No entanto, na prática de campo os dados sísmicos são adquiridos sobre uma superfície de medição irregular. A remoção da influência da topografia da linha de aquisição considerando um nível de referência arbitrário, para o qual as medições são corrigidas, é definido como a Redatumação.

Grosfeld et al. (2001) realizaram a correção do efeito topográfico em dados sintéticos. Aplicaram o empilhamento CRS aos dados sísmicos, assumindo que a linha de medição fosse horizontal, isto é, ignorando a topografia. Posteriormente, foi corrigido o efeito topográfico mediante o uso dos parâmetros obtidos no empilhamento CRS para levar a simulação do afastamento-nulo a uma linha horizontal que pode estar acima ou abaixo da linha topográfica. Consideraram a continuação dos raios acima da linha topográfica, e considerando uma camada fictícia cujo topo é a mesma linha horizontal que será a pseudo-linha de aquisição. A velocidade dessa camada foi aproximada pela velocidade v_1 , por razões de realizar uma implementação simples e poder extrapolar abaixo da linha. Assim, os raios que chegam à superfície de medição continuarão em linha reta até um Datum (linha de referência horizontal) previamente escolhido. Após foi realizada uma reamostragem dos dados para obter a informação numa malha regular. Esse método de correção do efeito topográfico apresentou resultados satisfatórios para dados sintéticos. As curvaturas da frente de onda Normal e NIP, K_N e K_{NIP} , não foram completamente bem corrigidos.

Heilmann (2002) aplicou o processo de redatumação às seções da velocidade NMO resultante do empilhamento CMP. As velocidades NMO obtidas foram comparadas com aquelas obtidas por modelamento direto 2-D, sendo usado uma superfície de medição curva. Após a redatumação os resultados tem mostrado serem consistentes dentro do intervalo esperado.

3.8 ABERTURA CRS

O método CRS considera diferentes tipos de aberturas (Figura 3.12) segundo o tipo de empilhamento usado na busca do seus parâmetros (Mann, 2002). Estes são explicados a continuação.

- 1) O empilhamento CMP considera uma abertura empírica. A experiência do usuário com o empilhamento CMP e a correção NMO é importante na definição desta abertura, porque estes métodos estarão sujeitos ao mesmo problema de abertura. É considerado uma interpolação linear da abertura CMP entre dois pontos dados pelo usuário (t_1, h_1) e (t_2, h_2) no plano tempo/meio-afastamento, completado por uma extrapolação constante fora deste intervalo (Figura 3.12a), onde (t_1, t_2) referem-se ao intervalo de abertura no eixo do tempo e (h_1, h_2) define o intervalo de abertura no eixo do meio-afastamento, ambos para o empilhamento CMP.
- 2) O empilhamento ZO, considera uma abertura física definida pela “estimativa da zona de Fresnel projetada” usada para um modelo 1-D com interface horizontal com camadas homogêneas e velocidade v_1 . Na Figura 3.12b, (m_1, m_2) define o intervalo de abertura no eixo do ponto-médio para o empilhamento ZO.
- 3) O empilhamento CRS considera uma “abertura elíptica” no plano ponto-médio/meio-afastamento. Nesta abertura são considerados as metades dos eixos dados pelas aberturas ZO e CMP (Figura 3.12c).

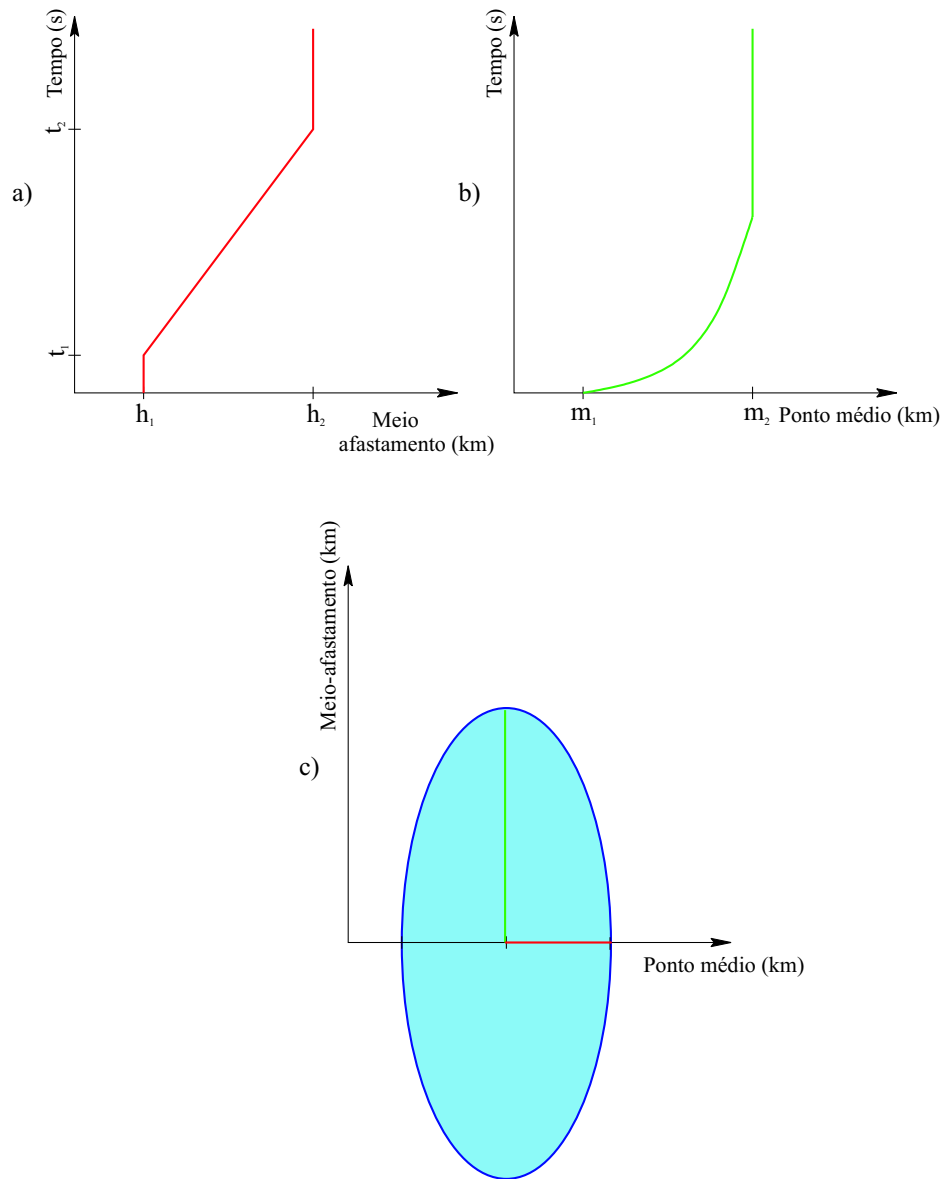


Figura 3.12 - Aberturas 2-D utilizadas no empilhamento CRS 2-D: a)Empilhamento CMP, b)Empilhamento ZO e c)Empilhamento CRS (modificado de Mann, 2001).

4 - EMPILHAMENTO CRS 2-D COM TOPOGRAFIA

Neste capítulo será abordada a fórmula de aproximação hiperbólica dos tempos de trânsito que considera a curvatura da superfície de medição curva. Esta aproximação é usada para o cálculo da superfície de empilhamento CRS.

4.1 APROXIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO HIPERBÓLICO

Schleicher et al. (1993a) derivaram a aproximação hiperbólica 3-D dos tempos de trânsito para um raio paraxial na vizinhança de um raio de reflexão normal. Particularizando este formalismo para o caso 2-D, e considerando um sistema de coordenadas Cartesianas local com a origem no ponto X_0 (Figura 4.1a), o tempo de trânsito para um raio paraxial que inicia em S' , reflete em R' e finaliza em G' , na vizinhança de um raio normal que inicia em X_0 , reflete em R e retorna à superfície em X_0 (Figura 4.1a) sobre uma superfície de medição suavemente curva é dado por

$$t^2(x_m, h) = (t_0 - 2 p_0 x_m)^2 + 2 t_0 \left[\frac{(A - 1)}{B} x_m^2 + \frac{(A + 1)}{B} h^2 \right]. \quad (4.1)$$

sendo

$$p_0 = \frac{-\text{sen}\beta_0^*}{v_1}, \quad (4.2)$$

e

$$x_m = \frac{x_S + x_G}{2}, \quad h = \frac{x_G - x_S}{2}, \quad (4.3)$$

onde v_1 é a velocidade no ponto de emergência do raio central (normal); t_0 é o tempo duplo do raio central de afastamento-nulo.

As coordenadas x_S e x_G são as coordenadas das projeções da fonte S' e do receptor G' sobre o eixo tangente x_1 à superfície de medição e com a origem em X_0 . As coordenadas x_m e h são o ponto-médio e meio-afastamento entre a fonte e o receptor medidos sobre a tangente. β_0^* é o ângulo de emergência do raio de reflexão normal (emergindo sobre a superfície de medição curva em X_0) com a normal à tangente em X_0 (Figuras 4.1b e 4.2). A e B são duas componentes específicas da matriz propagadora superfície a superfície \mathbf{T} 2×2 (Bortfeld, 1989; Červený, 2001), a qual tem mais duas componentes C e D (ver Apêndice A). A partir do modelo de velocidade e o raio normal dado, a matriz \mathbf{T} pode ser calculada por traçamento

dinâmico do raio (Červený, 2001). No empilhamento CRS a matriz \mathbf{T} é obtida a partir das reflexões primárias nos dados pré-empilhados, sem considerar qualquer traçamento de raios.

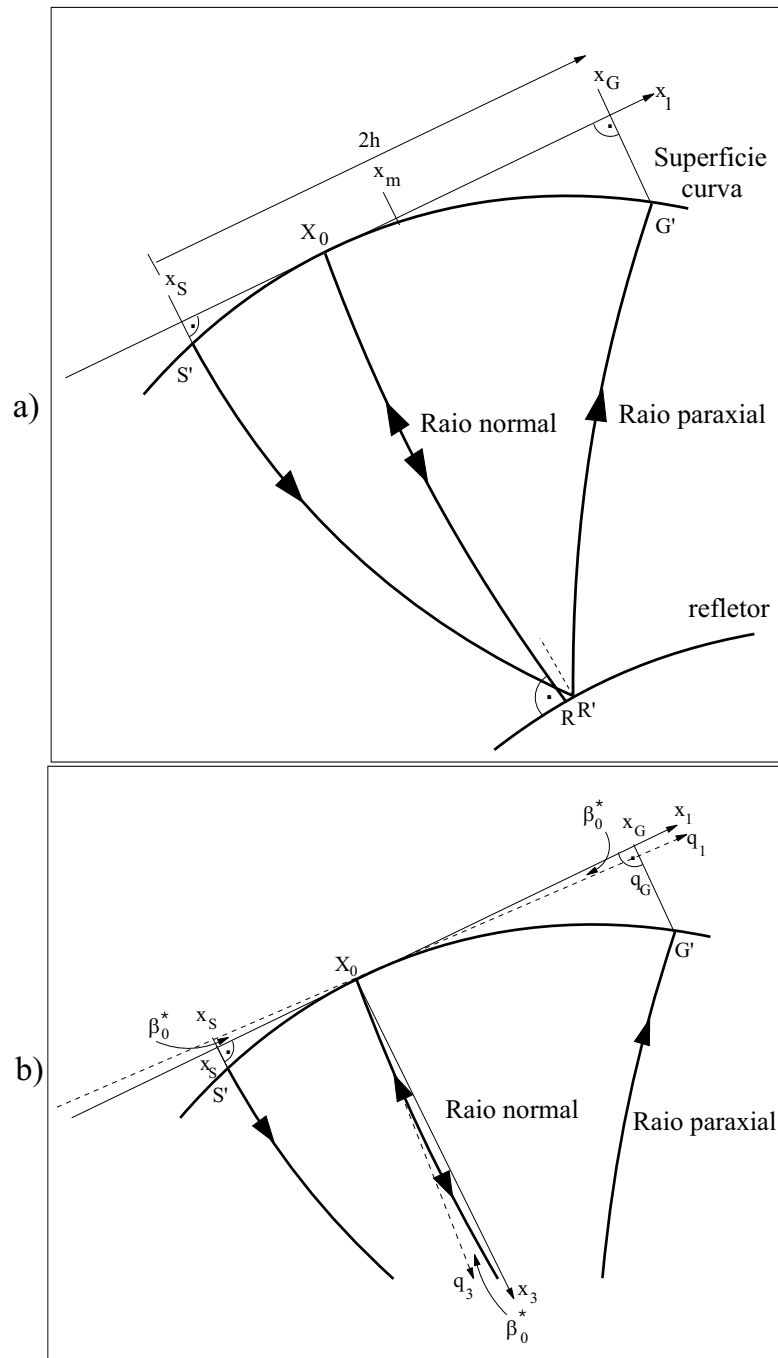


Figura 4.1 - a) Diagrama para um raio paraxial na vizinhança de um raio de reflexão normal em um meio inhomôgeneo. b) Detalhe da Figura 4.1a mostrando os sistemas de coordenadas 2-D Cartesianas local (x_1, x_3) (linhas contínuas) e centrado no raio (q_1, q_3) (linhas tracejadas) em X_0 .

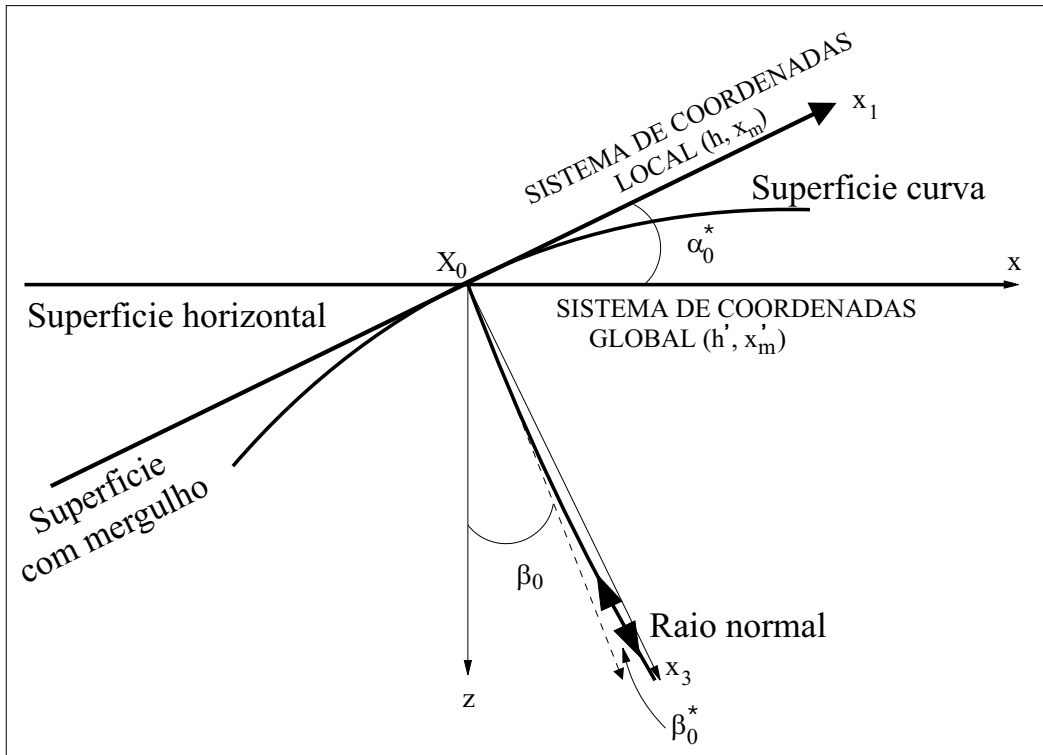


Figura 4.2 - Relação entre as superfícies de medição curva, com mergulho e horizontal. São apresentados os sistemas de coordenadas 2-D Cartesianas local (x_1, x_3) e global (x, z).

As componentes A e B são dadas por (ver APÊNDICE A)

$$A = \frac{1}{K_{NIP} - K_N} \left(K_{NIP} + K_N - \frac{2 K_0}{\cos \beta_0^*} \right), \quad (4.4)$$

$$B = \frac{1}{K_{NIP} - K_N} \left(\frac{2 v_1}{\cos^2 \beta_0^*} \right), \quad (4.5)$$

sendo K_0 a curvatura da linha sísmica sobre a superfície de medição curva no ponto X_0 . Esta curvatura é positiva se a superfície de medição curva está abaixo da tangente em X_0 , e negativa se esta linha está acima da tangente. K_{NIP} e K_N são as curvaturas das ondas NIP e N que emergem em X_0 , (Hubral, 1983). As curvaturas de frente de onda K_{NIP} e K_N , assim como β_0^* , podem ser automaticamente estimadas a partir dos dados sísmicos.

A matriz propagadora \mathbf{T} para o raio central (normal) é dada por

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \quad (4.6)$$

tem a propriedade simplética (Červený, 2001). Isto implica que a inversa da matriz \mathbf{T} é dada por

$$\mathbf{T}^{-1} = \begin{pmatrix} D & -B \\ -C & A \end{pmatrix}. \quad (4.7)$$

A identidade $\mathbf{T}\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{I}$, onde \mathbf{I} é a matriz identidade, fornece a condição de simplecticidade na forma, $AD - BC = 1$.

Mudando as posições da fonte e o receptor, se obtém a matriz propagadora \mathbf{T}^* (Hubral, 1983),

$$\mathbf{T}^* = \begin{pmatrix} D & B \\ C & A \end{pmatrix}. \quad (4.8)$$

Para um raio normal, se tem $\mathbf{T} = \mathbf{T}^*$, uma vez que a fonte e o receptor serem coincidentes na posição. Portanto, segundo esta igualdade, tem-se $A = D$ para o raio normal. O elemento C pode ser, então, expresso em termos de A e B . Só A e B aparecem na equação (4.1), que pode ainda ser ajustada para as configurações CMP, CS, e ZO.

Inserindo as equações (4.2, (4.4 e (4.5) na equação (4.1) se obtém (Chira e Hubral, 2003)

$$\begin{aligned} t^2(x_m, h) &= \left(t_0 + 2 \frac{\text{sen}\beta_0^*}{v_1} x_m \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1} \left(K_N \cos^2 \beta_0^* - \cos \beta_0^* K_0 \right) x_m^2 \\ &\quad + \frac{2 t_0}{v_1} \left(K_{NIP} \cos^2 \beta_0^* - \cos \beta_0^* K_0 \right) h^2. \end{aligned} \quad (4.9)$$

A equação acima se reduz ao caso de uma linha sísmica plana considerando-se $K_0 = 0$ (ver APÊNDICE B). Neste caso $x_0 = 0$ coincide com a origem do sistema de Coordenadas locais.

Para o caso do sistema de coordenadas Cartesianas global, projetam-se as coordenadas locais neste sistema (Figura 4.2), obtendo-se as seguintes relações

$$h = \frac{h'}{\cos \alpha_0^*}, \quad x_m = \frac{x_m'}{\cos \alpha_0^*}, \quad (4.10)$$

sendo x_m' e h' as coordenadas projetadas no sistema de coordenadas global das coordenadas locais x_m e h . α_0^* é o ângulo de mergulho da tangente à superfície de medição curva no ponto X_0 (Figura 4.2). Inserindo as relações (4.10) na equação (4.9) obtém-se

$$\begin{aligned} t^2(x_m', h') &= \left(t_0 + 2 \frac{\text{sen}\beta_0^*}{v_1 \cos \alpha_0^*} (x_m') \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1 \cos^2 \alpha_0^*} \left(K_N \cos^2 \beta_0^* - \cos \beta_0^* K_0 \right) (x_m')^2 \\ &\quad + \frac{2 t_0}{v_1 \cos^2 \alpha_0^*} \left(K_{NIP} \cos^2 \beta_0^* - \cos \beta_0^* K_0 \right) (h')^2. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Chira et al. (2001) apresentaram a função tempo de trânsito CRS 2-D para o caso de uma superfície de medição curva e gradiente de velocidade não-nulo (ver APÊNDICE C).

Dado (a) o ponto $P_0(x_0 = x_s = x_g = 0, t_0)$, com x_0 sendo a posição do raio emergindo em X_0 (Figura 4.3), (b) a curvatura K_0 e (c) a velocidade v_1 , então o triplo $(\beta_0^*, K_{NIP}, K_N)$ são os três parâmetros a serem determinados a partir dos dados sísmicos de cobertura múltipla. Uma vez encontrados eles, são usados para resolver uma variedade de problemas de inversão (Hubral, 1999). A seguir apresenta-se três reduções particulares da equação (4.9), que são parte da estratégia de busca para os três parâmetros cinemáticos em P_0 .

1) Configuração CMP

Esta configuração é caracterizada por $x_m = 0$, e a equação (4.9) se reduz a

$$t_{CMP}^2(h) = t_0^2 + \frac{2 t_0}{v_1} \left(K_{NIP} \cos^2 \beta_0^* - \cos \beta_0^* K_0 \right) h^2. \quad (4.12)$$

A expressão acima é comumente escrita na forma (Shah, 1973)

$$t_{CMP}^2(h) = t_0^2 + \frac{4 h^2}{v_{NMO}^2}, \quad (4.13)$$

onde a velocidade NMO é dada por

$$v_{NMO}^2 = \frac{2 v_1}{t_0 (K_{NIP} \cos^2 \beta_0^* - \cos \beta_0^* K_0)}. \quad (4.14)$$

Considerando um modelo estratificado 1-D com uma superfície de medição plana horizontal, sendo o raio normal, vertical e reto, e o ângulo de incidência $\beta_0^* = 0$, então esta expressão se reduz para $v_{NMO} = v_{RMS}$, onde v_{RMS} é a velocidade RMS (Dix, 1955).

2) Configuração CS

Esta configuração se caracteriza por $x_s = 0$, a equação (4.9) se reduz a

$$t_{CS}^2(x_G) = \left(t_0 + \frac{\text{sen} \beta_0^*}{v_1} x_G \right)^2 + \frac{t_0}{2 v_1} \left(K_N \cos^2 \beta_0^* + K_{NIP} \cos^2 \beta_0^* - 2 \cos \beta_0^* K_0 \right) x_G^2. \quad (4.15)$$

3) Configuração ZO

Para este caso, $h = 0$, considerando os pares fonte-receptor coincidentes na superfície de medição e aproximando-se as reflexões ZO na vizinhança de X_0 . A equação (4.9) se reduz a

$$t_{ZO}^2(x_m) = \left(t_0 + 2 \frac{\text{sen} \beta_0^*}{v_1} x_m \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1} \left(K_N \cos^2 \beta_0^* - \cos \beta_0^* K_0 \right) x_m^2. \quad (4.16)$$

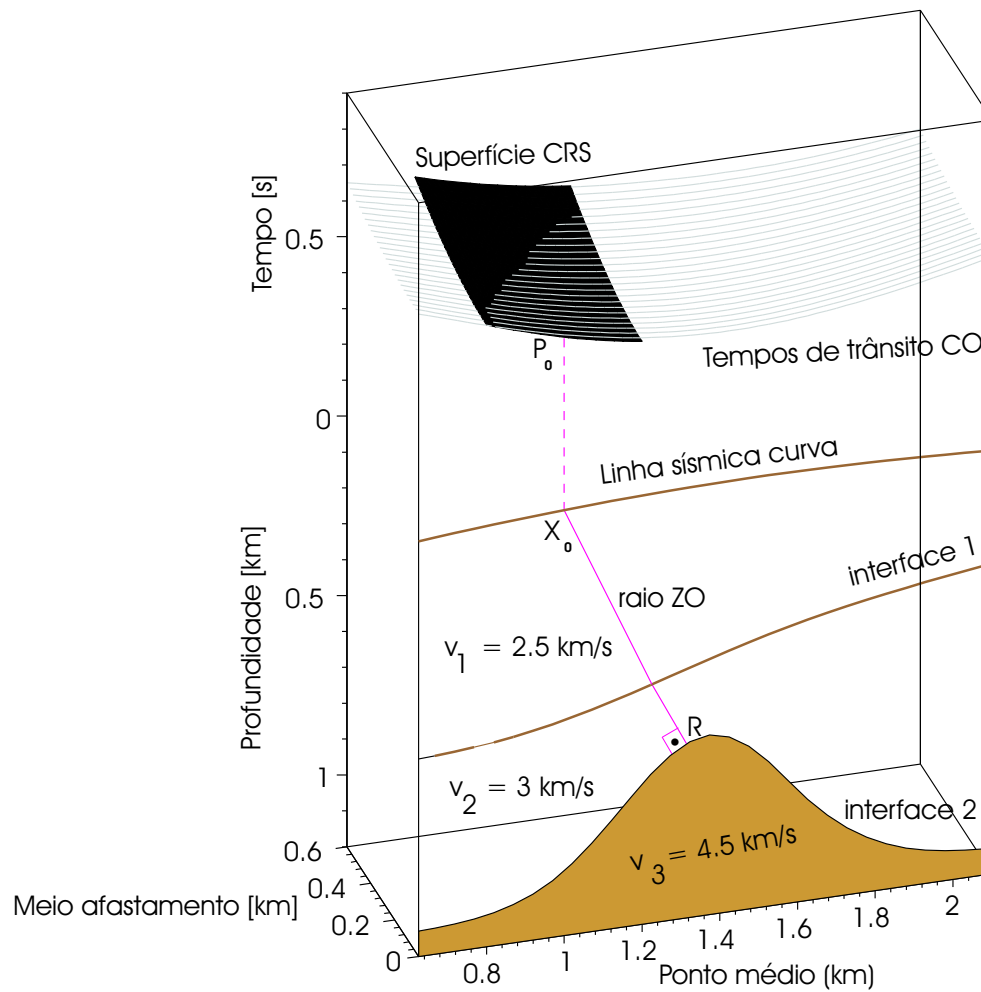


Figura 4.3 - Parte inferior (frontal): Um meio 2-D com duas camadas sobre um semi-espaço. Parte superior: Curvas de tempo de trânsito CO dos dados pré-empilhados. A superfície superior de cor preta corresponde ao operador CRS para uma linha de medição curva.

As três equações (4.12, 4.15, 4.16) são consideradas na generalização da estratégia de empilhamento CRS 2-D segundo Mann et al. (1999) e Jäger et al., (2001), considerando uma superfície de medição suavemente curva.

5 - APLICAÇÃO DO MÉTODO CRS 2-D COM TOPOGRAFIA

Neste capítulo são apresentados resultados da aplicação do método de empilhamento CRS em dados sintéticos para uma superfície de medição curva. A seguir, foi realizada uma análise da sensibilidade da curvatura da superfície de medição na função tempo de trânsito de empilhamento CRS. Iniciamos com a função-objeto do empilhamento CRS usada neste processo, o semblance.

5.1 FÓRMULAS DO PROCESSO DE EMPILHAMENTO CRS

Seguindo as linhas de Mann et al. (2000), considera-se o caso particular $K_N \equiv K_{NIP}$ na equação (4.11) e obtém-se

$$t^2(x_m', h') = \left(t_0 + 2 \frac{\sin \beta_0^*}{v_1 \cos \alpha_0^*} (x_m') \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1 \cos^2 \alpha_0^*} \left(K_{NIP} \cos^2 \beta_0^* - \cos \beta_0^* K_0 \right) \left((x_m')^2 + (h')^2 \right). \quad (5.1)$$

A equação (5.1) depende apenas de dois parâmetros (K_{NIP} , β_0^*) associados à onda NIP. Esta condição pode ser interpretada como os tempos de trânsito para difrações para simular uma seção sísmica ZO.

A condição $h' = 0$ na equação (4.11) se reduz para

$$t^2(x_m') = \left(t_0 + 2 \frac{\sin \beta_0^*}{v_1 \cos \alpha_0^*} (x_m') \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1 \cos^2 \alpha_0^*} \left(K_N \cos^2 \beta_0^* - \cos \beta_0^* K_0 \right) (x_m')^2, \quad (5.2)$$

que depende da dupla (K_N , β_0^*) e aproxima aos tempos de trânsito ZO das reflexões normais.

5.2 ESTRATÉGIA DE BUSCA DOS PARÂMETROS CRS

Neste trabalho de Tese, o método CRS 2-D para o caso de superfícies de medição curva foi aplicado a dados sintéticos, seguindo a estratégia de empilhamento CRS apresentada por Garabito (2001) e Garabito et al. (2001a,b).

Esta estratégia de empilhamento CRS é dividida em três etapas, e utiliza, do mesmo modo que Jäger et al. (2001), o semblance como função objeto. Estas três etapas são descritas abaixo, e podem ser visualizadas através do fluxograma da Figura (5.1).

Etapa I:

Nesta primeira etapa, para cada ponto imagem P_0 da seção sísmica ZO a ser simulada são determinados o par de parâmetros (R_{NIP}, β_0^*) , segundo a condição $R_N \equiv R_{NIP}$, mediante uma busca bidimensional nos dados de cobertura múltipla aplicando o algoritmo de otimização SA (Corona et al., 1987). A função objeto utilizada neste problema inverso é o semblance que usa a equação (5.1) para calcular as superfícies de empilhamento testadas. Esta etapa considera que os parâmetros iniciais sejam gerados aleatoriamente, mas dentro do intervalo estabelecido para cada parâmetro: $-\pi/2 < \beta_0^* < \pi/2$, $-\infty < R_{NIP} < \infty$.

Etapa II:

Na segunda etapa, para cada ponto ZO, P_0 , também é determinado o terceiro parâmetro R_N mediante uma busca unidimensional na seção ZO resultante da primeira etapa. O intervalo para este parâmetro é $-\infty < R_N < \infty$. Os valores dos parâmetros estimados na primeira etapa são usados para fixar β_0^* na equação (5.2) utilizada nesta etapa. O problema inverso é formulado para estimar o melhor R_N com o valor máximo do semblance medido ao longo das curvas de tempos de trânsito na seção ZO. Esta etapa também usa o algoritmo de otimização local SA.

Etapa III:

Os resultados das etapas I e II são considerados como uma boa aproximação para os parâmetros de empilhamento. Estes resultados serão usados como aproximações iniciais nesta etapa. Isto significa que para cada ponto P_0 , e considerando os dados de cobertura múltipla incluídos na superfície de empilhamento (4.11) e faz-se uma nova busca para os três parâmetros simultaneamente. O problema inverso é formulado para estimar o melhor trio de parâmetros $(\beta_0^*, R_{NIP}, R_N)$ com o valor máximo de semblance. Nesta etapa usa-se o algoritmo de otimização local denominado VM (Bard, 1974; Gill et al, 1981).

5.3 FUNÇÃO-OBJETO DO EMPILHAMENTO CRS

Para a estimativa do trio de parâmetros $(\beta_0^*, K_{NIP}, K_N)$ a partir dos dados sísmicos de cobertura múltipla, utiliza-se como função-objeto um critério de coerência aplicado ao longo das superfícies de empilhamento testadas, que neste caso é o semblance (Taner e Koehler, 1969) dado por

$$S = \frac{1}{N} \frac{\sum_t \left(\sum_{i=1}^N f_{i,t(i)} \right)^2}{\sum_t \sum_{i=1}^N f_{i,t(i)}^2}. \quad (5.3)$$

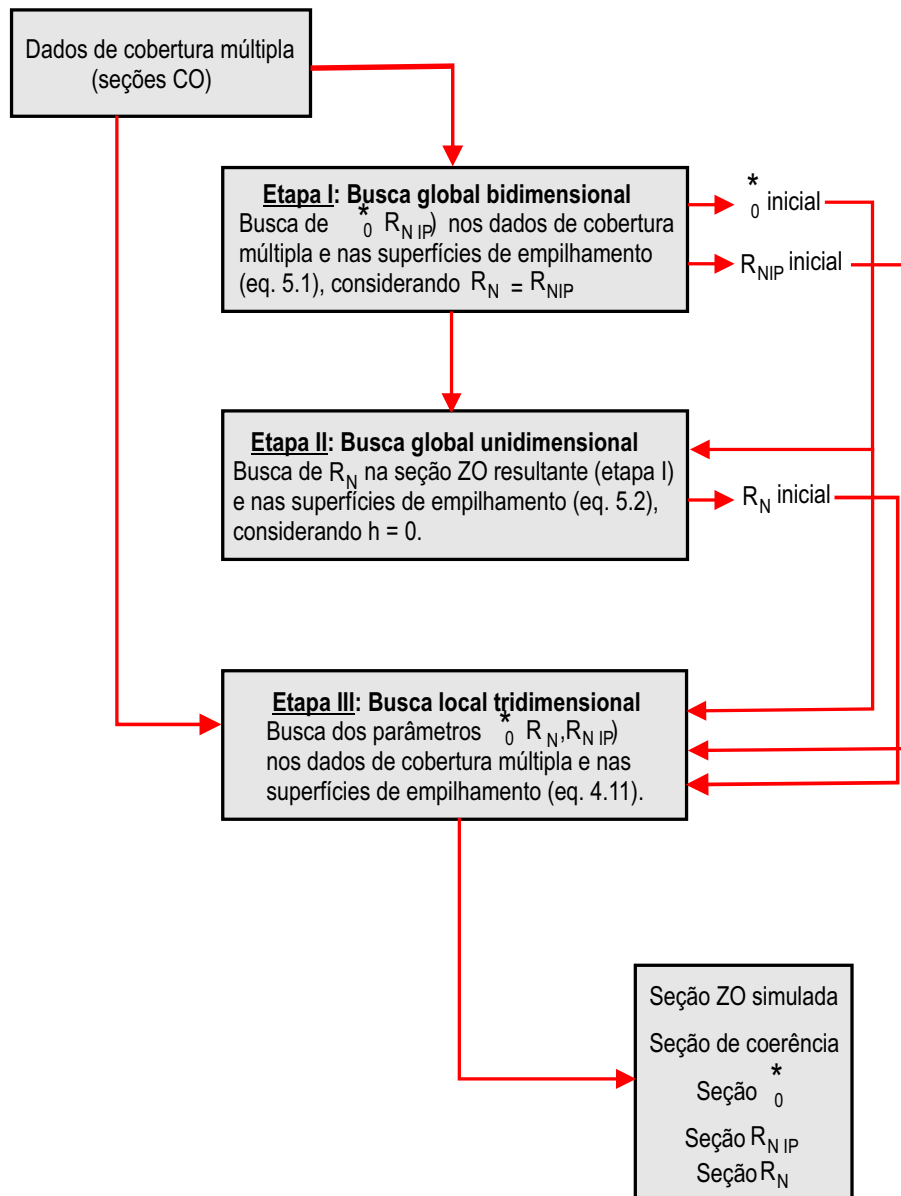


Figura 5.1 - Fluxograma computacional do processo de empilhamento CRS. Obtêm-se como resultados finais a seção ZO simulada e sua respectiva seção de coerência e as seções dos parâmetros $(\beta_0^*, R_{NIP}, R_N)$ (modificado de Garabito, 2001).

onde $f_{i,t(i)}$ é a amplitude do i -ésimo traço no tempo $t(i)$, N é o número de traços. \sum_t implica em que a somatória é feita numa janela temporal em relação a trajetória de empilhamento central. O semblance representa uma medida de coerência normalizada com valores compreendidos entre 0 e 1. Este valor pode ser próximo da unidade, no caso de todos os valores do sinal sísmico serem idênticos. Para o problema de minimização, faz-se o valor da coerência negativo.

A janela da coerência vai depender do comprimento de onda no domínio do tempo e do número de traços no domínio do espaço.

5.4 RESULTADOS COM DADOS SINTÉTICOS

A Figura 5.2 é um modelo acústico simples composto por quatro camadas homogêneas sobre um semi-espaço, separadas por interfaces curvas e contínuas. sendo considerado um gradiente de velocidade zero. Usando o software de traçamento de raios SEIS88 (Červený e Psěncik, 1988) foram gerados os dados de cobertura múltipla contendo apenas reflexões primárias para as quatro interfaces.

O conjunto de dados consiste de um total de 201 seções CS, cada uma com 72 receptores separados por um espaçamento uniforme de 50 m. O afastamento mínimo fonte-receptor é de 50 m. O sinal da fonte é a função Gabor com uma frequência dominante de 40 Hz, tendo os traços sísmicos um intervalo de amostragem de 4 ms. Isto foi feito com a finalidade de mostrar a capacidade de supressão de ruído pelo método CRS, foi considerado ruído aleatório com distribuição uniforme numa razão sinal/ruído = 10. Um exemplo de parte dos dados é apresentado na Figura 5.3 que é uma seção CS.

A seção ZO modelada com ruído (razão sinal/ruído = 10) é apresentada na Figura 5.4. A Figura 5.5 mostra a seção ZO simulada final do empilhamento CRS com superfície de medição curva. Comparando a seção de afastamento-nulo por modelamento direto (Figura 5.4) e a seção empilhada final (Figura 5.5) observa-se uma boa recuperação das reflexões primárias, e também coincidentes nos tempos de trânsito. Mostra-se também nesta seção simulada um alto grau de supressão de ruído aleatório, devido a cobertura múltipla considerada no processo de empilhamento CRS.

A seção de coerência (semblance) referente ao empilhamento CRS final está na Figura 5.6. Nesta seção as reflexões primárias são definidas por diferentes valores de coerência, onde os baixos valores referem-se a eventos com tempos de trânsito maiores. Estas diferenças nos valores da coerência é devido a utilização de dados sísmicos não normalizados.

As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 são as seções dos ângulo de emergência e os raios de curvatura das ondas NIP e N recuperados com a aplicação do empilhamento CRS.

Os valores exatos dos três parâmetros da função de tempo de trânsito do empilhamento CRS foram calculados por modelamento direto. Estes valores exatos foram comparados com seus correspondentes obtidos através do empilhamento CRS. Os valores estimados correspondem às posições das amplitudes máximas de cada sinal sísmico.

A Figura 5.10 mostra os valores do ângulo β_0^* determinados por otimização local (curvas de pontos de cor vermelho) e por modelamento direto (curvas de pontos de cor azul) para cada interface do modelo da Figura 5.2. Nesta comparação observa-se que ambos valores (diretos e otimizados) são muito próximos, o que indica que este parâmetro é bem determinado.

A Figura 5.11 mostra os valores dos raios de curvatura $R_{NIP} = 1/K_{NIP}$ determinados pelo empilhamento CRS (curvas de pontos de cor vermelho) e por modelamento direto (curvas de pontos de cor azul) para cada interface separadamente, do modelo da Figura 5.2. Observa-se uma moderada recuperação do parâmetro na primeira e segunda interfaces. Nas interfaces restantes, a recuperação é imprecisa, principalmente na parte do modelo (5.2) onde as variações topográficas não são suaves (aproximadamente na metade esquerda do modelo). Este problema acontece devido a mudanças de comportamento brusco na função curvatura nos pontos topográficos de maiores curvaturas no modelo (Figura 5.12). No primeiro refletor, K_{NIP} tem predominância em relação a curvatura K_0 (Figuras 5.13). Nos refletores mais profundos, i.e. no quarto refletor, existe predominância da curvatura K_0 em relação ao K_{NIP} (Figuras 5.14). Este problema na imprecisão para recuperar K_{NIP} , também se observa com o aumento da profundidade.

O mesmo problema com K_{NIP} também acontece com a recuperação do parâmetro $R_N = 1/K_N$ (Figura 5.15). Similarmente, no primeiro refletor, K_N tem predominância sobre K_0 (Figuras 5.16). No quarto refletor, acontece o contrário, ou seja predomina K_0 sobre K_N (Figuras 5.17).

O mesmo problema na recuperação do parâmetro R_{NIP} acontece com o parâmetro R_N (Figura 5.15). Outro fato que estaria contribuindo neste problema, é que R_N é parâmetro mais pobremente determinado em relação aos outros parâmetros (Chira, 2000).

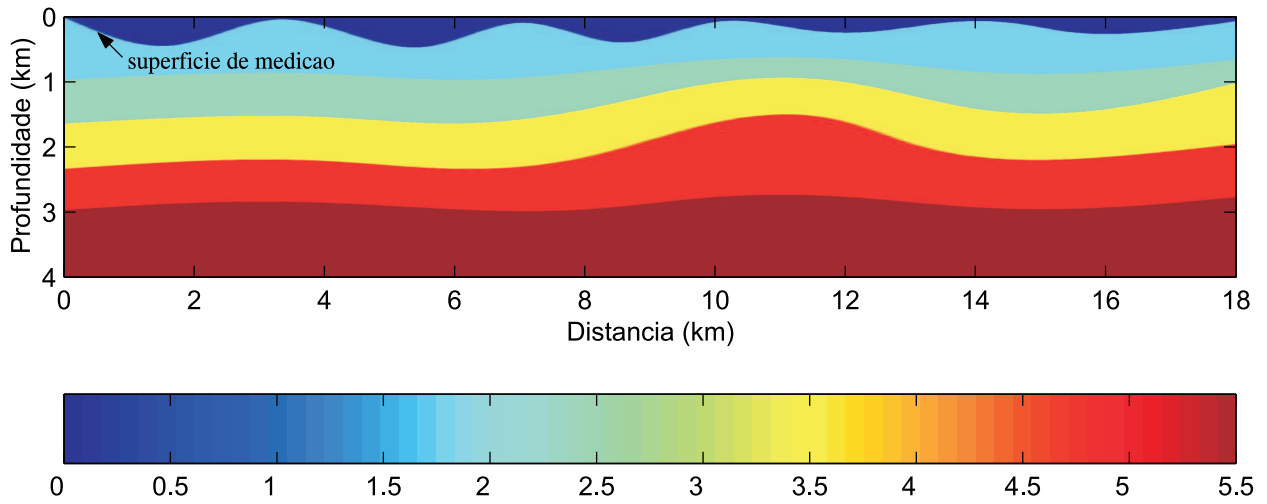


Figura 5.2 - Modelo 2-D constituído por quatro camadas sobre um semi-espaço. A superfície de medição é curva. As velocidades intervalares desde a camada superior até a inferior são 1.750 km/s, 2.400 km/s, 3.500 km/s, 4.650 km/s e 5.500 km/s para o semi-espaço.

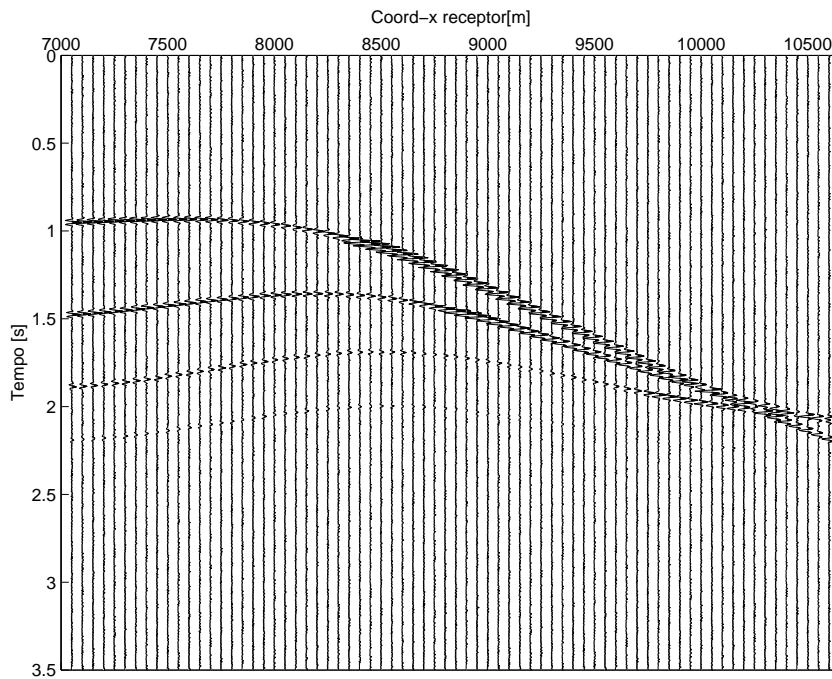


Figura 5.3 - Exemplo da seção CS dos dados de cobertura múltipla do modelo da Figura 5.2. A razão sinal/ruído é 10.

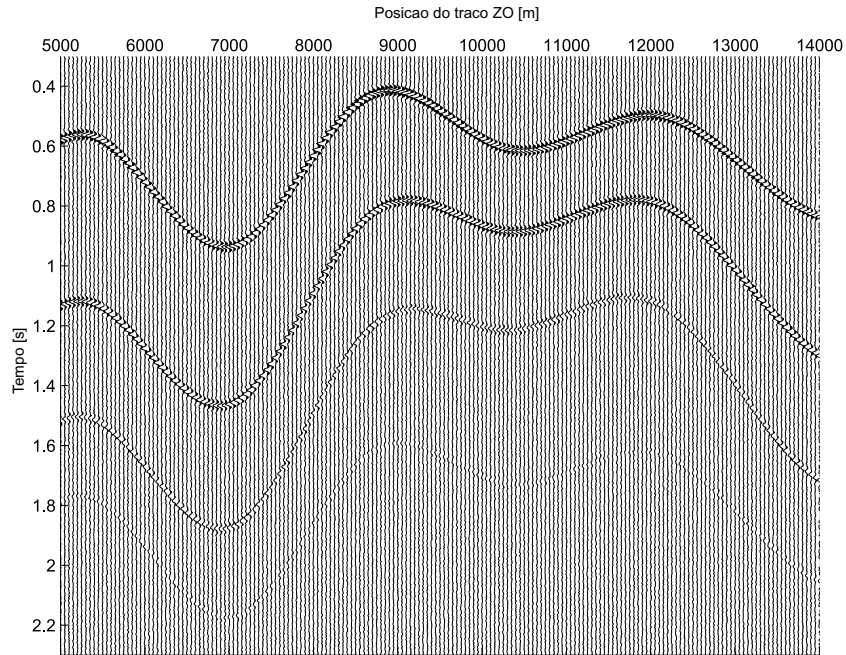


Figura 5.4 - Seção ZO obtida por modelamento direto com ruído (razão sinal/ruído = 10), composta por reflexões primárias correspondendo ao modelo sintético da Figura 5.2.

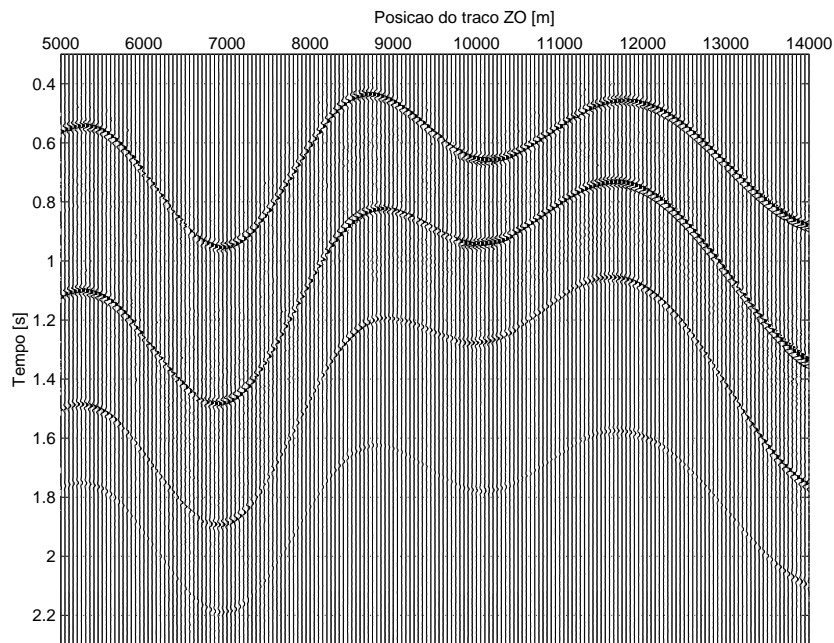


Figura 5.5 - Seção ZO simulada com a função tempo de trânsito do empilhamento CRS dada pela fórmula (4.11), para uma superfície de medição curva, e definido pelos parâmetros $(\beta_0^*, R_{NIP}, R_N)$.

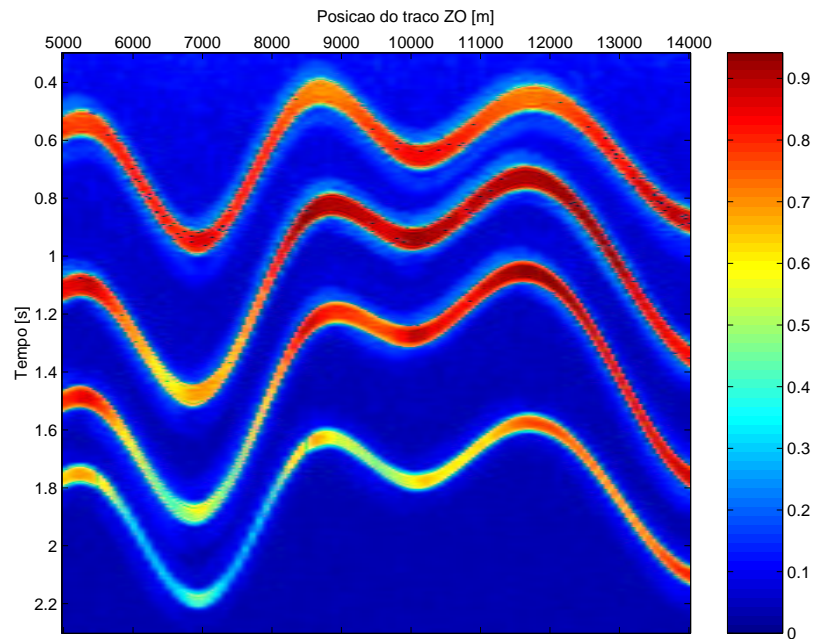


Figura 5.6 - Seção de coerência da seção ZO simulada da Figura 5.5. Os valores de coerência correspondem aos máximos globais da função de coerência.

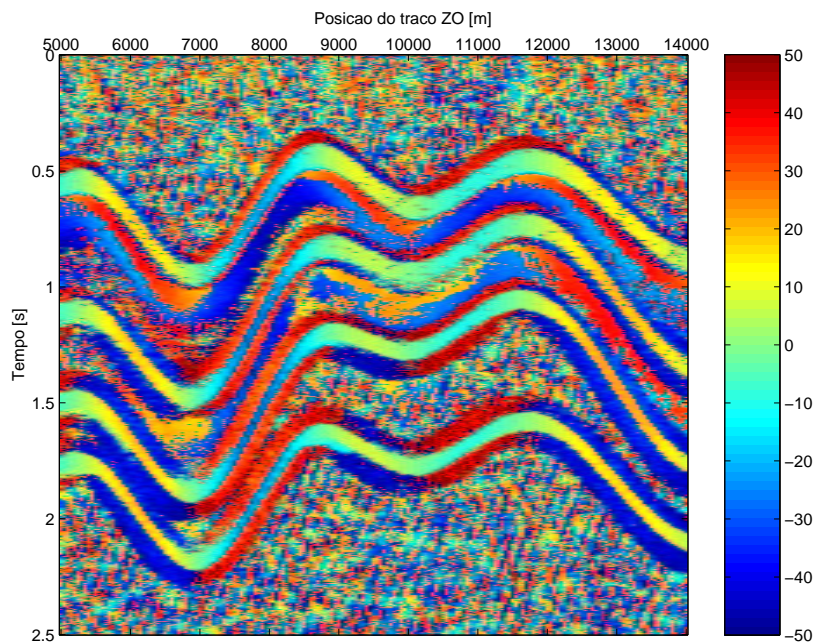


Figura 5.7 - Seção de ângulos de emergência de raios normais de reflexão, β_0^* , obtidos a partir do processo de otimização do método CRS, considerando uma superfície de medição curva.

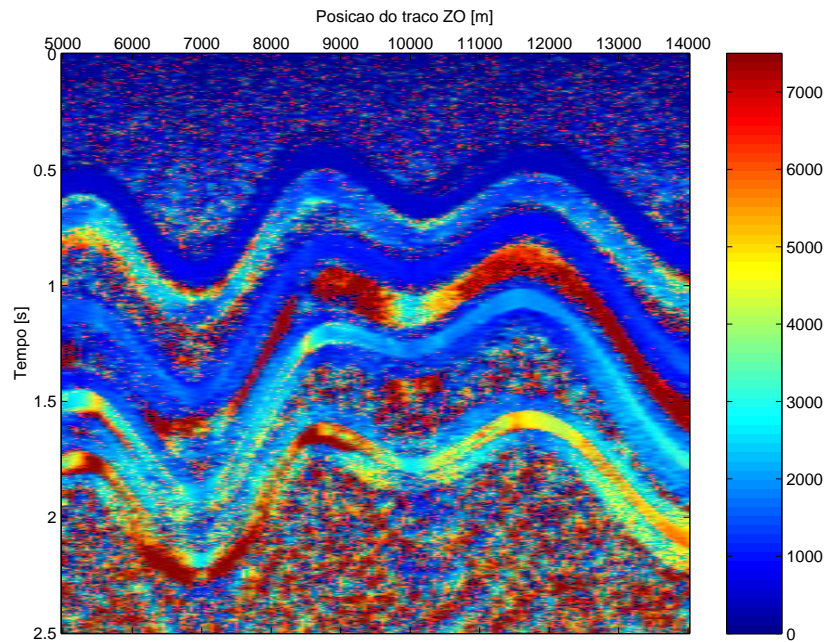


Figura 5.8 - Seção dos raios de curvatura da onda NIP, R_{NIP} , obtidos a partir do processo de otimização do método CRS, considerando uma superfície de medição curva.

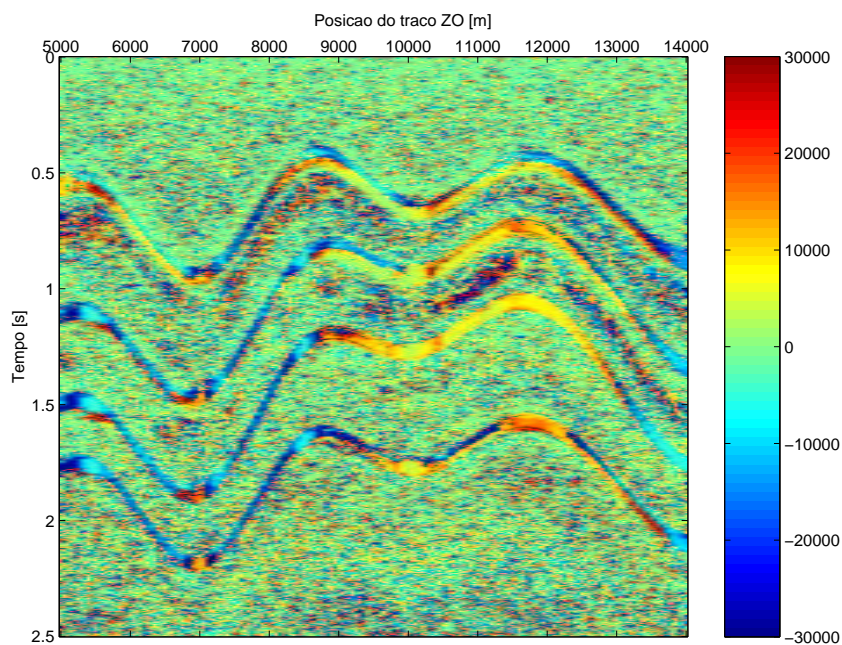


Figura 5.9 - Seção dos raios de curvatura da onda N, R_N , obtidos a partir do processo de otimização do método CRS, considerando uma superfície de medição curva.

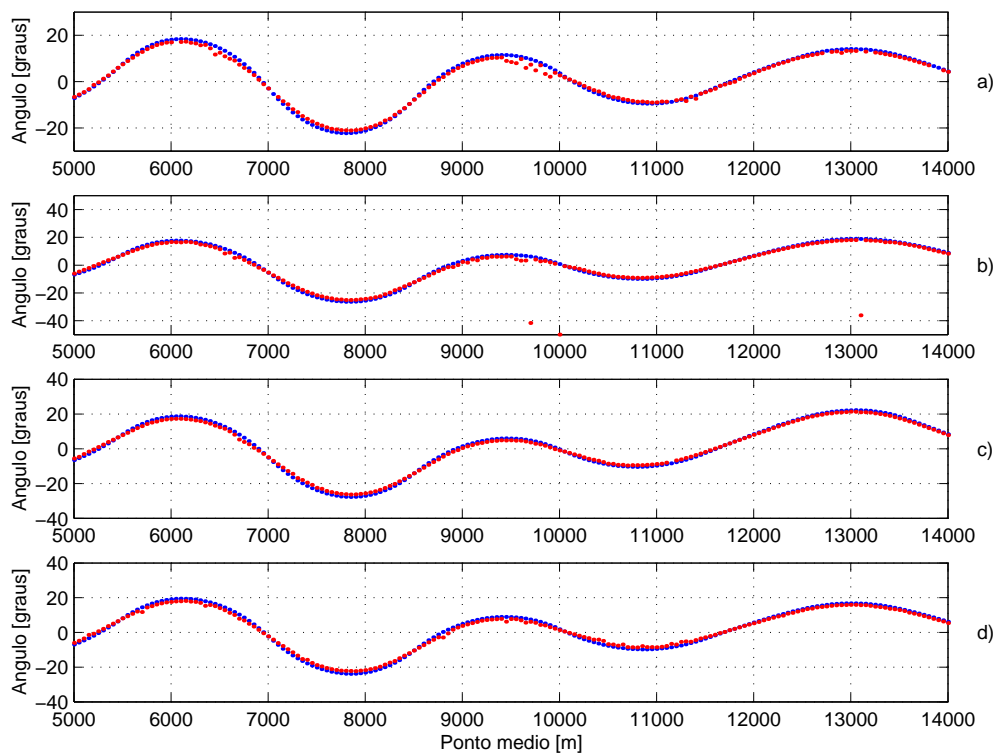


Figura 5.10 - Comparação do ângulo β_0^* estimado (curvas de pontos de cor vermelho) com os valores obtidos por modelamento direto (curvas de pontos de cor azul): a) Primeira interface, b) segunda interface, c) terceira interface e d) quarta interface do modelo da Figura 5.2.

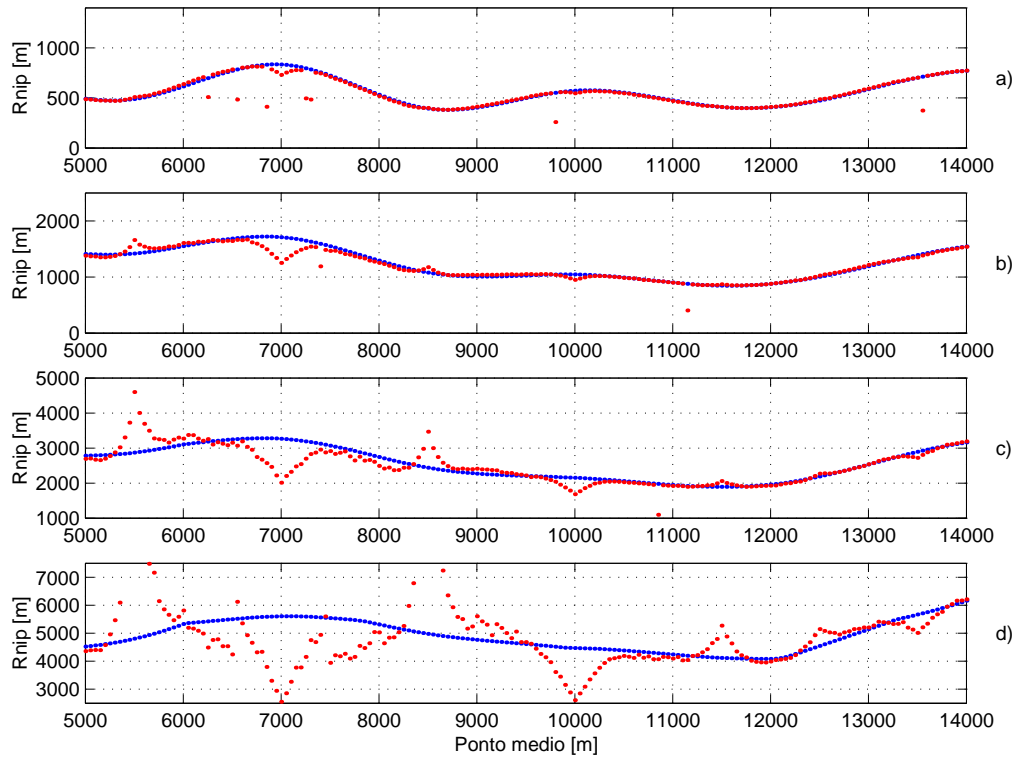


Figura 5.11 - Comparação do raio de curvatura R_{NIP} estimado (curvas de pontos de cor vermelho) com os valores exatos (curvas de pontos de cor azul): a) Primeira interface, b) segunda interface, c) terceira interface e d) quarta interface do modelo da Figura 5.2.

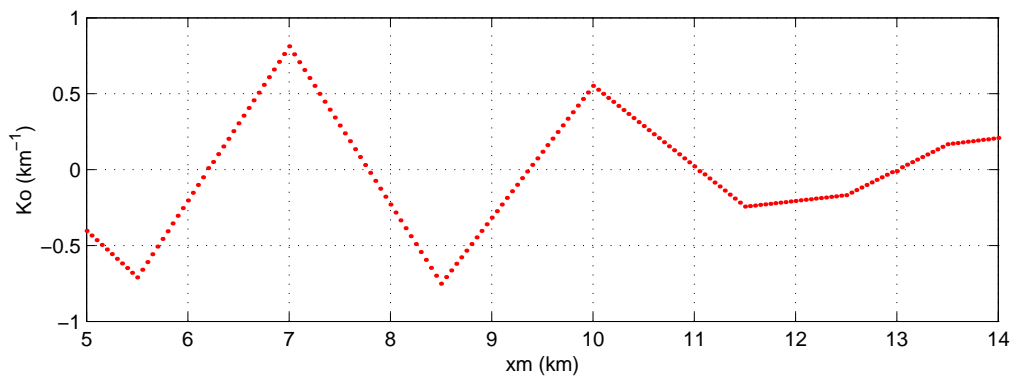


Figura 5.12 - Curvatura da superfície de medição ao longo da linha sísmica. Apresenta mudanças de comportamento bruscos no modelo da Figura 5.2.

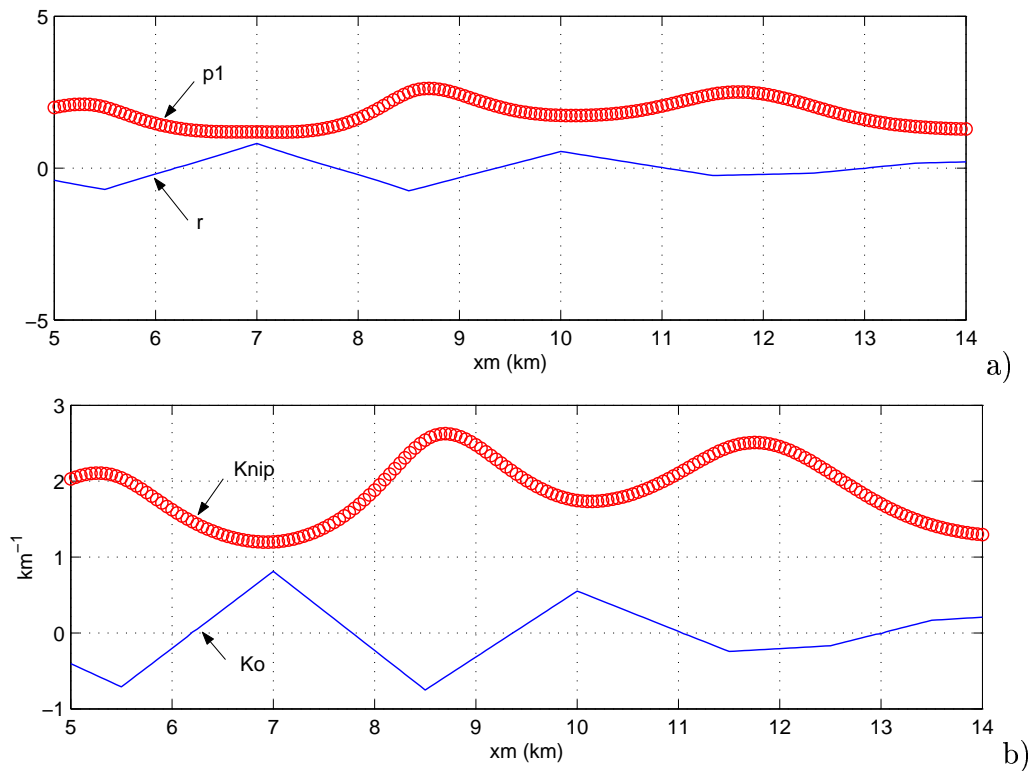


Figura 5.13 - a) É analisada a influência do fator $p1 = K_{NIP} * \cos^2 \beta_0^*$ em relação ao fator $r = \cos \beta_0^* * K_0$ (primeiro refletor), os quais formam parte da função tempo de trânsito CRS (4.11). Observa-se que não existe muita influência do fator r em relação ao fator $p1$. Portanto será mínima a influência da curvatura K_0 (que forma parte deste fator r), na recuperação do parâmetro K_{NIP} (que forma parte do fator $p1$). b) São comparados as curvaturas K_{NIP} (primeiro refletor) e K_0 . Observa-se também que a influência é mínima de K_0 em relação ao K_{NIP} .

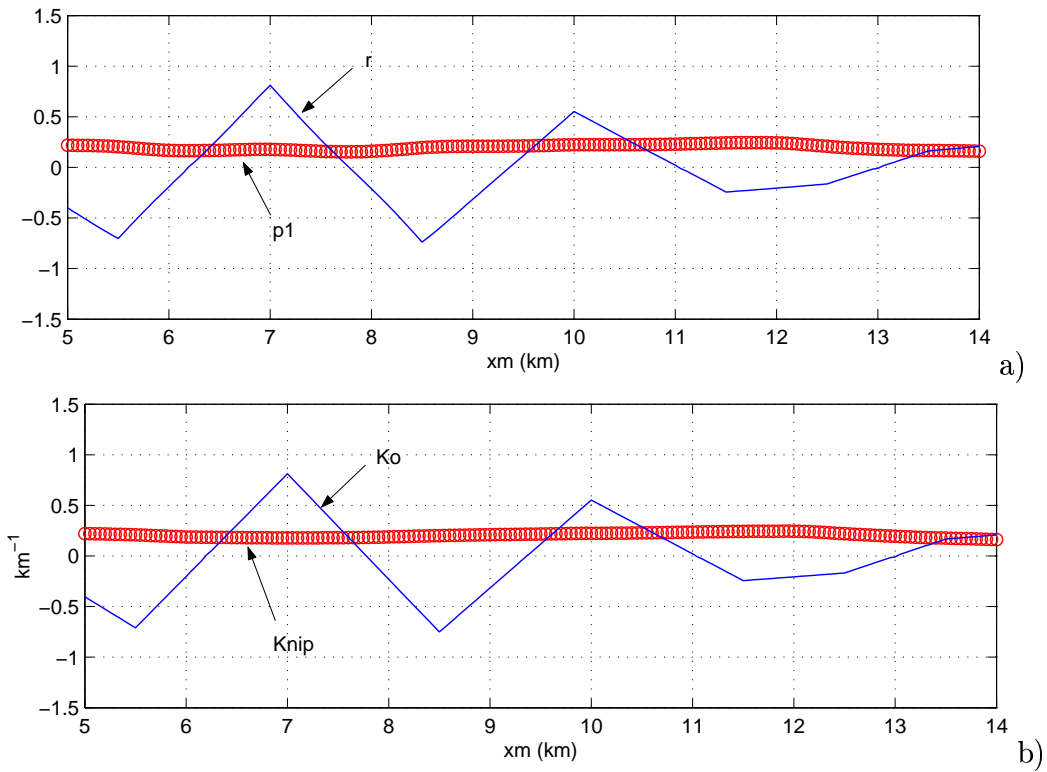


Figura 5.14 - a) É analisada a influência do fator $p1$ em relação ao fator r (quarto refletor), os quais formam parte da função tempo de trânsito CRS 4.11. Observa-se que existe muita influência do fator r em relação ao fator $p1$. Esta influência acontece nas partes onde há mudança brusca na curvatura da superfície de medição. Isto ocasiona perda na recuperação do parâmetro K_{NIP} . b) São comparados as curvaturas K_{NIP} (primeiro refletor) e K_0 . Observa-se também que a grande influência de K_0 em relação ao K_{NIP} .

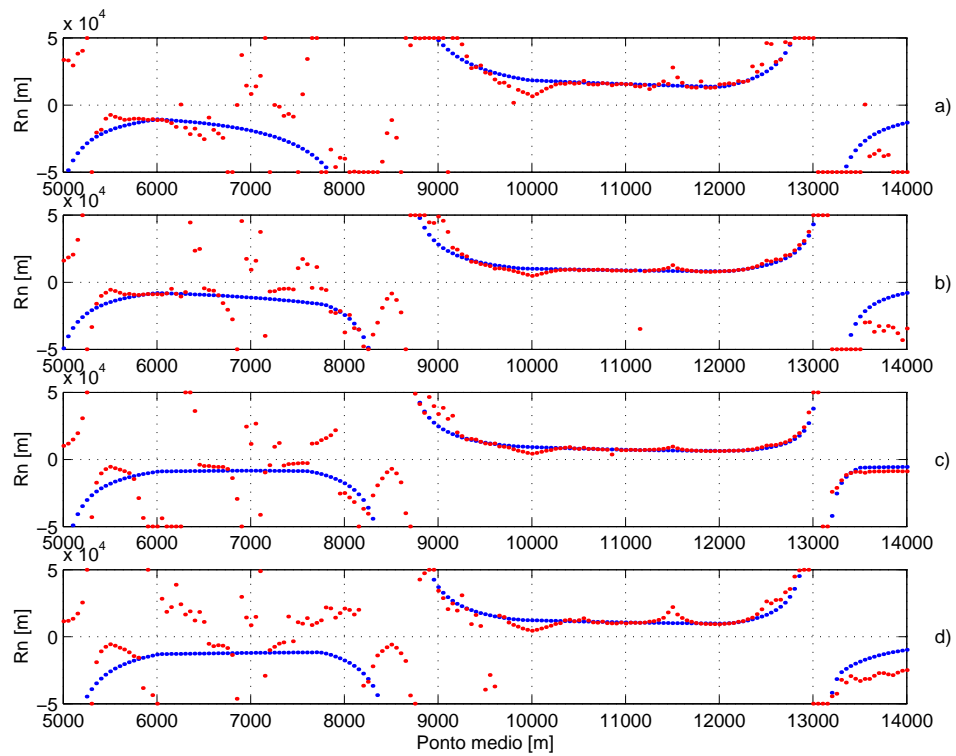


Figura 5.15 - Comparação do raio de curvatura R_N estimados (curvas de pontos de cor vermelho) com os valores obtidos por modelamento direto (curvas de pontos de cor azul): a) Primeira interface, b) segunda interface, c) terceira interface e d) quarta interface do modelo da Figura 5.2.

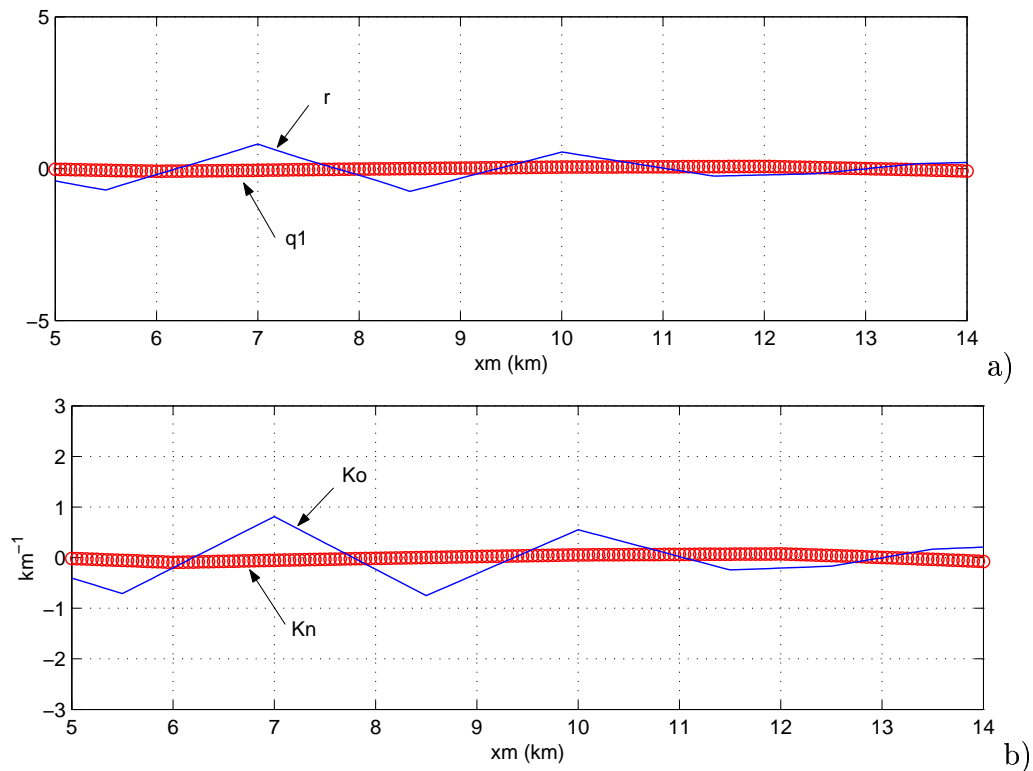


Figura 5.16 - a) É analisada a influência do fator $q1 = K_N * \cos^2 \beta_0^*$ em relação ao fator $r = \cos \beta_0^* * K_0$ (primeiro refletor), os quais formam parte da função tempo de trânsito CRS (4.11). Observa-se que não existe muita influência do fator r em relação ao fator $p1$. Portanto será mínima a influência da curvatura K_0 (que forma parte deste fator r), na recuperação do parâmetro K_N (que forma parte do fator $p1$). b) São comparados as curvaturas K_N (primeiro refletor) e K_0 . Observa-se também que a influência é mínima de K_0 em relação ao K_N .

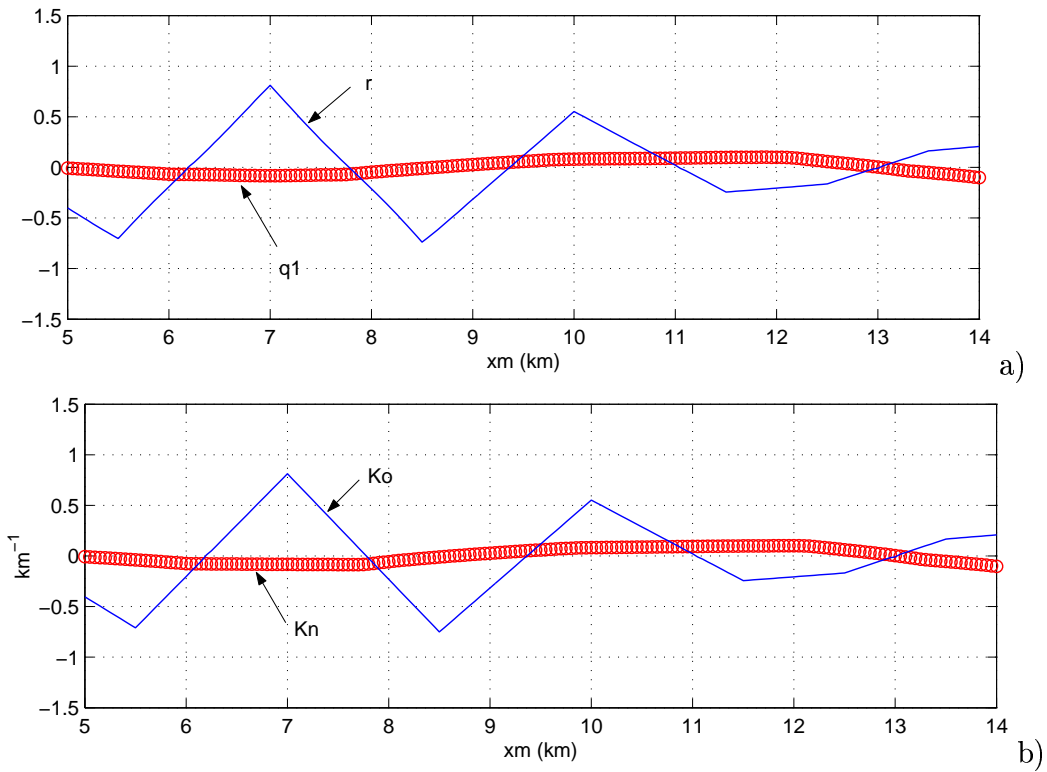


Figura 5.17 - a) É analisada a influência do fator q_1 em relação ao fator r (quarto refletor), os quais formam parte da função tempo de trânsito CRS 4.11. Observa-se que existe muita influência do fator r em relação ao fator q_1 . Esta influência acontece nas partes onde há mudança brusca na curvatura da superfície de medição. Isto ocasiona perda na recuperação do parâmetro K_N . b) São comparados as curvaturas K_N (primeiro refletor) e K_0 . Observa-se também que a grande influência de K_0 em relação ao K_N .

5.4.1 Análise da sensibilidade da função tempo de trânsito de empilhamento CRS em relação a curvatura K_0

Outra forma de analisar a sensibilidade da função tempo de trânsito CRS com relação a curvatura K_0 da superfície de medição é através da primeira derivada da função tempo de trânsito t (4.11) com relação ao parâmetro K_0 . Esta derivada é dada por

$$\frac{\partial t}{\partial K_0} = t^{-1} \left[\frac{-t_0 \cos \beta_0^*}{v_1 \cos^2 \alpha_0^*} \left((h')^2 + (x_m')^2 \right) \right]. \quad (5.4)$$

sendo t a função tempo de trânsito do empilhamento CRS, t_0 é o tempo duplo ao longo da trajetória do raio de reflexão normal. x_m' e h' são as coordenadas projetadas no sistema de coordenadas global das coordenadas locais x_m e h . β_0^* é o ângulo de emergência do raio normal sobre a superfície de medição curva com a normal à tangente no ponto X_0 (Figura 4.2). α_0^* é o ângulo de mergulho da tangente à superfície de medição curva no ponto X_0 . v_1 é a velocidade no ponto de emergência do raio de reflexão normal.

A equação (5.4) é apresentada para diversos meios-afastamentos h' , a qual foi aplicada para um modelo constituído por quatro camadas separadas por interfaces curvas sobre um semi-espaco, sendo a superfície de medição curva (Figura 5.2). Esta análise se refere ao terceiro refletor. Para esta aplicação foram considerados diversos pontos-médios na superfície de medição curva (Figuras 5.18 até 5.23). Nesta análise, pode-se concluir que para pequenos afastamentos e pontos médios próximos do ponto central X_0 , esta função t é menos sensível em relação a curvatura K_0 , no entanto, para maiores afastamentos e pontos-médios afastados do ponto X_0 e para valores de t_0 grandes em relação a t , a função t torna-se mais sensível (ver Figuras 5.18 até 5.23).

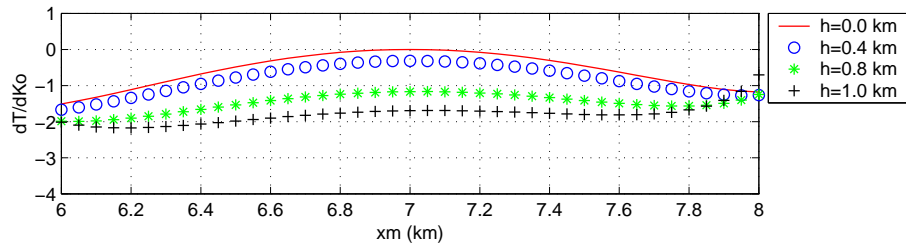


Figura 5.18 - Derivadas da função tempo de trânsito de empilhamento CRS em relação a K_0 avaliados no ponto médio $X_0 = 7.0 \text{ km}$.

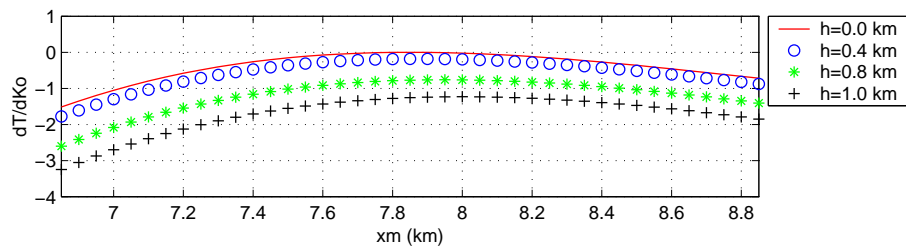


Figura 5.19 - Derivadas da função tempo de trânsito de empilhamento CRS em relação a K_0 avaliados no ponto médio $X_0 = 7.85 \text{ km}$.

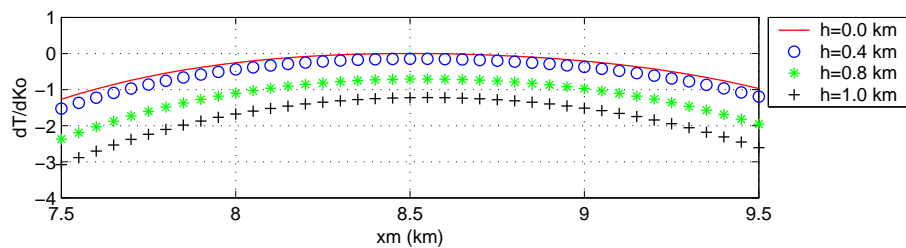


Figura 5.20 - Derivadas da função tempo de trânsito de empilhamento CRS em relação a K_0 avaliados no ponto médio $X_0 = 8.5 \text{ km}$.

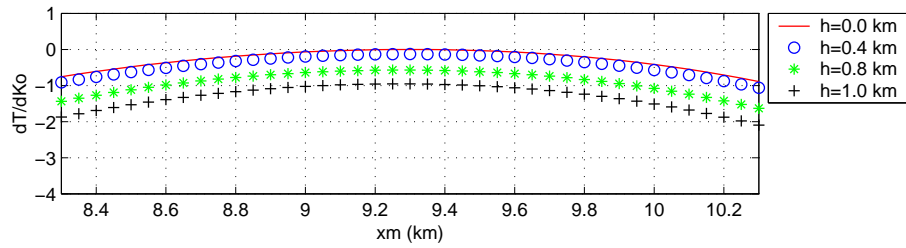


Figura 5.21 - Derivadas da função tempo de trânsito de empilhamento CRS em relação a K_0 avaliados no ponto médio $X_0 = 9.3 \text{ km}$.

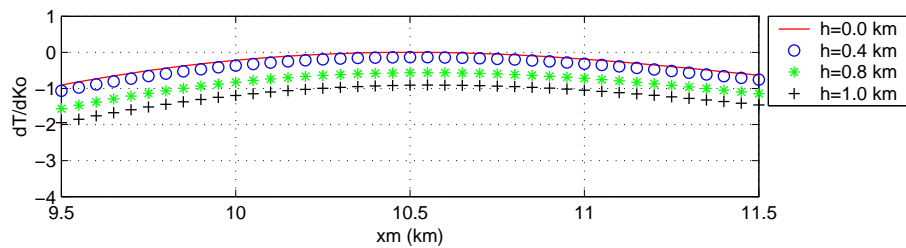


Figura 5.22 - Derivadas da função tempo de trânsito de empilhamento CRS em relação a K_0 avaliados no ponto médio $X_0 = 10.5 \text{ km}$.

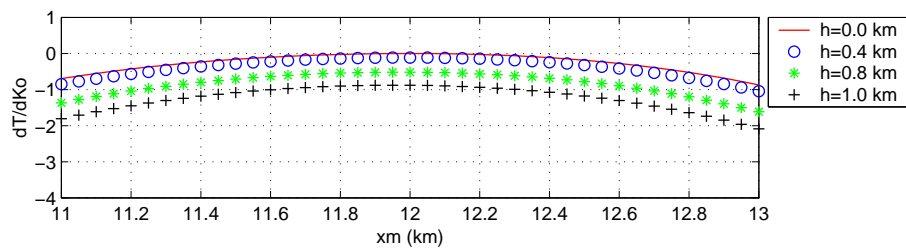


Figura 5.23 - Derivadas da função tempo de trânsito de empilhamento CRS em relação a K_0 avaliados no ponto médio $X_0 = 12 \text{ km}$.

6 - INVERSÃO 2-D AO MODELO DE VELOCIDADES

A solução do problema inverso consiste na determinação de parâmetros em um modelo geofísico a partir de dados de reflexão obtidos no levantamento sísmico. Isto se refere a determinar as propriedades geométricas do modelo e estimar um modelo de velocidades em profundidade.

No presente capítulo, será apresentada a teoria do método de inversão tipo Dix, dado uma aplicação do método para um modelo cuja superfície de medição é curva, chamando a atenção sobre a importância da curvatura e da tangente desta superfície de medição.

6.1 INVERSÃO TIPO DIX POR RETROPROPAGAÇÃO

O método tipo Dix por retropropagação determina um modelo estratificado de isovelocidades a partir de uma seção sísmica ZO. Este está ilustrado na Figura 6.1, onde a fonte S e um receptor G estão localizados simetricamente com respeito ao ponto-médio x_m , e separados por um afastamento $2h$, onde h é o meio-afastamento entre S e G . Os raios refletidos na última interface d_N podem ser traçados para diversos valores de h . O tempo de reflexão primária CDP, para o refletor mais superior é expresso por:

$$t_1^2(h) = t_{0,1}^2 + \frac{h^2}{v_1^2} = \frac{L^2}{v_1^2}, \quad (6.1)$$

sendo, $t_{0,1}$ o tempo-duplo ao longo de um raio normal na primeira camada. A velocidade v_1 corresponde à velocidade de propagação da onda na primeira camada e L é a distância ao longo da trajetória do raio refletido a partir da fonte S para o refletor e desde o refletor para o receptor G .

O gráfico h^2 versus t_1^2 permite obter uma linha reta de declividade de $1/v_1^2$ com a interseção no eixo do tempo em $t_{0,1}$. A velocidade RMS para a i -ésima reflexão primária do modelo (Figura 6.1) é expresso por

$$v_{RMS,i}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i}{t_{0,i}} = \frac{v_1^2 \Delta t_1 + v_2^2 \Delta t_2 + \dots + v_i^2 \Delta t_N}{t_{0,i}}, \quad \Delta t_i = t_{0,i} - t_{0,i-1}. \quad (6.2)$$

Para a primeira camada, segundo a equação (6.2), tem-se que $v_{RMS,i} = v_1$. Se as velocidades RMS e os tempos de trânsito duplo são conhecidos para o $(i-1)$ -ésimo e i -ésimo

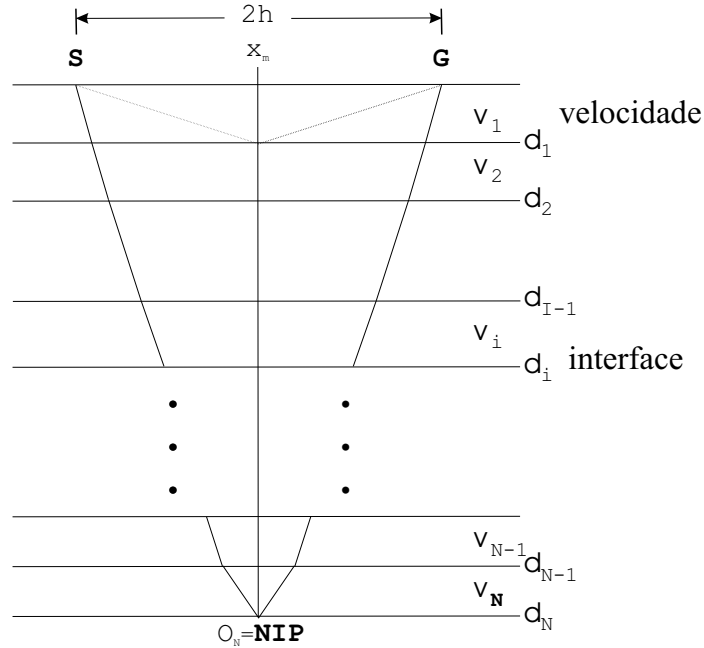


Figura 6.1 - Modelo 2-D estratificado de isovelocidades (adaptado de Hubral e Krey, 1980). A velocidade para cada camada é dada por v_i ($i = 1, \dots, N$), que estão separadas pelas interfaces d_i ($i = 1, \dots, N$). Observa-se o raio paraxial que se inicia na fonte S reflete no ponto O_N e retorna a superfície no receptor G . O raio normal se inicia no ponto x_m reflete no ponto O_N e retorna na superfície no mesmo ponto x_m .

refletor, a velocidade intervalar da camada i é dada por (Dix, 1955)

$$v_i = \left[\frac{v_{RMS,i}^2 t_{0,i} - v_{RMS,i-1}^2 t_{0,i-1}}{t_{0,i} - t_{0,i-1}} \right]^{1/2}. \quad (6.3)$$

Com as velocidades intervalares calculadas, a profundidade de cada ponto no refletor i são calculados recursivamente por

$$d_i = d_{i-1} + \frac{1}{2} v_i (t_{0,i} - t_{0,i-1}), \quad (6.4)$$

sendo a espessura de cada camada i calculada por

$$\Delta z_i = v_i \left(\frac{t_{0,i} - t_{0,i-1}}{2} \right). \quad (6.5)$$

Desta forma, podemos recuperar as velocidades intervalares e o modelo em profundidade de forma analítica.

A família de raios CDP (Figura 6.1) pode ser associado com a frente da onda *NIP* que origina-se no ponto *NIP* e emerge na superfície no ponto x_m . O raio de curvatura da frente de onda *NIP* emergindo que origina-se em $O_N (= NIP)$ é dado por

$$R_{NIP,N} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i}{2 v_1} = \frac{1}{2 v_1} (v_1^2 \Delta t_1 + v_2^2 \Delta t_2 + \dots + v_N^2 \Delta t_N) . \quad (6.6)$$

onde, $R_{NIP,N}$ esta relacionado à $v_{RMS,i}$ como segue

$$v_{RMS,N}^2 = 2 v_1 \frac{R_{NIP,N}}{\sum_{i=1}^N \Delta t_N} . \quad (6.7)$$

6.1.1 Superfícies de medições transformadas

A equação da velocidade NMO (4.14) para uma superfície de medição curva, pode ser simplesmente transformada, se a superfície de medição curva no ponto X_0 , for substituída localmente pela tangente, isto é, a superfície de medição com mergulho no ponto X_0 . Fazendo $K_0 = 0$, obtem-se a nova expressão,

$$v_{NMO,M}^2 = \frac{2 v_1}{t_0 K_{NIP} \cos^2 \beta_0^*} . \quad (6.8)$$

Esta equação 6.8 pode também reduzir-se localmente para o caso de uma superfície de medição horizontal, que passa através do mesmo ponto X_0 . Para isto, considera-se o ângulo de mergulho da superfície anterior, α_0^* e o ângulo β_0^* com $\beta_0^* = \beta_0 + \alpha_0^*$, $\alpha_0^* = 0$ e $\beta_0 = 0$ (Figura 4.2). Considerando esta relação na equação 6.8, se tem,

$$v_{NMO,H}^2 = \frac{2 v_1}{t_0 K_{NIP}} . \quad (6.9)$$

onde, o sobrescrito *H* indica que a superfície de medição é horizontal; e *M* está referida à superfície de medição com mergulho.

6.1.2 Testes com dados sintéticos

O teste realizado visou demonstrar a eficiência deste algoritmo tipo Dix para recuperar as velocidades intervalares e as profundidades dos refletores, destacando a importância da curvatura e da tangente da superfície de medição. O modelo considerado foi simples composto por quatro camadas sobre um semi-espaco separados por interfaces horizontais (Figura 6.2). A superfície de medição é suavemente curva, cuja curvatura, por uma questão de simplicidade, foi considerado circular. O raio de curvatura desta superfície de medição é $R_0 = 1/K_0 =$

10 km, com o ápice no ponto-médio $x_m = 3.5$ km. As velocidades de propagação são referidas às ondas compressoriais (P) para cada camada.

Em vários pontos x_m da superfície de medição curva com um intervalo de $\Delta x = 0.05$ km foram calculados por traçamento do raio os parâmetros $R_{0,i}$, $t_{0,i}$ e $\beta_{0,i}^*$ (Figuras 6.3, 6.4 e 6.5). Os dados de cobertura múltipla foram gerados contendo apenas reflexões primárias para cada refletor. O conjunto de dados consiste de um total de 140 seções com configuração CS, cada um com 140 receptores separados por um intervalo constante de 0.05 km. O intervalo entre fontes consecutivas é também de 0.05 km. Estas seções CS foram rearrumadas para a configuração CMP, sendo o mínimo h de 0.0 km e com um máximo h de 1 km. Para os cálculos utilizou-se o arranjo CMP. A Figura 6.6 mostra as diversas seções CMP referidos a cada refletor para o ponto-médio $x_m = 3.5$ km.

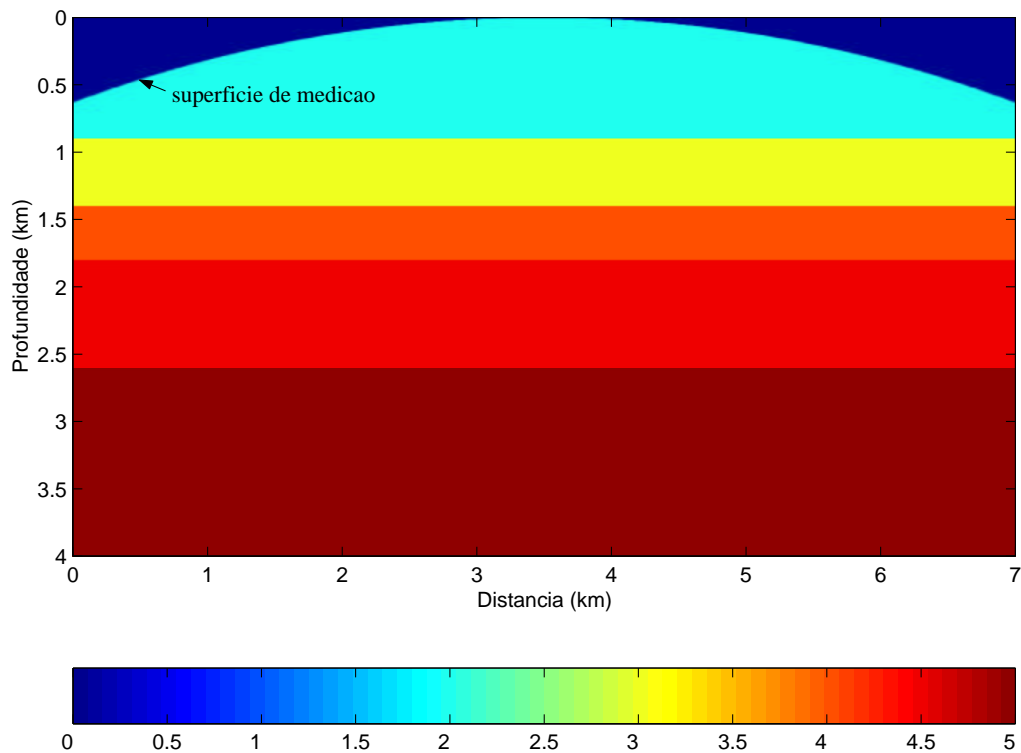


Figura 6.2 - Modelo 2-D constituído de quatro camadas de isovelocidade sobre um semi-espaco separados por interfaces horizontais. A superfície de medição é curva. As velocidades de propagação das ondas P desde a camada superior até a inferior são 2 km/s, 3 km/s, 4 km/s, 4.5 km/s e 5 km/s.

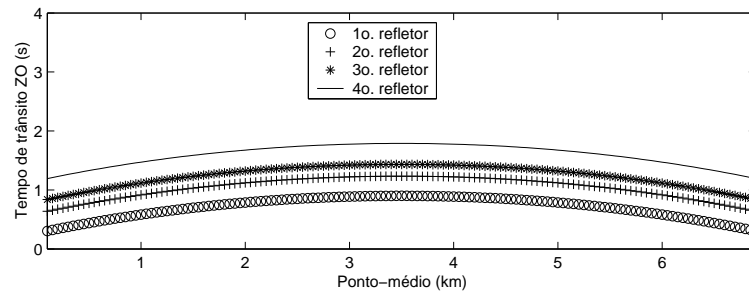


Figura 6.3 - Curvas de tempos de trânsito ZO obtidas pelo modelamento direto, referidas ao modelo da Figura 6.2.

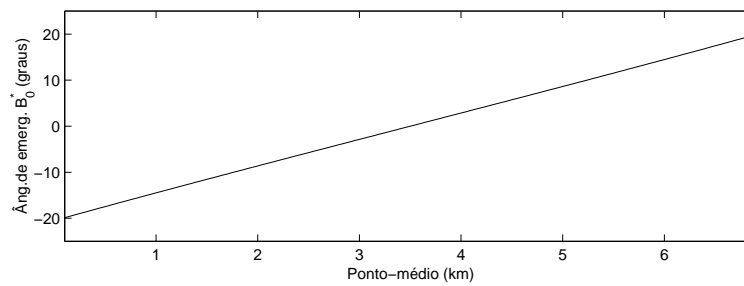


Figura 6.4 - Ângulos de emergência $\hat{\beta}_0^*$ para cada raio normal refletido no quarto refletor.

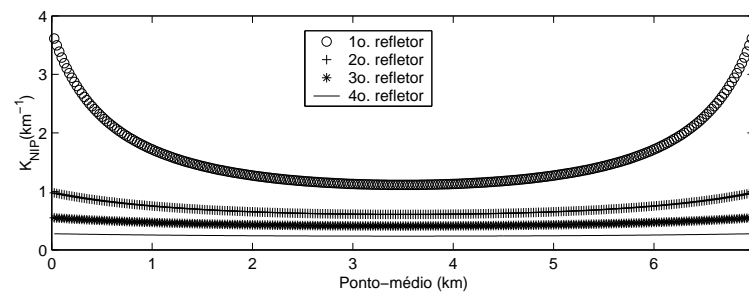


Figura 6.5 - Curvaturas de ondas NIP correspondentes a cada refletor.

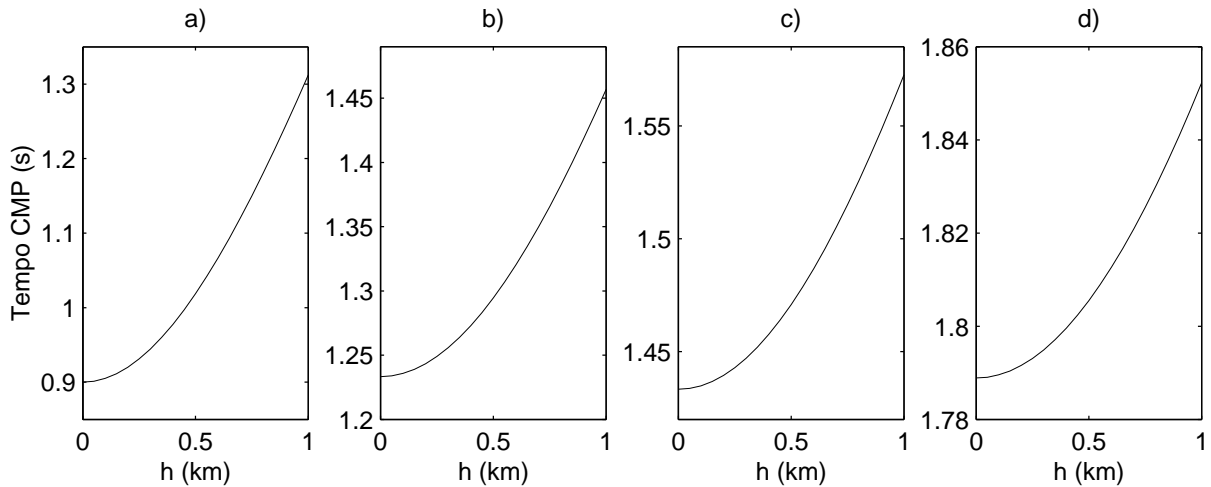


Figura 6.6 - Tempos de trânsito CMP para o ponto-médio $x_0 = 3.5 \text{ km}$, para a) primeiro refletor, b)segundo refletor, c) terceiro refletor e d)quarto refletor no modelo da Figura 6.2.

6.1.2.1 Estratégia de inversão 2-D

Como o modelo da Figura 6.2 é constituído por refletores horizontais e camadas homogêneas, e a estratégia de inversão reduz-se à inversão tipo Dix. A aplicação do processo de Inversão tipo Dix para a recuperação das velocidades intervalares e profundidades dos refletores compreende as seguintes etapas descritas abaixo.

1) Cálculo das velocidades *NMO* a partir dos dados de entrada (tempos de trânsito CMP). Isto é feito mediante o ajuste de uma linha reta para a trajetória $t^2(h^2)$ de cada reflexão primária na família CMP no intervalo do meio-afastamento indicado. A equação usada para expressar estes tempos de trânsito é:

$$t_i^2(h) = t_{0,i}^2 + \frac{4 h^2}{v_{NMO,i}^2}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (6.10)$$

onde i está referido ao número do refletor. Assume-se que estas velocidades NMO (equação 6.10) do modelo da Figura 6.2 correspondem a velocidade NMO da equação 4.14;

2) Cálculo do tempo-duplo de reflexão normal, $t_{0,i}$, a partir dos tempos CMP;
 3) Cálculo das curvaturas da onda *NIP*, segundo as equações 4.14, 6.8 e 6.9.
 4) Recuperação das velocidades intervalares (equação 6.3) considerando os tipos de superfícies de medição: horizontal, com mergulho e suavemente curva. 5) Recuperação das profundidades dos refletores (equação 6.4). Considera os resultados obtidos na etapa 5. Esta processo de Inversão tipo Dix é resumida na Figura 6.7.

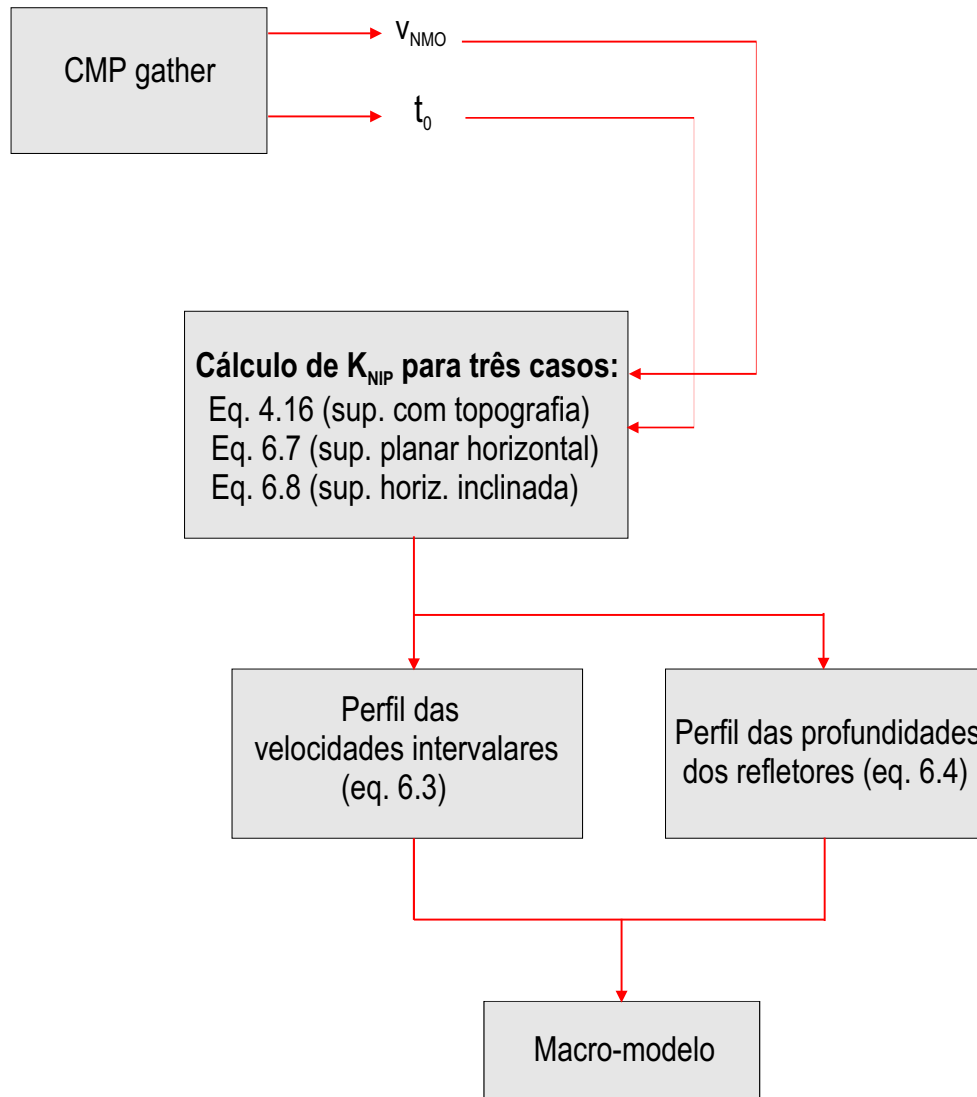


Figura 6.7 - Fluxograma de inversão tipo Dix para estimar as velocidades intervalares e as profundidades dos refletores.

O modelo usado para aplicar a estratégia de Inversão tipo Dix está na Figura 6.2. Observa-se nas Figuras 6.8 e 6.9 os erros significativos que resultam ao não considerar a curvatura e o mergulho da superfície de medição. Por exemplo, o erro mais evidente na recuperação da velocidade da quarta camada é ao redor de 2.5 km/s (Figura 6.8), e para pontos médios compreendidos entre 5.8 e 6 km e entre 1 e 2 km .

Na recuperação da profundidade dos refletores, outro erro evidente está no quarto refletor, o qual é aproximadamente de 0.8 km , principalmente entre os pontos médios 1 e 1.2 km e entre 5.8 e 6 km .

Outra maneira de apresentar didaticamente os resultados é através da Figura 6.10, a qual relaciona a velocidade versus a profundidade para cada camada.

Conforme foi exposto ao longo deste capítulo, conclui-se que, considerar a curvatura da superfície de medição é importante, por permitir recuperar melhor as velocidades e os refletores do que as outras superfícies de medição plana com uma inversão tipo Dix.

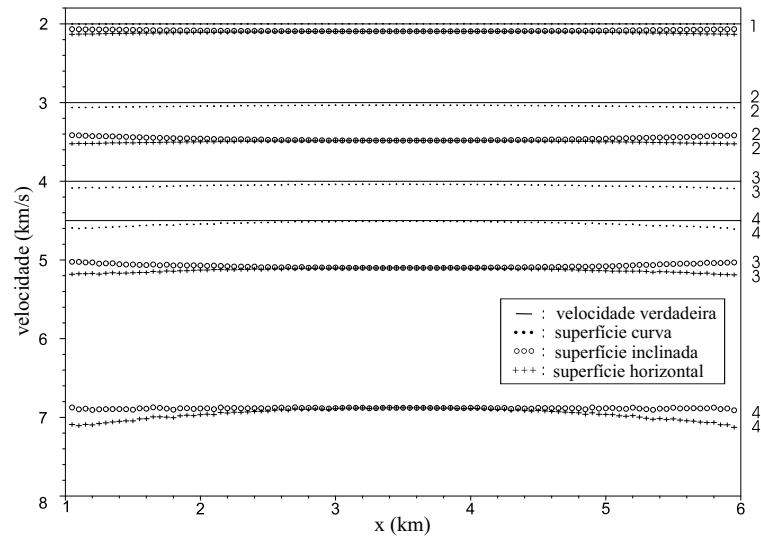


Figura 6.8 - Resultado de inversão tipo Dix para o modelo da Figura 6.2, mostrando as velocidades intervalares estimadas para as diferentes superfícies de medição. Se observa claramente que a solução admitindo a curvatura da superfície de medição é melhor do que as com superfície plana (inclinadas e horizontal). Os números 1 até 4 (escala a direita) são referidos a cada camada.

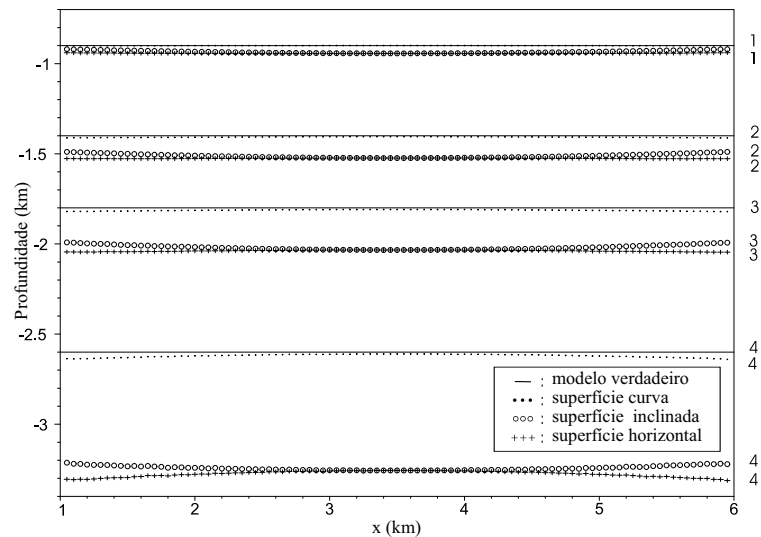


Figura 6.9 - Resultado da inversão tipo Dix para o modelo da Figura 6.2, mostrando as profundidades dos refletos estimados para as diferentes superfícies de medição. Se observa claramente que a solução admitindo a superfície curva é melhor do que as com superfície plana (inclinadas e horizontal). Os números 1 até 4 (escala a direita) são referidos a cada reflector.

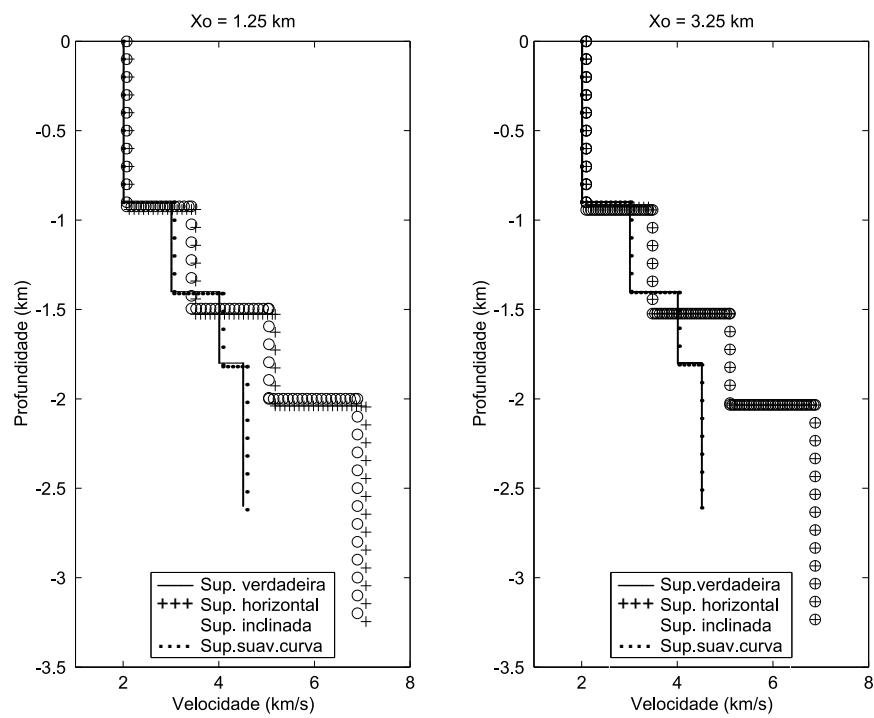


Figura 6.10 - Perfil de velocidade resultante da inversão tipo Dix para duas posições X_0 . Observa-se que a solução considerando uma superfície de medição curva é melhor na recuperação das velocidades que as superfícies de medição plana.

7 - INTRODUÇÃO AO EMPILHAMENTO CRS 3-D PARA UMA SUPERFÍCIE DE MEDIÇÃO PLANA

Neste capítulo é apresentada uma introdução ao método de empilhamento CRS para o caso 3-D. A função tempo de trânsito de empilhamento CRS 3-D depende de oito parâmetros para o caso do raio central ser um raio de reflexão normal. Para o caso do raio central ser diferente do raio de reflexão normal, o número de parâmetros passa a ser treze. No capítulo em questão, apenas é tratado o caso de oito parâmetros. São apresentadas cinco estratégias para a estimativa dos parâmetros da função tempo de trânsito CRS 3-D, para uma superfície de medição plana.

7.1 TEORIA

7.1.1 Sistemas de coordenadas

O sistema de coordenadas Cartesianas local tem como base ortonormal os vetores unitários $\mathbf{j}_i (i = 1, 2, 3)$; origem no ponto de emergência do raio de reflexão normal, X_0 , e coordenadas $x_i (i = 1, 2, 3)$ (Figura 7.1). As coordenadas x_1 e x_2 formam o plano de medição.

O sistema de coordenadas centradas no raio tem como base ortonormal os vetores unitários $\mathbf{e}_i (i = 1, 2, 3)$; origem no ponto de emergência do raio de reflexão normal, X_0 , e coordenadas $q_i (i = 1, 2, 3)$. Este sistema de coordenadas é definido em relação ao raio de reflexão normal, de tal modo que a coordenada q_3 tem eixo coincidente com o vetor vagarosidade no ponto X_0 , e as coordenadas q_1 e q_2 formam um plano perpendicular ao eixo q_3 .

No plano de medição (Figura 7.2) são definidos os vetores ponto médio \mathbf{x}_m e meio-afastamento \mathbf{h} , por

$$\mathbf{x}_m = \frac{1}{2}(\mathbf{g} + \mathbf{s}) = \mathbf{s} + \mathbf{h}, \quad \mathbf{h} = \frac{1}{2}(\mathbf{g} - \mathbf{s}), \quad (7.1)$$

onde \mathbf{s} e \mathbf{g} são vetores denotando as posições da fonte e receptor no plano de medidas.

Höcht (2002) define o plano de referência como o plano formado por um vetor unitário de referência $\check{\mathbf{e}}_F$ sobre a superfície de medição plana, e o vetor de direção do raio de reflexão normal, \mathbf{e}_3 (Figura 7.1).

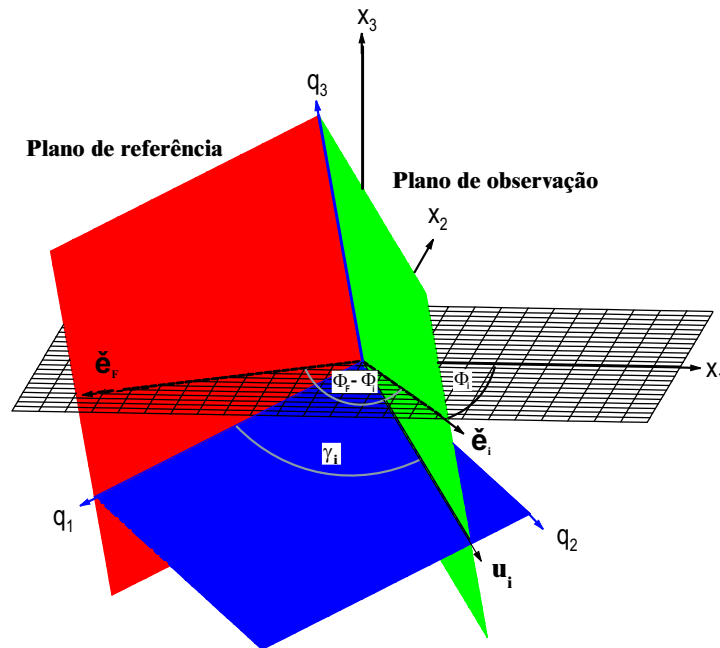


Figura 7.1 - Sistema de coordenadas Cartesianas local (x_1, x_2, x_3) com os vetores base ortonormal \mathbf{j}_i ($i = 1, 2, 3$). O sistema de coordenadas centradas no raio (q_1, q_2, q_3) com os vetores base ortonormal \mathbf{e}_i ($i = 1, 2, 3$). O plano de referência (plano vermelho) contém o eixo q_3 e o vetor de referência $\check{\mathbf{e}}_F$ sobre a superfície de medição. O eixo q_1 é especificado de tal forma, a estar contido no plano de referência. β_F define o azimute do vetor de referência $\check{\mathbf{e}}_F$. Observa-se o plano de observação (plano verde) formado pelo eixo q_3 e o vetor unitário $\check{\mathbf{e}}_i$ que especifica a linha sísmica i (adaptado de Chira et al., 2000).

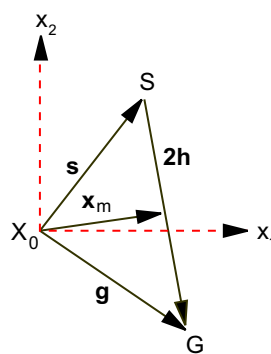


Figura 7.2 - Definição do vetor ponto médio \mathbf{x}_m e o vetor meio-afastamento \mathbf{h} sobre a superfície de medição plana definida pelos eixos coordenados (x_1, x_2) . Os vetores \mathbf{s} e \mathbf{g} denotam os vetores fonte e receptor relativos ao ponto X_0 , origem do sistema de coordenadas Cartesianas local.

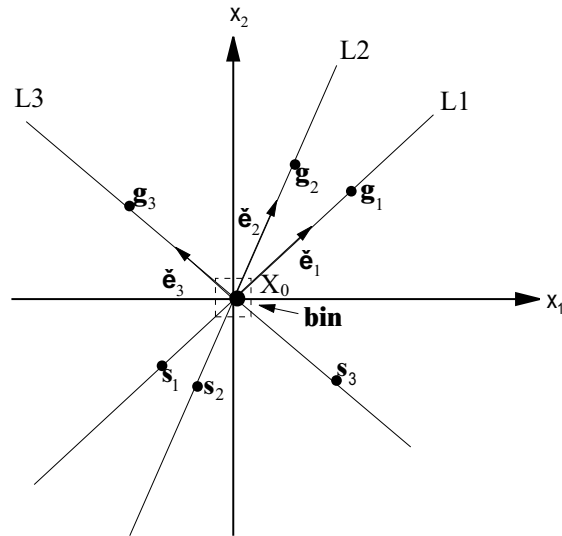


Figura 7.3 - Três pseudo-linhas sísmicas L1, L2, e L3 interseptando no ponto X_0 no sistema de coordenadas Cartesianas local (x_1, x_2) . Estão definidos os vetores unitários \check{e}_i ($i = 1, 2, 3$) de cada linha sísmica i ($i = L1, L2, L3$). s_i e g_i são as coordenadas fonte e receptor sobre estas linhas sísmicas.

O vetor unitário \check{e}_F é expresso por:

$$\check{e}_F = \begin{pmatrix} \cos \beta_F \\ \text{sen} \beta_F \end{pmatrix} \quad \text{com} \quad -\pi < \beta_F \leq \pi, \quad (7.2)$$

sendo, β_F o azimute do vetor unitário \check{e}_F .

Para determinar o vetor unitário de uma linha sísmica (Figura 7.3), é necessário saber o azimute Φ_i de cada uma destas linhas. Este vetor é expresso por,

$$\check{e}_i = \begin{pmatrix} \cos \Phi_i \\ \text{sen} \Phi_i \end{pmatrix} \quad \text{com} \quad -\pi < \Phi_i \leq \pi. \quad (7.3)$$

O plano de observação contém os vetores unitários \check{e}_i e e_3 , que definem a direção da linha sísmica e o raio emergente (Figura 7.1).

7.1.2 Fórmulas básicas

Seguindo Schleicher et al. (1993a), a aproximação paraxial do tempo de trânsito na sua forma hiperbólica, considerada pelo empilhamento CRS 3-D, no sistema (x_1, x_2) , em função

das coordenadas ponto-médio \mathbf{x}_m e meio-afastamento \mathbf{h} , é dada por:

$$t^2(\mathbf{x}_m, \mathbf{h}) = (t_0 + 2 \mathbf{p}_0 \cdot \mathbf{x}_m)^2 + 2 t_0 \mathbf{x}_m \cdot \mathbf{D}_0^{-1} \mathbf{C}_0 \mathbf{x}_m + 2 t_0 \mathbf{h} \cdot \mathbf{B}_0^{-1} \mathbf{A}_0 \mathbf{h}, \quad (7.4)$$

com

$$\mathbf{D}_0^{-1} \mathbf{C}_0 = \frac{\partial^2 t}{2 \partial^2 \mathbf{h}}, \quad \mathbf{B}_0^{-1} \mathbf{A}_0 = \frac{\partial^2 t}{2 \partial^2 \mathbf{x}_m}, \quad (7.5)$$

onde, t_0 é o tempo de trânsito duplo do raio de reflexão normal. \mathbf{A}_0 , \mathbf{B}_0 , \mathbf{C}_0 e \mathbf{D}_0 são sub-matrizes 2×2 da matriz propagadora 4×4 \mathbf{T}_0 referidas ao raio de normal apenas numa direção (Bortfeld, 1989; Hubral et al., 1992); \mathbf{p}_0 é a projeção do vetor vagarosidade do raio de incidência normal (emergente no ponto X_0) no plano de medição.

Substituindo $\mathbf{D}_0^{-1} \mathbf{C}_0 v_1 = \mathbf{A}$, $\mathbf{B}_0^{-1} \mathbf{A}_0 v_1 = \mathbf{B}$ e $\mathbf{p}_0 = \frac{1}{v_1} \mathbf{c}$ na equação (7.4) para obter

$$t^2(\mathbf{x}_m, \mathbf{h}) = \left(t_0 + \frac{2}{v_1} \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_m \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1} \mathbf{x}_m \cdot \mathbf{A} \mathbf{x}_m + \frac{2 t_0}{v_1} \mathbf{h} \cdot \mathbf{B} \mathbf{h}, \quad (7.6)$$

sendo,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{12} & b_{22} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{c} = (c_1, c_2), \quad (7.7)$$

onde, v_1 é a velocidade no ponto de emergência do raio de reflexão normal, e \mathbf{c} é a diretividade do vetor vagarosidade no ponto de emergência. Este vetor é obtido através da projeção do vetor direção do raio de reflexão normal ($\underline{\mathbf{c}}$) sobre a superfície de medição. \mathbf{A} e \mathbf{B} são matrizes 2×2 simétricas, que representam as derivadas de segunda ordem do tempo de trânsito com relação às coordenadas ponto-médio e meio-afastamento vezes a velocidade v_1 . Os vetores $\underline{\mathbf{c}}$ e \mathbf{c} são expressos por,

$$\underline{\mathbf{c}} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 \text{sen} \varphi_2 \\ \text{sen} \varphi_1 \text{sen} \varphi_2 \\ \cos \varphi_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{c} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 \text{sen} \varphi_2 \\ \text{sen} \varphi_1 \text{sen} \varphi_2 \end{pmatrix}, \quad (7.8)$$

sendo, φ_1 e φ_2 denominados de azimute e ângulo polar. Também são referidos como os ângulos de direção do raio de incidência normal (Figura 7.4).

Segundo Höcht (2002), outra forma de expressar as equações (7.4) e (7.6), é dado da seguinte forma:

$$t^2(\mathbf{x}_m, \mathbf{h}) = \left(t_0 + \frac{2}{v_1} \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_m \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1} \mathbf{x}_m \cdot \mathbf{D}_{zyz} \mathbf{N} \mathbf{D}_{zyz}^T \mathbf{x}_m + \frac{2 t_0}{v_1} \mathbf{h} \cdot \mathbf{D}_{zyz} \mathbf{M} \mathbf{D}_{zyz}^T \mathbf{h} \quad (7.9)$$

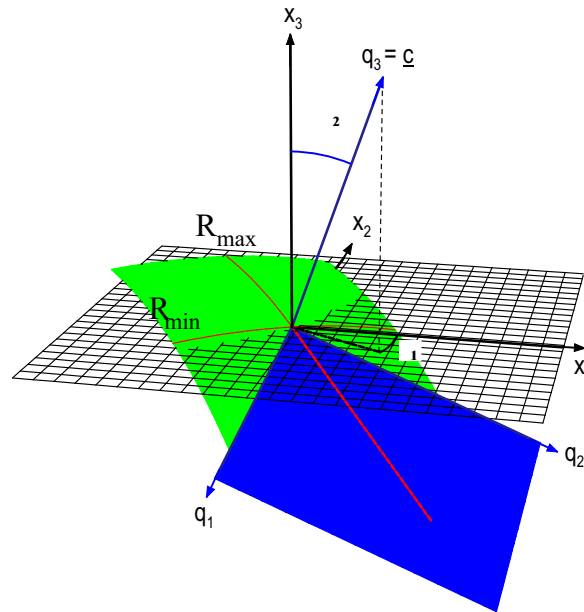


Figura 7.4 - Representação do vetor unitário \mathbf{c} do raio normal com os ângulos φ_1 e φ_2 que determinam a direção de propagação da frente de onda ao longo do raio normal (modificado de Höcht, 2002). R_{min} e R_{max} são os raios de curvatura mínimo e máximo da frente de onda (superfície verde).

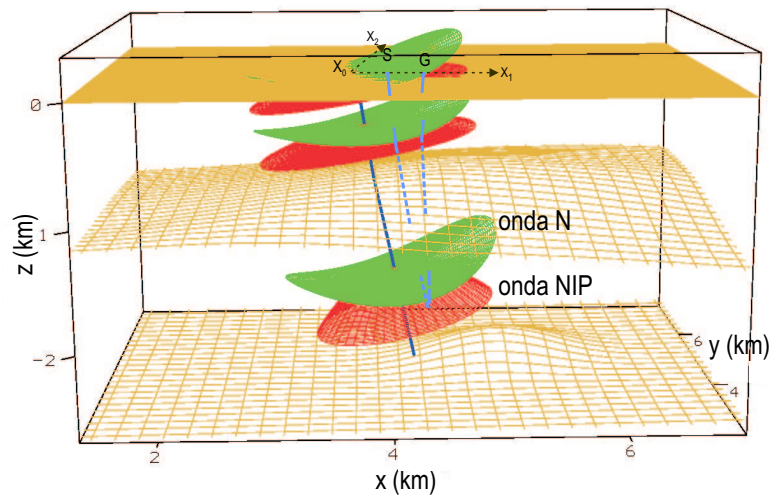


Figura 7.5 - Ilustração das ondas NIP (superfície vermelha) e N (superfície verde) propagando-se através do modelo 3-D em profundidade (modificado de Höcht, 2002). Observa-se o raio normal emergindo no ponto X_0 e o raio paraxial que se inicia em S e finaliza no ponto G .

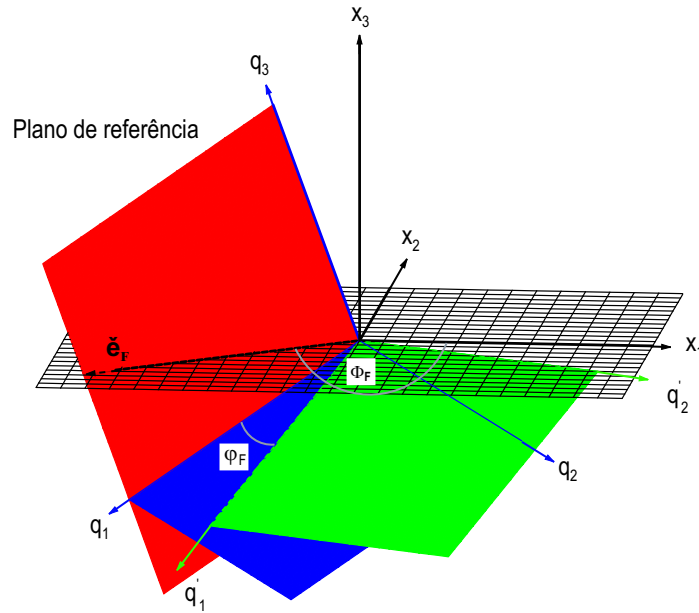


Figura 7.6 - Ângulo de rotação φ_F do eixo q'_1 com relação ao eixo q_1 . O outro eixo q'_2 precisa do ângulo $\varphi_F + 90^\circ$ para coincidir com o eixo q_2 (modificado de Höcht, 2002).

onde,

$$\mathbf{D}_{zyz} = \mathbf{D}_z(\varphi_1) \mathbf{D}_y(\varphi_2) \mathbf{D}_z(\varphi_F), \quad \mathbf{D}_{zy} = \mathbf{D}_z(\varphi_1) \mathbf{D}_y(\varphi_2), \quad (7.10)$$

$$\mathbf{D}_z(\varphi_1) = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & -\text{sen} \varphi_1 \\ \text{sen} \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D}_y(\varphi_2) = \begin{pmatrix} \cos \varphi_2 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7.11)$$

sendo, \mathbf{D}_{zyz} e \mathbf{D}_{zy} as matrizes de transformação bi-dimensionais. O sobrescrito T indica transposta. $\mathbf{D}_z(\varphi_1)$ e $\mathbf{D}_z(\varphi_2)$ são as matrizes de rotação. \mathbf{M} e \mathbf{N} são as matrizes de curvatura da onda NIP e N (Figura 7.5).

O vetor unitário \mathbf{e}_3 coincide com o vetor de direção do raio de reflexão normal \mathbf{c} , o qual é obtido através de duas transformações (equações 7.11) ao eixo x_3 do sistema de coordenadas Cartesianas local, definido por \mathbf{j}_3 ,

$$\mathbf{c} = \mathbf{D}_z(\varphi_0) \mathbf{D}_y(\varphi_1) \mathbf{j}_3. \quad (7.12)$$

Submetendo os outros vetores (\mathbf{j}_1 e \mathbf{j}_2) as mesmas transformações anteriores, produz-se os outros vetores unitários $\mathbf{e}'_i (i = 1, 2)$ do sistema de coordenadas Centrada no raio (Figura 7.6), dados por:

$$\mathbf{e}'_i = \mathbf{D}_z(\varphi_0) \mathbf{D}_y(\varphi_1) \mathbf{j}_i, \quad (i = 1, 2). \quad (7.13)$$

Sendo fixo o vetor $\mathbf{e}_3 = \mathbf{c}$, os outros vetores ortonormais do sistema de coordenadas centradas no raio, $\mathbf{e}'_i (i = 1, 2)$, podem ter direções arbitrárias. Então, com a finalidade de fixar estes dois vetores ortonormais, torna-se necessário rotacionar o vetor \mathbf{e}'_1 um ângulo φ_F (Figura 7.6) e conseqüentemente o vetor \mathbf{e}'_2 um ângulo $(90^\circ + \varphi_F)$ (Höcht, 2002). Esta transformação é dada por:

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{D}_z(\varphi_1) \mathbf{D}_y(\varphi_2) \mathbf{D}_y(\varphi_F) \mathbf{e}'_i, \quad (i = 1, 2). \quad (7.14)$$

Atualmente, das três formas particulares de representar a aproximação hiperbólica do tempo de trânsito, (7.4, 7.6 e 7.9) a equação 7.6 proposta neste trabalho, foi aplicada a dados sintéticos (Cristini et al., 2001) e reais (Bergler et al., 2002), com resultados bem sucedidos. As outras duas fórmulas não foram aplicadas no momento. Possivelmente, elas podem exigir um maior esforço computacional, devido a que consideram mais parâmetros em cada etapa do processo.

7.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO EMPILHAMENTO CRS 3-D

7.2.1 Estratégia das três pseudo-linhas sísmicas

Nesta estratégia seleciona-se para cada ponto X_0 três pseudo-linhas sísmicas 2-D (ver Figura 7.3). Estas linhas interceptam-se aproximadamente no mesmo ponto X_0 ou ao redor dele através de uma determinada distribuição areal ("bin") (e.g., uma abertura retangular), sobre uma superfície de medição plana (Figura 7.7).

Uma dessas linhas sísmicas é definida como aquela que se constrói a partir de todos os possíveis pares de fontes e receptores (incluídos aqueles pares interpolados) na vizinhança do ponto X_0 , segundo um determinado azimuth (Figura 7.3).

Segundo a Figura (7.3), os vetores $\check{\mathbf{e}}_i (i = 1, 2, 3)$ estão associados às direções das pseudo-linhas sísmicas. Ao longo de cada pseudo-linha sísmica são definidos vetores de coordenadas das fontes sísmicas, dos receptores, do ponto médio e do meio-afastamento, como apresentados abaixo,

$$\mathbf{s} = s \check{\mathbf{e}}_i, \quad \mathbf{g} = g \check{\mathbf{e}}_i, \quad \mathbf{h} = h \check{\mathbf{e}}_i, \quad \mathbf{x}_m = x_m \check{\mathbf{e}}_i, \quad \check{\mathbf{e}}_i = (\cos \Phi_i, \sin \Phi_i), \quad (7.15)$$

sendo, Φ_i o azimuth correspondente a cada pseudo-linha sísmica.

A aproximação do tempo de trânsito usada nesta estratégia é dada por

$$t_i^2(x_m, h) = \left(t_0 + \frac{2}{v_1} \mathbf{c} \cdot \check{\mathbf{e}}_i x_m \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1} \check{\mathbf{e}}_i \cdot \mathbf{A} \check{\mathbf{e}}_i x_m^2 + \frac{2 t_0}{v_1} \check{\mathbf{e}}_i \cdot \mathbf{B} \check{\mathbf{e}}_i h^2. \quad (7.16)$$

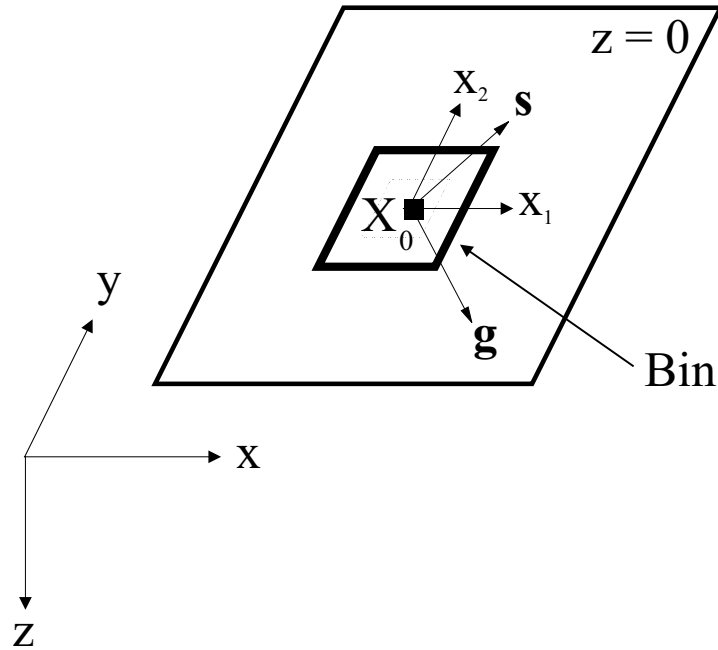


Figura 7.7 - (x, y, z) definem os eixos do sistema de coordenadas Cartesianas global. A superfície de medição é definida no plano $z = 0$. Nesta superfície de medição é definido um sistema de coordenadas Cartesianas local (x_1, x_2) com a origem no ponto X_0 . Uma distribuição areal (“bin”) também é definida ao redor do ponto X_0 . Os vetores \mathbf{s} e \mathbf{g} denotam a fonte e geofone relativos a este ponto.

A partir da equação (7.16) tem-se o sistema de equações paramétricas na forma escrita para se obter os oito parâmetros do operador CRS 3-D. Este sistema é expresso por:

$$\check{\mathbf{e}}_i \cdot \mathbf{A} \check{\mathbf{e}}_i = a_{11} \cos^2 \Phi_i + 2 a_{12} \text{sen} \Phi_i \cos \Phi_i + a_{22} \text{sen}^2 \Phi_i = a_i, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (7.17)$$

$$\check{\mathbf{e}}_i \cdot \mathbf{B} \check{\mathbf{e}}_i = b_{11} \cos^2 \Phi_i + 2 b_{12} \text{sen} \Phi_i \cos \Phi_i + b_{22} \text{sen}^2 \Phi_i = b_i, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (7.18)$$

$$\mathbf{c} \cdot \check{\mathbf{e}}_j = c_1 \cos \Phi_j + c_2 \text{sen} \Phi_j = d_j, \quad (j = 1, 2), \quad (7.19)$$

sendo, a_i , b_i e d_j escalares. Substituindo estes escalares na equação (7.16) tem-se:

$$t_i^2(x_m, h) = \left(t_0 + \frac{2}{v_1} d_i x_m \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1} (a_i x_m^2 + b_i h^2). \quad (7.20)$$

A função tempo de trânsito de empilhamento CRS 2-D para cada linha sísmica i é dado por:

$$t_i^2(x_m, h) = \left(t_0 + \frac{2}{v_1} \text{sen} \beta_0^i x_m \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1} \cos^2 \beta_0^i \left(K_N^i x_m^2 + K_{NIP}^i h^2 \right), \quad (7.21)$$

onde o trio-paramétrico $(\beta_0^i, K_{NIP}^i, K_N^i)$ correspondente a cada ponto X_0 em cada linha sísmica i .

Comparando as equações (7.20) e (7.21), obtêm-se os valores dos escalares (a_i, b_i, d_i) ,

$$a_i = K_N^i \cos^2 \beta_0^i, \quad (7.22)$$

$$b_i = K_{NIP}^i \cos^2 \beta_0^i, \quad (7.23)$$

$$d_i = \text{sen} \beta_0^i. \quad (7.24)$$

A obtenção dos oito parâmetros procurados das expressões (7.7), compreende as seguintes etapas:

- 1) Seleção de três linhas sísmicas para cada ponto X_0 ou uma distribuição areal (“bin”), na superfície de medição plana, respectivamente (Figura 7.3);
- 2) Cálculo dos três parâmetros para cada uma das linhas sísmicas $(\beta_0^i, K_{NIP}^i, K_N^i)$;
- 3) Obtenção dos parâmetros (a_i, b_i, d_i) segundo as equações (7.22 até 7.24);
- 4) Cálculo dos elementos da matriz \mathbf{A} .

Para o cálculo dos elementos da matriz \mathbf{A} , escreve-se a equação 7.17 para as três linhas sísmicas na forma,

$$a_{11} \cos^2 \Phi_1 + 2 a_{12} \text{sen} \Phi_1 \cos \Phi_1 + a_{22} \text{sen}^2 \Phi_1 = a_1, \quad (7.25)$$

$$a_{11} \cos^2 \Phi_2 + 2 a_{12} \text{sen} \Phi_2 \cos \Phi_2 + a_{22} \text{sen}^2 \Phi_2 = a_2, \quad (7.26)$$

$$a_{11} \cos^2 \Phi_3 + 2 a_{12} \text{sen} \Phi_3 \cos \Phi_3 + a_{22} \text{sen}^2 \Phi_3 = a_3. \quad (7.27)$$

obtendo-se o sistema linear de equações dado por

$$\overbrace{\begin{bmatrix} \cos^2 \Phi_1 & 2 \text{sen} \Phi_1 \cos \Phi_1 & \text{sen}^2 \Phi_1 \\ \cos^2 \Phi_2 & 2 \text{sen} \Phi_2 \cos \Phi_2 & \text{sen}^2 \Phi_2 \\ \cos^2 \Phi_3 & 2 \text{sen} \Phi_3 \cos \Phi_3 & \text{sen}^2 \Phi_3 \end{bmatrix}}^{\mathbf{F}} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}. \quad (7.28)$$

Esta representação (7.28) tem solução, se o determinante da matriz quadrada \mathbf{F} for diferente de zero. Este critério será usado nas escolhas das três pseudo-linhas sísmicas.

- 5) Cálculo dos elementos da matriz \mathbf{B} .

Para o cálculo dos elementos da matriz \mathbf{B} , expande-se a sub-equação 7.18 para as três linhas sísmicas,

$$b_{11} \cos^2 \Phi_1 + 2 b_{12} \text{sen} \Phi_1 \cos \Phi_1 + b_{22} \text{sen}^2 \Phi_1 = b_1, \quad (7.29)$$

$$b_{11} \cos^2 \Phi_2 + 2 b_{12} \text{sen} \Phi_2 \cos \Phi_2 + b_{22} \text{sen}^2 \Phi_2 = b_2, \quad (7.30)$$

$$b_{11} \cos^2 \Phi_3 + 2 b_{12} \text{sen} \Phi_3 \cos \Phi_3 + b_{22} \text{sen}^2 \Phi_3 = b_3, \quad (7.31)$$

obtendo-se o sistema linear de equações dado por

$$\begin{bmatrix} \cos^2 \Phi_1 & 2 \operatorname{sen} \Phi_1 \cos \Phi_1 & \operatorname{sen}^2 \Phi_1 \\ \cos^2 \Phi_2 & 2 \operatorname{sen} \Phi_2 \cos \Phi_2 & \operatorname{sen}^2 \Phi_2 \\ \cos^2 \Phi_3 & 2 \operatorname{sen} \Phi_3 \cos \Phi_3 & \operatorname{sen}^2 \Phi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{12} \\ b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (7.32)$$

Semelhanmente como no caso da matrix \mathbf{A} , esta representação (7.32) tem solução se o determinante da matriz quadrada \mathbf{F} for diferente de zero.

6) Cálculo das componentes do vetor \mathbf{c} .

Para o cálculo das componentes do vetor \mathbf{c} , considera-se apenas duas linhas hipotéticas arbitrárias (por exemplo, as linhas L_1 e L_2). Expande-se a equação 7.19 para estas linhas sísmicas consideradas,

$$c_1 \cos \Phi_1 + c_2 \operatorname{sen} \Phi_1 = d_1, \quad (7.33)$$

$$c_1 \cos \Phi_2 + c_2 \operatorname{sen} \Phi_2 = d_2. \quad (7.34)$$

obtendo-se o sistema linear de equações dado por

$$\begin{bmatrix} \cos \Phi_1 & \operatorname{sen} \Phi_1 \\ \cos \Phi_2 & \operatorname{sen} \Phi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (7.35)$$

O sistema de equações (7.35) tem solução se o determinante da matriz quadrada for diferente de zero. Este critério é usado nas escolhas das duas pseudo-linhas sísmicas consideradas para obter os elementos do vetor \mathbf{c} , i.e., $\cos \Phi_1 \operatorname{sen} \Phi_2 - \cos \Phi_2 \operatorname{sen} \Phi_1 \neq 0$.

7) Finalmente, substitui-se os oito parâmetros iniciais (etapas 4, 5 e 6) na equação (7.6), para realizar o empilhamento CRS 3-D. Opcionalmente é realizado um processo de Otimização para refinar estes parâmetros iniciais. Esta estratégia é resumida na Figura 7.8.

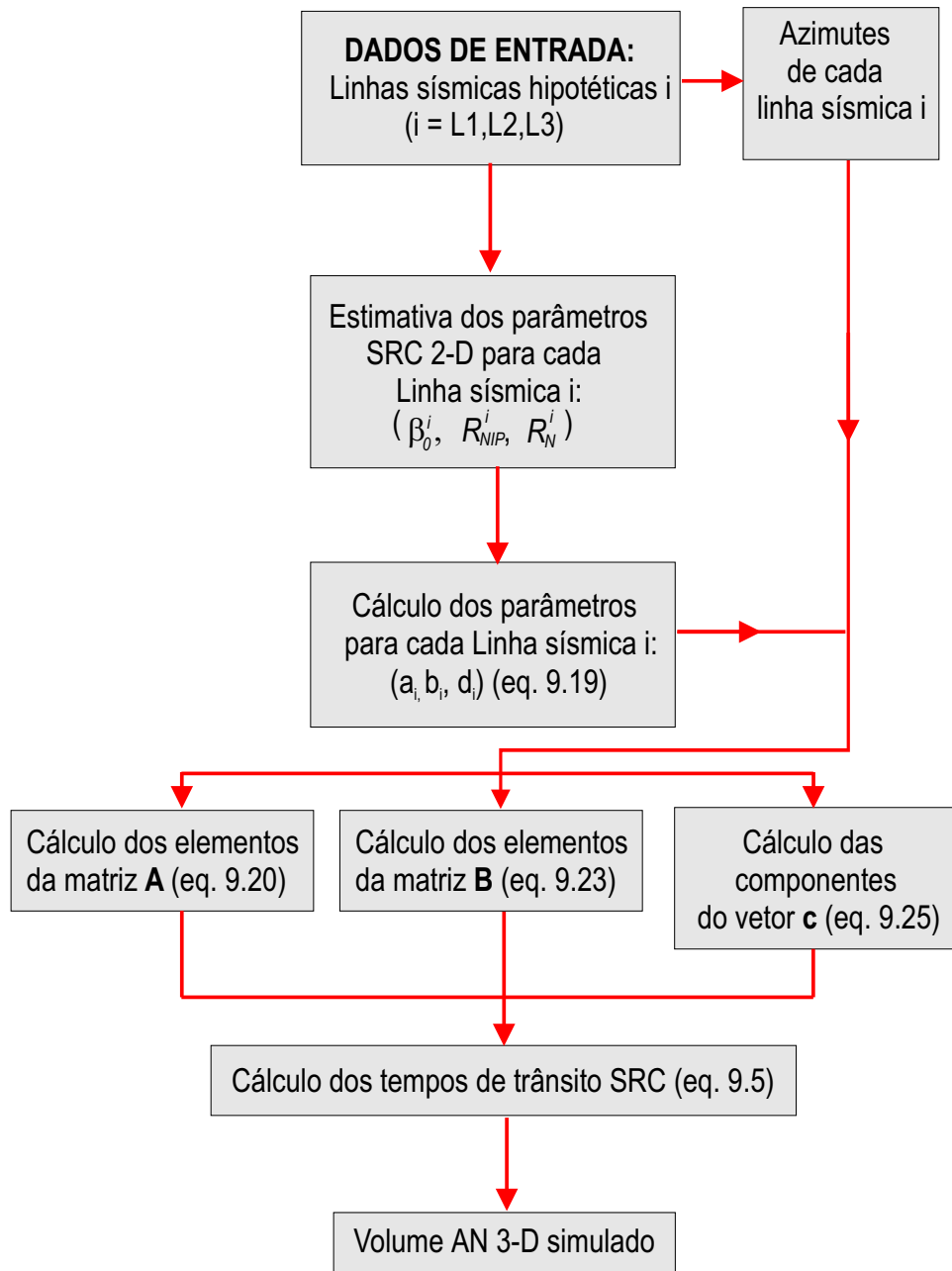


Figura 7.8 - Fluxograma computacional para a estratégia das três pseudo-linhas sísmicas. Como resultado final obtêm-se um volume de traços sísmicos com afastamento-nulo simulados, a partir dos trios paramétricos calculados para cada linha hipotética.

7.2.2 Estratégia das três aproximações dos tempos de trânsito

Esta estratégia é denominada desta forma, por considerar três tipos de aproximações dos tempos de trânsito, para a busca dos oito parâmetros da função tempo de trânsito de empilhamento CRS 3-D nos dados de cobertura múltipla. Estas aproximações são referidas às configurações CMP, ZO e CRS. Para se obter os oito parâmetros que permitem realizar o empilhamento CRS 3-D, esta estratégia compreende três etapas.

1) Primeira etapa: Empilhamento CMP 3-D.

Esta etapa permite obter os três elementos da matriz \mathbf{B} . Os dados utilizados são famílias CMP 3-D. Neste empilhamento a fonte S_i é localizada em direção simetricamente oposta ao receptor G_i em relação ao ponto X_0 (Figura 7.9). Nas coordenadas fonte/receptor isto significa que, $\mathbf{s} = -\mathbf{g}$, e nas coordenadas ponto médio/meio-afastamento o empilhamento CMP é descrito por $\mathbf{x}_m = 0$.

Fazendo $\mathbf{x}_m = 0$ e $\mathbf{h} = h\check{\mathbf{e}}_i$, a equação (7.6) reduz-se para

$$t_{CMP,i}^2(h) = t_{0,i}^2 + \frac{2t_0}{v_1} h^2 \check{\mathbf{e}}_i \cdot \mathbf{B} \check{\mathbf{e}}_i = t_{0,i}^2 + 4 \frac{h^2}{v_{NMO,i}^2}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (7.36)$$

onde,

$$v_{NMO,i}^2(\Phi_i) = \frac{2v_1}{t_{0,i} \check{\mathbf{e}}_i \cdot \mathbf{B} \check{\mathbf{e}}_i}, \quad \check{\mathbf{e}}_i = (\cos \Phi_i, \sin \Phi_i), \quad (7.37)$$

sendo, v_{NMO} a velocidade NMO.

Esta etapa compreende as seguintes partes:

- 1a) Seleção de três pseudo-linhas sísmicas, de forma semelhante à estratégia anterior;
- 1b) Cálculo das velocidades NMO e os tempos $t_{0,i}$ correspondentes a cada pseudo-linha sísmica, segundo a equação (7.36, lado direito);
- 1c) Cálculo dos elementos iniciais da matriz \mathbf{B} . Para isto é utilizado o sistema de equações

$$b_{11} \cos^2 \Phi_1 + 2 b_{12} \sin \Phi_1 \cos \Phi_1 + b_{22} \sin^2 \Phi_1 = \frac{2 v_1}{t_{0,1} v_{NMO,1}^2}, \quad (7.38)$$

$$b_{11} \cos^2 \Phi_2 + 2 b_{12} \sin \Phi_2 \cos \Phi_2 + b_{22} \sin^2 \Phi_2 = \frac{2 v_1}{t_{0,2} v_{NMO,2}^2}, \quad (7.39)$$

$$b_{11} \cos^2 \Phi_3 + 2 b_{12} \sin \Phi_3 \cos \Phi_3 + b_{22} \sin^2 \Phi_3 = \frac{2 v_1}{t_{0,3} v_{NMO,3}^2}. \quad (7.40)$$

sendo conhecidos Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 , $t_{0,1}$, $t_{0,2}$, $t_{0,3}$ e a velocidade v_1 . Os valores das velocidades NMO e $t_{0,i}$ foram obtidos na parte 1b.

Os elementos da matriz \mathbf{B} são obtidos como solução do sistema de equações (7.38) a (7.40).

1d) Finalmente substituem-se os elementos iniciais da matriz \mathbf{B} para refinar estes valores

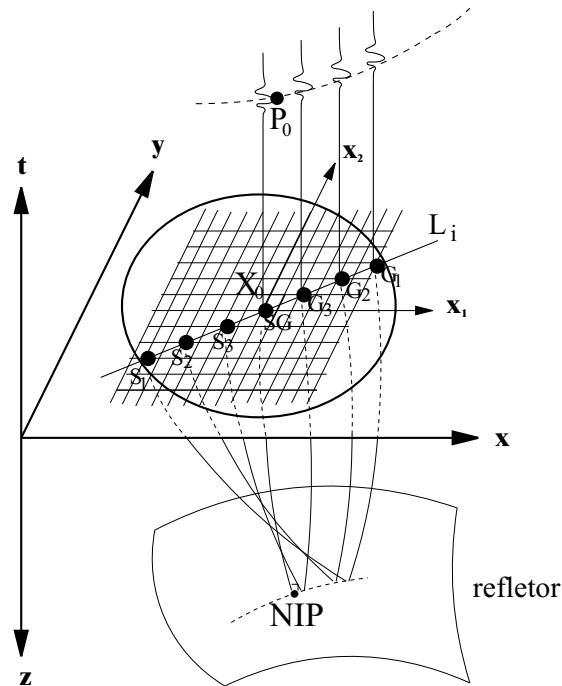


Figura 7.9 - O empilhamento CMP 3-D. As fontes S_i e receptores G_i são simétricos em relação a locação de afastamento-nulo fixo X_0 .

através do empilhamento CMP 3-D (7.36, lado esquerdo).

2) Segunda etapa: Empilhamento ZO 3-D:

Para este empilhamento utilizam-se os traços sísmicos ZO simulados a partir do empilhamento CMP 3-D (etapa 1).

Neste empilhamento a fonte e o receptor têm as mesmas coordenadas. Nas coordenadas fonte/receptor isto significa que $\mathbf{s} = \mathbf{g}$. Nas coordenadas ponto-médio/meio-afastamento, é expresso por $\mathbf{h} = 0$ (Figura 7.10).

Para $\mathbf{h} = 0$, a equação (7.6) reduz-se para

$$t_{ZO}^2(x_m) = \left(t_0 + \frac{2}{v_1} \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_m \right)^2 + \frac{2t_0}{v_1} \mathbf{x}_m \cdot \mathbf{A} \mathbf{x}_m, \quad \mathbf{x}_m = x_m \tilde{\mathbf{e}}_i (i = 1, 2, 3). \quad (7.41)$$

Para obter os cinco parâmetros, referidos à matriz \mathbf{A} e ao vetor \mathbf{c} , considera-se as seguintes partes:

2a) Seleciona-se dos pseudo-linhas sísmicas, de tal maneira que seus azimutes $\Phi_i (i = 1, 2)$ cumpram a condição $\cos \Phi_1 \operatorname{sen} \Phi_2 - \cos \Phi_2 \operatorname{sen} \Phi_1 \neq 0$.

2b) Considera-se uma aproximação de primeira ordem da equação (7.41), dada por

$$t_{ZO,i}(x_m) = t_{0,i} + \frac{2t_0}{v_1} \mathbf{c} \tilde{\mathbf{e}}_i x_m. \quad (7.42)$$

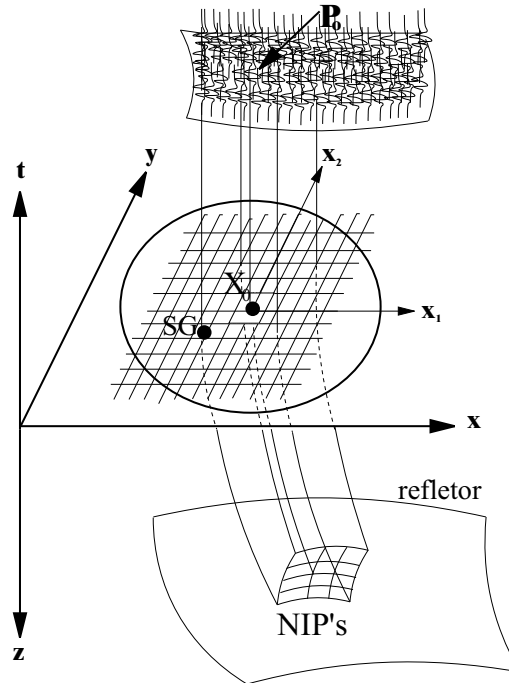


Figura 7.10 - O empilhamento ZO 3-D utiliza o volume de dados sísmicos simulados a partir do empilhamento CMP 3-D.

Para o cálculo das componentes do vetor \mathbf{c} expande-se a equação (7.42) para as duas pseudo-linhas,

$$t_{ZO,1} = t_{0,1} + \frac{2}{v_1} (\cos \Phi_1, \text{sen} \Phi_1) (c_1, c_2) x_m, \quad (7.43)$$

$$t_{ZO,2} = t_{0,2} + \frac{2}{v_1} (\cos \Phi_1, \text{sen} \Phi_1) (c_1, c_2) x_m, \quad (7.44)$$

onde $t_{0,i}$ ($i = 1, 2$) correspondem a etapa anterior. Os elementos iniciais do vetor \mathbf{c} são obtidos como solução do sistema de equações 7.43 e 7.44. Para obter os valores finais do vetor \mathbf{c} , então substitui-se os valores iniciais na equação (7.42) para serem refinados através do empilhamento ZO inicial 3-D.

2c) Cálculo dos elementos da matriz \mathbf{A} .

Para o cálculo dos elementos da matriz \mathbf{A} é utilizado a equação (7.41).

Este cálculo compreende as seguintes partes:

2c.1) Seleciona-se três pseudo-linhas sísmicas que cumpram a condição $\mathbf{F} \neq 0$, onde,

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \cos^2 \Phi_1 & 2 \text{sen} \Phi_1 \cos \Phi_1 & \text{sen}^2 \Phi_1 \\ \cos^2 \Phi_2 & 2 \text{sen} \Phi_2 \cos \Phi_2 & \text{sen}^2 \Phi_2 \\ \cos^2 \Phi_3 & 2 \text{sen} \Phi_3 \cos \Phi_3 & \text{sen}^2 \Phi_3 \end{bmatrix} \quad (7.45)$$

2c.2) Para o cálculo dos elementos da matriz \mathbf{A} expande-se a equação (7.41) para as três pseudo-linhas.

2c.3) Substitui-se os valores finais do vetor \mathbf{c} na equação (7.41) para obter os valores iniciais da matriz \mathbf{A} .

2c.4) Cálculo dos elementos finais da matriz \mathbf{A} . Substitue-se as componentes finais do vetor \mathbf{c} e os valores iniciais dos elementos da matriz \mathbf{A} na equação (7.41) para refinar os elementos da \mathbf{A} através do empilhamento ZO final 3-D. Este é o empilhamento ZO 3-D final, uma vez que se considera a matriz \mathbf{A} e o vetor \mathbf{c} .

3) Terceira etapa: Empilhamento CRS 3-D.

Nesta etapa, considera-se todos os dados sísmicos de cobertura múltipla. Substitui-se os oito parâmetros obtidos (etapas 1 e 2) na equação (7.6) para simular o volume de dados sísmicos ZO 3-D. Esta estratégia é resumida na Figura 7.11.

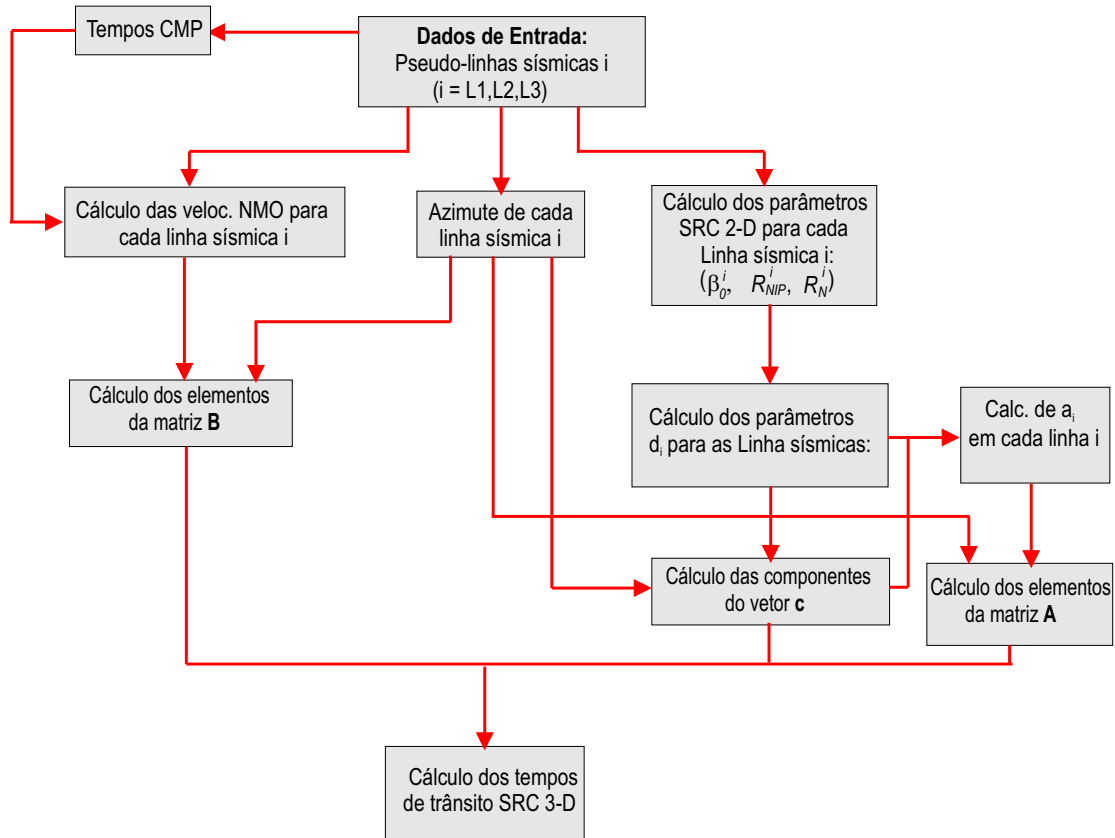


Figura 7.11 - Fluxograma computacional para a estratégia das três aproximações dos tempos de trânsito. Como resultado final obtém-se um volume de traços simulados com afastamento-nulo a partir das velocidades NMO calculados para cada uma das pseudo-linhas sísmicas, para cada ponto X_0 da superfície de medição plana-horizontal.

7.2.3 Estratégia da decomposição das matrizes

Esta estratégia foi introduzida por Höcht (2002), denominado desta forma devido à equação de aproximação de tempos de trânsito (7.6) conter as matrizes \mathbf{A} e \mathbf{B} decompostas em um produto de matrizes de transformação para o caso bi-dimensional e as matrizes das curvaturas das ondas NIP e N.

Esta estratégia também considera três pseudo-linhas sísmicas que se cruzam em cada ponto X_0 de emergência do raio de reflexão normal.

O número de parâmetros procurados desta estratégia é oito e são: os ângulos de direção do raio de reflexão normal (φ_1, φ_2) , as curvaturas das ondas NIP e N.

A determinação destes parâmetros consta das seguintes etapas:

- 1) Seleção de três pseudo-linhas sísmicas para cada ponto X_0 , onde é simulado um traço sísmico com afastamento-nulo a partir dos parâmetros procurados;
- 2) Determinação dos três parâmetros $(\beta_0^i, K_{NIP}^i, K_N^i)$ para cada uma destas pseudo-linhas sísmicas selecionadas.
- 3) Especificar o vetor unitário correspondente a cada pseudo-linha sísmica (equação 7.3);
- 4) Cálculo dos ângulos de direção do raio de reflexão normal (φ_1, φ_2) . Para calcular estes ângulos torna-se necessário de dois ângulos de emergência do raio de reflexão normal, por exemplo, β_0^1 e β_0^2 . As duas pseudo-linhas sísmicas consideradas devem cumprir a condição de ser ortogonais, ou seja, $|\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2| \ll 1$. Além disso, são necessários os azimutes respectivos destas linhas sísmicas, Φ_1 e Φ_2 . Estes ângulos são expressos por

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{c_2}{c_1}\right), \quad (7.46)$$

$$\varphi_2 = \arcsen\left(\sqrt{c_1^2 + c_2^2}\right). \quad (7.47)$$

e acordo a Höcht (2002),

$$\cos \varphi_1 \sen \varphi_2 = c_1 = \frac{\sen \Phi_2 \sen \beta_0^1 - \sen \Phi_1 \sen \beta_0^2}{\cos \Phi_1 \sen \Phi_2 - \sen \Phi_1 \cos \Phi_2} = \frac{\sen \Phi_2 \sen \beta_0^1 - \sen \Phi_1 \sen \beta_0^2}{\det(\mathbf{S}^T)}, \quad (7.48)$$

$$\sen \varphi_1 \sen \varphi_2 = c_2 = \frac{\cos \Phi_1 \sen \beta_0^2 - \cos \Phi_2 \sen \beta_0^1}{\cos \Phi_1 \sen \Phi_2 - \sen \Phi_1 \cos \Phi_2} = \frac{\cos \Phi_1 \sen \beta_0^2 - \cos \Phi_2 \sen \beta_0^1}{\det(\mathbf{S}^T)}, \quad (7.49)$$

$$\det(\mathbf{S}^T) = \begin{pmatrix} \cos \Phi_1 & \sen \Phi_1 \\ \cos \Phi_2 & \sen \Phi_2 \end{pmatrix}. \quad (7.50)$$

- 5) Cálculo do vetor $\check{\mathbf{e}}_F$ segundo a equação (7.2);
- 6) Cálculo do ângulo φ_F . Segundo a Figura (7.6), o ângulo φ_F é o ângulo entre as direções

\mathbf{q}_1 e \mathbf{r}_1 . Este ângulo é obtido através da seguinte expressão (Höcht, 2002),

$$\begin{pmatrix} \cos \varphi_F \\ \text{sen} \varphi_F \end{pmatrix} = \frac{\mathbf{D}_y^T(\varphi_2) \mathbf{D}_z^T(\varphi_1) \check{\mathbf{e}}_F}{\sqrt{1 - (\mathbf{c} \cdot \check{\mathbf{e}}_F)^2}}. \quad (7.51)$$

7) Cálculo do ângulo γ_i . Segundo a Figura (7.1), o ângulo γ_i é o ângulo entre as direções \mathbf{q}_1 e \mathbf{u}_i . Este ângulo é obtido através da seguinte expressão,

$$\mathbf{u}_i = \begin{pmatrix} \cos \gamma_i \\ \text{sen} \gamma_i \end{pmatrix} = \frac{\mathbf{D}_z^T(\varphi_F) \mathbf{D}_y^T(\varphi_2) \mathbf{D}_z^T(\varphi_1) \check{\mathbf{e}}_i}{\sqrt{1 - (\mathbf{c} \cdot \check{\mathbf{e}}_i)^2}} \quad (i = 1, 2, 3). \quad (7.52)$$

8) Cálculo das matrizes das curvaturas das ondas NIP e Normal:

Para calcular estas curvaturas torna-se necessário conhecer os ângulos γ_i , ($i = 1, 2$) referidas às duas pseudo-linhas sísmicas (Figura 7.1).

As matrizes das curvaturas das ondas NIP (\mathbf{M}) e Normal (\mathbf{N}) são dadas por,

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{12} & m_{22} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{N} = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} \\ n_{12} & n_{22} \end{pmatrix}, \quad (7.53)$$

sendo,

$$m_{11} = \frac{1}{|\mathbf{E}|} \mathbf{f}_{11} \cdot \mathbf{k}_{\text{NIP}}, \quad m_{12} = \frac{1}{|\mathbf{E}|} \mathbf{f}_{12} \cdot \mathbf{k}_{\text{NIP}}, \quad m_{22} = \frac{1}{|\mathbf{E}|} \mathbf{f}_{22} \cdot \mathbf{k}_{\text{NIP}}, \quad (7.54)$$

$$n_{11} = \frac{1}{|\mathbf{E}|} \mathbf{f}_{11} \cdot \mathbf{k}_N, \quad n_{12} = \frac{1}{|\mathbf{E}|} \mathbf{f}_{12} \cdot \mathbf{k}_N, \quad n_{22} = \frac{1}{|\mathbf{E}|} \mathbf{f}_{22} \cdot \mathbf{k}_N, \quad (7.55)$$

$$(7.56)$$

$$|\mathbf{E}| = \begin{pmatrix} \cos^2 \gamma_1 & \text{sen}^2 \gamma_1 & 2 \cos \gamma_1 \text{sen} \gamma_1 \\ \cos^2 \gamma_2 & \text{sen}^2 \gamma_2 & 2 \cos \gamma_2 \text{sen} \gamma_2 \\ \cos^2 \gamma_3 & \text{sen}^2 \gamma_3 & 2 \cos \gamma_3 \text{sen} \gamma_3 \end{pmatrix}, \quad (7.57)$$

$$(7.58)$$

$$\mathbf{f}_{11} = \begin{pmatrix} 2 \cos \gamma_3 \text{sen} \gamma_3 \text{sen}^2 \gamma_2 - 2 \cos \gamma_2 \text{sen} \gamma_2 \text{sen}^2 \gamma_3 \\ 2 \cos \gamma_1 \text{sen} \gamma_1 \text{sen}^2 \gamma_3 - 2 \cos \gamma_3 \text{sen} \gamma_3 \text{sen}^2 \gamma_1 \\ 2 \cos \gamma_2 \text{sen} \gamma_2 \text{sen}^2 \gamma_1 - 2 \cos \gamma_1 \text{sen} \gamma_1 \text{sen}^2 \gamma_2 \end{pmatrix}, \quad (7.59)$$

$$\mathbf{f}_{12} = \begin{pmatrix} \cos^2 \gamma_2 - \cos^2 \gamma_3 \\ \cos^2 \gamma_3 - \cos^2 \gamma_1 \\ \cos^2 \gamma_1 - \cos^2 \gamma_2 \end{pmatrix}, \quad (7.60)$$

$$\mathbf{f}_{22} = \begin{pmatrix} 2 \cos \gamma_2 \text{sen} \gamma_2 \cos^2 \gamma_3 - 2 \cos \gamma_3 \text{sen} \gamma_3 \cos^2 \gamma_2 \\ 2 \cos \gamma_3 \text{sen} \gamma_3 \cos^2 \gamma_1 - 2 \cos \gamma_1 \text{sen} \gamma_1 \cos^2 \gamma_3 \\ 2 \cos \gamma_1 \text{sen} \gamma_1 \cos^2 \gamma_2 - 2 \cos \gamma_2 \text{sen} \gamma_2 \cos^2 \gamma_1 \end{pmatrix}, \quad (7.61)$$

$$\mathbf{k}_{\mathbf{NIP}} = \begin{pmatrix} 1/R_{NIP}^1 \\ 1/R_{NIP}^2 \\ 1/R_{NIP}^3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{k}_{\mathbf{N}} = \begin{pmatrix} 1/R_N^1 \\ 1/R_N^2 \\ 1/R_N^3 \end{pmatrix}. \quad (7.62)$$

Esta estratégia é resumida na Figura 7.12.

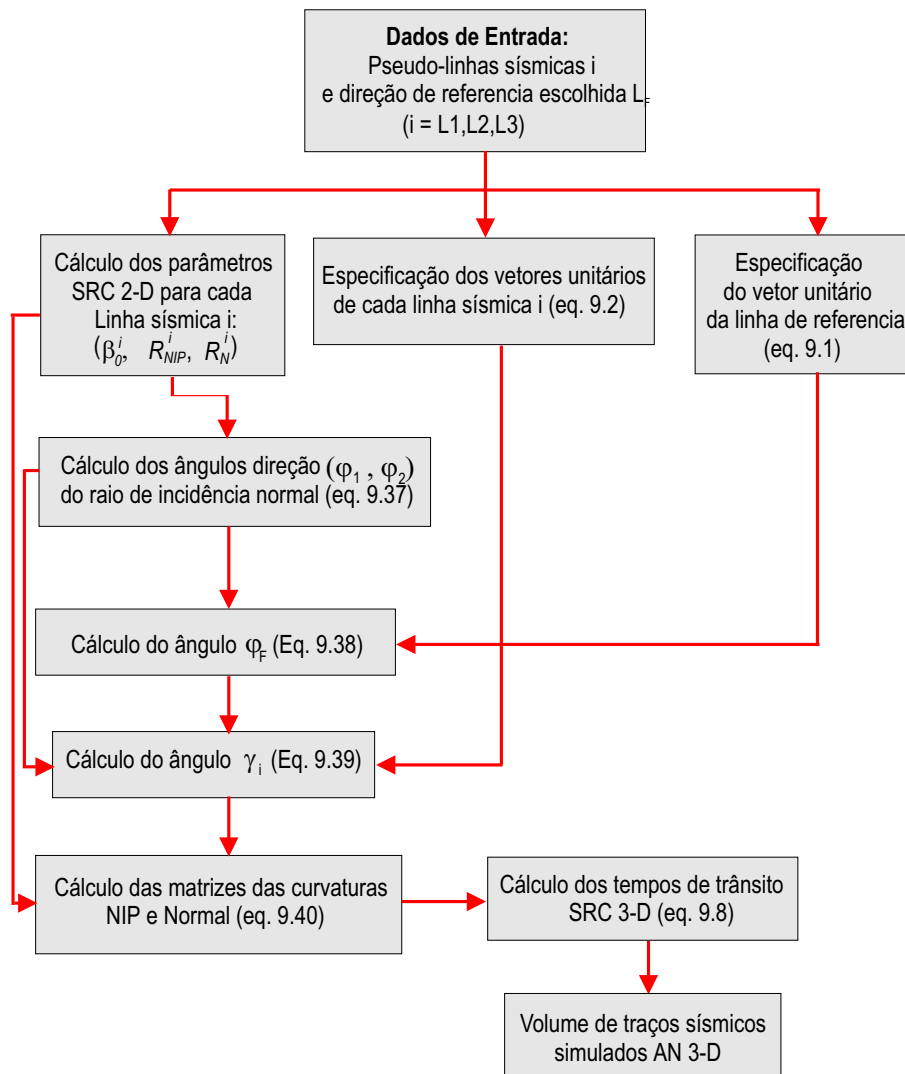


Figura 7.12 - Fluxograma computacional da estratégia de decomposição das matrizes. Como resultado final obtém-se um volume de traços sísmicos simulados ZO, a partir de parâmetros CRS 2-D referentes a cada linha sísmica i , ($i = L1, L2, L3$) e parâmetros referentes à linha de referencia escolhida (β_F, φ_F), em cada ponto X_0 da superfície de medição plana.

7.2.4 Estratégia das configurações arbitrárias com curvaturas esféricas

Esta estratégia (Chira, 2001) é assim denominada por considerar que as formas geométricas das ondas NIP e N são consideradas esféricas. Sendo assim, as matrizes \mathbf{A} e \mathbf{B} são expressas por;

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix} = \mathbf{D}_{zy} \overbrace{\begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} \\ n_{12} & n_{22} \end{pmatrix}}^{\mathbf{N}} \mathbf{D}_{zy}^{\mathbf{T}}, \quad (7.63)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{12} & b_{22} \end{pmatrix} = \mathbf{D}_{zy} \overbrace{\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{12} & m_{22} \end{pmatrix}}^{\mathbf{M}} \mathbf{D}_{zy}^{\mathbf{T}}. \quad (7.64)$$

Ao considerar a forma geométrica nas ondas, ou seja, $m_{11} = m_{12} = m_{22} = m$, $n_{11} = n_{12} = n_{22} = n$, então são reduzidas a seguinte forma:

$$\mathbf{A} = \mathbf{D}_{zy} \overbrace{\begin{pmatrix} n & 0 \\ 0 & n \end{pmatrix}}^{\mathbf{N}} \mathbf{D}_{zy}^{\mathbf{T}}, \quad (7.65)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{D}_{zy} \overbrace{\begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix}}^{\mathbf{M}} \mathbf{D}_{zy}^{\mathbf{T}}, \quad (7.66)$$

sendo, m e n as curvaturas da onda NIP e N esféricas. Desta forma, a função tempo de trânsito de empilhamento (7.6) vai depender apenas de quatro parâmetros: φ_1 , φ_2 , m e n . Esta estratégia compreende as seguintes etapas,

1) Primeira etapa: Empilhamento CMP 3-D.

Para a realização são selecionadas famílias CMP 3-D para simular dados sísmicos ZO 3-D. Nesta etapa, utiliza-se a parte esquerda da equação (7.36) dada por

$$t_{CMP,i}^2(h) = t_{0,i}^2 + \frac{2t_0}{v_1} h^2 \check{\mathbf{e}}_i \cdot \mathbf{B}\check{\mathbf{e}}_i. \quad (7.67)$$

Esta etapa considera as seguintes partes descritas a seguir.

1.1) Simplificação do modelo.

Na indústria, freqüentemente é usado a simplificação do modelo estratificado horizontal para obter resultados iniciais. Baseado nesta simplificação, é considerado que o modelo em profundidade abaixo de cada ponto X_O consiste de camadas estratificadas horizontalmente com

um refletor arbitrário. Conseqüentemente, $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = 0$ e, portanto $\mathbf{D}_{zy} = \mathbf{D}_{zy}^T = \mathbf{I}$. Desta forma, a matriz \mathbf{B} (eq. 7.66) se reduz-se a:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} m^* & 0 \\ 0 & m^* \end{pmatrix}. \quad (7.68)$$

onde, torna-se necessário apenas de um único parâmetro m^* inicial, dado por:

$$m^* = \frac{t_0}{2v_1} v_{RMS}^2, \quad (7.69)$$

sendo, v_{RMS} a velocidade RMS.

No caso em que existam poucos traços na coleção CMP em X_0 , deve-se considerar os bins na vizinhança (ver Figura 7.13). Por exemplo, no bin no. 2 se toma o traço CMP dado por m_2 , como se corresponde a um traço CMP do “bin” 1, m_2^* . Neste sentido, tem-se uma “coleção CMP combinada” no “bin” 1 com mais traços CMP para simular traços ZO em X_0 .

2) Segunda etapa: Empilhamento ZO 3-D:

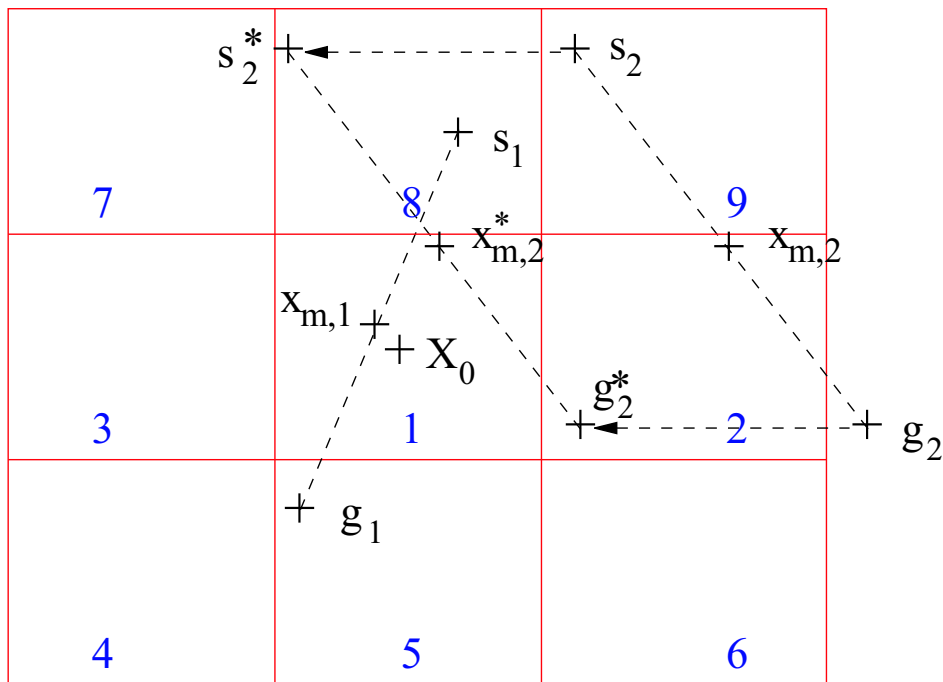


Figura 7.13 - Pontos-médios (\mathbf{x}_m) dos “bins” vizinhos ao “bin” 1, considerados como parte deste “bin”, para realizar o empilhamento CMP 3-D em relação ao ponto X_0 .

Os resultados obtidos na etapa anterior são utilizados com a parte esquerda da equação (7.41)

dado por:

$$t_{ZO}^2(x_m) = \left(t_0 + \frac{2}{v_1} \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_m \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1} \mathbf{x}_m \cdot \mathbf{A} \mathbf{x}_m . \quad (7.70)$$

Esta etapa considera as seguintes partes:

2.1) Considera-se uma aproximação de primeira ordem da equação (7.70) dada por:

$$t_{ZO}(\mathbf{x}_m) = t_0 + \frac{2}{v_1} \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_m . \quad (7.71)$$

Esta equação permite obter as componentes do vetor \mathbf{c} . Estas componentes serão obtidos através de uma busca de dois parâmetros.

2.2) Considerando o mesmo pressuposto da parte 1.1 desta estratégia, então a matriz \mathbf{A} fica reduzida da seguinte forma:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} n^* & 0 \\ 0 & n^* \end{pmatrix} . \quad (7.72)$$

A matriz \mathbf{A} (7.72) e os valores obtidos do vetor \mathbf{c} são substituídas na equação (7.70), para obter os elementos da matriz \mathbf{A} .

Os elementos da matriz \mathbf{A} são obtidos através de uma busca uni-dimensional (curvatura da onda N, m^*). Para a busca deste parâmetro, é utilizado um dos processos de otimização mencionados na parte anterior.

3) Em prosseguimento, os elementos da matriz \mathbf{B} são refinados com o auxílio do vetor \mathbf{c} , e para isto é usado a relação

$$\mathbf{B} = \mathbf{D}_{zy} \begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix} \mathbf{D}_{zy}^T = m \mathbf{D}_{zy} \mathbf{D}_{zy}^T , \quad (7.73)$$

na equação (7.67) para fazer uma nova busca uni-dimensional para o parâmetro m , que não é necessariamente igual ao parâmetro m^* , dado em 7.68. Este valor inicial é utilizado na busca da curvatura da onda NIP, m . Desta forma, será encontrada uma matriz \mathbf{B} adequada que poderá ser utilizada na fórmula (7.6).

4) De forma semelhante à terceira etapa, os valores refinados da matriz \mathbf{A} são obtidos;

5) Finalmente, substitui-se os 4 parâmetros procurados, na equação (7.6) para realizar o empilhamento CRS 3-D. Esta estratégia é resumida na Figura (7.14).

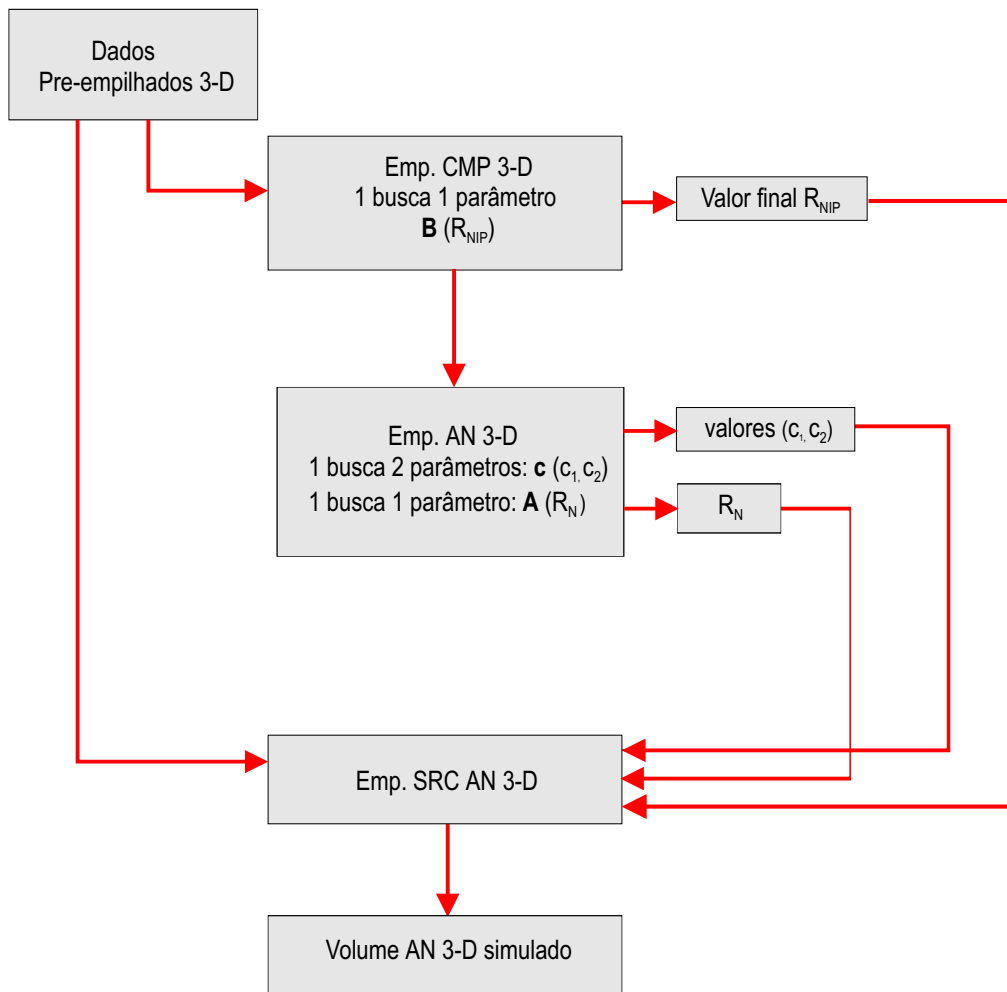


Figura 7.14 - Fluxograma computacional da estratégia das configurações arbitrárias com curvaturas esféricas. O número de parâmetros procurados desta estratégia é reduzido a quatro, devido à condição das ondas NIP e N consideradas como esféricas.

7.2.5 Estratégia das configurações e curvaturas arbitrárias

Esta estratégia (Chira, 2001) é assim denominada, por não restringir as formas geométricas das ondas NIP e N, podendo ser arbitrárias.

A presente estratégia é uma modificação de uma das estratégias propostas por Chira et al. (2000) para o empilhamento CRS 3-D. A mesma foi a base para a aplicação do método CRS 3-D para dados sintéticos (Cristini et al., 2001) e reais (Bergler et al., 2002).

Para aplicar a equação (7.6) para simular um traço sísmico ZO no ponto de empilhamento CRS, $P_0(x_0, y_0, z_0)$, é necessário encontrar os oito parâmetros contidos na equação, e que são: os três elementos da matriz **A**, os três elementos da matriz **B** e as duas componentes do vetor **c**.

Para a estimativa dos oito parâmetros, a equação (7.6) é dividida em duas etapas. Desta forma, a busca fica restrita para sub-conjuntos dos parâmetros obtidos em três buscas: uma busca de três parâmetros (elementos da matriz **B**) no volume CMP 3-D; e uma busca de dois parâmetros (componentes do vetor **c**) e a outra consiste de uma busca de três parâmetros (elementos da matriz **A**) no volume de traços sísmicos ZO simulados com o empilhamento CMP 3-D (Figura 7.15). Esta estratégia compreende três etapas.

1) Primeira etapa: Empilhamento CMP 3-D.

Esta etapa utiliza a equação (7.67), que depende da matriz **B**, constituída por três elementos não conhecidos. Estes parâmetros são obtidos através de uma busca de três parâmetros.

A matriz da velocidade NMO inversa **V** é obtida por:

$$\mathbf{V} = \frac{t_0}{2 v_1} \mathbf{B} . \quad (7.74)$$

2) Segunda etapa: Empilhamento ZO 3-D.

Neste etapa é utilizado o volume ZO simulado na etapa anterior. Considera-se a equação (7.70), que depende de cinco parâmetros não conhecidos: as duas componentes do vetor **c** e os três elementos da matriz **A**.

Considerando a aproximação de primeira ordem para a equação 7.70, esta reduz para a forma 7.71, em função do vetor **c**.

As componentes do vetor **c** são estimados através de uma busca bi-dimensional. A seguir, são substituídos as duas componentes do vetor **c** na equação (7.6) para estimar os três elementos da matriz **A**, aplicando uma busca de três parâmetros.

3) Terceira etapa: empilhamento CRS 3-D.

Finalmente, substitui-se os oito parâmetros na equação (7.6) para realizar o empilhamento CRS 3-D. A Figura 7.15 representa a estratégia das configurações e curvaturas arbitrárias.

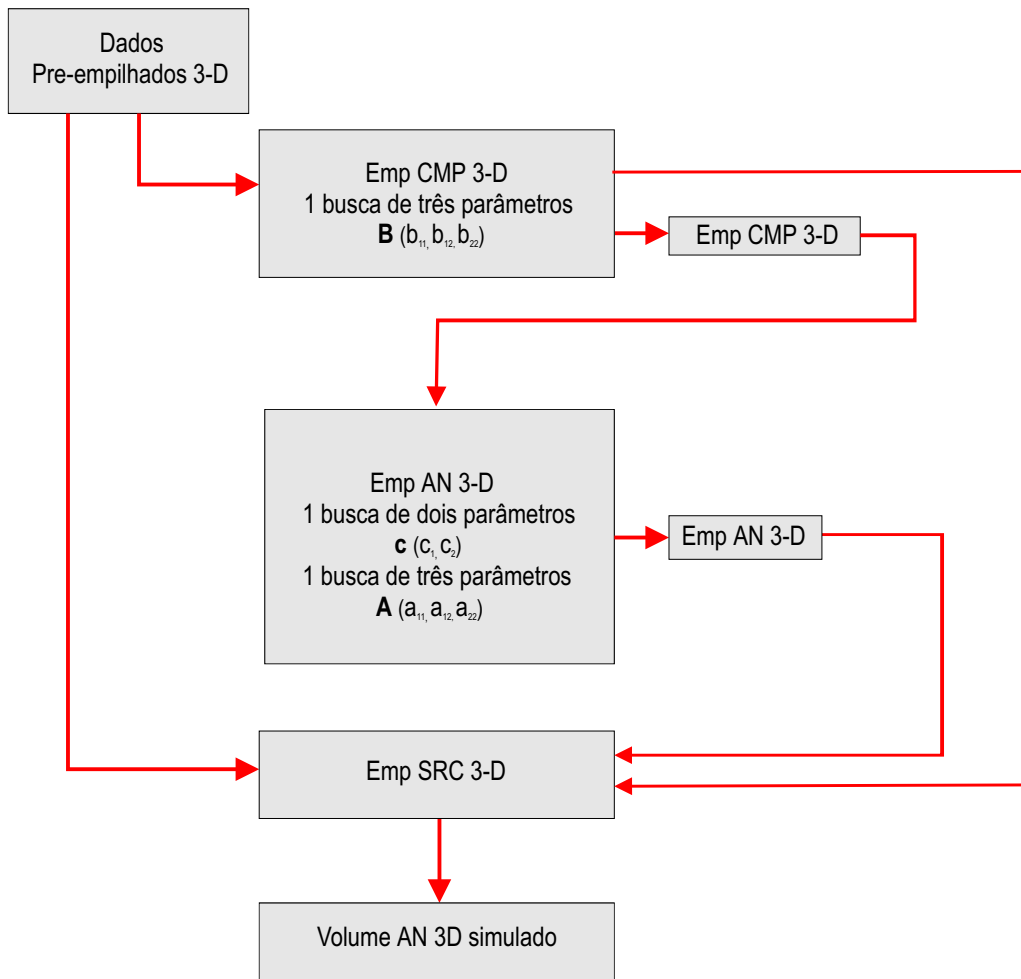


Figura 7.15 - Fluxograma computacional referente à estratégia das configurações e curvaturas arbitrárias. O número de parâmetros procurados desta estratégia são oito. As formas geométricas das ondas NIP e N são arbitrárias nesta estratégia.

7.3 APLICAÇÃO A DADOS SINTÉTICOS

O empilhamento CRS 3-D tem sido aplicado em dados sintéticos (Cristini et al, 2001) e em dados reais (Bergler et al, 2002) satisfatoriamente.

A Figura 7.16 é um modelo acústico 3-D simples composto por duas camadas sob um semi-espaço. Cada camada está separada por superfícies curvas e contínuas. As velocidades de propagação são aquelas referidas às ondas compressionais (P) para cada camada, sendo considerado que o gradiente de velocidade é zero. Um esquema de aquisição sísmica convencional foi realizado para obter os dados de cobertura múltipla. O tamanho do “bin” é $0.025 \times 0.025 \text{ m}^2$, sendo 0.0125 e 3.515 km os afastamentos mínimo e máximo obtido com uma técnica de tiro cruzado com 10 linhas de receptores por 96 canais. As respostas de reflexão primária foram geradas pelo pacote sísmico NORSAR 3D, sendo considerado o pulso Ricker de fase zero e uma frequência de 20 Hz.

Na Figura 7.17 apresenta-se o resultado da aplicação do empilhamento CMP 3-D. Este processo considera apenas os dados cuja configuração é CMP. O seguinte resultado em questão, é mostrado na Figura 7.18, o qual está referido ao empilhamento ZO 3-D. Este processo tem utilizado o resultado do empilhamento CMP. Finalmente, na Figura 7.19 apresenta-se o empilhamento CRS 3-D aplicado nos dados de cobertura múltipla referidos ao modelo da Figura 7.16.

Todos os volumes simulados (Figuras 7.17, 7.18 e 7.19) apresentam uma boa recuperação dos eventos de reflexão primária e na posição correta.

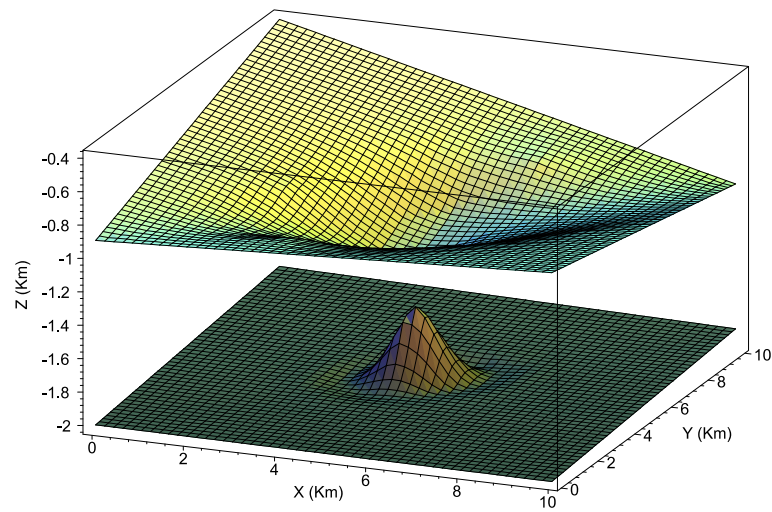


Figura 7.16 - Modelo 3-D constituído por duas camadas sob um semi-espaco. A superfície de medição é plana. As velocidades intervalares deste o topo até a base são 2 km/s, 3.5 km/s e 5 km/s.

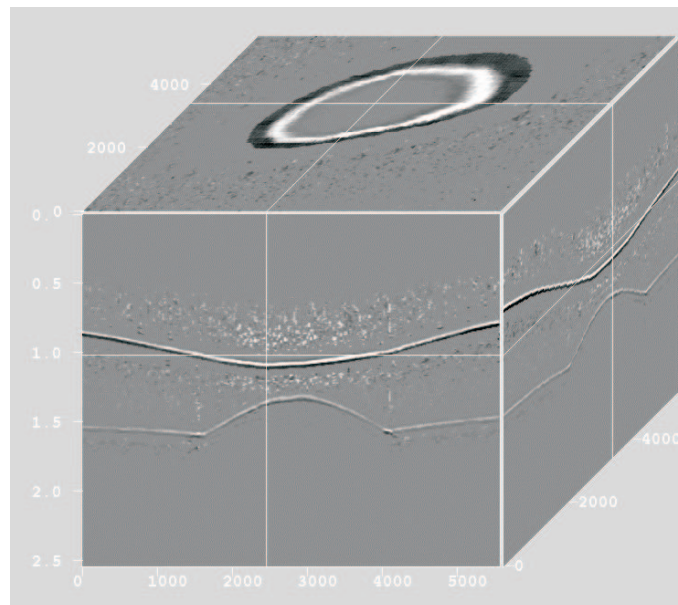


Figura 7.17 - Volume obtido pelo empilhamento CMP 3-D referido ao modelo da Figura 7.16. Neste processo foram considerados apenas os dados CMP (Cortesia de AGIP).

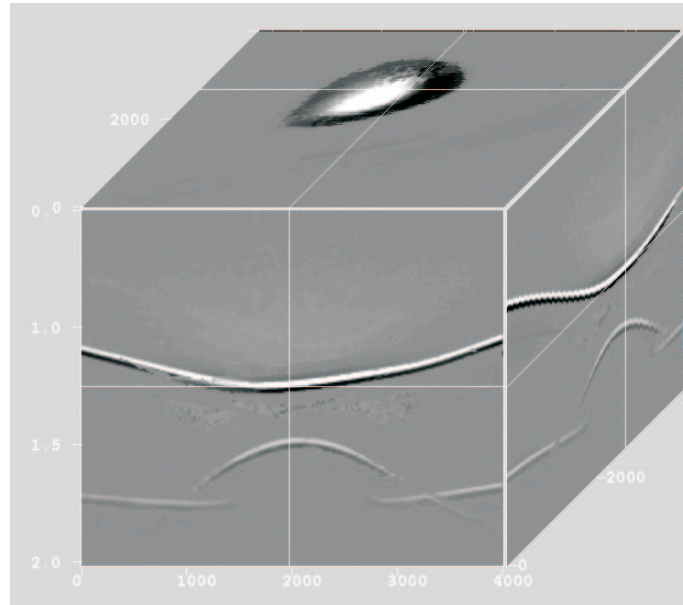


Figura 7.18 - Volume obtido pelo empilhamento ZO 3-D a partir do resultado da Figura 7.17 (Cortesia de AGIP).

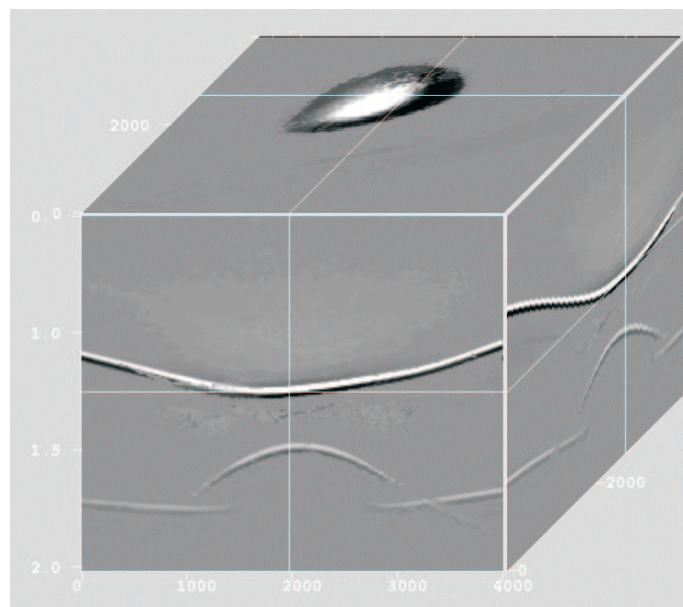


Figura 7.19 - Volume ZO simulado com o método de empilhamento CRS 3-D. Este processo considera todos os dados de cobertura múltipla da Figura 7.16 (Cortesia de AGIP).

8 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões relativas a extensão do método CRS para o caso de superfícies de medição curva. Da mesma forma, discutem-se sugestões de continuação de pesquisas no futuro, relacionados aos tópicos tratados nesta tese.

8.1 CONCLUSÕES

Tenho proposto e testado uma nova função de tempo de trânsito para o método CRS com topografia em dados sintéticos com resultados satisfatórios. Esta fórmula não é aplicável à topografias rugosas e complexas.

O resultado do empilhamento CRS para uma superfície de medição curva, ou seja a seção ZO simulada, apresentou uma boa recuperação dos eventos sísmicos de reflexão primária. Esta seção também apresentou um alto grau de supressão do ruído aleatório e também coincidência nas posições dos tempos de trânsito em relação à seção ZO obtida por modelamento direto. Além da seção ZO simulada, são obtidas a seção de coerência e as seções referidas aos três atributos das ondas NIP e N.

O parâmetro melhor recuperado é o ângulo β_0^* , e os outros não apresentam uma boa recuperação para todos os refletores. Este problema é devido a mudanças de comportamento brusco da função curvatura, o que estaria restringindo esta função de tempo de trânsito do empilhamento CRS.

Na análise da sensibilidade da curvatura K_0 com relação à função tempo de trânsito de empilhamento CRS para o caso de uma superfície de medição curva, se tem que esta curvatura torna-se mais sensível para maiores afastamentos (h) e pontos-médios (x_m) afastados do ponto X_0 . No caso contrário, para pequenos afastamentos e pontos-médios próximos do ponto X_0 , esta função de tempos de trânsito não é tão sensível.

Foi tenho proposto e testado uma nova expressão para a velocidade NMO (equação 4.14), que considera a curvatura da superfície de medição, considerando o método de inversão tipo Dix. Esta fórmula tem demonstrado ser mais exata que as velocidades NMO para superfícies de medição plana (horizontal e com mergulho) na recuperação das velocidades intervalares e as profundidades dos refletores.

Foram apresentados cinco estratégias para a determinação dos parâmetros CRS 3-D e seu consequente processo de empilhamento. As estratégias que estão relacionadas a busca de oito parâmetros são: i) estratégia das três linhas sísmicas; ii) estratégia das três aproximações dos tempos de trânsito; iii) estratégia da decomposição das matrizes; e iv) estratégia das configurações e curvaturas arbitrárias. No entanto, os oitos parâmetros procurados podem ser reduzidos a quatro, como tratado na estratégia das curvaturas arbitrárias com curvaturas esféricas que considera as formas geométricas das ondas hipotéticas NIP e N como esféricas.

Estas estratégias propostas estimam os parâmetros em etapas sucessivas, com a conveniência de que a função tempo de trânsito de empilhamento CRS 3-D apresenta a mesma estrutura como no caso 2-D. Portanto, aplicam-se as estratégias envolvidas no empilhamento CRS 2-D, ou seja, procuram os parâmetros nos sub-conjuntos dos dados sísmicos (segundo as configurações consideradas) e nos resultados de empilhamento em cada etapa. Outra possibilidade considerada por estas estratégias é considerar três linhas sísmicas que se cruzam aproximadamente em cada ponto da superfície planar, onde deve ser simulado um traço sísmico ZO.

8.2 PERSPECTIVAS

Devido aos resultados satisfatórios obtidos pela aplicação do algoritmo implementado do método CRS 2-D em dados sintéticos neste trabalho, é importante considerar como uma perspectiva natural a aplicação a dados reais. Estes testes deverão ser comparados com outros métodos sísmicos.

Aplicar outros métodos de inversão diferentes do método tipo Dix em modelos com topografia e interfaces curvas. Um fator importante nos resultados obtidos com o empilhamento CRS 2-D é a utilização de uma adequada fórmula de abertura no empilhamento. Ainda é necessário, verificar as diversas fórmulas de abertura existentes para o empilhamento e estabelecer qual contribui melhor no resultado do empilhamento CRS. Sugere-se testar as aberturas propostas por Chira et al., (2002) através da consideração da expansão de Taylor do atual função tempo de trânsito de empilhamento CRS 2-D. A seguir, comparar estas aberturas propostas com as aberturas aplicadas por Vieth (2001) em dados reais, que considerou as zonas de Fresnel como uma abertura para o empilhamento CRS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, F. 2003. **Atenuação de Múltiplas pelo método WHLP-CRS**. Belém, Universidade Federal do Pará (Tese de Doutorado).
- BARD, Y. 1974. **Nonlinear Parameter Estimation**. New York, Academic Press, Inc. 302 p.
- BERGLER, S.; HUBRAL, P.; MARCHETTI, P.; CRISTINI, A.; CARDONE, G. 2002. 3D common-reflection-surface stack and kinematic wavefield attributes. **The Leading Edge**, 21:1010-1015.
- BILOTI, R. 2001. **Tempo de Trânsito Multiparamétricos: Estimação e Inversão**. Campinas, Universidade Estadual de Campinas (Tese de Doutorado).
- BILOTI, R.; PORTUGAL, R.; SANTOS, T. L.; TYGEL, M. 2001. Obtaining AVO and AVA curves from CRS attributes. **Journal of Seismic Exploration**, 10:19-29.
- BIRGIN, E. G.; BILOTI, R.; TYGEL, M.; SANTOS, T. L. 1999. Restricted optimization: a clue to a fast and accurate implementation of the Common Reflection Surface Stack method. **Journal of Applied Geophysics**, 42:143-155.
- BORTFELD, R. 1989. Geometrical ray theory: Rays and traveltimes in seismic systems (second order approximation of the traveltimes). **Geophysics**, 54:342-349.
- BLEINSTEIN, N. G. 1986. Two and one-half dimensional in plane wave propagation. **Geophysical Prospecting**, 34:686-703.
- ČERVENÝ, V. 1985. **The application of ray tracing to the numerical modeling of seismic wavefields in complex structures**. In: Dohr, G., Ed., *Seismic Shear Waves, Part A: Theory*. London, Geophysical Press., 15:1-24.
- ČERVENÝ, V. 2001. **Seismic ray theory**. Cambridge University Press.
- ČERVENÝ, V. & PSĚNSIK, I. 1988. SEIS88, Ray tracing program package. Prague, Charles University.
- CHIRA, P. 2000. **Imageamento Multifoco de Refletores Sísmicos**. Belém, Universidade Federal do Pará (Tese de Mestrado).

- CHIRA, P. 2001. **The 3D Common-Reflection-Surface Stack** (Relatório interno apresentado a AGIP (ENI) - Italy).
- CHIRA, P. & HUBRAL, P. 2003. Traveltime formulas of near-zero-offset primary reflections for a curved 2-D measurement surface. **Geophysics**, 68:255-261.
- CHIRA, P.; HÖCHT, G.; MANN, J.; HUBRAL, P. 2000. **Strategies for the 3D Common-Reflection-Surface Stack** (Relatório interno apresentado a AGIP (ENI) - Italy).
- CHIRA, P.; TYGEL, M.; HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J. 2002. **A fourth-order CRS moveout for reflection and diffraction events**. Apresentado para o Wave Technology Inversion (WIT) Report, Karlsruhe (Germany).
- CHIRA, P.; TYGEL, M.; ZHANG, Y.; HUBRAL, P. 2001. Analytic CRS Stack formula for a 2D curved measurement surface and finite-offset reflections. **Journal of Seismic Exploration**, 10:245-262.
- CORONA, A.; MARCHESI, M.; MARTINI, C.; RIDELA, S. 1987. Minimizing multimodal functions of continuous variables with 'Simulated Annealing' algorithm. **ACM Transactions on Mathematical Software**, 13:262-280.
- CRISTINI, A.; CARDONE, G.; CHIRA, P.; HUBRAL, P.; MARCHETTI, P. 2001. 3D Zero-Offset Common Reflection Surface Stack for Land Data. In: CONGRESSO EM SAN ANTONIO, SEG MEETING, W5-13.
- DE BAZELAIRE, E. 1988. Normal moveout revisited-inhomogeneous media and curved interfaces. **Geophysics**, 53:143-157.
- DIX, H. C. 1955. Seismic velocities from surface measurements. **Geophysics**, 20:68-86.
- GARABITO, G. 2001. **Empilhamento Sísmico por Superfície de Reflexão Comum: um novo algoritmo usando Otimização Global e Local**. Belém, Universidade Federal do Pará (Tese de Doutorado).
- GARABITO, G.; CRUZ, J. C. R.; HUBRAL, P.; COSTA, J. 2001a. Common reflection surface stack by global optimization. In: ANN. INTERNAT. SEG MEETING , 71. **Expand. Abstract**, San Antonio, Texas.
- GARABITO, G.; CRUZ, J. C. R.; HUBRAL, P.; COSTA, J. 2001b. Empilhamento Sísmico de Superfícies de Reflexão Comum com Mergulhos Conflitantes. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 7o. **Resumos expandidos**, TS2.

- GELCHINSKY, B.; BERKOVITCH, A.; KEYDAR, S. 1999a. Multifocusing homeomorphic imaging. Part I. Basic concepts and formulas. Special Issue: Macro-Model Independent Seismic Reflection Imaging. **Journal of Appl. Geophys.**, 42:229-242.
- GELCHINSKY, B.; BERKOVITCH, A.; KEYDAR, S. 1999b. Multifocusing homeomorphic imaging. Part II. Multifold data set and multifocusing. Special Issue: Macro-Model Independent Seismic Reflection Imaging. **Journal Appl. Geophys.**, 42:243-260.
- GILL, P. E.; MURRAY, W.; WRIGHT, M. H. 1981. **Practical optimization**. New York, Academic Press, 401 p.
- GROSFELD, V.; BILOTI, R.; SANTOS, T. L.; TYGEL, M. 2001. **Topographic effects correction using CRS parameters**. University of Karlsruhe, Germany (WIT Report).
- GUREVICH, B.; KEYDAR, S.; LANDA, E. 2002. Multifocusing imaging over an irregular topography. **Geophysics**, 67:639-643.
- HEILMANN, Z. 2002. **The Common-Reflection-Surface Stack under consideration of the Acquisition Surface Topography and of the Near-Surface Velocity Gradient**. University of Karlsruhe, Germany (Master's dissertation).
- HÖCHT, G. 1998. **Common reflection surface stack**. University of Karlsruhe, Germany (Master's dissertation).
- HÖCHT, G. 2002. **Traveltime approximation for 2D and 3D media and kinematic wavefield attributes**. University of Karlsruhe, Germany (PhD thesis).
- HUBRAL, P., 1983. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. **Geophysics**, 48:1051-1062.
- HUBRAL, P. 1999. Special Issue: Macro-Model Independent Seismic Reflection Imaging. **Journal Appl. Geophys.**, 42: 3, 4.
- HUBRAL, P. & KREY, T. 1980. **Interval velocities from seismic reflection time measurements**. Soc. Expl. Geophys (Monograph).
- HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J.; TYGEL, M. 1992. Three-dimensional paraxial ray properties, Part I: Basic relations. **Journal of Seismic Exploration**, 1:265-279.
- HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HANITZSCH, C. 1993. Determination of fresnel zones from traveltime measurements. **Geophysics**, 58:703-712.

- JÄGER, R. 1999. **The Common Reflection Surface Stack** : Introduction and Application. University of Karlsruhe, Germany (Master's dissertation).
- JÄGER, R.; MANN, J.; HÖCHT, G.; HUBRAL, P. 2001. Common Reflection Surface Stack: Image and Attributes. **Geophysics**, 66:97-109.
- MACIEL, R.; CRUZ, J. C. R.; GARABITO, G. 2001. Empilhamento SRC considerando Múltiplas Reflexões. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 7. **Resumos expandidos**, PS6.
- MAJER, P. 2000. **Inversion of seismic parameters**: Determination of the 2-D iso-velocity layer model. University of Karlsruhe, Germany (Master's dissertation).
- MANN, J. 2001. **Common-Reflection-Surface Stack**: User's manual to version 4.2. Geophysical Institute, University of Karlsruhe (Germany).
- MANN, J. 2002. **Extensions and Applications of the Common-Reflection-Surface Stack Method**. University of Karlsruhe, Germany (PhD thesis).
- MANN, J.; HUBRAL, P.; TRAUB, B.; GERST, A.; MEYER, H. 2000. Macro-Model Independent Approximative Prestack Time Migration. In: MTG. EUR. ASSN. GEOSCI. ENG., 62. **Extended Abstracts**, B-52.
- MANN, J.; JÄGER, R.; MÜLLER, T.; HÖCHT, G.; HUBRAL, P. 1999. Common Reflection Surface stack: a real data example. Special Issue: Macro-Model Independent Seismic Reflection Imaging. **Journal Appl. Geophys.**, 42:301-318.
- MAYNE, W. H. 1962. Common reflection point horizontal data stacking techniques. **Geophysics**, 27:927-938.
- MÜLLER, T. 1999. **The common reflection surface stack**: seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model. Der Andere Verlag. Bad Iburg.
- POPOV, M. M. & PŠENČÍK, I. 1978. Computation of ray amplitudes in inhomogeneous media with curved interfaces. **Studia Geophy. et Geod.**, 22:248-258.
- SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. 1993a. Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media. **Geophys. Prosp.**, 41:495-513.
- SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. 1993b. 3-D true-amplitude finite-offset migration. **Geophysics**, 58:1112-1126.

- SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. 2003. **Seismic true amplitude imaging** (SEG monograph in press).
- SHAH, P. 1973. Use of wavefront curvature to relate seismic data with subsurface parameters. **Geophysics**, 38:812-825.
- TANER, M. T. & KOEHLER, F. 1969. Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity functions. **Geophysics**, 34:859-881.
- TEEC, 2002. TEEC up and running with 3D CRS seismic processing. **First Break**, 20:596.
- TRAPPE, H.; GIERSE, G.; PRUESSMANN, J. 2001. Case studies show potential of common reflection surface stack - structural resolution in the time domain beyond the conventional NMO/DMO stack. **First Break**, 19:625-633.
- VIETH, K.-U. 2001. **Kinematic wavefield attributes in seismic imaging**. University of Karlsruhe, Germany (PhD thesis).
- ZHANG, Y.; HÖCHT, G.; HUBRAL, P. 2002. 2D and 3D ZO CRS stack for a complex top-surface topography. In: EAGE CONFERENCE, 64. **Extended Abstracts**. Poster 166.

APÊNDICES

APÊNDICE A - MATRIZ PROPAGADORA SUPERFÍCIE A SUPERFÍCIE

De acordo com Hubral et al., (1992), Červený (2001) e Schleicher et al., (2003), a matriz propagadora superfície a superfície $\underline{\mathbf{T}}$ 4×4 é expressa por

$$\underline{\mathbf{T}} = \begin{pmatrix} \underline{\mathbf{A}} & \underline{\mathbf{B}} \\ \underline{\mathbf{C}} & \underline{\mathbf{D}} \end{pmatrix}, \quad (\text{A-1})$$

sendo $\underline{\mathbf{A}}$, $\underline{\mathbf{B}}$, $\underline{\mathbf{C}}$ e $\underline{\mathbf{D}}$ as sub-matrizes 2×2 , as quais podem ser expressas para o caso 2-D pelos escalares:

$$A = \frac{Q_1 g_S}{g_G} - \frac{Q_2 X_S}{g_S g_G}, \quad (\text{A-2})$$

$$B = \frac{Q_2}{g_S g_G}, \quad (\text{A-3})$$

$$C = g_S g_G P_1 - \frac{g_G P_2 X_S}{g_S} + \frac{g_S X_G Q_1}{g_G} - \frac{X_G Q_2 X_S}{g_S g_G}, \quad (\text{A-4})$$

$$D = \frac{g_G P_2}{g_S} + \frac{X_G Q_2}{g_S g_G}, \quad (\text{A-5})$$

onde, P_1 , P_2 , Q_1 e Q_2 são os elementos escalares da matriz propagadora Π (Popov e Pšenčík, 1978; Červený, 1985; Hubral et al., 1992) expressa por

$$\Pi_{ZO} = \begin{pmatrix} Q_1 & Q_2 \\ P_1 & P_2 \end{pmatrix}. \quad (\text{A-6})$$

A matriz $\underline{\mathbf{T}}$ é definida para o sistema de coordenadas Cartesianas e a matriz propagadora Π é definida para o sistema de coordenada centrada no raio (Červený, 2001). As outras quantidades são definidas abaixo.

Considere-se um modelo 2-D (Figuras 4.1a e 4.1b) com uma superfície de medição curva e um par fonte-receptor coincidentes X_0 . Na vizinhança da posição fonte-receptor coincidentes, X_0 , onde a velocidade perto da superfície v_1 muda apenas gradualmente, têm-se dois pontos S' e G' . Este par fonte-receptor é conectado pelo raio paraxial refletido $S'R'G'$. Segundo Červený (2001) e Schleicher et al. (2003) pode-se expressar para o caso 2-D as projeções de $S'(x_S)$ e $G'(x_G)$ sobre o eixo x_1 do sistema de coordenadas Cartesianas local 2-D $\vec{x}(x_1, x_3)$

centrado em X_0 para o eixo q_1 do sistema de coordenadas centrada no raio 2-D $\vec{q}(x_1, x_3)$ (Figura 4.1b) por:

$$q_S = g_S x_S, \quad q_G = g_G x_G, \quad (\text{A-7})$$

$$g_S = \cos \beta_0^*, \quad g_G = \cos \beta_0^*, \quad (\text{A-8})$$

$$X_S \equiv \frac{\cos \beta_0^*}{v_1} K_0, \quad X_G \equiv \frac{-\cos \beta_0^*}{v_1} K_0, \quad X_S \equiv -X_G. \quad (\text{A-9})$$

Na aproximação paraxial, a superfície de medição curva em X_0 é expressa como uma parábola, e o sistema de coordenadas local 2-D (x_1, x_3) , é representado por

$$x_3 = \frac{1}{2} K_0 x_1^2, \quad (\text{A-10})$$

onde K_0 é a curvatura da linha em SG (Schleicher et al., 2003).

A matriz Π para o caso ZO , é expressa em termos das curvaturas da frente de onda NIP e N , K_{NIP} e K_N (Hubral, 1983) no ponto X_0 por:

$$\Pi_{ZO} = \pm \frac{1}{K_{NIP} - K_N} \begin{pmatrix} K_{NIP} + K_N & 2 v_1 \\ \frac{2}{v_1} K_{NIP} K_N & K_{NIP} + K_N \end{pmatrix} \quad (\text{A-11})$$

Substituindo as equações (A-8), (A-9) e as componentes da matriz Π (equação A-11) nas equações (A-2) até (A-5) são obtidas as componentes A, B, C e D da matriz \mathbf{T} 2×2 dados pelas equações (4.4 e 4.5).

APÊNDICE B - DERIVAÇÃO DA APROXIMAÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO HIPERBÓLICO 2-D

De acordo com Schleicher et al. (1993a), a aproximação de tempo de trânsito parabólico 3-D é dado por

$$t = t_0 + 2 \mathbf{p}_0 \cdot \mathbf{x}_m + \mathbf{x}_m \cdot \mathbf{D}_0^{-1} \mathbf{C}_0 \mathbf{x}_m + \mathbf{h} \cdot \mathbf{B}_0^{-1} \mathbf{A}_0 \mathbf{h} \quad (\text{B-1})$$

e por questão prática considerando $\mathbf{D}_0^{-1} \mathbf{C}_0 = \frac{\mathbf{A}}{v_1}$, $\mathbf{B}_0^{-1} \mathbf{A}_0 = \frac{\mathbf{B}}{v_1}$, $\mathbf{p}_0 = \frac{1}{v_1} \mathbf{c}$ na equação (B-1) é expressa por

$$t = t_0 + \frac{2}{v_1} \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}_m + \frac{1}{v_1} \mathbf{x}_m \cdot \mathbf{A} \mathbf{x}_m + \frac{1}{v_1} \mathbf{h} \cdot \mathbf{B} \mathbf{h} \quad (\text{B-2})$$

sendo,

$$\mathbf{c} = (c_1, c_2), \quad \mathbf{x}_m = (m_x, m_y), \quad \mathbf{h} = (h_x, h_y), \quad (\text{B-3})$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{12} & b_{22} \end{pmatrix}. \quad (\text{B-4})$$

A fórmula B-2 na forma escalar é:

$$t(m_x, m_y, h_x, h_y) = t_0 + \frac{2}{v_1} (c_1 m_x + c_2 m_y) + \frac{1}{v_1} (a_{11} m_x^2 + 2 a_{12} m_x m_y + a_{22} m_y^2) + \frac{1}{v_1} (b_{11} h_x^2 + 2 b_{12} h_x h_y + b_{22} h_y^2) \quad (\text{B-5})$$

Elevando ao quadrado a equação (B-5) tem-se:

$$\begin{aligned} t^2(m_x, m_y, h_x, h_y) &= \left[t_0 + \frac{2}{v_1} (c_1 m_x + c_2 m_y) \right]^2 + \frac{1}{v_1^2} \left[(a_{11} m_x^2 + 2a_{12} m_x m_y + a_{22} m_y^2)^2 + (b_{11} h_x^2 + 2 b_{12} h_x h_y + b_{22} h_y^2) \right] + \\ &\frac{2}{v_1} \left[t_0 + \frac{2}{v_1} (c_1 m_x + c_2 m_y) \right] \left[(a_{11} m_x^2 + 2 a_{12} m_x m_y + a_{22} m_y^2) + (b_{11} h_x^2 + 2 b_{12} h_x h_y + b_{22} h_y^2) \right] + \frac{2}{v_1} (a_{11} m_x^2 + 2 a_{12} m_x m_y + a_{22} m_y^2) (b_{11} h_x^2 + 2 b_{12} h_x h_y + b_{22} h_y^2) \end{aligned} \quad (\text{B-6})$$

Para o caso 2-D, na equação B-6 têm-se que, $m_y = 0$ e $h_y = 0$ e considerando os termos até segunda ordem, obtêm-se:

$$t^2(m_x, h_x) = \left[t_0 + \frac{2}{v_1} c_1 m_x \right]^2 + \frac{2 t_0}{v_1} [a_{11} m_x^2 + b_{11} h_x^2] . \quad (\text{B-7})$$

A partir das expressões $\mathbf{A} = \mathbf{D}_{zy} \mathbf{N} \mathbf{D}_{zy}^T$ e $\mathbf{B} = \mathbf{D}_{zy} \mathbf{M} \mathbf{D}_{zy}^T$, onde

$$\mathbf{D}_{zy} = \mathbf{D}_z(\varphi_1) \mathbf{D}_y(\varphi_2) = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi_2 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 & \sin \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 & \cos \varphi_1 \end{pmatrix} . \quad (\text{B-8})$$

aplicam-se estas expressões para obter os elementos a_{11} e b_{11} dados por:

$$a_{11} = \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2 n_{11} + 2 \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 n_{12} + n_{22} \sin^2 \varphi_1 n_{22} , \quad (\text{B-9})$$

$$b_{11} = \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2 m_{11} + 2 \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 m_{12} + \sin^2 \varphi_1 m_{22} . \quad (\text{B-10})$$

Para o caso 2-D, onde $\varphi_1 = 0$, e fazendo $n_{11} = 1/R_N$, $m_{11} = 1/R_{NIP}$ e $\varphi_2 = \beta_0$ estes elementos ficam reduzidos a:

$$a_{11} = K_N \cos^2 \beta_0, \quad b_{11} = K_{NIP} \cos^2 \beta_0 . \quad (\text{B-11})$$

Da mesma maneira, como $\varphi_1 = 0$, então,

$$\mathbf{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \beta_0 \\ 0 \end{pmatrix} . \quad (\text{B-12})$$

Finalmente, substituindo os elementos a_{11} , b_{11} (eqs. B-11) e c_1 (equação B-12) na equação (B-7) e fazendo $m_x = x_m$ e $h_x = h$, tem-se a fórmula considerada pelo empilhamento SRC para uma linha de medição horizontal

$$t^2(x_m, h) = \left[t_0 + \frac{2}{v_1} \sin \beta_0 x_m \right]^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta_0}{v_1} [K_N x_m^2 + K_{NIP} h^2] . \quad (\text{B-13})$$

APÊNDICE C - DERIVAÇÃO DA APROXIMAÇÃO DA FUNÇÃO TEMPO DE TRÂNSITO CRS 2-D PARA UMA SUPERFÍCIE DE MEDIÇÃO CURVA COM GRADIENTE DE VELOCIDADE DIFERENTE DE ZERO

De acordo com Červený (2001), Chira et al. (2001) a função tempo de trânsito paraxial na forma parabólica, em relação ao raio central (Figura C.1) é dado por

$$t(\Delta x_S, \Delta x_G) = t_0 + a \Delta x_S + b \Delta x_G + c \Delta x_S \Delta x_G + d(\Delta x_S)^2 + e(\Delta x_G)^2 \quad (\text{C-1})$$

onde

$$a = \frac{-\text{sen}\beta_S}{v_S}, \quad b = \frac{\text{sen}\beta_G}{v_G}, \quad c = \frac{-1}{B}, \quad d = \frac{A}{2B}, \quad e = \frac{D}{2B}, \quad (\text{C-2})$$

$$\beta_S = \text{sen}^{-1}(v_S \mathbf{p}_S \cdot \mathbf{t}_S), \quad \beta_G = \text{sen}^{-1}(v_G \mathbf{p}_G \cdot \mathbf{t}_G), \quad (\text{C-3})$$

sendo \mathbf{p}_S , \mathbf{t}_S , e \mathbf{p}_G , \mathbf{t}_G os vetores vagarosidade e tangentes a superfície nos pontos S e G . t_0 é o tempo de trânsito ao longo do raio central. v_S e v_G são as velocidades do meio nos pontos inicial e final do raio central. β_S e β_G são os ângulos que o raio central faz com as normais às superfícies de medição nos pontos S e G (Figura C.1). Δx_S e Δx_G são os deslocamentos de posição, em relação as fonte S e receptor G . A , B e D são os elementos da matriz propagadora \mathbf{T} (Červený, 2001).

Elevando ao quadrado ambos lados da equação C-1 e considerando até os termos de segunda ordem obtém-se o tempo de trânsito paraxial na sua forma hiperbólica (Chira et al., 2001),

$$t^2(\Delta x_S, \Delta x_G) = [t_0 + a \Delta x_S + b \Delta x_G]^2 + 2 t_0 [c \Delta x_S \Delta x_G + d(\Delta x_S)^2 + e(\Delta x_G)^2]. \quad (\text{C-4})$$

Para o caso da fonte-receptor coincidentes, onde o raio central é um raio normal, as equações C-1 e C-4 se simplificam consideravelmente. As simplificações acontecem devido a que para um raio de reflexão normal, as trajetórias que se propagam e emergem, mudam de direções. Segundo Chira et al. (2001), isto tem duas conseqüências,

- As direções dos raios de incidência nos pontos fonte e receptor coincidentes são opostos. Isto implica que os dois ângulos correspondentes são simétricos

$$\beta_S = -\beta_G = \beta_0^* , \quad (\text{C-5})$$

A equação C-5 é uma consequência da convenção do sinal na definição destes ângulos (C-3) e a direção da normal na fonte.

- Como o raio de reflexão AN coincide com seu raio reverso, então suas matrizes superfície a superfície devem coincidir. A matriz propagadora de um raio de reflexão ZO é expresso por

$$T_{ZO} = \begin{pmatrix} A^{ZO} & B^{ZO} \\ C^{ZO} & D^{ZO} \end{pmatrix} , \quad A^{ZO} D^{ZO} - B^{ZO} C^{ZO} = 1 \quad (\text{C-6})$$

com a propriedade adicional $A^{ZO} = D^{ZO}$.

Introduzindo as coordenadas ponto-médio (x_m) e meio-afastamento (h),

$$x_m = \frac{\Delta x_S + \Delta x_G}{2} , \quad h = \frac{\Delta x_G - \Delta x_S}{2} , \quad (\text{C-7})$$

na função tempo de trânsito na forma hiperbólica (C-1), obtém-se,

$$t_{ZO}^2 = (t_0 + \alpha_0 x_m)^2 + 2 t_0 (\alpha_1 x_m^2 + \alpha_2 h^2) , \quad (\text{C-8})$$

onde

$$\alpha_0 = \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0^*}{v_1} , \quad \alpha_1 = \frac{A^{ZO} - 1}{B^{ZO}} , \quad \alpha_2 = \frac{A^{ZO} + 1}{B^{ZO}} . \quad (\text{C-9})$$

De acordo com Bortfeld (1989), Hubral (1983), a matriz propagadora centrada no raio em relação ao raio normal é expressa por

$$\pi_{ZO} = \begin{pmatrix} Q_1^{ZO} & Q_2^{ZO} \\ P_1^{ZO} & P_2^{ZO} \end{pmatrix} . \quad (\text{C-10})$$

Segundo Červený (2001) e Chira et al. (2001) os coeficientes de segunda ordem, α_1 e α_2 , podem ser expressos em função dos elementos da matriz π_{ZO} ,

$$\alpha_1 = \frac{A^{ZO} - 1}{B^{ZO}} = \left(\frac{Q_1^{ZO} + 1}{Q_2^{ZO}} \right) \cos^2 \beta_0^* - \frac{\cos \beta_0^*}{v_1} K_0 - E_0 , \quad (\text{C-11})$$

$$\alpha_2 = \frac{A^{ZO} + 1}{B^{ZO}} = \left(\frac{Q_1^{ZO} - 1}{Q_2^{ZO}} \right) \cos^2 \beta_0^* - \frac{\cos \beta_0^*}{v_1} K_0 - E_0 , \quad (\text{C-12})$$

onde

$$E_0 = \frac{-\text{sen}\beta_0^*}{v_1^2} \left[(1 + \cos^2 \beta_0^*) (\partial_1 v)(S_0) + \cos \beta_0^* \text{sen}\beta_0^* (\partial_3 v)(S_0) \right] , \quad (\text{C-13})$$

sendo E_0 o fator de heterogeneidade. $(\partial_1 v)(S_0)$ e $(\partial_3 v)(S_0)$ são as componentes no plano 2-D do gradiente de velocidade do meio v na fonte-receptor coincidentes S_0 .

Substituindo A-11 nas equações C-11 e C-12, obtém-se

$$\alpha_1 = \frac{\cos^2 \beta_0^*}{v_1} K_N - \frac{\cos \beta_0^*}{v_1} K_0 - E_0 , \quad (\text{C-14})$$

$$\alpha_2 = \frac{\cos^2 \beta_0^*}{v_1} K_{NIP} - \frac{\cos \beta_0^*}{v_1} K_0 - E_0 , \quad (\text{C-15})$$

e substituindo os coeficientes α_1 e α_2 na equação C-8, obtém-se finalmente a função tempo de trânsito CRS para uma superfície de medição curva com gradiente de velocidade constante,

$$\begin{aligned} t_{ZO}^2 = & \left(t_0 + \frac{2\text{sen}\beta_0^*}{v_1} x_m \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1} (K_N \cos^2 \beta_0^* - \cos \beta_0^* K_0 - v_1 E_0) x_m^2 \\ & + \frac{2 t_0}{v_1} (K_{NIP} \cos^2 \beta_0^* - \cos \beta_0^* K_0 - v_1 E_0) h^2 . \end{aligned} \quad (\text{C-16})$$

As derivações neste apêndice forma parte do artigo de Chira et al. (2001) publicado no Journal Seismic Exploration.

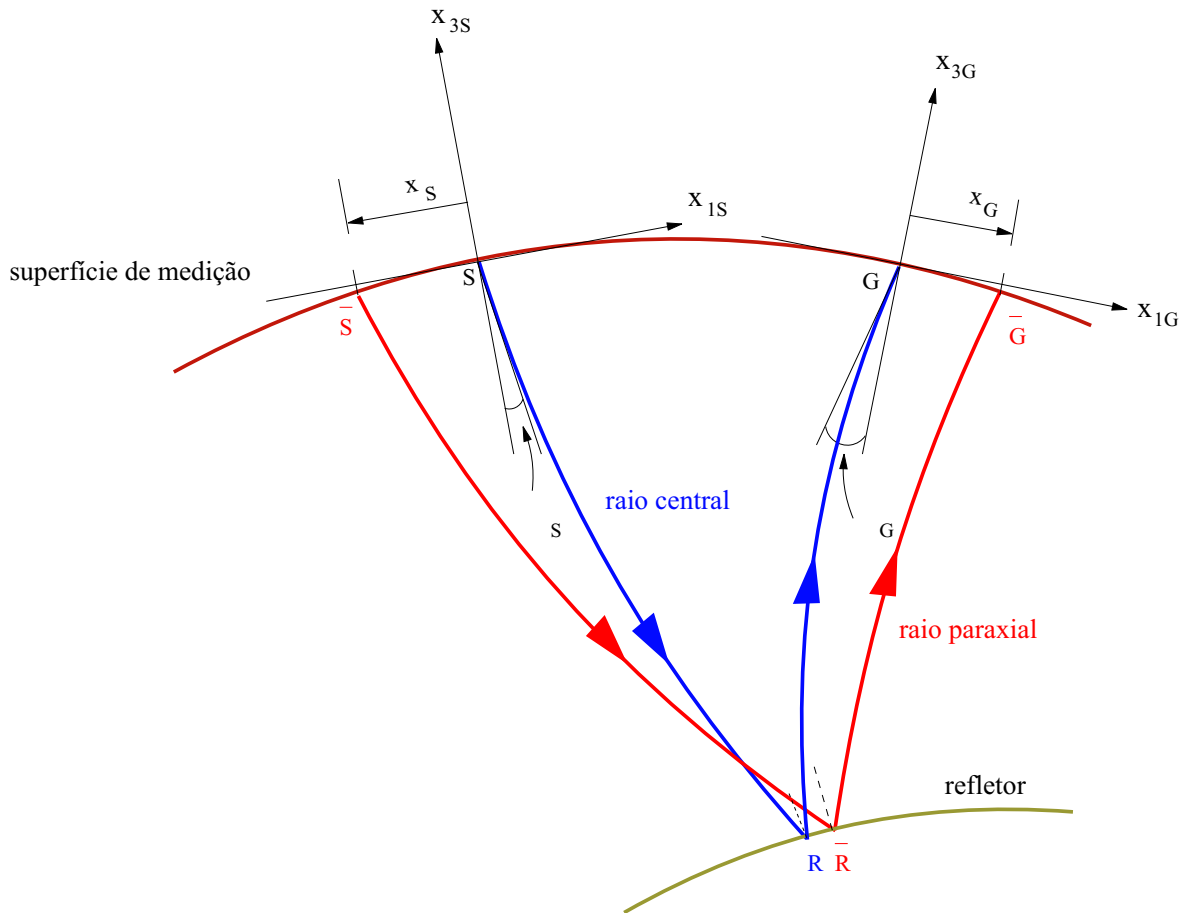


Figura APÊNDICE C.1 - Modelo 2-D para uma superfície de medição curva: os raios central SRG e paraxial SRG são mostrados. O ponto inicial S , é a origem do eixo local x_{1S} e o ponto final, G , é a origem do eixo local x_{1G} . Ambos eixos são tangentes a superfície de medição na fonte S e receptor G .