



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**IDENTIFICAÇÃO DE REFLEXÕES MÚLTIPLAS, UTILIZANDO
OS PARÂMETROS DAS FRENTES DE ONDA PIN E NORMAL**

FRANCISCO JOSÉ MOTA DE SOUZA

**BELÉM – PARÁ - BRASIL
2005**

Souza, Francisco José Mota de

Identificação de reflexões múltiplas, utilizando os parâmetros das frentes de onda PIN e NORMAL. / **Francisco José Mota de Souza; orientador, João Carlos Ribeiro Cruz; co-orientador, Pedro Andrés Chira Oliva. - 2005**

69f.: il

Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2005.

1. Identificação de múltiplas. 2. SRC 3. Reflexão múltipla 4. Parâmetros das frentes de onda 5. Onda PIN 6. Onda NORMAL I
Título.

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


**IDENTIFICAÇÃO DE REFLEXÕES MÚLTIPLAS, UTILIZANDO
OS PARÂMETROS DAS FRENTES DE ONDA PIN E NORMAL**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR


FRANCISCO JOSÉ MOTA DE SOUZA

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

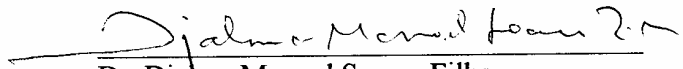
Data da aprovação: 21 /06 / 2005
Nota : 8,5 (Excelente)
COMITÊ DE DISSERTAÇÃO



Prof. Dr. João Carlos R. Cruz (Orientador)



Prof. Dr. Pedro Andrés Chira Oliva (Co-orientador)



Dr. Djalma Manoel Soares Filho

BELÉM – PARÁ – BRASIL

2005

À minha mãe Maria Celeste e à
minha esposa Ana Cláudia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado confiança e inspiração para concluir este trabalho.

Ao Prof. Dr. João Carlos Ribeiro Cruz pela confiança em mim creditada, pela sua inequívoca competência profissional, por sua compreensão e apoio.

Ao Prof. Dr. Pedro Chira pela co-orientação e apoio dispensados durante a elaboração desta dissertação.

A todos os colegas do CPGf, em especial ao amigo Carlos Sarmiento pelo auxílio e apoio imperiosos dispensados durante a realização desta dissertação.

Aos professores do CPGf, em especial ao Prof. Dr. German Garabito.

A minha mulher e meus filhos pela compreensão pelos dias, noites e fins de semana que não pude estar presente.

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

Ao Curso de Pós-Graduação de Geofísica da UFPA, que deu o suporte acadêmico para a elaboração deste trabalho.

A Sra Benildes Lopes por seu apoio, carinho e amizade constante.

À minha Mãe, Maria Celeste, sempre tão presente, pelo incentivo e apoio nos momentos difíceis.

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

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	v
LISTA DE SÍMBOLOS	x
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUÇÃO	3
1.1. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2. REFLEXÕES MÚLTIPLAS	6
2.1. CARACTERÍSTICA DA REFLEXÃO MÚLTIPLA.....	6
2.2. CLASSIFICAÇÃO DAS REFLEXÕES MÚLTIPLAS.....	6
2.3. MÉTODOS DE ATENUAÇÃO DE MÚLTIPLAS.....	9
2.3.1. Método de extração de periodicidade	9
2.3.2. Métodos de empilhamento sísmico	9
2.3.3. Método de predição baseados nos parâmetros de campo de onda	10
2.3.4. Métodos de inferência de campo de onda	11
2.3.5. Métodos baseados na autoconvolução	11
2.3.6. Métodos baseados na coerência	12
2.3.7. Métodos de espalhamento inverso	12
3. TEORIA DO RAIOS	13
3.1. EQUAÇÃO DA ONDA.....	13
3.2. EQUAÇÃO DA ONDA ACUSTICA.....	14
3.3. EQUAÇÃO DO ICONAL E TRANSPORTE.....	15
3.4. SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO ICONAL.....	16
3.5. SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE TRANSPORTE.....	16
4. APROXIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO	18
4.1. INTERFACES PLANO-HORIZONTAIS.....	18
4.2. MODELO 2-D COM INTERFACES PLANAS COM MERGULHO.....	21
4.3. INTERFACES CURVAS – 2D.....	22

4.4. APROXIMAÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO PARA REFLEXÕES MÚLTIPLAS.....	24
4.5. VELOCIDADE NMO	24
5. GEOMETRIA DE FRENTES DE ONDAS.....	26
5.1. ONDA PONTO DE INCIDÊNCIA NORMAL E ONDA NORMAL.....	26
5.2. LEIS DE CURVATURA DE FRETE DE ONDA.....	28
5.2.1. Lei de propagação.....	28
5.2.2. Lei de transmissão	29
5.2.3. Lei de reflexão	30
5.2.4. Convenção de sinais	31
5.3. CÁLCULO DOS PARÂMETROS DAS ONDAS PIN E N.....	32
5.3.1. Reflexões primárias.....	32
5.3.2. Reflexões múltiplas	34
5.3.3. Fluxograma do algoritmo de cálculo do trio de parâmetros	35
6. MIGRAÇÃO KIRCHHOFF.....	37
6.1 FUNDAMENTO TEÓRICO DA MIGRAÇÃO DE KIRCHHOFF.....	37
7. APLICAÇÃO A DADOS SINTÉTICOS	41
7.1 MODELO 2-D.....	41
7.2 RESULTADOS COM DADOS SINTÉTICOS.....	48
8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	50
8.1. CONCLUSÕES.....	50
8.2. SUGESTÕES.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
APÊNDICE	55
APÊNDICE A.- ESPELHO PLANO (FORMAÇÃO DA IMAGEM).....	56

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	(a) Reflexão múltipla de curto percurso; (b) Reflexão múltipla de longo percurso.....	7
Figura 2.2	(a) Reflexão múltipla simétrica; (b) Reflexão múltipla assimétrica.....	7
Figura 2.3	(a) Múltipla da superfície livre; (b) Múltipla interna (intercamada).....	8
Figura 2.4	(a) Reflexão fantasma (ghost reflection); (b) Múltiplas combinadas.....	8
Figura 3.1	Coordenadas do raio para uma fonte pontual S em 3D dadas pelos ângulos γ_1 e γ_2 , e o eikonal τ que determina a posição de um ponto ao longo do raio.....	17
Figura 4.1	Modelo 2-D estratificado de isovelocidades, adaptado de Hubral e Krey (1980). A velocidade para cada camada é dada por V_i ($i = 0, 1, \dots, N$), que estão separadas pelas interfaces \sum_i ($i = 1, \dots, N$). 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_0 reflete no ponto O_N e retorna à superfície no mesmo ponto X_0	20
Figura 4.2	Traçado da trajetória de uma reflexão múltipla de primeira ordem na segunda camada em um modelo constituído de 2 camadas separadas por interfaces plano horizontal (homogêneas e isotrópicas) sobre um semi espaço infinito. O afastamento entre a fonte S e o receptor G é dado por $2h$	20
Figura 4.3	Modelo 2D constituído por camadas separadas por interfaces plano-inclinadas mostrando o raio normal. A velocidade do meio em cada camada é V_i , α_i é o ângulo de refração ou	

	transmissão, β_i é o ângulo de incidência, O_i é um ponto sobre a interface. O afastamento entre a fonte S e o receptor G é dado por $2h$, adaptado de Hubral e Krey (1980).....	22
Figura 4.4	Modelo 2D constituído por N camadas separadas por interfaces curvas mostrando o raio de incidência normal. O afastamento entre a fonte S e o receptor G é dado por $2h$. V_i é a velocidade na camada, α_i é o ângulo de transmissão, β_i é o ângulo de incidência e O_i é um ponto de refração ou reflexão sobre a interface i ($i = 1, \dots, N$), adaptado de Hubral e Krey (1980).....	23
Figura 4.5	Desenho da superfície de levantamento sísmico e um refletor plano inclinado em subsuperfície. A fonte esta na posição $(0,0,0)$ e o receptor na posição $(x,0,0)$. O ponto médio do levantamento é $(x/2,0,0)$. Os co-senos diretores são representados por α , β e ϕ . O mergulho do refletor é representado pelo ângulo θ , adaptado de Levin (1971).....	25
Figura 4.6	Desenho da superfície de levantamento sísmico e um refletor plano inclinado em subsuperfície. θ é o ângulo de mergulho do plano. Adaptado de Levin (1971).....	25
Figura 5.1	Representação de um meio heterogêneo composto de duas camadas sobre um semi-espaco que tem a forma de um domo, na qual é ilustrado a propagação das duas ondas hipotéticas ao longo do raio com afastamento nulo, desde o ponto de incidência normal do raio R sobre o refletor até o ponto de observação em X_0 . (a) Propagação de uma onda PIN, para diferentes instantes de tempo, e a transmissão de uma camada a outra, ao longo do raio normal com afastamento nulo. (b) Propagação de uma onda N, para diferentes instantes de tempo, e a transmissão de uma camada a outra ao longo do raio normal com afastamento nulo, até o ponto X_0 do refletor.....	27
Figura 5.2	Propagação da frente de onda dentro de uma camada e ao longo	

do raio normal, desde um ponto inicial (P_1) localizado numa interface ao ponto final (P_2) localizado na interface imediatamente superior. No meio de propagação da onda a velocidade da mesma é representada por v , K_{P_1} é a curvatura da frente de onda no início da propagação na camada e K_{P_2} é a curvatura da frente da onda, no final da propagação na camada.

28

Figura 5.3 Transmissão da frente de onda de um lado da interface ao outro lado, α_I é ângulo de incidência, α_T é o ângulo transmitido, v_T é a velocidade da onda transmitida, v_I é a velocidade da onda incidente, K_I e K_T são as curvaturas das frentes de onda incidente e transmitida, respectivamente, K_F é a curvatura da interface. Os vetores normais às curvaturas K_I , K_T e K_F , são representados por \vec{n}_I , \vec{n}_T e \vec{n}_F , respectivamente.....

29

Figura 5.4 Reflexão do raio de curvatura da frente de onda através de uma interface, Os ângulos de incidência e reflexão são representados por α_I e α_R , v_I e v_R são as velocidades da frentes de ondas incidente e refletida, K_I e K_R são as curvaturas das frentes de ondas incidente e refletida, respectivamente e K_F é a curvatura do refletor. Os vetores normais às curvaturas K_I , K_R e K_F , são representados por \vec{n}_I , \vec{n}_R e \vec{n}_F , respectivamente.....

30

Figura 5.5 Convenção de sinais das curvatura das (a) frentes de onda e (b) interfaces.....

31

Figura 5.6 Trajetória dos raios considerados no processo recursivo para obter R_N e R_{PIN} , considerando apenas eventos primários. Adaptado de Cabral (2002).....

33

Figura 5.7 Traçado dos raios considerados no processo recursivo para obter R_N e R_{PIN} , considerando eventos de reflexões múltiplas. Adaptado de Cabral (2002).....

35

Figura 5.8	– Fluxograma do algoritmo de cálculo do trio de parâmetros do raio normal β_o, R_N e R_{PIN} para eventos de reflexões primárias e múltiplas. Onde B_0, B_1, B_2 e B_3 são etapas executadas para reflexões primárias e C_0, C_1, C_2, C_3 e C_4 executadas para reflexões múltiplas. Adaptado de Cabral (2002).....	36
Figura 6.1	Curvas de tempos de trânsito de reflexão (τ_R) e de difração (τ_D) para diferentes escolhas do ponto M em uma configuração de afastamento comum. A localização da fonte e do receptor ao longo do eixo x é dado por $S(\xi)$ e $G(\xi)$, respectivamente, descritas pelo parâmetro ξ , t é o tempo de registro. (a) M coincide com um ponto de reflexão R . Neste caso as duas curvas são tangentes. (b) O ponto M não está situado sobre o refletor. Neste caso não haverá contribuição para a migração. adaptado de Schleicher et al. (1993b).....	38
Figura 7.1	a) Modelo 2-D composto de duas camadas limitadas por interfaces, uma plana e outra suavemente curva, sobre um semi-espaco infinito. b) Para uma configuração AN, apresentam-se os raios para reflexões primárias (linha cor vermelha) e múltiplas (linha cor verde).....	43
Figura 7.2	(a) Seção sísmica AN modelada através do traçador de raios SEIS88; (b) Traço sísmico correspondente a posição do raio normal em $X_0 = 2.0$ km na seção sísmica modelada.....	44
Figura 7.3	a) Dados sísmicos migrados, utilizando-se migração cinemática tipo Kirchhoff, apresentando um terceiro refletor, devido a presença das reflexões múltiplas. b) Seção sísmica AN modelada através do traçador de raios SEIS88, onde se observa a ausência da interface plana, a qual funciona como espelho, e a presença da terceira interface (fictícia), que é a imagem especular da primeira interface.....	45

Figura 7.4	Comparação dos parâmetros da frente de onda (migração Kirchhoff e modelamento direto). Os valores dos parâmetros obtidos por modelamento direto são representados pelo símbolo asterisco e os obtidos por migração são representados por círculos. (a) β_0 ; (b) R_N	46
Figura 7.5	Comparação dos parâmetros da frente de onda (migração Kirchhoff e modelamento direto). Os valores dos parâmetros obtidos por modelamento direto são representados pelo símbolo asterisco e os obtidos por migração são representados por círculos. (a) R_{PIN} ; (b) V_{NMO}	47
Figura A1	Formação da imagem de um objeto puntiforme. Observa-se o Raio Incidente (RI) partindo do ponto P, atingindo o espelho obliquamente. O prolongamento do Raio Refletido (RR) intercepta a normal n no ponto P'.....	56
Figura A2	O raio (cor vermelha) que sai da fonte (S), reflete-se no ponto M, localizado no segundo refletor, reflete-se P localizado na primeira interface, novamente reflete-se em M e chega no receptor (G). Os pontos P e P' são simétricos e equidistantes em relação a segunda interface, cujas distâncias em relação a mesma são d e d'	57
Figura A3	– Formação da imagem de um objeto extenso, em um espelho plano, a imagem tem o mesmo tamanho do objeto e é simétrica dele em relação ao espelho.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS

Apresentamos abaixo uma tabela relacionando os símbolos utilizados no presente trabalho com suas definições.

SÍMBOLOS	VARIÁVEL
h	Meio afastamento fonte-receptor
β_0	Ângulo de emergência do raio normal
K_{PIN}	Curvatura da frente onda PIN
R_{PIN}	Raio de curvatura da frente onda PIN
K_N	Curvatura da frente onda Normal
R_N	Raio de curvatura da frente onda Normal
x_m	Coordenada Ponto médio
x_g	Coordenada horizontal do receptor
x_s	Coordenada horizontal da fonte
x_0	Ponto de observação na superfície de medição
t_0	Tempo de trânsito de reflexão normal
P_0	Ponto imagem na seção afastamento nulo
$f(\mathbf{r}, t)$	Densidade da força interna
$\mathbf{U}(\mathbf{r}, t)$	Vetor deslocamento
$c = \sqrt{\lambda/\rho}$	Velocidade de propagação da pressão
τ	Tempo de trânsito da frente de onda
J	Jacobiano
Ψ	Constante de integração
$\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$	Campo de pressão
q	Parâmetro combinado

λ, μ	Constantes elásticas de Lamé
ρ	Densidade do meio
$T(p)$	Tempo duplo de trânsito de reflexão
e_n	Espessura da camada n
v_n	Velocidade na camada n
$X(p)$	Afastamento em termos do parâmetro horizontal do raio
p	Parâmetro horizontal do raio
R_0	Raio de curvatura da frente de onda
v_{NMO}	Velocidade Normal Moveout
PMC	Ponto médio-comum
ϵ_I	Ângulo de incidência do raio
ϵ_T	Ângulo de transmissão do raio
ϵ_R	Ângulo de saída da onda refletida
v_I	Velocidade da onda incidente
v_T	Velocidade da onda transmitida
v_R	Velocidade da onda refletida
R_I	Raio de curvatura da frente de onda incidente
R_T	Raio de curvatura da frente de onda transmitida
R_R	Raio de curvatura da frente de onda refletida
R_F	Raio de curvatura da interface
PIN	Ponto de incidência normal
N	Normal
SRC	Superfície de Reflexão Comum

RESUMO

As reflexões múltiplas presentes nos sismogramas ocultam informações importantes sobre os refletores em subsuperfície e, podem até tornar completamente invisíveis as reflexões primárias, como no caso dos sismogramas marinhos, que muitas das vezes, exibem uma aparência anelar com fortes superposições das reflexões múltiplas, sobre as reflexões primárias. Problema este que tem sido alvo de importantes pesquisas, com o intuito de identificar, atenuar e/ou eliminá-las, através de vários métodos populares.

O objetivo principal deste trabalho é a identificação das reflexões múltiplas. Com essa finalidade foi gerada, por modelamento direto, uma seção sísmica, com afastamento nulo (AN), contendo reflexões primárias e múltiplas simétricas de primeira ordem. Posteriormente, foi aplicada a migração cinemática do tipo Kirchhoff para obter o modelo em profundidade, apresentando uma boa recuperação dos refletores, bem como a presença de um refletor fictício, quando comparado com a seção anteriormente especificada.

Foi obtida uma seção sísmica AN, do modelo migrado, na qual não é observado o segundo refletor, devido à ausência de contraste de impedância, entre a segunda e terceira camada, sendo este o primeiro indício de que o refletor fictício deste modelo é uma múltipla. Outro indício sobre a existência da múltipla foi a simetria encontrada entre as curvaturas do primeiro e terceiro refletor.

Finalmente, foram calculados os parâmetros das frentes de ondas Hipotéticas Ponto de Incidência Normal (PIN) e Normal (N), bem como a velocidade Normal Moveout (NMO), tanto para os eventos de reflexões primárias como os eventos de reflexões múltiplas, para o modelo direto e para o modelo migrado. Em seguida, foram realizadas as comparações destes parâmetros, o que permitiu confirmar a veracidade dos indícios anteriores para a identificação das reflexões múltiplas.

ABSTRACT

The multiple reflections present in seismograms hide important information of reflectors in subsurface, sometimes turning primary reflections invisible. This is the case of marine seismograms, in which sometimes they present a ring-like appearance, with strong superposition of multiple reflections, together with primary reflections. This problem has been the subject of important researches, whose principal objective is the identification, attenuation and elimination of multiples, using in this respect some widespread methods. The objective of this work is the identification of multiple reflections. With this purpose, we have forward modeled zero-offset (ZO) seismic sections containing primary reflections, together with first-order multiple reflections. Later on, we have performed a kinematic Kirchhoff depth migration in order to obtain a simulated geological model in depth, with true and fictitious reflectors at the same time. From this depth migrated section, we have modeled a ZO section, in which the fictitious reflector is not recorded, due to the impedance contrast in the second and third layers of the model. This is the first clue that the referred fictitious reflector is, in fact, the result of imaging a multiple reflection. Another clue for this assertion is the semblance of the curvatures of the first and third reflectors. Finally, the wavefront parameters of two hypothetical waves Normal Incidence Point (NIP) and Normal (N) were computed, as well as the NMO velocity for the primary and multiple events, in the forward and migrated models. We have finally compared these parameters in order to verify the later clues with respect to the identification of multiple reflections.

1. INTRODUÇÃO

Na exploração sísmica, cada vez mais, o imageamento sísmico vem ganhando importância nos trabalhos de exploração e caracterização de reservatórios, já que uma melhor imagem estrutural da subsuperfície permite a correta interpretação do modelo geológico. O sinal sísmico é afetado por diferentes tipos de ruídos. As reflexões múltiplas são consideradas ruídos coerentes e que em muitos casos não permitem a correta identificação das reflexões primárias, necessárias para o imageamento sísmico.

Hoje, a maioria dos recursos de óleo e gás é descoberta em águas costeiras da plataforma continental, embora a tendência é mover-se para águas profundas (um exemplo é o pioneirismo da PETROBRAS). Antes dos poços de produção de óleo serem perfurados, os geofísicos têm que fornecer uma imagem das propriedades físicas em subsuperfície que ilustre onde os reservatórios podem ser esperados. No ambiente de uma exploração marinha existe um problema referente a lâmina de água que frequentemente funciona como uma armadilha de onda (Backus, 1959), onde as ondas sísmicas são múltiplamente refletidas entre a superfície e a base da camada de água. As ondas transmitidas através da base da camada também reverberam entre refletores em profundidade. A energia das reverberações das múltiplas dentro das camadas e da camada de água pode se tornar tão grande que a chegada das reflexões primárias de um refletor de interesse em profundidade pode ser totalmente invisível. Como resultado, sismogramas marinhos muitas vezes exibem uma aparência anelar com forte superposição das múltiplas na maioria das reflexões primárias de refletores em profundidade. Então, a identificação e localização do refletor-alvo, que pode indicar, por exemplo, um reservatório de petróleo, depende da atenuação ou eliminação das reflexões múltiplas.

Segundo Trape 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 das frentes de ondas.

Maciel et al. (2001) simulou reflexões múltiplas de primeira ordem com afastamento-nulo usando o modelamento direto no método de empilhamento sísmico superfície de reflexão comum (SRC). A estratégia usada está baseada no conhecimento do modelo, e inclui um processo

recursivo para calcular os raios de curvatura, segundo Hubral e 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. Ela considera que uma maneira de identificar os eventos de reflexões tipo múltiplas nos resultados após o empilhamento SRC é derivar um modelo de velocidade, e aqueles eventos que repetem as mesmas velocidades, corresponderão às reflexões múltiplas.

Para a atenuação de múltiplas intracamadas, Alves (2003) estendeu os filtros de Wiener para afastamentos arbitrários com auxílio da função tempos de trânsito SRC.

Gamboa (2003) identificou e eliminou múltiplas intercamadas simétricas, comparando o comportamento dos parâmetros do SRC e da velocidade NMO. Ele observou que os valores do parâmetro R_{PIN} e da velocidade NMO para as reflexões múltiplas são menores que os correspondentes valores para as reflexões primárias.

O presente trabalho tem como objetivo específico identificar múltiplas intercamadas simétricas, por meio da comparação do comportamento dos parâmetros das frentes de ondas PIN e Normal, tanto do modelo direto como do modelo migrado. Primeiramente foram gerados os sismogramas sintéticos, simulando reflexões primárias e reflexões múltiplas, obtidos através do programa de traçamento de raios, a partir do modelo de entrada (modelo direto). O sismograma sintético vai constituir a entrada para o algoritmo de migração em profundidade (modelo migrado). O método de migração é baseado na teoria do raio e na integral de migração Kirchhoff, através da qual são obtidos os tempos de trânsito empregados no empilhamento das curvas de difração.

Considerando o modelo direto e o modelo migrado, os três parâmetros das frentes de ondas hipotéticas PIN e Normal (β_0, R_{PIN}, R_N) do método de empilhamento sísmico SRC, são calculados por meio de traçamento de raio e posteriormente comparados. A comparação destes parâmetros nos permite identificar e diferenciar as reflexões múltiplas das reflexões primárias.

1. 1. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além desta introdução o trabalho de tese é constituído pelos capítulos descritos abaixo:

Capítulo 2: Apresentaremos algumas definições e características das reflexões múltiplas, bem como algumas metodologias para a atenuação e/ou eliminação das reflexões múltiplas.

Capítulo 3: São apresentados os fundamentos teóricos da teoria do raio para o caso bi-dimensional (2D) que serão utilizados para simular uma seção sísmica.

Capítulo 4: São apresentadas as principais fórmulas de aproximação dos tempos de trânsito.

Capítulo 5: São apresentados os aspectos teóricos referidos aos parâmetros cinemáticos das ondas hipotéticas Ponto de Incidência Normal (PIN) e Normal (N) relacionados ao raio normal.

Capítulo 6: É apresentado o fundamento teórico da migração por empilhamento de difração de Kirchhoff.

Capítulo 7: É apresentada a aplicação da migração Kirchhoff em dados sintéticos, para um exemplo que representa um modelo geológico simples de ambiente propício à ocorrência de reflexões múltiplas intracamadas. Além disso, é apresentada a comparação do trio de parâmetros das frentes de ondas hipotéticas PIN e N, que foram obtidos tanto do modelo direto como do modelo migrado.

Capítulo 8: Apresentamos as conclusões dessa dissertação, bem como algumas perspectivas para futuros desenvolvimentos.

2. REFLEXÕES MÚLTIPLAS

Neste capítulo serão apresentadas algumas definições e características dos eventos de reflexão múltipla, bem como sua classificação e suas propriedades fundamentais. Ainda neste capítulo serão mostradas algumas técnicas para a atenuação e/ou eliminação das reflexões múltiplas.

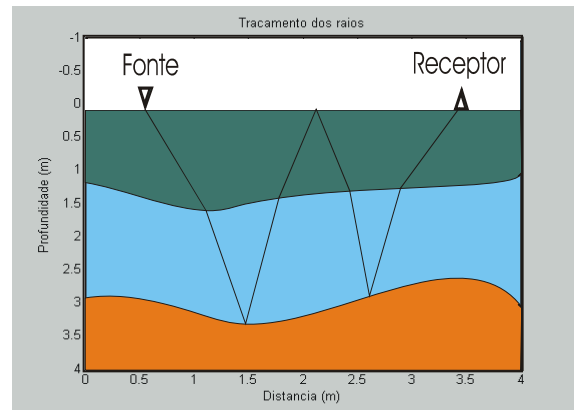
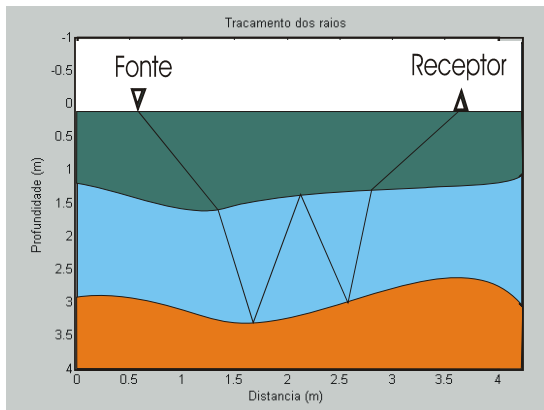
2.1 - CARACTERÍSTICA DA REFLEXÃO MÚLTIPLA

As reflexões múltiplas são eventos sísmicos que sofreram mais de umas reflexões ascendentes dentro de uma certa porção de subsuperfície. A trajetória dos raios das reflexões primárias é repetida pelos raios das reflexões múltiplas total ou parcialmente, donde as múltiplas podem se assemelhar às primárias em certas características, tais como: velocidade, amplitude e forma do pulso, a depender de sua trajetória e do modelo geofísico.

Uma das principais características das múltiplas é que estes eventos apresentam um tempo de trânsito maior do que as primárias.

2.2 - CLASSIFICAÇÃO DAS REFLEXÕES MÚLTIPLAS

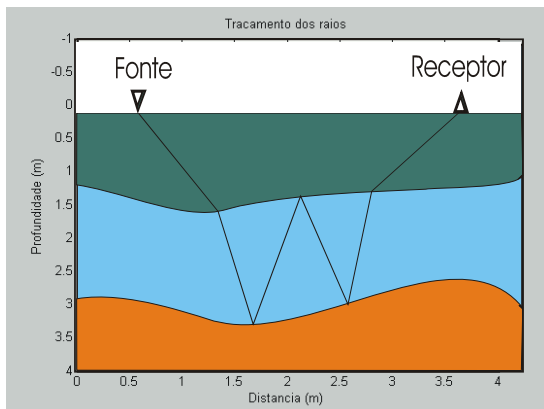
A classificação das reflexões múltiplas é diversificada. As múltiplas podem ser classificadas quanto ao tempo de percurso: múltiplas de curto percurso (*peg-legs*) e múltiplas de longo percurso, veja as Figuras 2.1(a) e 2.1(b), respectivamente. Múltiplas de curto percurso são associadas às reflexões primárias, pois surgem logo após as mesmas. As múltiplas de longo percurso são aquelas que possuem uma trajetória longa quando comparada à trajetória das reflexões primárias.



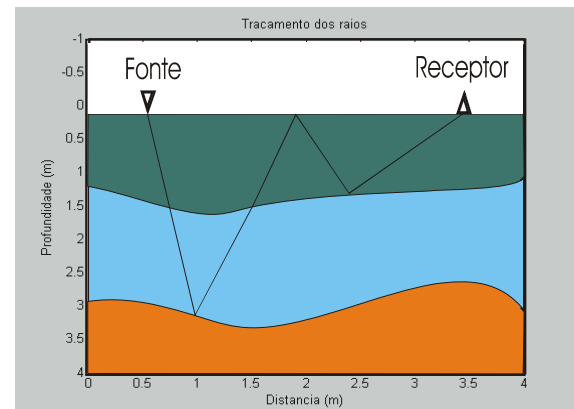
(b)

Figura 2.1 - (a) Reflexão múltipla de curto percurso; (b) Reflexão múltipla de longo percurso.

As reflexões múltiplas também podem ser simétricas ou assimétricas, veja as Figuras 2.2 (a) e (b), respectivamente. Uma reflexão múltipla é chamada de simétrica quando seus segmentos de raios elementares refletem e transmitem em trajetórias idênticas de ida e volta. Caso contrário a múltipla é chamada de assimétrica.



(a)



(b)

Figura 2.2 – (a) Reflexão múltipla simétrica; (b) Reflexão múltipla assimétrica.

Existem também as múltiplas da superfície livre e as múltiplas internas, veja a Figura 2.3 (a) e (b), respectivamente. Múltipla da superfície livre é aquela que se reflete na interface terra/ar ou água/ar. Um tipo especial deste tipo de múltipla é a chamada *Múltipla do fundo do mar*,

devida aos altos coeficientes de reflexão nas interfaces água/ar e água/fundo do mar. Múltiplas internas (ou intercadas) são as que ocorrem em camadas mais profundas.

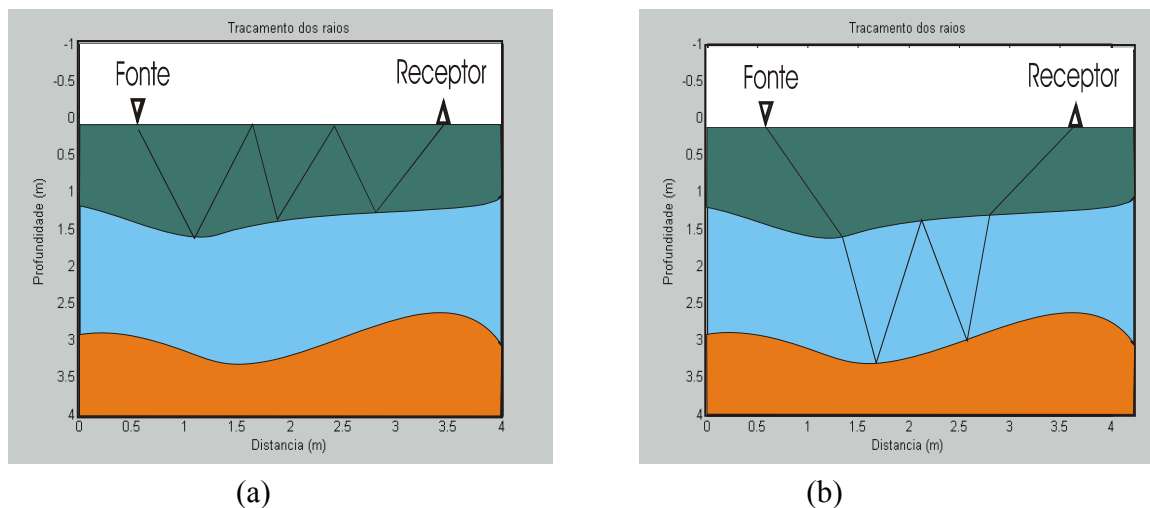


Figura 2.3 – (a) Múltipla da superfície livre; (b) Múltipla interna (intercamada)

Temos ainda, a reflexão fantasma (ghost reflection), veja a Figura 2.4(a). A reflexão fantasma é uma múltipla própria da geometria dos levantamentos sísmicos, onde a fonte e o receptor encontram-se abaixo da superfície. Parte da energia expedida pela fonte é refletida na superfície, gerando reflexões defasadas em curto período de tempo que interferem nas reflexões primárias. Na prática, porém, as múltiplas ocorrem associadas, daí sua denominação como múltiplas combinadas, Veja a Figura 2.4 (b).

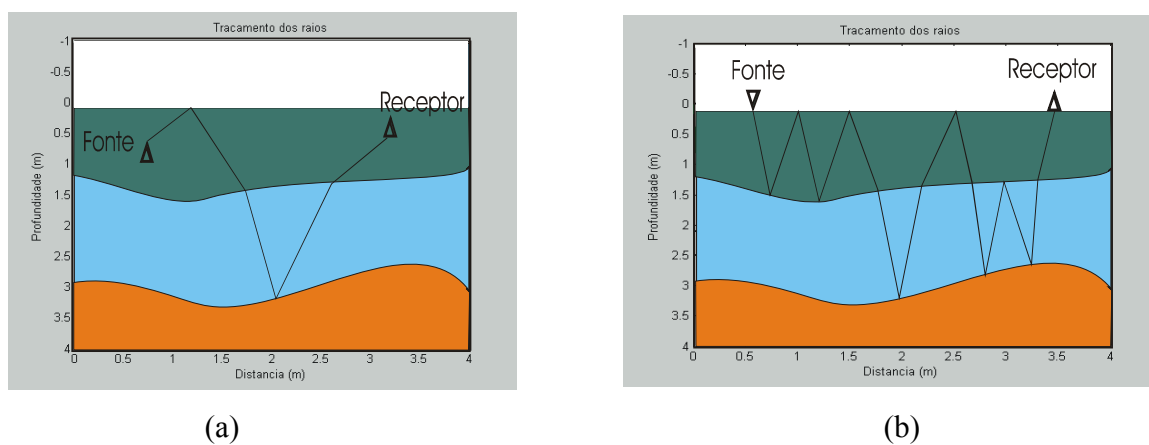


Figura 2.4 – (a) Reflexão fantasma (ghost reflection); (b) Múltiplas combinadas.

2.3 – MÉTODOS DE ATENUAÇÃO DE MÚTIPLAS

As reflexões múltiplas presentes nos sismogramas podem ocultar algumas informações importantes sobre os refletores na subsuperfície. A identificação das reflexões múltiplas para posteriormente atenuar e/ou eliminar tem sido alvo de importantes pesquisas ao longo do tempo.

Os métodos de atenuação ou eliminação de múltiplas se dividem entre aqueles que tentam extrair alguma propriedade física ou característica que diferencie reflexões primárias das reflexões múltiplas através de algoritmos de filtragem, e aqueles que tentam revelar as reflexões múltiplas por meio de técnicas de modelagem e inversão. Posteriormente, as múltiplas identificadas são removidas do registro sísmico.

Até então não existe técnica de atenuação de múltiplas que trabalhe universalmente. Métodos usados hoje na indústria do petróleo podem ser divididos em sete categorias maiores:

2.3.1 - Métodos de extração de periodicidade

Estes métodos baseiam-se na periodicidade das múltiplas em contraste com as chegadas das primárias. Deconvolução preditiva usando filtros de Wiener, utilizado por Robinson e Treitel (1980); Peacock e Treitel (1969) é uma abordagem em que um operador prediz as múltiplas e as subtrai do traço sísmico. No entanto, o método falha para grandes afastamentos, visto que as múltiplas não possuem grandes periodicidades. Outra desvantagem do método é que ele requer a hipótese de que o traço sísmico seja estacionário e a refletividade seja uma série de *spikes* aleatórios. Taner (1980) mostrou uma forma de superar o problema da não-periodicidade a grandes afastamentos aplicando deconvolução preditiva no espaço radial do traço (*radial trace space*). Similarmente, as múltiplas são periódicas para qualquer valor de vagariedade (p) no domínio $\tau - p$, τ é o tempo entre duas chegadas (primária e múltipla de primeira ordem, por exemplo), segundo Carrion (1986), mas um meio horizontal estratificado deve ser presumido.

2.3.2 - Métodos de empilhamento sísmico

Os métodos de empilhamento sísmico extraem a diferença do efeito de *moveout* (sobre tempo) entre as hipérboles das reflexões primárias e múltiplas em uma família Ponto Médio

Comum (PMC). Em princípio, estes métodos somam todas as possíveis hipérbolas lendo todos os tempos afastamento nulo e as curvaturas de todas as hipérbolas teoricamente possíveis. Se a soma coincidir com uma hipérbole de reflexão, um sinal de alta amplitude é gerado, enquanto que em todos os outros casos o sinal deverá ser fraco. Este método é denominado de análise de velocidade, visto que a curvatura da hipérbole está relacionada com a velocidade da correspondente onda, segundo Yilmaz (1987). Um intérprete experiente pode distinguir primárias (geralmente com altas velocidades aparentes) de múltiplas (geralmente com baixas velocidades aparentes) no espectro de velocidade, podendo-se produzir, desta forma, um macro modelo de velocidade. A correção *Normal Moveout (NMO)* com o macro-modelo de velocidade e o subsequente empilhamento PMC reduzem o montante de energia das múltiplas, segundo Schneider et al.(1965). A chamada correção NMO consiste da diferença entre os tempos de trânsito em afastamento dado e o tempo em afastamento-nulo. Se a correção NMO é aplicada de tal forma que as primárias sejam sobre-corrigidas e as múltiplas sub-corrigidas, os dois sinais se organizam em diferentes meio-espacos no domínio $f - k$ (frequência-número de onda),segundo Yilmaz (1987). No entanto, estes métodos de correlação muitas vezes falham devido contribuições de refletores profundos ou estruturas geológicas complexas que progressivamente desviam de uma simples relação hiperbólica. Desta forma, as primárias muitas vezes não podem ser separadas de múltiplas na velocidade ou no espectro $f - k$, devido principalmente aos efeitos de interferência. Além disso, em casos onde múltiplas internas são criadas em inversões de velocidade, estas mostram velocidades aparentes superiores as das primárias. Isto leva a modelos de velocidades incorretos e à amplificação das múltiplas, ao invés de sua atenuação.

2.3.3 - Métodos de Predição baseados nos parâmetros de campo de onda

Estes métodos são baseados na idéia de que todos os tempos de trânsito das múltiplas – tanto para as múltiplas de superfície livre, quanto para as internas – podem ser construídas pela adição ou subtração dos tempos de trânsito das reflexões primárias, segundo Keydar et al. (1998). Com o objetivo de identificar as primárias significativas, o método compara o ângulo de emergência das frentes de onda que chegam na superfície. Se um número de reflexões primárias pode ser combinado para construir um certo tipo e ordem de reflexões múltiplas, os eventos correspondentes são as primárias que se procura, e as múltiplas podem ser preditas num sentido

cinemático. O parâmetro essencial é o ângulo de emergência da frente de onda, o qual é obtido junto com o raio de curvatura da frente de onda refletida com uma correção local de *moveout*, obtida no domínio tiro comum (*common shot*). O poder deste método é sua independência do macro-modelo de velocidade e o aspecto prático na supressão de múltiplas alvo, com a entrada das primárias mais relevantes, dada pelo intérprete, o que pode ser ao mesmo tempo uma desvantagem. Este método também requer a velocidade próxima da superfície, o que não é um problema em aquisições marinhas, mas muitas vezes não é bem conhecida em dados terrestres.

2.3.4 - Métodos de inferência de campo de onda

Estes métodos identificam as múltiplas pela inferência do campo de onda na subsuperfície, removendo, posteriormente, as múltiplas do dado, segundo Berryhill e Kim (1986) e Wiggins (1988). Aqui, o campo de onda é propagado pela camada de água para cima e para baixo de forma que as primárias se transformam em múltiplas de primeira ordem, sendo subtraídas de forma adaptativa do dado original. É necessário uma estimativa da topografia da base da camada de água e da refletividade, sendo que apenas múltiplas da base da camada de água podem ser removidas. Este método conta com um algoritmo de subtração adaptado, o qual pode produzir um sinal incorreto se não trabalhar apropriadamente.

2.3.5 - Métodos baseados na autoconvolução

Estes métodos identificam múltiplas relacionadas à superfície livre através de autoconvolução iterativa no tempo e no espaço, segundo Berkhout e Verschuur (1997) e Verschuur e Berkhout (1997). Os métodos que se baseiam neste princípio assumem que se sabe sobre a assinatura da fonte e da existência de dados afastamento-nulo e pequenos afastamentos, os quais são quase impossíveis de registrar no campo. A inferência para afastamento-nulo e a interpolação entre os traços registrados pode gerar grandes erros que, na prática, podem degradar severamente estes métodos.

2.3.6 - Métodos baseados na coerência

Estes métodos são baseados na computação de medidas de coerência (usando Decomposição de Valor Singular) após correção *NMO* que horizontaliza as reflexões múltiplas, utiliza por Kneib e Bardan (1997). As auto-imagens com grandes autovalores (relacionados às múltiplas) são removidos, deixando a informação primária no caso ideal, mas nem sempre é a realidade, visto que grandes autovalores também podem conter energia das múltiplas devida uma correção *NMO* mal feita.

2.3.7 - Métodos de espalhamento inverso

Estes métodos expressam o campo de onda total como a soma do campo de onda de um meio suavizado conhecido mais o campo de onda gerado por espalhadores, segundo Weglein et al. (1992). As múltiplas são representadas pelos termos de alta ordem em uma série de espalhadores inversos não-lineares e podem, então, serem removidas. No entanto, aqui, ambos a assinatura da fonte e o modelo da subsuperfície têm de ser conhecidos. Similar ao método da autoconvolução, esta técnica também requer traços afastamento-nulo. Até então, não existem métodos de extrapolação *near-trace* (traço próximo) para águas rasas, sendo o método falível neste caso.

As reflexões múltiplas presentes nos sismogramas podem ocultar alguma informação importante sobre os refletores na subsuperfície. A energia das reflexões múltiplas pode chegar a ser maior que a energia das reflexões primárias concorrentes fazendo com que fiquem completamente invisíveis. Por tudo isto, a atenuação e/ou eliminação de reflexões múltiplas tem sido motivo de várias pesquisas.

Existem abordagens onde as múltiplas não são tratadas como ruídos que devem ser eliminadas, mas estimadas como sinal que percorreu certas partes da subsuperfície algumas vezes mais que uma reflexão primária e que também pode nos informar acerca da geologia em subsuperfície, segundo Helbig e Brouwer (1993).

Uma abordagem não-convencional, mas bastante promissora na supressão de múltiplas se baseia no uso de redes neurais artificiais, utilizado por Calderon-Macias et al. (1997).

3. TEORIA DO RAIOS

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos da teoria do raio para o caso bidimensional (2-D).

A teoria do raio é uma possibilidade de descrever o campo de onda sísmico. Outros métodos, também muito usados são, por exemplo, Diferenças Finitas (DF), ou Elementos Finitos (EF). Esses métodos discretizam o meio e a equação da onda, promovendo uma solução para o campo de onda em uma malha. Todos os métodos apresentam vantagens e desvantagens, portanto, a escolha depende das condições e tarefas a serem realizadas.

3.1 – EQUAÇÃO DA ONDA

A equação da onda elástica descreve matematicamente a propagação linear, e ela é obtida a partir da Lei de Hooke generalizada. Seguindo Aki & Richard (1980), a equação geral da elastodinâmica para meios elásticos, homogêneos e isotrópicos em 3-D tem a seguinte forma:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = f(\mathbf{r}, t) + (\lambda + 2\mu) \nabla[\nabla \cdot \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)] - \mu \nabla \times [\nabla \times \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)], \quad (3.1)$$

onde $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$ representa o vetor deslocamento do solo na posição \mathbf{r} e no tempo t . $f(\mathbf{r}, t)$ é a densidade da força interna, e pode representar a fonte externa que excita o meio. A densidade ρ e os parâmetros de Lamé λ e μ determinam as propriedades físicas do meio. Na equação (3.1), o operador gradiente é dado por

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \bar{\mathbf{i}} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{\mathbf{j}} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{\mathbf{k}}, \quad (3.2)$$

e $\mathbf{r} = (x, y, z)$ em coordenadas cartesianas. A equação diferencial (3.1) é resolvida separando-a em duas partes: pelas operações de divergência e rotação sobre $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$. A parte rotacional do campo \mathbf{u} representa as ondas cisalhantes (ondas-S).

3.2 – A EQUAÇÃO DA ONDA ACÚSTICA

Um meio com $\mu = 0$ é chamado de fluido. O meio fluido é comumente usado na sismica de prospecção para hidrocarbonetos como uma aproximação do meio sólido (o conhecido caso acústico). Se desconsiderarmos forças de volume, observamos que em tal meio a equação (3.1), se reduz

$$\nabla[\lambda \nabla \cdot \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)] - \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = -f(\mathbf{r}, t). \quad (3.3)$$

Divide-se a equação (3.3) por ρ e tomando o divergente, $\nabla \cdot$, temos

$$\nabla \cdot \left\{ \nabla[\lambda \nabla \cdot \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)] - \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = -f(\mathbf{r}, t) \right\} \quad (3.4)$$

Considerando ρ constante e substituindo o vetor deslocamento $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$ pelo campo de pressão, $P(\mathbf{r}, t) = -\lambda \nabla \cdot \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$, após alguma álgebra, chegamos a equação da onda acústica

$$\nabla \cdot \left[\frac{1}{\rho} \nabla (P(\mathbf{r}, t) + P_0(\mathbf{r}, t)) \right] - \frac{1}{\lambda} \frac{\partial^2 P(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0. \quad (3.5)$$

A pressão aplicada $P_0(\mathbf{r}, t)$ representa na equação (3.5) a distribuição de pressão equivalente a densidade de força $f(\mathbf{r}, t) = -\nabla P_0(\mathbf{r}, t)$, então para um meio acústico, temos

$$\nabla \cdot \nabla [P(\mathbf{r}, t) + P_0(\mathbf{r}, t)] - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (3.5)$$

com $c = \sqrt{\lambda/\rho}$ sendo a velocidade de propagação do campo de pressão.

3.3 – EQUAÇÃO DO ICONAL E TRANSPORTE

Propriedades cinemáticas e dinâmicas do campo de pressão podem ser modeladas com a teoria do raio, que reduz a equação de onda sob a condição de alta frequência, ou em outras palavras, que o comprimento de onda envolvido seja pequeno quando comparado com as dimensões características do meio. No caso de meios estratificados esta condição se traduz na hipótese de que os raios de curvatura das interfaces do modelo sejam relativamente maiores que os comprimentos de onda. A forma de solução da equação da onda (3.5) é separar a parte dinâmica (equação de transporte) da temporal (equação iconal)

$$P(\mathbf{r}, t) = A(\mathbf{r})e^{-i\omega(t-\tau(\mathbf{r}))}, \quad (3.6)$$

onde A representa a propagação dinâmica da onda, ω é a frequência angular, t é a variável temporal e τ é o tempo de trânsito. As equações (3.5) e (3.6) com a identidade vetorial $\nabla \cdot (ab) = b \cdot \nabla a + a \nabla \cdot b$, resulta na forma intermediária

$$-\omega^2 A \left[(\nabla \mathbf{r})^2 - \frac{1}{c_2} \right] + i\omega [2\nabla A \cdot \nabla \tau] + \nabla^2 A = 0. \quad (3.7)$$

A condição de alta frequência faz com que o último termo da equação (3.7) seja desprezado, e o primeiro e o segundo resultam na equação eikonal

$$(\nabla \tau)^2 = \frac{1}{c^2}, \quad (3.8)$$

e na equação de transporte

$$2\nabla A \cdot \nabla \tau + A \nabla^2 \tau = 0. \quad (3.9)$$

3.4 – SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO ICONAL

O iconal é uma equação diferencial parcial não-linear de primeira ordem para o tempo de trânsito $\tau(x)$, e é resolvida através do método de características, segundo Bronstein & Semendjajew (1991). As características, ou raios, são curvas que cobrem toda uma região do espaço, de modo que ao longo de cada raio os tempos de trânsito ficam determinados. Estes raios são determinados como solução de um sistema de equações diferenciais ordinárias, chamadas equações características, ou melhor, equações do raio

$$\frac{dr_i}{d\tau} = c^2 p_i, \quad (i = 1,2,3), \quad (3.10)$$

$$\frac{dp_i}{d\tau} = -\frac{1}{c} \frac{dc}{dr_i}, \quad (i = 1,2,3), \quad (3.11)$$

onde p_i e r_i são as componentes (coordenadas cartesianas) do vetor vagarosidade $|p| = 1/c$, e c é a velocidade de propagação do campo de pressão.

3.5 – SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE TRANSPORTE

Usando as coordenadas do raio (γ_1 e γ_2) (Figura 3.1), a solução da equação de transporte é dada por

$$A = \frac{\Psi(\gamma_1, \gamma_2)}{\sqrt{\frac{J}{c}}} \quad (3.12)$$

Ψ é a constante de integração que depende das coordenadas do raio γ_1 e γ_2 , J é o jacobiano da transformação de coordenadas

$$J = \frac{1}{c} \left| \frac{d(x, y, z)}{d(\tau, \gamma_1, \gamma_2)} \right|, \quad (3.13)$$

onde τ é o tempo de trânsito.

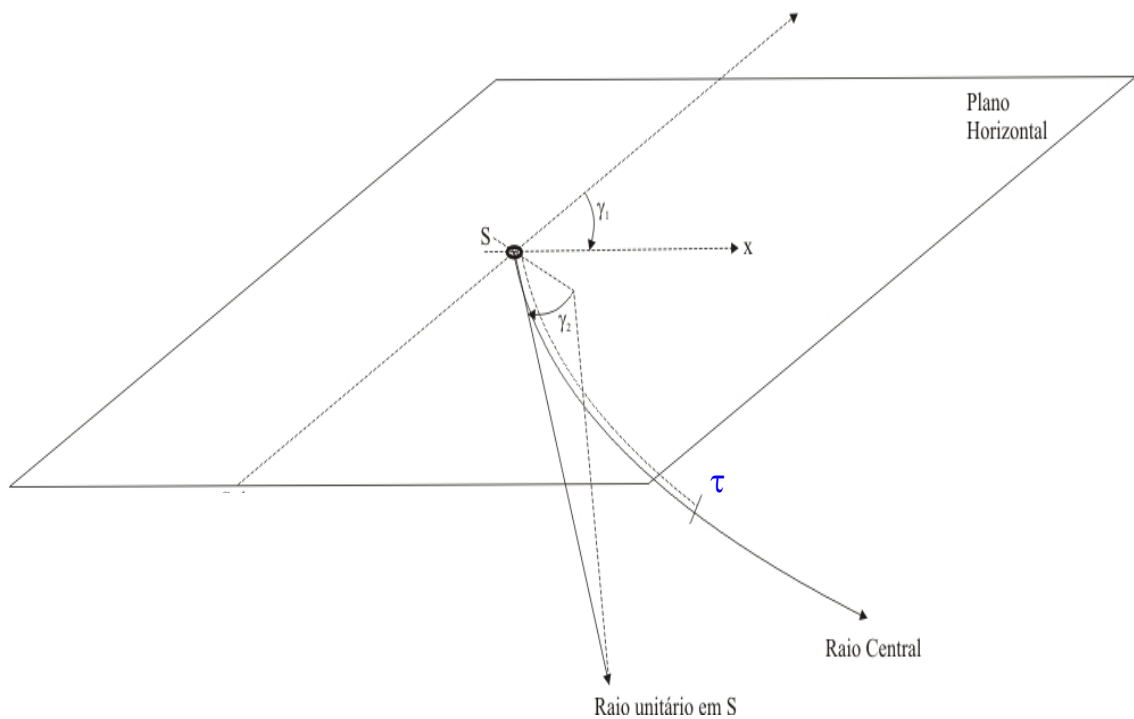


Figura 3.1 – Coordenadas do raio para uma fonte pontual S em 3D dadas pelos ângulos γ_1 e γ_2 , e o eikonal τ que determina a posição de um ponto ao longo do raio.

Pode-se observar que a equação do iconal traz informação somente sobre tempos de trânsito τ . Por outro lado, a equação de transporte relaciona os tempos de trânsito τ com as amplitudes A , mostrando como estas quantidades são transportadas, como diz o próprio nome da equação. Em outras palavras, a equação do iconal resolve a parte cinemática do problema enquanto a equação de transporte soluciona a parte dinâmica. Assim, o procedimento natural para achar a solução é buscar uma solução da equação do iconal em primeiro lugar, substituí-la na equação de transporte, para em seguida achar uma solução para a amplitude.

Apesar de todas as vantagens e simplificações da teoria do raio, a mesma somente pode ser efetivamente aplicada a meios suaves. Difrações, ondas frontais (head waves) e outros tipos de ondas observadas em seções sísmicas não podem ser adequadamente simuladas usando a teoria de ordem zero. Isso significa que o comprimento de onda da energia sísmica deve ser muito menor que o fator de escala das heterogeneidades do meio. Uma maneira de lidar com essa situação, para efeito de imageamento, é a suavização do modelo de velocidade, o que permite traçar raios em meios onde a geologia é mais complicada.

4. APROXIMAÇÕES DO TEMPO DE TRÂNSITO

Neste capítulo determinamos os tempos de trânsito para reflexões primárias e reflexões múltiplas, bem como o raio de curvatura das frentes de onda, para modelos 2-D constituídos por camadas separadas por interfaces plano-horizontais, plano-inclinadas, e curvas, considerando a velocidade constante na camada.

4.1 – INTERFACES PLANO-HORIZONTALAIS:

Iniciamos a descrição com o modelo clássico constituído por camadas separadas por interfaces plano-horizontais, homogêneas e isotrópicas, com uma fonte esfericamente simétrica pontual (Figura 4.1), o afastamento entre a fonte e o receptor é nulo e o espalhamento de energia obedece uma descrição dependente do tempo-duplo de trânsito de cada camada, t_n . O tempo duplo de propagação, $[T(p)]$, de uma onda primária refletida na interface Σ_N é dado por:

$$T(p) = 2 \sum_{n=1}^N \frac{e_n}{v_n}. \quad (4.1)$$

segundo Hubral e Krey (1980) o raio da frente de onda é dado por

$$R_0(p) = \frac{1}{v_0} \sum_{n=1}^N t_n v_n^2. \quad (4.2)$$

onde v_0 é a velocidade na primeira camada, v_n é a velocidade na camada n e e_n a espessura relativas à camada n .

O afastamento, $[X(p)]$, e o tempo-duplo, $[T(p)]$, podem ser expresso em termos do parâmetro horizontal do raio (p), segundo Hubral e Krey (1980), é dado por

$$T(p) = 2 \sum_{i=1}^k \frac{\Delta t_i}{\sqrt{1 - p^2 v_i^2}}, \quad X(p) = 2 \sum_{i=1}^k \frac{v_i^2 p \Delta t_i}{\sqrt{1 - p^2 v_i^2}}, \quad (4.3)$$

onde $p = \text{sen } \theta_0 / v_0$, (θ_0 é o ângulo de partida, $\theta \leq |\pi/2|$) e Δt_i é o tempo-simples de percurso vertical na camada. (Figura 4.1).

O atributo fundamental da frente de onda se resume ao raio desta frente de onda, cujo inverso é o fator de espalhamento geométrico, dado por (Figura 4.1):

$$R_0(h) = \frac{\sqrt{1-p^2v_0^2}}{pc_0} \left[h^2 + 2h \sum_{i=1}^k d_i \left(\frac{pv_i}{\sqrt{1-p^2v_i^2}} \right)^3 \right]^{1/2}. \quad (4.4)$$

onde d_i é a profundidade da camada. A correção ao afastamento-nulo, expressa pela lei hiperbólica, é dada por:

$$T^2(h) = T_0^2 + \frac{4h^2}{v_{RMS}^2}, \quad (4.5)$$

onde h é o meio-afastamento, T_0 é o tempo-duplo de trânsito de uma onda refletida com incidência normal na interface N e v_{RMS} é a velocidade média-quadrática para camadas horizontais, segundo Taner e Koehler (1969).

A figura 4.2 exibe um exemplo simples de múltiplas simétricas com o tempo de trânsito e a distância fonte-receptor, $X(p)$, expressos na forma paramétrica, segundo Kleyn (1983), por

$$T(p) = 2 \sum_{k=1}^k \frac{\Delta t_k}{\sqrt{1-p^2v_k^2}} + 2 \sum_{k=M_1}^{M_2} \frac{\Delta t_k}{\sqrt{1-p^2v_k^2}} \quad (4.6)$$

$$X(p) = 2 \sum_{k=1}^N \frac{v_k^2 p \Delta t_k}{\sqrt{1-p^2v_k^2}} + 2 \sum_{n=M_1}^{M_2} \frac{v_n^2 p \Delta t_n}{\sqrt{1-p^2v_n^2}} \quad (4.7)$$

onde $N=2$, $M_1=M_2=2$. O segundo somatório representa a contribuição da reflexão múltipla.

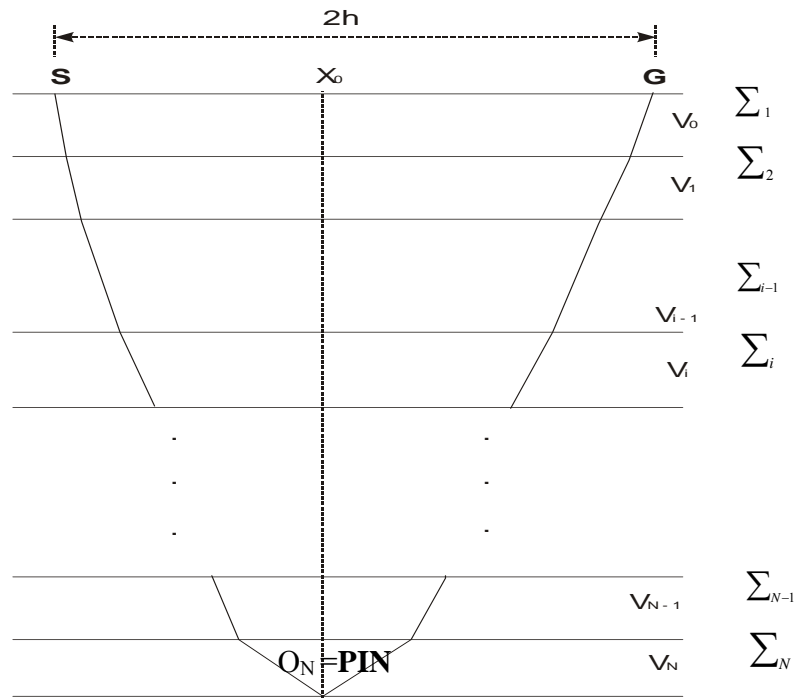


Figura 4.1 – Modelo 2-D estratificado de isovelocidades, adaptado de Hubral e Krey (1980). A velocidade para cada camada é dada por V_i ($i = 0, 1, \dots, N$), que estão separadas pelas interfaces Σ_i ($i = 1, \dots, N$). Observa-se o raio paraxial que se inicia na fonte S reflete no ponto O_N e retorna a superfície no receptor G. O raio normal se inicia no ponto X_0 reflete no ponto O_N e retorna à superfície no mesmo ponto X_0 .

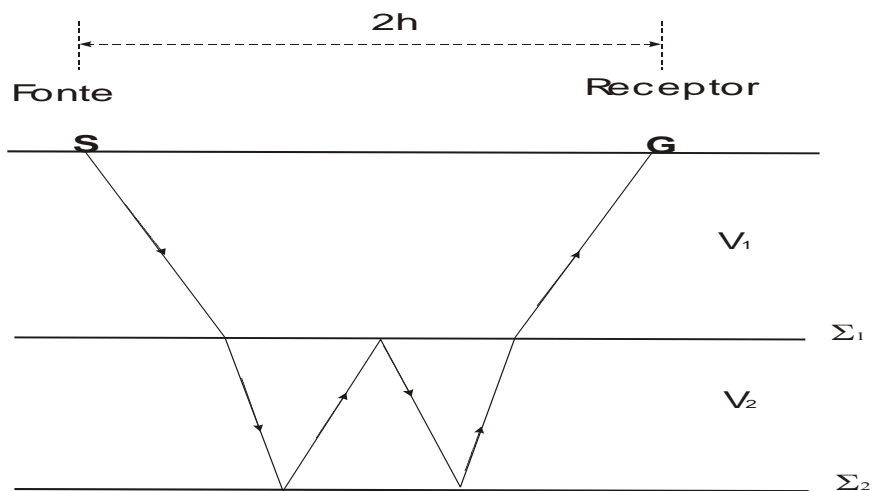


Figura 4.2 – Traçado da trajetória de uma reflexão múltipla de primeira ordem na segunda camada em um modelo constituído de 2 camadas separadas por interfaces plano horizontal (homogêneas e isotrópicas) sobre um semi espaço infinito. Observa-se que o afastamento entre a fonte S e o receptor G é dado por $2h$.

4.2 – MODELO 2-D COM INTERFACES PLANAS COM MERGULHO

Consideramos um modelo 2-D constituído por camadas separadas por interfaces planas com mergulho arbitrário sobre um semi-espaço (Figura 4.3). O raio normal é traçado desde o ponto na superfície, PMC, até o refletor N. Os ângulos de incidência e refração são dados por α_i e β_i ($i = 1, \dots, N - 1$) e o ângulo de emergência do raio normal é dado por β_0 . As velocidades em cada camada são dadas por v_i ($i = 1, \dots, N$). Para uma configuração PMC, observa-se o raio paraxial entre a fonte S e o receptor G cujo afastamento é dado por $2h$. Para o caso da primeira camada, a aproximação paraxial de tempo de trânsito hiperbólico para a configuração PMC, na vizinhança de um raio normal, é dada por

$$T^2(h) = T(0)^2 + \frac{4h^2 \cos^2 \theta}{v^2}, \quad (4.8)$$

onde θ é o ângulo de mergulho da interface.

O caso se torna mais geral para mergulhos arbitrários, ainda com camadas homogêneas e isotrópicas, e as equações aplicáveis para o modelo direto 2D, válidas para pequenos afastamentos, e baseadas nos atributos da frente de onda (Figura 4.3), a aproximação parabólica de tempo de trânsito é dada por

$$T(h) = T(0) + \frac{\text{sen } \beta_0}{v_1} h + \frac{\cos^2 \beta_0}{v_1 R_0} 2h^2 + \dots \quad (4.9a)$$

e a aproximação hiperbólica de tempo de trânsito é dada por

$$T^2(h) = \left\{ T(0) + \frac{\text{sen } \beta_0}{v_1} h \right\}^2 + \frac{T(0) \cos^2 \beta_0}{v_1 R_0} 4h^2 + \dots \quad (4.9b)$$

O raio de curvatura da frente de onda, que se origina no ponto PIN, segundo Hubral e Krey (1980), na superfície de observação é dado por:

$$R_0 = \frac{2}{v_1} \sum_{n=1}^N v_n^2 \Delta t_n \prod_{k=1}^{n-1} \frac{\cos^2 \alpha_k}{\cos^2 \beta_k}. \quad (4.10)$$

onde α_k e β_k estão referidos aos ângulos de incidência e refração, respectivamente, na camada k.

A aproximação hiperbólica de tempo de trânsito é dada por:

$$T^2(h) = T(0)^2 + \frac{4h^2}{v_{NMO}^2}, \quad v_{NMO}^2 = \frac{2v_1 R_0}{T(0) \cos^2 \beta_0}, \quad (4.11)$$

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

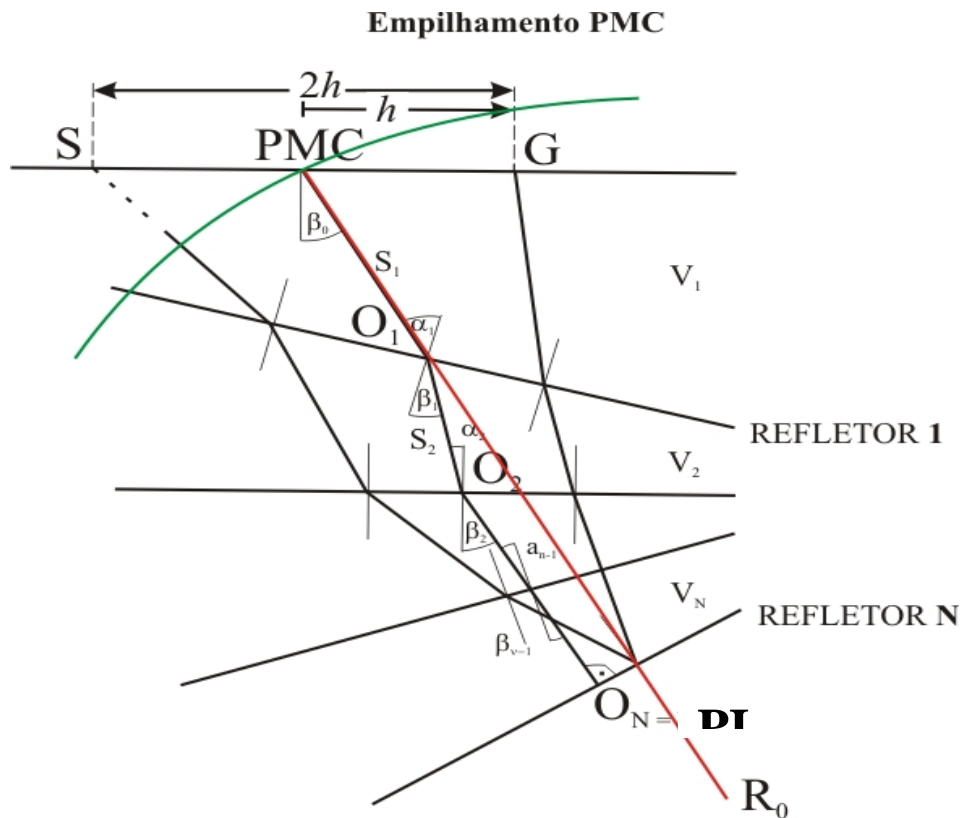


Figura 4.3 – Modelo 2D constituído por camadas separadas por interfaces plano-inclinadas mostrando o raio normal. A velocidade do meio em cada camada é V_i , α_i é o ângulo de refração ou transmissão, β_i é o ângulo de incidência, O_i é um ponto de incidência do raio sobre a interface. Observa-se que o afastamento entre a fonte S e o receptor G é dado por $2h$, adaptado de Hubral e Krey (1980).

4.3 – INTERFACES CURVAS – 2-D

Para o cálculo da curvatura de frente de onda em qualquer ponto ao longo do raio traçado através do modelo 2-D estratificado, serão utilizadas as leis de curvatura da frente de onda, que serão abordadas no capítulo 5. A partir de um ponto com curvatura de frente de onda conhecida podemos aplicar as três leis em cascata para encontrar uma expressão que represente a curvatura da frente de onda em algum outro ponto desejado no raio.

Os raios de curvaturas das interfaces $R_{F,i}$ são considerados nas equações do tempo de trânsito. Para o caso 2D, o perfil tem uma direção coincidente com a direção dos mergulhos não uniformes, e o raio de curvatura difere da equação relativamente simples para o caso anterior. Segundo Hubral e Krey (1980), para três camadas separadas por interfaces curvas, o raio de incidência normal é dado por:

$$R_0 = \frac{1}{v_1} \left[s_1 v_1 + \left(\frac{\rho}{v_1 \cos^2 \alpha_1} \frac{1}{R_{F,1}} + \left\{ s_2 v_2 \frac{\cos^2 \alpha_1}{\cos^2 \beta_1} + \left[\frac{\rho_2 \cos^2 \beta_1}{v_2 \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2} \frac{1}{R_{F,2}} + \left(s_3 v_3 \frac{\cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2}{\cos^2 \beta_1 \cos^2 \beta_2} \right)^{-1} \right]^{-1} \right)^{-1} \right]^{-1} \right] \quad (4.12)$$

onde o comprimento do raio na camada é dado por s_i ($i = 1, 2, 3$). O tempo-duplo de percurso hiperbólico é o mesmo dado no caso anterior.

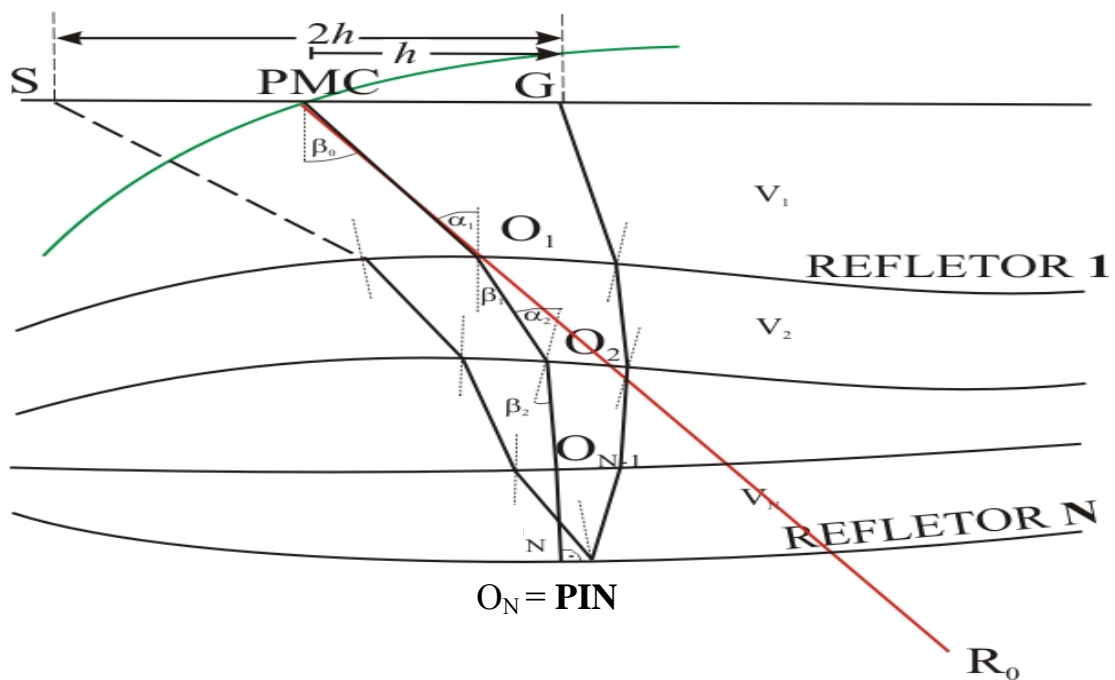


Figura 4.4 – Modelo 2D constituído por N camadas separadas por interfaces curvas mostrando o raio de incidência normal. Observa-se que o afastamento entre a fonte S e o receptor G é dado por $2h$. v_i é a velocidade na camada, α_i é o ângulo de transmissão, β_i é o ângulo de incidência e O_i é um ponto de refração ou reflexão sobre a interface i ($i = 1, \dots, N$), adaptado de Hubral e Krey (1980).

4.4 – APROXIMAÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO PARA REFLEXÕES MÚLTIPLAS

Para a determinação do tempo de trânsito das reflexões múltiplas, são feitas pequenas alterações matemáticas, no tempo de trânsito das reflexões primárias equivalentes. Segundo Levin (1971), o tempo de trânsito da múltipla de reflexão de ordem n , no caso 3-D, é dado pela expressão

$$t_n^2 = \left[\frac{2D \operatorname{sen}(n+1)\phi}{v \operatorname{sen} \phi} \right]^2 + \left[\frac{1 - \cos^2 \theta \operatorname{sen}^2(n+1)\phi}{v^2} \right] h^2, \quad (4.13)$$

onde n é a ordem da múltipla e fazendo $n = 0$ obtemos o tempo da reflexão primária. α , β e ϕ são os co-senos diretores da normal ao plano (Veja Figura 4.5). D é a distância da superfície no ponto médio ao refletor. O ângulo de mergulho do plano é dado por θ . Segundo Levin (1971), fazendo $\theta = 0$ obtemos a expressão do tempo de trânsito da múltipla de ordem n no modelo 2-D (Veja Figura 4.5).

$$t_n^2 = \left[\frac{2D \operatorname{sen}(n+1)\phi}{v \operatorname{sen} \phi} \right]^2 + \left[\frac{1 - \operatorname{sen}^2(n+1)\phi}{v^2} \right] x^2, \quad (4.14)$$

onde a velocidade de empilhamento v_{NMO} é dada por

$$v_{NMO}/v = \left[1 - \operatorname{sen}^2(n+1)\phi \right]^{1/2} \quad (4.15)$$

sendo v é a velocidade constante na camada.

4.5 - VELOCIDADE NMO

Para a determinação dos valores da velocidade v_{NMO} , é usada a expressão

$$v_{NMO}^2 = \frac{2v_0 R_{PIN}}{t_0 \cos \beta_0} \quad (4.16)$$

onde v_0 é a velocidade no ponto de emergência do raio normal; t_0 é o tempo duplo do raio central de afastamento-nulo; β_0 é o ângulo de emergência do raio de reflexão normal e R_{PIN} é o raio de curvatura da frente de onda PIN.

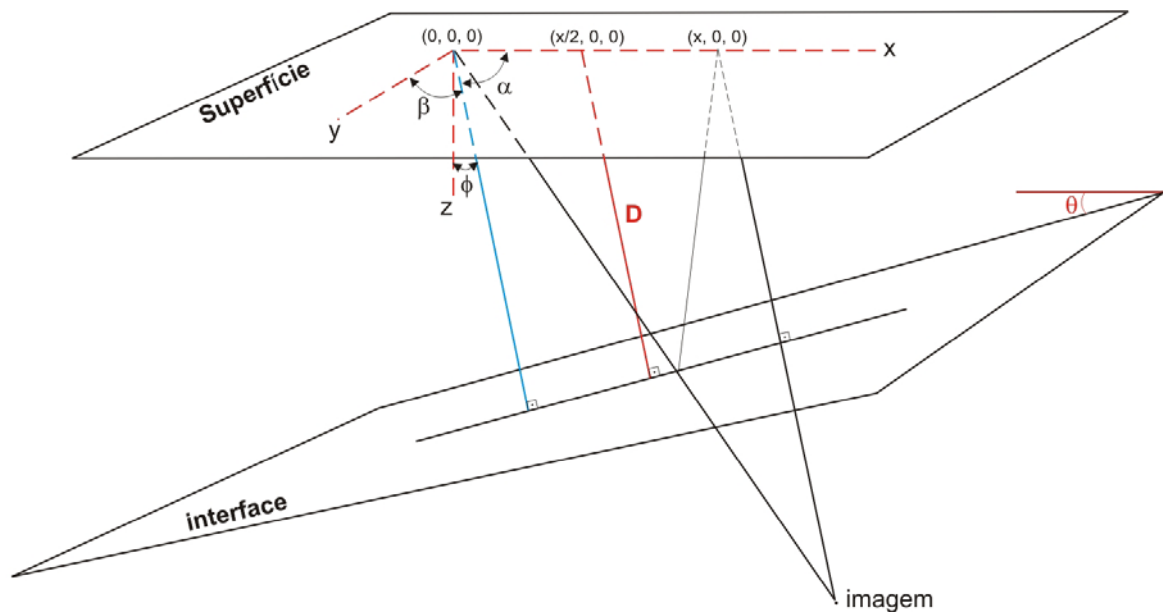


Figura 4.5 – Desenho da superfície de levantamento sísmico e um refletor plano inclinado em subsuperfície. A fonte esta na posição $(0,0,0)$ e o receptor na posição $(x,0,0)$. O ponto médio do levantamento é $(x/2,0,0)$. Os co-senos diretores são representados por α , β e ϕ . O mergulho do refletor é representado pelo ângulo θ . Adaptado de Levin (1971).

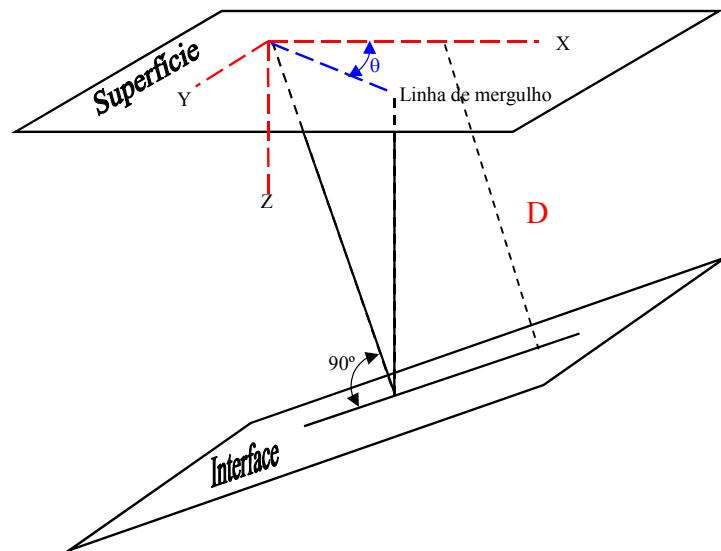


Figura 4.6 - Desenho da superfície de levantamento sísmico e um refletor plano inclinado em subsuperfície. θ é o ângulo de mergulho do plano. Adaptado de Levin (1971).

5. GEOMETRIA DE FRENTES DE ONDAS

Neste capítulo são apresentados os aspectos teóricos referidos aos parâmetros cinemáticos das ondas hipotéticas Ponto de Incidência Normal (PIN) e Normal (N) relacionados ao raio normal. Estes parâmetros são: o ângulo de emergência do raio normal; a curvatura da frente onda PIN e a curvatura da frente de onda N. São apresentadas ainda as três leis de curvatura de frente de onda, segundo Hubral e Krey (1980). Estas leis são: Transmissão, Propagação e Reflexão. Estas leis são requeridas para o cálculo das curvaturas da frente de onda em qualquer ponto de um raio arbitrário.

5.1 – ONDA PONTO DE INCIDÊNCIA NORMAL E ONDA NORMAL

A definição das ondas Ponto de Incidência Normal (PIN) e a onda Normal (N), foram introduzidas por Hubral (1983). Estas ondas são fictícias geradas hipoteticamente, relacionadas ao experimento de afastamento nulo (AN). A partir dessas ondas e do raio de reflexão normal, torna-se possível a obtenção do trio de parâmetros: ângulo de emergência do raio normal (β_0), o raio de curvatura da frente de onda PIN (R_{PIN}) e o raio de curvatura da frente de onda N (R_N).

Na Figura 5.1, se observa a propagação de duas ondas hipotéticas PIN e N, num meio heterogêneo formado por duas camadas homogêneas sobre um semi-espaco, desde o ponto de incidência normal R sobre o refletor até o ponto de observação X_0 na linha sísmica.

A onda PIN se propaga de forma ascendente a partir de uma fonte no ponto R, localizada no refletor, a qual emite um campo de ondas que se propaga com a metade da velocidade do meio. As frentes de onda em azul representam a propagação da mesma até atingir o ponto de emergência X_0 , localizado na linha sísmica. (Ver Figura 5.1a).

A onda N é originada pela excitação do refletor e se propaga de forma ascendente, com velocidade igual à metade da velocidade do meio. A onda N é o envelope de todas as ondas PIN uma vez que se propaga, por definição, perpendicularmente a todos os raios normais ao refletor (Figura 5.1 b).

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

Para um meio heterogêneo, a interpretação dos atributos das ondas PIN e N não é direta e intuitiva como no meio homogêneo, porém continua associado com a orientação, à distância e a curvatura do refletor. As curvaturas K_{PIN} (ou o raio de curvatura $R_{PIN} = 1/K_{PIN}$) e K_N (ou o raio de curvatura $R_N = 1/K_N$) medidas no ponto de emergência X_0 são interpretadas por aproximações circulares das frentes de ondas correspondentes a onda PIN e a onda N, respectivamente, para um modelo 2D.

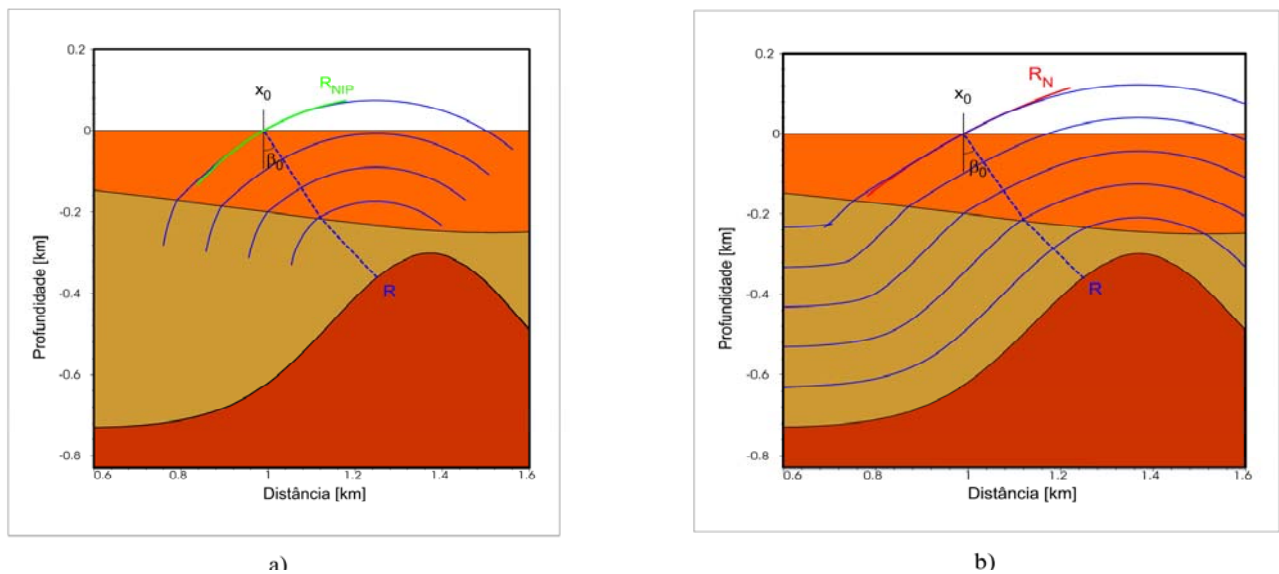


Figura 5.1 – Representação de um meio heterogêneo composto de duas camadas sobre um semi-espaço que tem a forma de um domo, na qual é ilustrado a propagação das duas ondas hipotéticas ao longo do raio com afastamento nulo, desde o ponto de incidência normal do raio R sobre o refletor até o ponto de observação em X_0 . (a) Propagação de uma onda PIN, para diferentes instantes de tempo, e a transmissão de uma camada a outra, ao longo do raio normal com afastamento nulo. (b) Propagação de uma onda N, para diferentes instantes de tempo, e a transmissão de uma camada a outra ao longo do raio normal com afastamento nulo, até o ponto X_0 do refletor. Adaptado de Jäger et al. (2001).

5.2 – LEIS DA CURVATURA DE FRENTE DA ONDA

As curvaturas da frente de onda podem ser expressas analiticamente em termos dos parâmetros ao longo do raio normal conforme Hubral e Krey (1980). O cálculo destas curvaturas em qualquer ponto de um raio arbitrário está intrinsecamente associado às leis de Transmissão e Reflexão. A curvatura da frente de onda que se propaga em subsuperfície pode mudar devido as transmissões (Figura 5.3) e reflexões (Figura 5.4) nas interfaces.

5.2.1 – Lei de propagação

A lei de propagação mostra como o raio de curvatura da frente de onda muda devido à propagação em camadas homogêneas

$$R_{p_2} = R_{p_1} + v\Delta T, \quad (5.1)$$

onde R_{p_1} e R_{p_2} (Figura 5.4) denotam os raios de curvatura das frentes de onda nos pontos P_1 e P_2 respectivamente, v é a velocidade do meio e ΔT é o tempo de trânsito requerido pela onda para se propagar de P_1 até P_2 .

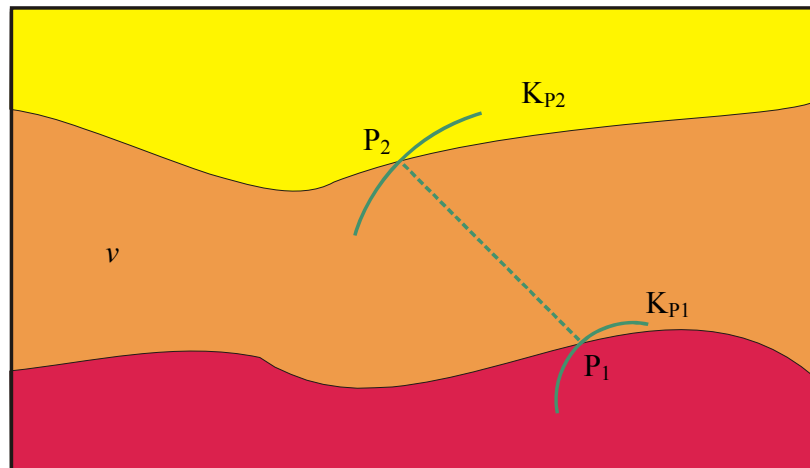


Figura 5.2 – Propagação da frente de onda dentro de uma camada e ao longo do raio normal, desde um ponto inicial (P_1) localizado numa interface ao ponto final (P_2) localizado na interface imediatamente superior. No meio de propagação da onda a velocidade da mesma é representada por v , K_{P_1} é a curvatura da frente de onda no início da propagação na camada e K_{P_2} é a curvatura da frente da onda, no final da propagação na camada.

5.2.2 – Lei de transmissão

A lei de transmissão refere-se à mudança do raio de curvatura da frente de onda devido a sua passagem de um meio para outro

$$\frac{1}{R_T} = \frac{v_T \cos^2 \alpha_I}{v_I \cos^2 \alpha_T} \frac{1}{R_I} + \frac{1}{\cos^2 \alpha_T} \left(\frac{v_T}{v_I} \cos \alpha_I - \cos \alpha_T \right) \frac{1}{R_F}, \quad (5.2)$$

onde R_T e R_I são os raios de curvatura da frente de onda transmitida e incidente, v_T e v_I são as velocidades das ondas transmitida e incidente, respectivamente (Figura 5.3). O raio de curvatura da interface é expresso por R_F . Também temos α_I e α_T que são os ângulos de incidência e transmissão do raio, respectivamente.

O primeiro termo da equação (5.2) descreve a alteração da curvatura da frente de onda relacionada à mudança de meio e o segundo descreve a alteração devido à curvatura da interface.

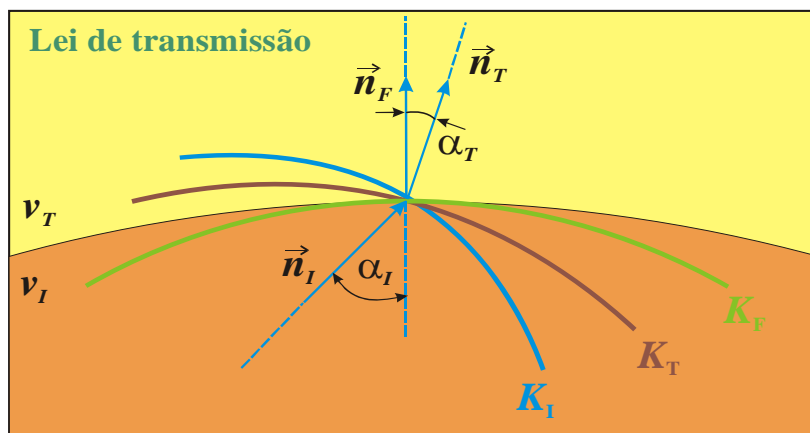


Figura 5.3 – Transmissão do raio de curvatura da frente de onda de um lado da interface ao outro lado, α_I é ângulo de incidência, α_T é o ângulo transmitido, v_T é a velocidade da onda transmitida, v_I é a velocidade da onda incidente, K_I e K_T são as curvaturas das frentes de onda incidente e transmitida, respectivamente, K_F é a curvatura da interface. Os vetores normais às curvaturas K_I , K_T e K_F , são representados por \vec{n}_I , \vec{n}_T e \vec{n}_F , respectivamente.

5.2.3 – Lei de reflexão

A lei da reflexão descreve como muda a curvatura da frente de onda pela sua reflexão numa interface

$$\frac{1}{R_R} = \frac{v_R \cos^2 \alpha_I}{v_I \cos^2 \alpha_R R_I} + \frac{1}{\cos^2 \alpha_R} \left(\frac{v_R \cos \alpha_I - \cos \alpha_R}{v_I} \right) \frac{1}{R_F}, \quad (5.3)$$

onde R_R é o raio de curvatura da frente de onda refletida e, v_I e α_I representam a velocidade e o ângulo de chegada da onda incidente e, v_R e α_R a velocidade e o ângulo de saída da onda refletida. Os ângulos são medidos em relação à normal da superfície. (Figura 5.4).

O primeiro termo da equação (5.3) descreve a mudança à frente onda pela reflexão e o segundo termo descreve a mudança devido à curvatura da interface. Note que no caso de não haver mudança no tipo de onda e nas propriedades do meio, $v_R = v_I$ ($\alpha_R = \alpha_I$), a equação (5.3) fica

$$\frac{1}{R_R} = \frac{1}{R_I} + \frac{2}{\cos \alpha R_F}. \quad (5.4)$$

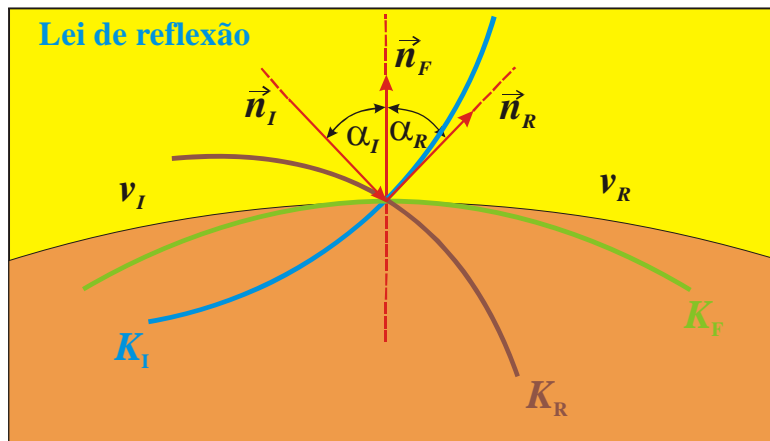


Figura 5.4 – Reflexão do raio de curvatura da frente de onda através de uma interface. Os ângulos de incidência e reflexão são representados por α_I e α_R , v_I e v_R são as velocidades das frentes de ondas incidente e refletida, K_I e K_R são as curvaturas das frentes de ondas incidente e refletida, respectivamente e K_F é a curvatura do refletor. Os vetores normais às curvaturas K_I , K_R e K_F , são representados por \vec{n}_I , \vec{n}_R e \vec{n}_F , respectivamente.

5.2.4 – Convenção de sinais

A convenção de sinais considerada é a mesma adotada por Hubral e Krey (1980) na qual se define:

- Quando uma frente de onda se apresenta atrás de seu plano tangencial (Figura 5.5(a)), então a curvatura da frente de onda é positiva, caso contrário, a curvatura é negativa.
- A curvatura da interface, K_F (linha verde da figura 5.5(b)), é positiva ($K_{F1} > 0$) se a interface aparece convexa ao raio incidente e negativa ($K_{F2} < 0$) se for côncava.

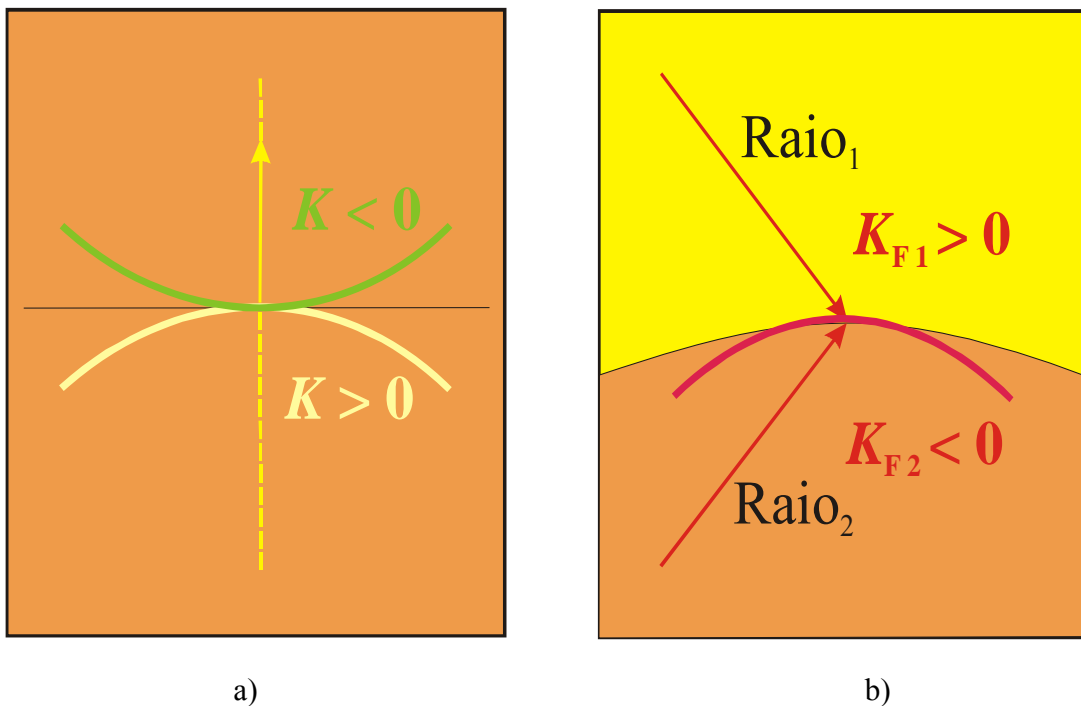


Figura 5.5 – Convenção de sinais das curvatura das (a) frentes de onda e (b) interfaces.

5.3 – CALCULO DOS PARÂMETROS DAS ONDAS PIN E N.

Considera-se um modelo sintético 2-D constituído por camadas homogêneas separadas por interfaces curvas. Os parâmetros da frente de onda β_0 , R_{NIP} e R_N , podem ser calculados diretamente pelo traçamento do raio. O traçamento de um raio normal para uma determinada interface, serve para determinar o ângulo de emergência β_0 com a normal à superfície no ponto observação X_0 . A forma de calcular as curvaturas das frentes de ondas hipotéticas PIN e N é realizada na direção ascendente a partir do ponto de incidência normal sobre o refletor, ao longo do raio normal, levando em conta a transformação das frentes de ondas (PIN e N) através da transmissão entre as camadas; isto é, a partir do ponto O_N numa interface até atingir o ponto de observação O_0 localizado na superfície.

5.3.1 – Reflexões primárias

Para calcular os raios de curvatura R_{PIN} , R_N e o ângulo de emergência β_0 , para as reflexões primárias, consideramos inicialmente o raio de incidência normal com origem em $O_N = PIN$. Isto fornecerá todos os ângulos de incidência e de transmissão para todas as interfaces ($i = 1, \dots, n-1$) e o ângulo de emergência β_0 no ponto O_0 na superfície. Ajustamos $R_{inicial} = 0$ para determinar R_{PIN} ou $R_{inicial} = R_{Fn}$ para determinar R_N , onde R_{Fn} é o raio de curvatura na n -ésima interface considerando o ponto O_n . Segundo Hubral e Krey (1980), o cálculo do raio de curvatura da frente de onda ao longo do raio normal, para a primeira transmissão, é realizado por

$$R_{I_{n-1}} = R_{inicial} + v_{n-1} \Delta T_{O_n \rightarrow O_{n-1}} \quad (5.3)$$

sendo $R_{I_{n-1}}$ o raio de curvatura da frente de onda na interface $(n - 1)$. A distância $v_{n-1} \Delta T_{O_n \rightarrow O_{n-1}}$ corresponde ao segmento de raio reto que une o ponto O_n localizado na interface (n) até o ponto O_{n-1} , localizado na interface $(n - 1)$. Segundo Hubral e Krey (1980), a determinação da curvatura resultante da frente de onda que é transmitida de um lado da interface ao outro lado, é dado pelo processo recursivo ($i = n-1, \dots, 1$)

$$\frac{1}{R_{Ti}} = \frac{v_{i-1} \cos^2 \beta_i}{v_i \cos^2 \alpha_i R_{Fi}} + \frac{1}{\cos^2 \alpha_i} \left(\frac{v_{i-1}}{v_i} \cos \beta_i - \cos \alpha_i \right) \frac{1}{R_{Fi}} \quad (5.4)$$

em que α_i e β_i são, respectivamente, os ângulos de transmissão e incidência do raio normal na interface i ($i = n - 1, \dots, 1$). As velocidades v_i e v_{i-1} correspondem, respectivamente, as camadas inferior e superior com relação a interface $(n - 1)$, cujo raio de curvatura no ponto de incidência (ou transmissão) do raio é R_{Fi} . Portanto, usando (5.3) e (5.4) ao longo da trajetória do raio normal são calculados os raios de curvaturas das frentes de ondas correspondentes as ondas PIN e N, até atingir o ponto de emergência O_0 . Dessa forma, podem ser determinados os três parâmetros (β_0 , R_{NIP} e R_N) associados a cada um dos raios normais às interfaces do modelo sintético considerado (Figura 5.6)

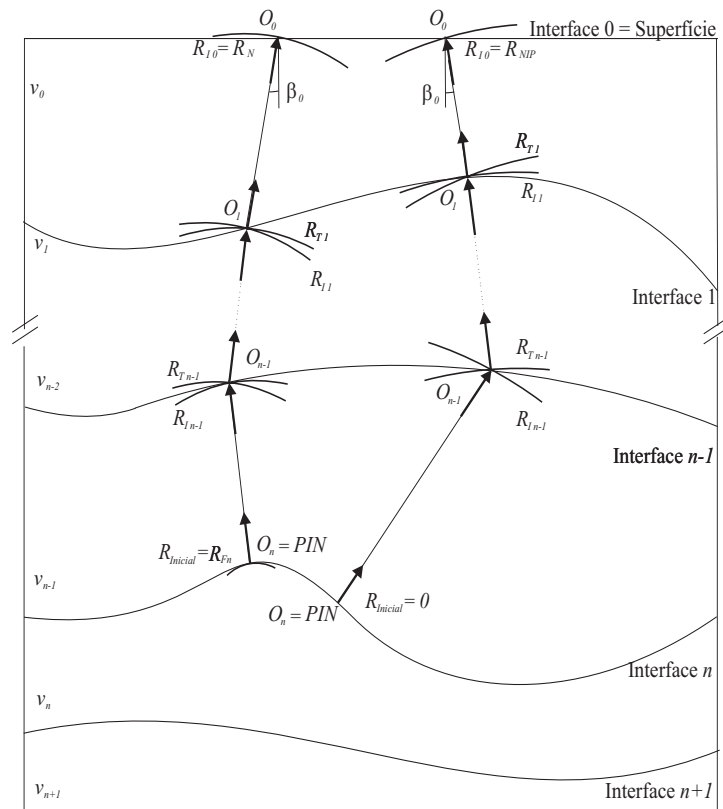


Figura 5.6 – Trajetória dos raios considerados no processo recursivo para obter R_N e R_{PIN} , considerando apenas eventos primários. Adaptado de Jäger (1999).

5.3.2 – Reflexões múltiplas

Para calcular os raios de curvatura R_{PIN} , R_N e o ângulo de emergência β_0 , para as reflexões múltiplas, seguimos um procedimento similar ao cálculo realizado para as reflexões primárias. Colocamos uma fonte hipotética no ponto PIN. Consideramos inicialmente o raio de incidência normal com origem em $O_{n-1} = PIN$ (Figura 5.7). Isto fornecerá todos os ângulos de incidência e de transmissão para todas as interfaces ($i = 1, \dots, n - 1$) e o ângulo de emergência β_0 no ponto O_0 na superfície. Ajustamos $R_{inicial} = 0$ para determinar o R_{PIN} ou $R_{inicial} = R_{F_{n-1}}$ para determinar R_N , onde $R_{F_{n-1}}$ é o raio de curvatura na interface ($n - 1$) considerando o ponto O_{n-1} . Segundo Hubral e Krey (1980), o cálculo do raio de curvatura da frente de onda ao longo do raio normal, para a primeira transmissão, é realizado por:

$$R_{I_n} = R_{inicial} + v_{n-1} \Delta T_{O_{n-1} \rightarrow O_n} \quad (5.5)$$

sendo R_{I_n} o raio de curvatura da frente de onda na interface (n). A distância $v_{n-1} \Delta T_{O_{n-1} \rightarrow O_n}$ corresponde ao segmento de raio reto que une o ponto O_{n-1} localizado na interface ($n - 1$) até o ponto O_n , localizado na interface (n). Segundo Hubral e Krey (1980), a determinação da curvatura resultante da frente de onda que é refletida na interface (n), é dada por :

$$\frac{1}{R_{R_n}} = \frac{1}{R_{I_n}} + \frac{2}{\cos^2 \alpha_n R_{F_n}} \quad (5.6)$$

em que α_n é o ângulo de incidência do raio normal na interface (n). A determinação da curvatura resultante da frente de onda, a partir deste ponto, é obtida de forma idêntica para a reflexão primária. Portanto, considerando uma reflexão múltipla, determinamos ao longo da trajetória do raio normal, os raios de curvaturas das frentes de ondas correspondentes as ondas PIN e N, até atingir o ponto de emergência O_0 . Assim, para cada um dos raios normais às interfaces do modelo sintético, determinamos os três parâmetros (β_0 , R_{NIP} e R_N). (Figura 5.7)

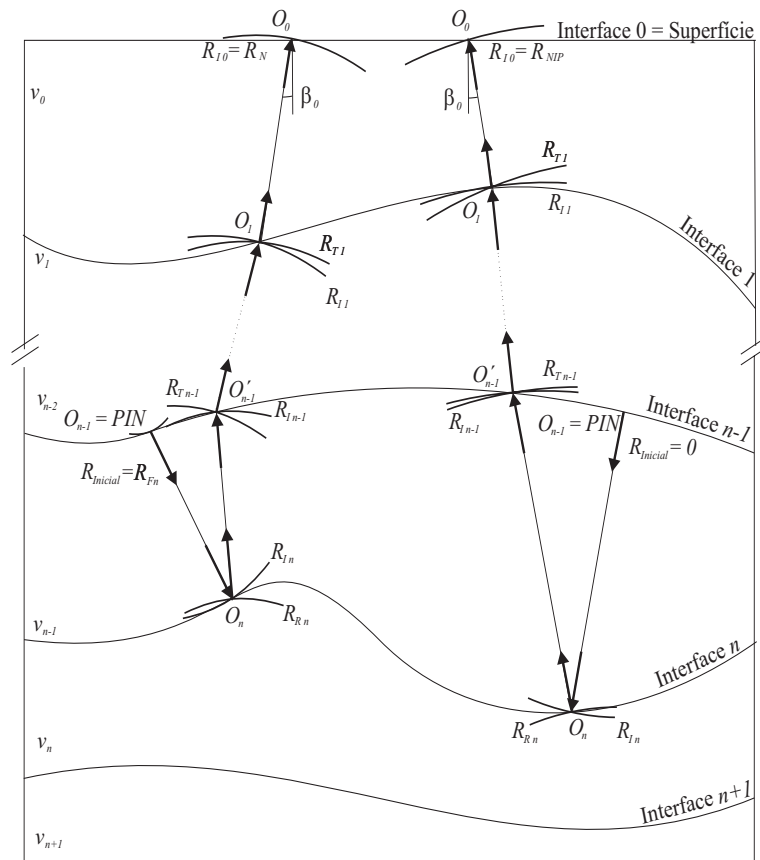


Figura 5.7 – Traçado dos raios considerados no processo recursivo para obter R_N e R_{PIN} , considerando eventos de reflexões múltiplas. Adaptado de Jäger (1999).

5.3.3 – Fluxograma do algoritmo de cálculo do trio de parâmetros

Os parâmetros de cada raio normal de reflexão são calculados tanto para os eventos de reflexões primárias quanto de reflexões múltiplas, conforme o fluxograma na Figura 5.8. Neste caso, o algoritmo inclui os procedimentos recursivos mostrados anteriormente, aplicando as leis de transmissão e reflexão.

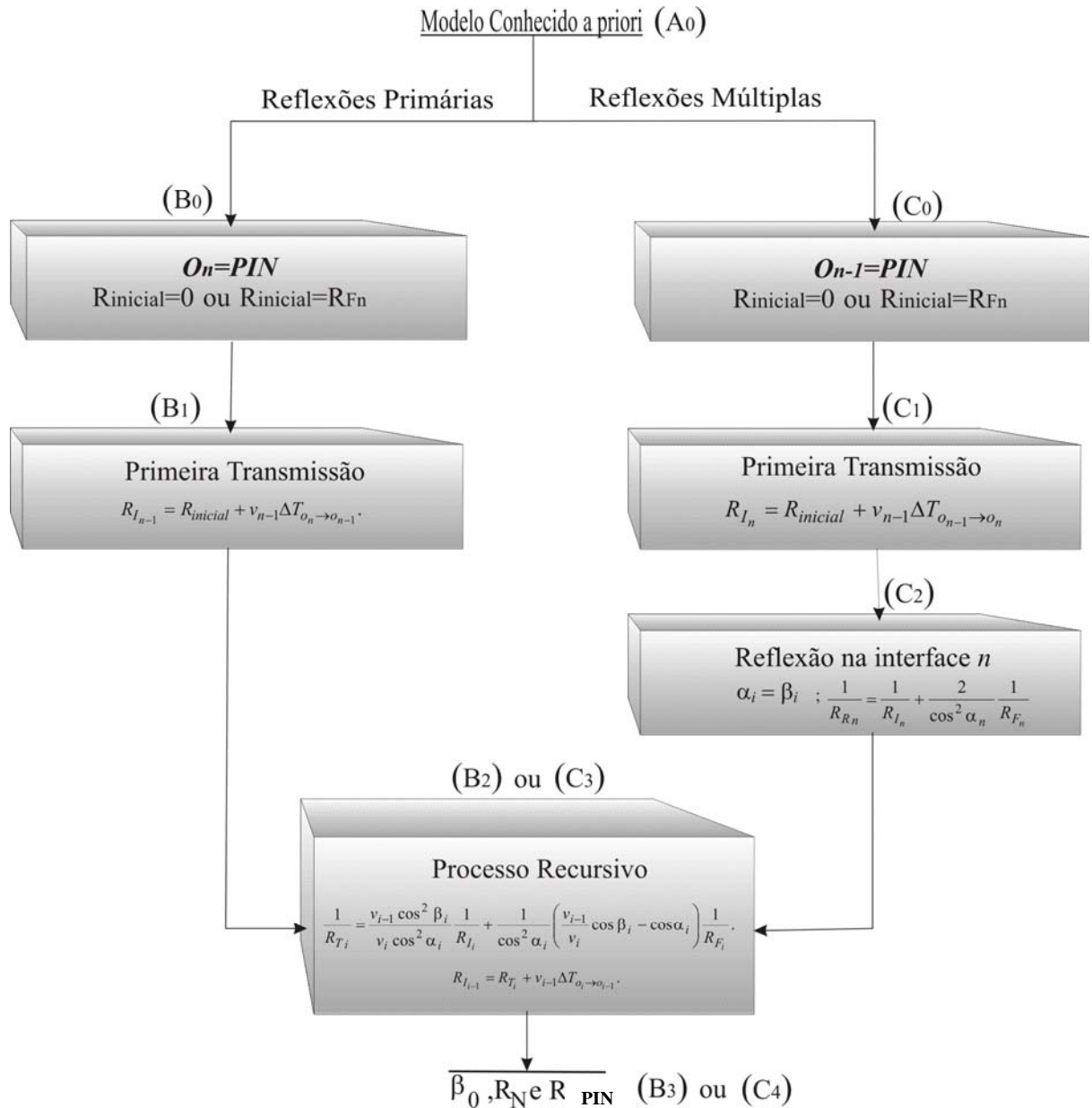


Figura 5.8 – Fluxograma do algoritmo de cálculo do trio de parâmetros do raio normal β_0, R_N e R_{PIN} para eventos de reflexões primárias e múltiplas. Onde B₀, B₁, B₂ e B₃ são etapas executadas para reflexões primárias e C₀, C₁, C₂, C₃ e C₄ executadas para reflexões múltiplas. Adaptado de Cabral (2002).

6. MIGRAÇÃO KIRCHHOFF

A migração é uma ferramenta básica para o processamento e a interpretação sísmica. O propósito da migração é fornecer imagens mais próximas das estruturas em subsuperfície, baseado na equação da onda sísmica.

Mediante a técnica de migração investiga-se a relação entre a curva de difração e a posição do ponto difrator, onde qualquer amostra pode ser relacionada a um ponto em subsuperfície, cuja representação corresponde a uma curva de difração.

O processo de migração consiste em somar as amplitudes dos traços que interceptam a curva de difração, e fixar este resultado no ápice desta curva. Esta operação é repetida para todas as amostras da seção sísmica.

Existem diversos métodos de migração. Nesta Dissertação, será utilizado o método de migração Kirchhoff devido a melhor recuperação dos refletores. Este tipo considera que todos os pontos da subsuperfície são candidatos potenciais a pertencerem a refletores. Sobre aqueles que confirmam esta hipótese, uma função indicadora sobre o ponto adquire um valor alto. Caso contrário, sobre os pontos que não estejam sobre os refletores, a função indicadora assume um valor baixo. Combinando estas características, uma seção sísmica em profundidade é imageada (migrada).

Neste capítulo apresentamos a formulação teórica da migração Kirchhoff em profundidade, que será utilizada no capítulo subsequente em modelos sintéticos 2-D, estratificados, com interfaces planas e curvas, de velocidade variando linearmente com a profundidade, na configuração afastamento nulo.

6.1. FUNDAMENTO TEÓRICO DA MIGRAÇÃO DE KIRCHHOFF

Considera-se que a subsuperfície é descrita por um modelo de camadas isotrópicas estratificadas, e que também existem reflexões primárias P-P e reflexões múltiplas com pares fonte-receptor (S,G), segundo Schleicher et al. (1993b), são dados por:

$$x_S = x_S(\xi), \quad x_G = x_G(\xi) \quad (6.1)$$

em que ξ é um parâmetro na superfície que identifica a posição de um par fonte-receptor.

Na migração Kirchhoff, o valor da amplitude de cada ponto M do traço migrado é obtido pela soma algébrica das amplitudes dos traços de entrada ao longo de uma curva de difração $\tau_D(\xi, M)$ mostrada na Figura 6.1 abaixo.

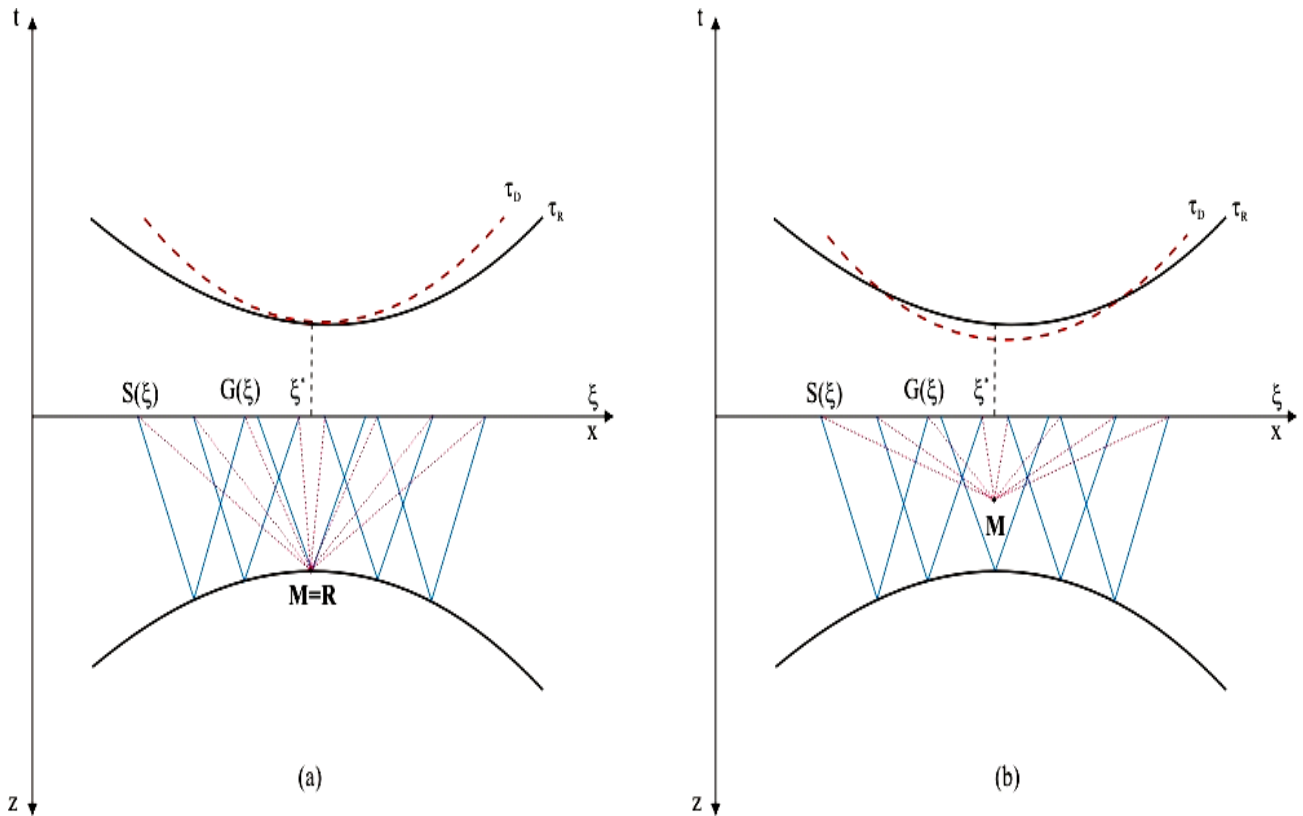


Figura 6.1 – Curvas de tempos de trânsito de reflexão (τ_R) e de difração (τ_D) para diferentes escolhas do ponto M em uma configuração de afastamento comum. A localização da fonte e do receptor ao longo do eixo x é dado por $S(\xi)$ e $G(\xi)$, respectivamente, descritas pelo parâmetro ξ , t é o tempo de registro. (a) M coincide com um ponto de reflexão R . Neste caso as duas curvas são tangentes. (b) O ponto M não está situado sobre o refletor. Neste caso não haverá contribuição para a migração. Adaptado de Schleicher et al. (1993b)

Assume-se que a linha sísmica na superfície $z = 0$ da Figura 6.1 é densamente coberta por pares fonte-receptor (S,G). As reflexões primárias do refletor desconhecido são descritas para cada par (S,G) pela teoria do raio em sua aproximação de ordem zero, e ocorrem na chamada curva de tempo de trânsito de reflexão τ_R . Conectando cada ponto S e G com um ponto M arbitrário em profundidade e usando-se um modelo de velocidade a priori conhecido, calcula-se a chamada curva de tempo de trânsito de difração (τ_D) ou curva de Huygens para esse ponto.

As curvas de tempo de trânsito (reflexão e difração) dependem do par fonte-receptor (S,G) e são, portanto, funções de ξ .

Podem ser visualizadas duas situações, conforme a figura 6.1: (a) o ponto difrator M coincide com um ponto de reflexão R. Neste caso a curva de difração será tangente à curva de reflexão e o resultado do empilhamento das amplitudes é diferente de zero; (b) o ponto difrator M não coincide com um ponto do refletor, neste caso o resultado do empilhamento das amplitudes é desprezível.

Considerando-se o termo de ordem zero da série assintótica do raio, segundo Schleicher et al. (1993b) quando a superfície de registro ($z = 0$) não é uma superfície livre, a componente principal do vetor deslocamento da partícula é representada pelo sinal analítico:

$$U(\xi, t) = R_C \frac{A}{L} W(t - \tau_R(\xi)), \quad (6.2)$$

onde $W(t)$ é a função complexa que representa o pulso analítico para uma fonte linha, consistindo do pulso fonte como parte real e sua transformada de Hilbert como parte imaginária. O coeficiente de reflexão da onda plana no ponto de reflexão R é dado por R_C . A perda total de energia devido à transmissão do raio através das interfaces é expressa por A . O fator de espalhamento geométrico normalizado é representado por L .

Para cada ponto M no macro-modelo de velocidades e para todos os pontos ξ localizados na abertura da migração A (região de integração), que resulta do conjunto de pares fonte-receptor (S,G) especificados pela configuração de medida na linha sísmica, segundo Urban (1999), a integral de empilhamento de difrações 2-D é expressa matematicamente por:

$$V_F(M, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_A d\xi \omega(\xi, M) \partial_{t^-}^{\frac{1}{2}} U(\xi, t + \tau_D(\xi, M)), \quad (6.3)$$

onde $V_F(M, t)$ é o resultado da migração com amplitude verdadeira, $\partial_{t^-}^{\frac{1}{2}}$ é o operador semi-derivada temporal anti-causal e correspondente (no domínio da frequência). O filtro é representado por $F(\omega) = \sqrt{-i\omega}$, onde ω é a frequência angular de oscilação.

A superfície de Huygens $\tau_D(\xi, M)$ é dada por

$$\tau_D(\xi, M) = \tau(S, M) + \tau(M, G), \quad (6.4)$$

em que $\tau(S, M)$ e $\tau(M, G)$ denotam os tempos de trânsito de $S(\xi)$ a M e de M a $G(\xi)$, respectivamente.

O valor $V(M, t = 0)$ é o resultado da migração de empilhamento de difração para o ponto em profundidade escolhido M . A função peso é denotado por $w(\xi, M)$.

Substituindo a expressão $U(\xi, t)$ da equação (6.2) na equação (6.3) e tomando-se para a função peso o valor $w(\xi, M) = 1$, resultando na saída do algoritmo de migração um sinal sem a correção do fator de espalhamento geométrico, tem-se

$$V(M, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_C d\xi \partial_{-t}^{\frac{1}{2}} \left[\left(R_C \frac{A}{L} \right) W(t + \tau_F(\xi, M)) \right], \quad (6.5)$$

sendo, $\tau_F(\xi, M) = \tau_D(\xi, M) - \tau_R(\xi, M)$ a diferença entre os tempos de difração e de reflexão.

Efetuando-se a transformada de Fourier direta de $V(M, t)$ na variável temporal, é obtido

$$\hat{V}(M, \omega) = \sqrt{\frac{-i\omega}{2\pi}} \int_C d\xi R_C \frac{A}{L} e^{i\omega\tau_F(\xi, M)}. \quad (6.6)$$

A integral (6.6), que possui um núcleo oscilatório, não pode ser resolvida analiticamente. Pode-se, entretanto, calcular o seu valor aproximado para altas frequências usando o método da fase estacionária, proposto por Bleistein (1984).

Aplicar o método da fase estacionária à integral (6.6) significa expandir a função fase em uma série de Taylor com respeito ao ponto estacionário ξ^* , que truncada no termo de segunda ordem é dada por

$$\tau_F(\xi, M) = \tau_F(\xi^*, M) + \frac{1}{2} H_F (\xi - \xi^*)^2, \quad (6.7)$$

onde $\left. \frac{\partial \tau_F}{\partial \xi} \right|_{\xi = \xi^*} = 0$. Assumindo que $H_F = \left. \frac{\partial^2 \tau_F(\xi, M)}{\partial \xi^2} \right|_{\xi = \xi^*} \neq 0$ e usando o método da fase

estacionária tem-se a solução assintótica, proposta por Bleistein (1984), dada por:

$$\hat{V}_F(M, \omega) = \hat{V}(M, \omega) F(\omega) \approx \hat{W}(\omega) \frac{R_C A}{L \sqrt{|H_F|}} \exp \left[i\omega\tau_F(\xi^*, M) + \frac{i\pi}{4} (\text{sgn } H_F - 1) \right] \quad (6.8)$$

Na expressão (6.8), verifica-se que o empilhamento de difrações, realizado de acordo com a equação (6.3), introduz no resultado um deslocamento de fase de $\pi/4$ devido ao fator $\frac{1}{\sqrt{-i\omega}}$.

7. APLICAÇÃO A DADOS SINTÉTICOS

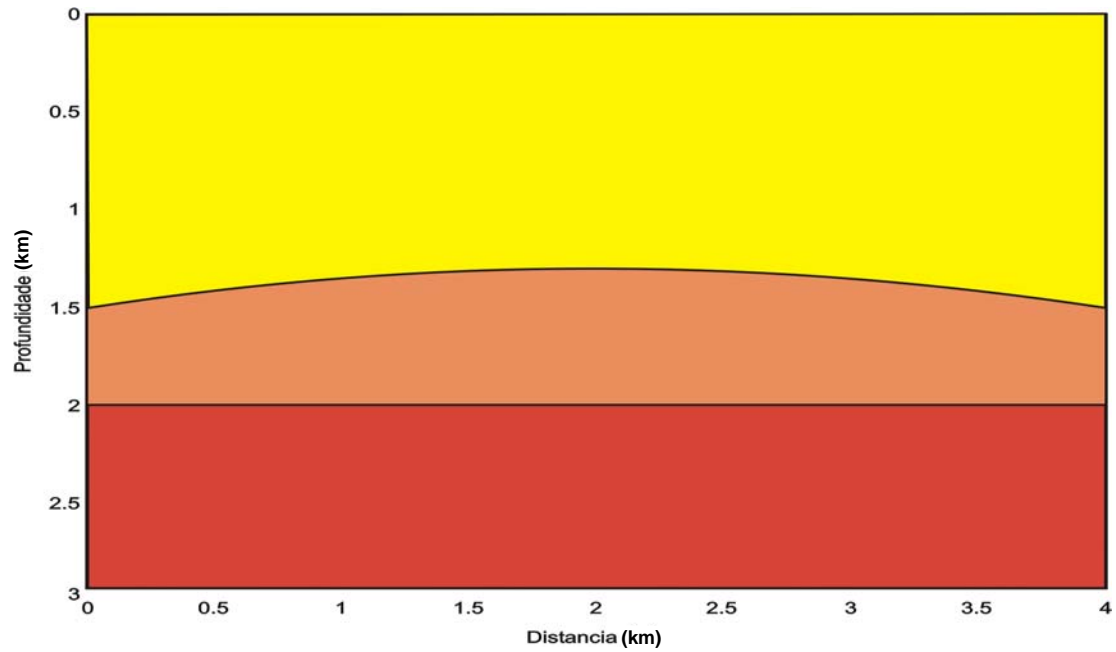
Neste capítulo aplicamos a migração Kirchhoff em dados sintéticos para um exemplo que representa um modelo geológico simples de ambiente propício à ocorrência de reflexões múltiplas intracamadas. Depois se compara os parâmetros SRC obtidos por modelamento direto para este exemplo com os parâmetros obtidos no modelo migrado. O modelo sintético 2-D, considerado para estes testes, foi gerado pelo software de traçamento de raios SEIS88 de Červený & Pšenčík (1988).

7.1 - MODELO 2-D

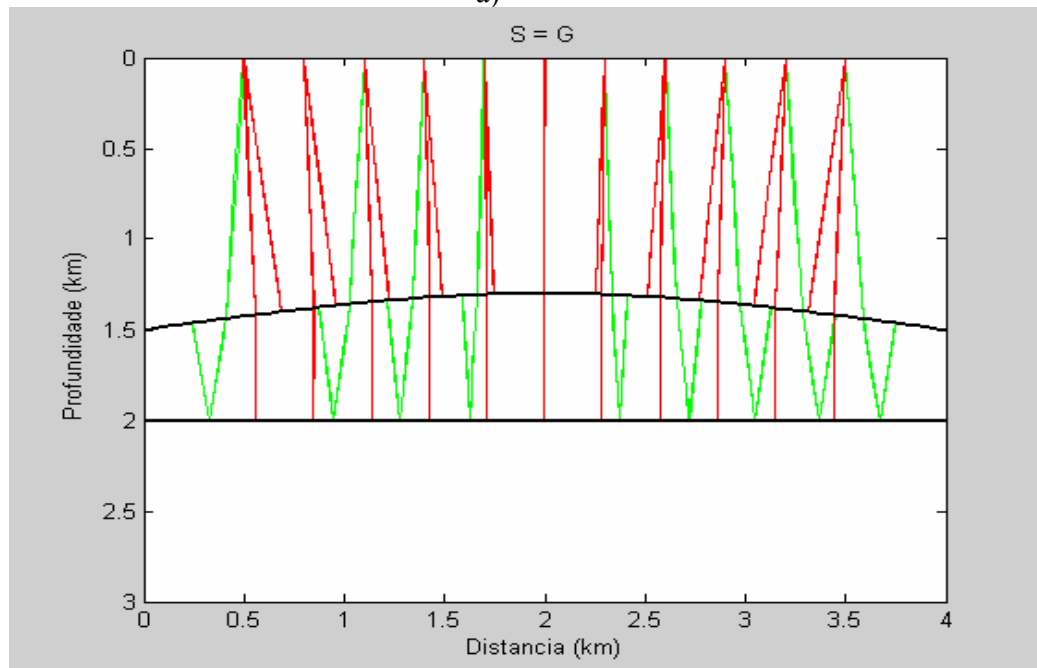
A Figura 7.1a é um modelo acústico simples composto por duas camadas homogêneas sobre um semi-espaço, separadas por duas interfaces, uma suavemente curva e outra plana. Foram utilizados onze pares de fonte-receptor com afastamento de 0,3 km, para melhor visualização das reflexões primárias e reflexões múltipla (Figura 7.1b). As velocidades intervalares desde a camada superior até a inferior são 2,5 km/s, 3,5 km/s e 4,5 km/s para o semi-espaço. Foram traçados raios na configuração afastamento-nulo para cada refletor, considerando reflexões primárias e reflexões múltiplas. Na segunda camada foram simuladas reflexões múltiplas simétricas de primeira ordem. Os dados utilizados são sismogramas sintéticos obtidos através do programa SEIS88 de modelamento sísmico, o qual se baseia na Teoria do Raio de Červený & Pšenčík (1988).

Foi simulada uma secção afastamento-nulo (AN) referente ao modelo da Figura 7.1a. Esta secção está constituída por 51 traços sísmicos, separados 0.06 km entre eles (Figura 7.2a). O pulso fonte utilizado foi a função Gabor com frequência dominante igual a 40 Hz, sendo o intervalo de amostragem temporal em cada traço sísmico igual a 2 ms. Na Figura 7.2 b apresenta-se o traço sísmico correspondente a posição do raio normal em $X_0 = 2.0$ km na secção sísmica modelada, onde é observada uma pequena amplitude para a reflexão múltipla.

As Figuras 7.4 e 7.5, mostram as comparações dos parâmetros da frente de onda e da velocidade V_{NMO} para o modelo direto e o modelo migrado. Os parâmetros obtidos por modelamento direto são representados pelo símbolo asterisco e os obtidos do modelo migrado são representados por círculos.

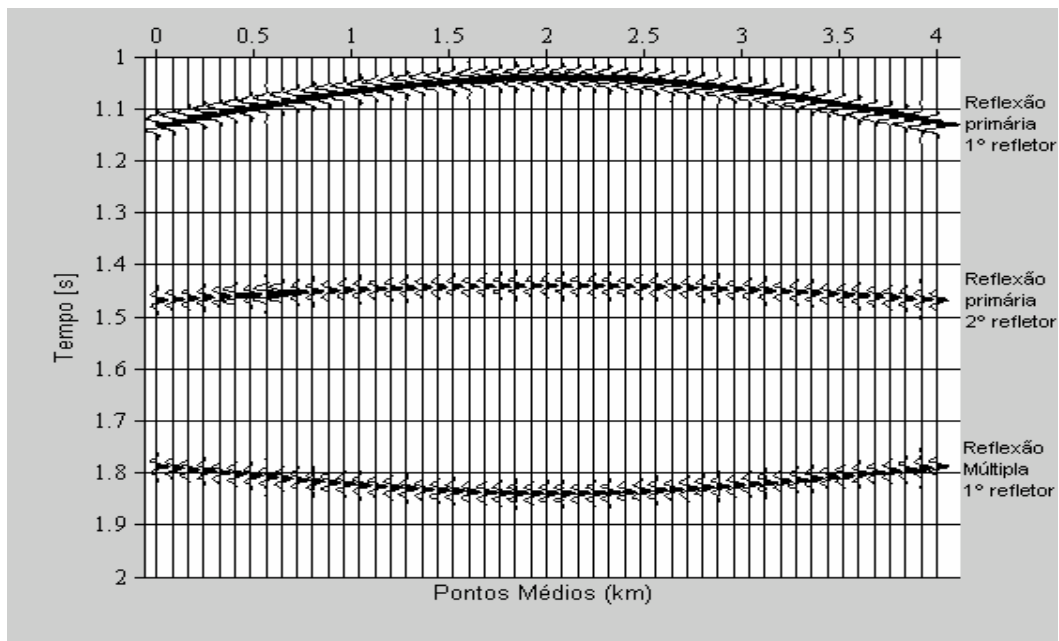


a)

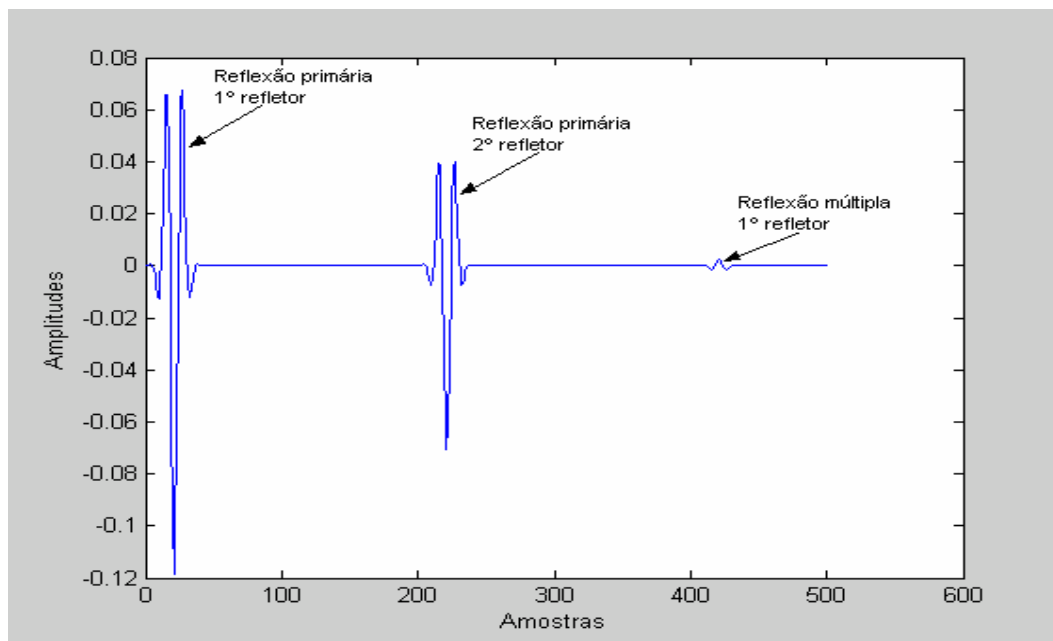


b)

Figura 7.1 – a) Modelo 2-D composto de duas camadas limitadas por interfaces, uma plana e outra suavemente curva, sobre um semi-espaco infinito. b) Para uma configuração AN, apresentam-se os raios para reflexões primárias (linha cor vermelha) e múltiplas (linha cor verde).

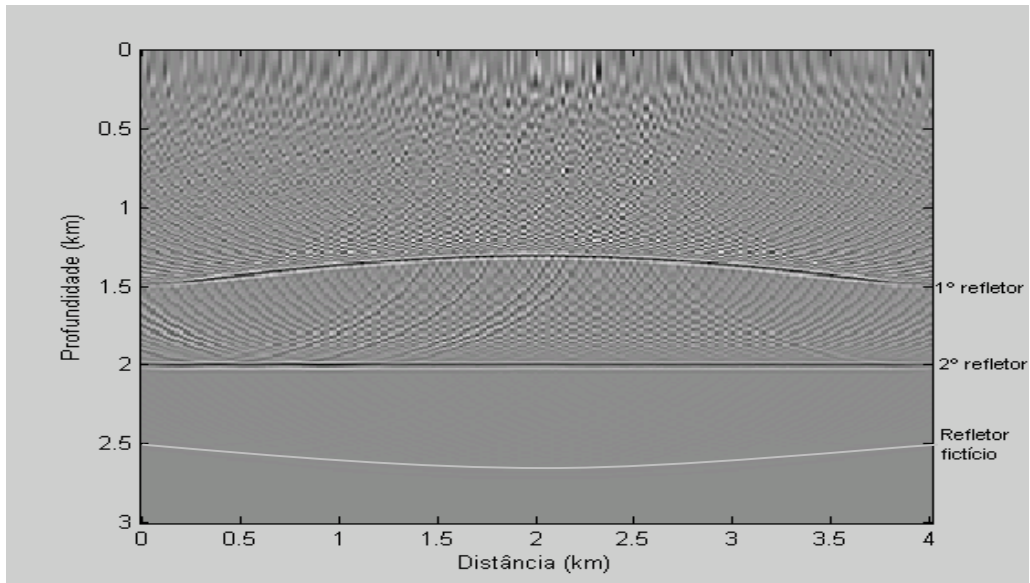


a)

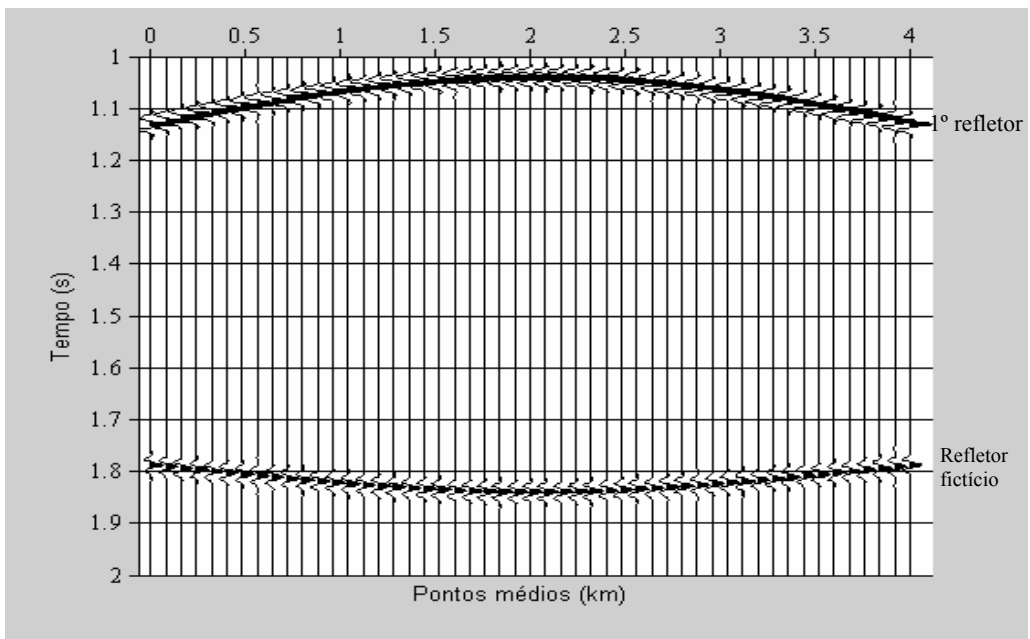


b)

Figura 7.2 – (a) Seção sísmica AN modelada através do traçador de raios SEIS88; (b) Traço sísmico correspondente a posição do raio normal em $X_0 = 2.0$ km na seção sísmica modelada.

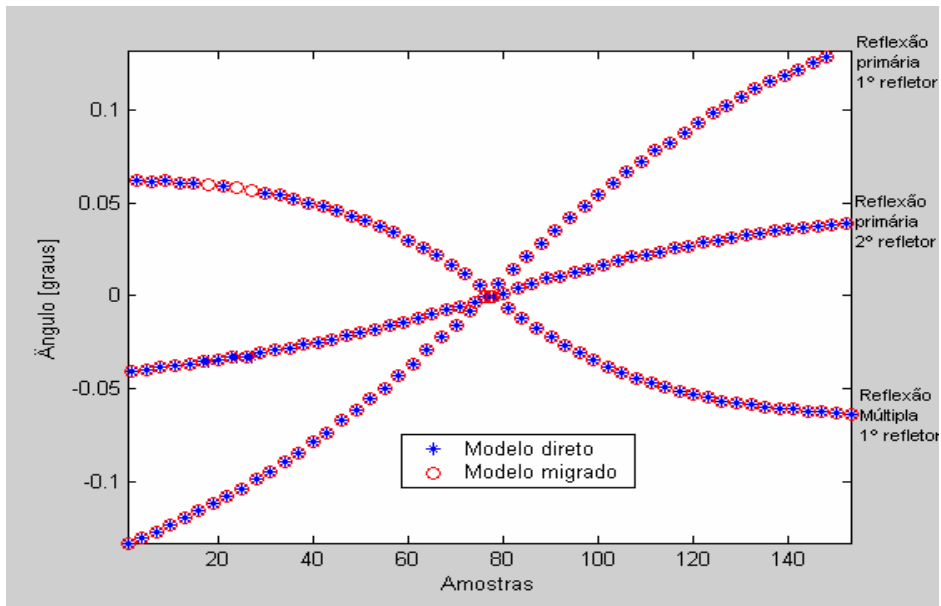


a)

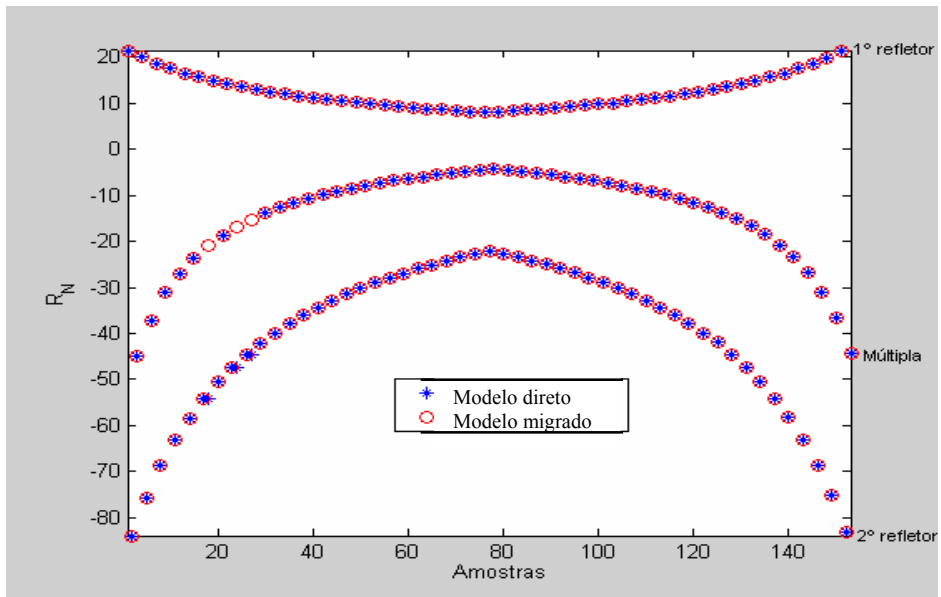


b)

Figura 7.3 – a) Dados sísmicos migrado, utilizando-se migração cinemática tipo Kirchhoff, apresentando um terceiro refletor, devido a presença das reflexões múltiplas. b) Seção sísmica NA modelada através do traçador de raios SEIS88, onde se observa a ausência da interface plana, a qual funciona como espelho, e a presença da terceira interface (fictícia), que é a imagem especular da primeira interface.

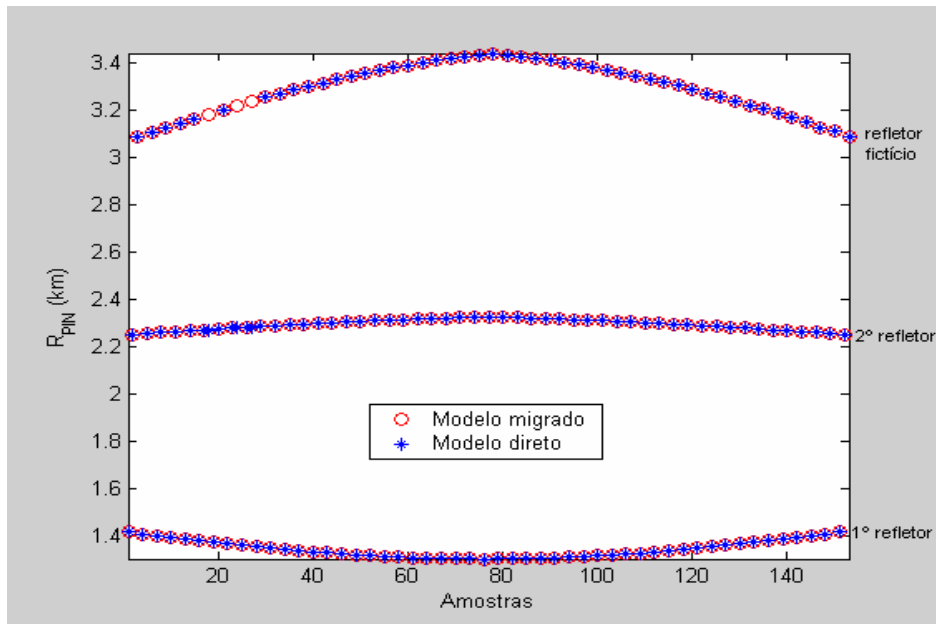


a)

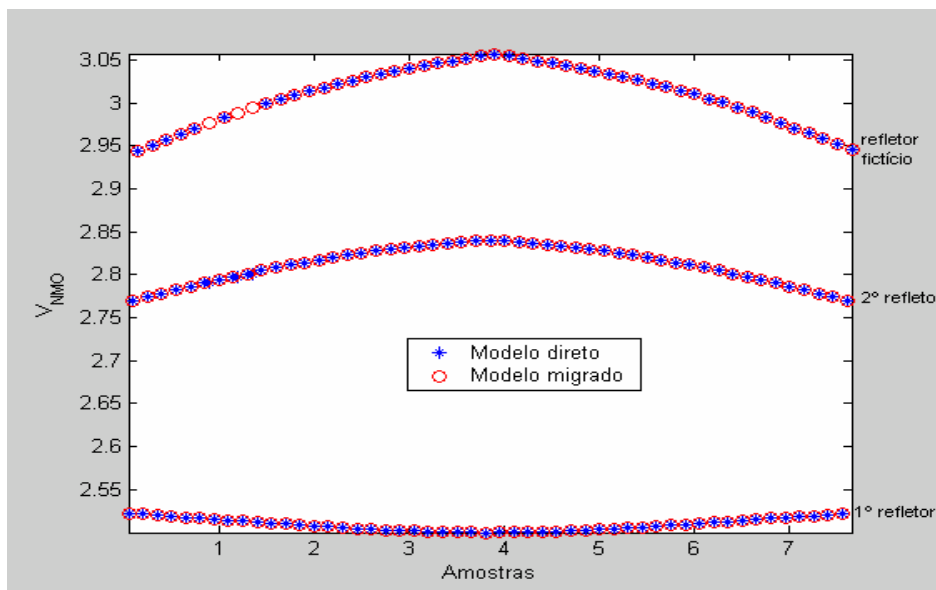


b)

Figura 7.4 – Comparação dos parâmetros da frente de onda (migração Kirchhoff e modelamento direto). Os valores dos parâmetros obtidos por modelamento direto são representados pelo símbolo asterisco e os obtidos por migração são representados por círculos. (a) β_0 ; (b) R_N .



a)



b)

Figura 7.5 – Comparação dos parâmetros da frente de onda (migração Kirchhoff e modelamento direto). Os valores dos parâmetros obtidos por modelamento direto são representados pelo símbolo asterisco e os obtidos por migração são representados por círculos. (a) R_{PIN} ; (b) V_{NMO} .

7.2 – RESULTADOS COM DADOS SINTÉTICOS

Para a realização da migração dos dados sísmicos, foi adotada a zona alvo $0 \leq x \leq 4$ km, $0 \leq z \leq 3$ km, sendo a discretização nas direções x e z dadas por $\Delta x = 0,010$ km e $\Delta z = 0,015$ km. As amplitudes foram somadas ao longo das curvas de difração e o resultado que se obteve deste procedimento é a seção sísmica migrada no domínio da profundidade (Figura 7.3a). Foi utilizado o algoritmo de migração tipo Kirchhoff para recuperar os refletores em profundidade, tendo como dados de entrada os sismogramas da Figura 7.2a. O algoritmo corresponde a uma versão adaptada por Urban (1999) para migração com amplitudes verdadeiras. Um traço sísmico com amplitudes verdadeiras é determinado pela multiplicação de cada reflexão do traço registrado pelo fator de espalhamento geométrico correspondente, proposto por Schleicher et al. (1993b).

Observa-se na figura 7.3(a) uma boa recuperação dos refletores em profundidade e observamos também a presença de artefatos, que são próprios da migração Kirchhoff. É observada a presença de uma terceira interface, que corresponde a reflexão múltipla de primeira ordem na segunda interface.

Na Figura 7.3(b) observa-se uma seção sísmica em que o resultado esperado nesta seção comparado com a Figura 7.3(a) não trás informação coerente com respeito ao número de refletores. O segundo refletor mostrado na Figura 7.3(a) não é observado na seção sísmica, resultado este que pode se explicado pelo princípio da Óptica Geométrica, em que um raio de luz ao sofrer reflexão total, obtém-se uma imagem formada com uma determinada simetria. Pode-se considerar que esta reflexão total é originada a partir de um espelho plano. Portanto, o segundo refletor assume esta característica (Apêndice A).

Posteriormente, foi aplicado o programa SEIS88-Modificado, para obter o trio de parâmetros (β_0 , R_{NIP} e R_N). Logo estes parâmetros foram utilizados para obter a velocidade V_{NMO} , tanto do modelo direto, como do modelo migrado. Os resultados da obtenção e comparação desses parâmetros são mostrados nas Figuras 7.4 e 7.5.

A Figura 7.4(a) mostra os valores do ângulo β_0 determinados no modelo direto (representado pelo símbolo asterisco em cor azul) e no modelo migrado (representados por círculos na cor vermelha). Nesta comparação observa-se que ambos os valores são coincidentes, o que indica que as interfaces apresentam a mesma orientação. Como os valores de β_0 da reflexão múltipla, no modelo direto, coincidem com os correspondentes ao terceiro refletor do modelo migrado, então, isto seria um primeiro indício de que essa interface do modelo migrado é uma interface fictícia.

A comparação do parâmetro R_N é mostrada na Figura 7.4(b). Os valores do parâmetro R_N do modelo direto são representados pelo símbolo asterisco (cor azul) e os obtidos do modelo migrado são representados por círculos (cor vermelha). Nesta comparação, é observado que todas as interfaces, tanto do modelo direto como do modelo migrado, apresentam o mesmo raio de curvatura.

A Figura 7.5(a) mostra os valores dos raios de curvatura R_{PIN} determinados do modelo direto (representado pelo símbolo asterisco em cor azul) e do modelo migrado (representado por círculos na cor vermelha). É observado nesta comparação que as interfaces apresentam a mesma curvatura. A simetria existente entre a curvatura do “último refletor” do modelo migrado com a curvatura do primeiro refletor do modelo direto é mais um indicativo de que o “último refletor” é uma múltipla.

A Figura 7.5(b) mostra os valores da velocidade V_{NMO} , determinados para o modelo direto (representados pelo símbolo asterisco em cor azul) e para o modelo migrado (representados por círculos na cor vermelha). A comparação destes valores da velocidade V_{NMO} corroboram a hipótese de que o “último refletor” é uma múltipla.

A comparação entre os parâmetros (β_0 , R_{NIP} e R_N) e a velocidade V_{NMO} , para as reflexões primárias e reflexões múltiplas, permite afirmar que a interface onde ocorre a reflexão múltipla, no modelo direto, apresenta as mesmas características que o “último refletor” do modelo migrado.

8 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes à identificação das reflexões tipo múltiplas. Da mesma forma, apresentam-se sugestões de continuação de pesquisas no futuro, relacionadas ao tópico tratado nesta tese.

8.1 – CONCLUSÕES

São as seguintes:

a) No modelo migrado com o método Kirchhoff não existe contraste de impedância entre a segunda e terceira camada devido a que certas propriedades (velocidade e densidade) entre elas são as mesmas. Isto foi demonstrado ao ser gerado a seção sísmica AN deste modelo migrado. Observou-se a ausência do segundo refletor. Esta ausência deve-se ao fato de não haver contraste de impedância entre estas camadas. Portanto, isto é um primeiro indício de existência de múltiplas. Isto é reforçado com as seguintes razões descritas abaixo.

b) A existência de simetria entre as curvaturas do primeiro e “último refletor”. Cinematicamente, o tempo de trânsito da reflexão múltipla de primeira ordem intracamada é coincidente com o tempo de trânsito da reflexão primária de um refletor fictício e simétrico. Se os refletores são simétricos, os mesmos apresentam a mesma curvatura. Isto demonstra que o segundo refletor está atuando tipo um espelho e, portanto ao ser idênticos esses valores, então é mais um indicativo de que o “último refletor” é uma múltipla.

c) Outra maneira de reforçar a existência das múltiplas foi através do cálculo dos parâmetros das Frentes de Onda (PIN e N) e da velocidade NMO, tanto no modelo direto como no modelo migrado. Observa-se coincidência entre os valores destes parâmetros em ambos casos. Com esta comparação confirmou-se a presença das múltiplas no modelo migrado. Deve-se ressaltar que no modelo direto já tinha-se definido a múltipla.

d) A segunda conclusão descrita acima, não restringe a forma do refletor para ser considerado como espelho, podendo ser ele inclusive curvo, sendo este um espelho constituído por elementos especulares.

e) Desde o ponto de vista prática na indústria petrolífera, pode-se sugerir as conclusões a) e b) como ferramentas de auxílio na identificação das múltiplas.

8.2 – SUGESTÕES

Devido aos resultados bem sucedidos na identificação de múltiplas em dados sintéticos neste trabalho, sugere-se estender esta aplicação em dados reais com a finalidade de testar também o desempenho deste algoritmo neste tipo de dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKI, K. & RICHARDS, P. G. 1980. *Quantitative Seismology*. W. H. San Francisco, Freeman and Company .
- ALVES, F. J. C., 2003, *Atenuação de múltiplas pelo método WHLP-CRS*, , Belém, Universidade Federal do Pará. (Tese de Doutorado)
- BACKUS, M. M., 1959. Water Reverberations – Their Nature and Elimination. *Geophysics*, 24: 233-261.
- BERKHOUT, A. J. & VERSCHUUR, R. J. 1997. Estimation of multiple scattering by iterative inversion. Part I: Theoretical considerations. *Geophysics*, 62(5): 1586-1595.
- BERRYHILL, J. R. & KIM, Y. C. , 1986. Deep-water peg-legs and multiples: Umulation and suppression. *Geophysics*. 51(12): 2177-2184.
- BLEISTEIN, N. , 1984. *Mathematics of wave phenomena*. Academic Press Inc.
- BRONSTEIN, I. N., & SEMENDJAJEW, K. A. 1991. *Taschenbuch der Mathematik* .Teubner Stuttgart, Verlag.
- CABRAL, R. C. M., 2002, *Simulação de reflexões múltiplas usando o método de empilhamento sísmico Superfície de Reflexão Comum*, Belém, Universidade Federal do Pará. (Dissertação de mestrado).
- CALDERÓN-MACIAS, C., SEN, M. K., STOFFA, P. L. , 1997. Hopfield neural networks, and mean field annealing for seismic deconvolution and multiple attenuation. *Geophysics*, 62(3): 992-1002.
- CARRION, P. M. 1986, A layer-stripping technique for suppression of water-bottom multiple reflection. *Geophysical Prospecting*, 34: 330-342
- ČĚRVENÝ, V. 2001. *Seismic ray theory*. Cambridge University Press.
- ČĚRVENÝ, V. & PSENCIK, J. , 1988. *Seis88, Ray Tracing Program Package*.
- GAMBOA, F., 2003, *Caracterização e atenuação de múltiplas pelo método Superfície Comum de Reflexão (CRS)*, Universidade Estadual de Campinas. (Dissertação de mestrado).
- HELBIG, K. & BROWER, J. H., 1993. Surface multiples as a tool of calibration in shallow AVO studies. In: MTG. EUR. ASSOC. EXPL. GEOPHYS., 55., *Extended abstract*, session: A040.

- HUBRAL, P., 1980. Wave front curvatures in 3D laterally inhomogeneous media with curved interfaces: *Geophysics*. 45: 905-913.
- HUBRAL, P., 1983. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, 48 (8): 1051-1062.
- HUBRAL, P & KREY, T., 1980. *Interval velocities from seismic reflection time measurements*, Texas, Soc. Of Exploration Geophysicists. Wertern Geophysical Copany Houston.
- KEYDAR, S., LANDA, E., GELCHINSKY, B. & BELFER, I., 1998. Multiple Prediction using the homeomorphic – imaging technique. *Geophysical Prospecting*, 46: 423-440.
- KLEYN, A. H., 1983. *Seismic Reflection Interpretation*. Elsevier Applied Science Publister.
- KNEIB, G & BARDAN, V. 1997. 3D targeted multiple attenuation. *Geophysical Prospecting*. 45: 701-714.
- 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.
- LEVIN, F. K., 1971, Apparent velocity from dipping interface reflections: *Geophysics*. 36: 510-516.
- LEVIN, F. K. & SHAH, P. M., 1977. Peg-leg multiples and dipping reflectors: *Geophysics*, 42: 957-981.
- 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.
- MULLER, T.; JAEGER, R. HOECHT, G. 1998. Common Reflection Surface Stacking Method- Imaging with an unknown velocity model. In: 68th Annual Internat. Mtg., SOC. EXPL. GEOPHYS., *Expanded Abstracts*, 1764-1767.
- O'DOHERTY, R. F. & ANSTEY, N. A. 1971. Reflections on Amplitudes. *Geophysical Prospecting*. 19 (03): 430-458.
- PEACOCK, K. L. & TREITEL, S. 1969. Predictive deconvolution: Theory and practice. *Geophysics*, 34: 155-169.
- POPOV, M. M., 1996. *Ray theory and gaussian beam method for geophysicists*. Salvador, PPPG, UFBA, 148p.
- ROBINSON, E. A., 1984. *Seismic Inversion and Deconvolution*. Amsterdam. Geophysics Press. Part A: Classical Methods.

- ROBINSON, E. A. & TREITEL, S., 1980. Principles of digital Wiener filtering. *Geophysical Prospecting*, 15 (3): 311-333.
- SCHNEIDER, W. A.; PRINCE, E. R. J. GILLES, B. F. 1965. A new data-processing technique for multiple attenuation exploiting normal moveout. *Geophysics*, 30: 348-362.
- SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. 1993. a) Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media: *Geophysical Prospecting*, 41(4): 495-514.
- SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P., 1993. b) 3D True-amplitude finite-offset migration. *Geophysics*, 58: 1112-1126.
- SHAPIRO, S. A. & HUBRAL, P. 1998. *Fundamentals of seismic stratigraphic filtering*. Alemanha, Springer-Verlag.
- TANER, M. T. 1980. Long-period sea-floor multiples and their suppression. *Geophysical Prospecting*, 28: 30-48.
- TANER, M. T. & KOEHLER, F. 1969. Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity function. *Geophysics*, 34 (6): 859-881.
- TRAPE, 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.
- URBAN, J., 1999. *Migração com amplitude verdadeira em meios bidimensionais (2-D) e introdução ao caso 2,5-D*. Universidade Federal do Pará. (Dissertação de mestrado).
- VERSHUUR, D. J. & BERKHOUT, A. J. 1997. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, part II: Practical aspects and examples. *Geophysics*, 62 (5): 1596-1611.
- WEGLEIN, A. B.; GASPAROTTO, F. A.; CARVALHO, P. M.; STOLT, R. H. 1992. Na inverse-scattering series method for attenuating multiples in seismic reflection data. *Geophysics*, 62: 1975-1989.
- WIGGINS, J. W. 1988. Attenuation of complex water-bottom multiples by water-equation-based prediction and subtraction. *Geophysics*, 53 (12): 1527-1534.
- YILMAZ, O. 1987. *Seismic Data Processing*. Tulsa, USA Society of Exploration Geophysicists.

APÊNDICE

APÊNDICE A – ESPELHO PLANO (FORMAÇÃO DA IMAGEM)

Imagem de Um Objeto Puntiforme

Seja P uma fonte de luz puntiforme colocada em frente a um espelho plano E (Figura A1) e seja n a reta que passa por P e é normal ao plano do espelho. Consideremos um raio de luz que sai de P e incide obliquamente no espelho, Raio Incidente (RI). O prolongamento do Raio Refletido (RR) intercepta a reta n no ponto P'. Observa-se que os triângulos PMA e P'MA são congruentes. Então:

$$\overline{PM} = \overline{P'M} \quad (A1)$$

Assim, os pontos P e P' são simétricos em relação ao espelho.

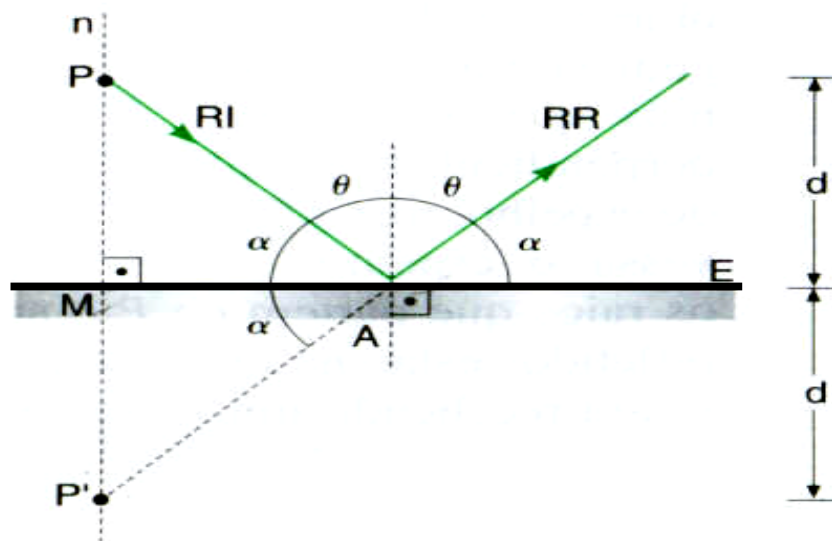


Figura A1 – Formação da imagem de um objeto puntiforme. Observa-se o Raio Incidente (RI) partindo do ponto P, atingindo o espelho obliquamente. O prolongamento do Raio Refletido (RR) intercepta a normal n no ponto P'.

Suponhamos um modelo constituído por uma interface curva, abaixo da qual existe uma interface plana. Digamos que em um experimento sísmico foi detectada a presença de uma reflexão múltipla $\overline{\text{SMPMG}}$, sendo S uma fonte e G um receptor (Figura A2).

Considerando a existência de uma reflexão especular, o ponto P na primeira interface teria uma imagem localizada no ponto P'. Os pontos P e P' são simétricos e equidistantes em relação à segunda interface, cujas distâncias em relação a mesma são d e d', respectivamente. Agora consideremos um evento de reflexão representado por $\overline{\text{SMP'MG}}$.

Devido P' ser imagem especular de P, os eventos $\overline{\text{SMPMG}}$ e $\overline{\text{SMP'MG}}$ terão o mesmo tempo de trânsito. Como a migração Kirchhoff se baseia fortemente nos eventos cinemáticos de reflexão, a migração dos eventos referentes a múltipla $\overline{\text{SMPMG}}$ resultam em uma interface fictícia que passa pelo ponto P'.

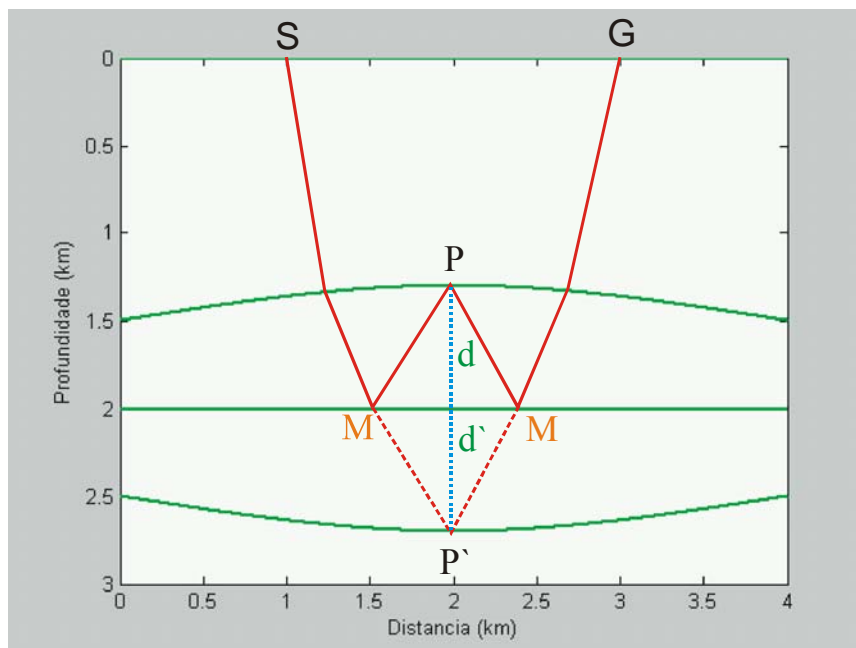


Figura A2 - O raio (cor vermelha) que sai da fonte (S), reflete-se no ponto M, localizado no segundo refletor, reflete-se P localizado na primeira interface, novamente reflete-se em M e chega no receptor (G). Os pontos P e P' são simétricos e equidistantes em relação a segunda interface, cujas distâncias em relação a mesma são d e d'.

Imagem de um Objeto Extenso

Dado um espelho plano M, a imagem de um objeto extenso produzida por ele é obtida determinando-se a imagem de cada ponto do objeto (Figura A2(a)).

Como cada ponto e a respectiva imagem são simétricos em relação ao plano do espelho, o objeto extenso e a respectiva imagem também são simétricos em relação ao plano do espelho. Portanto, a distância do objeto ao plano do espelho é igual à distância da imagem ao plano do espelho.

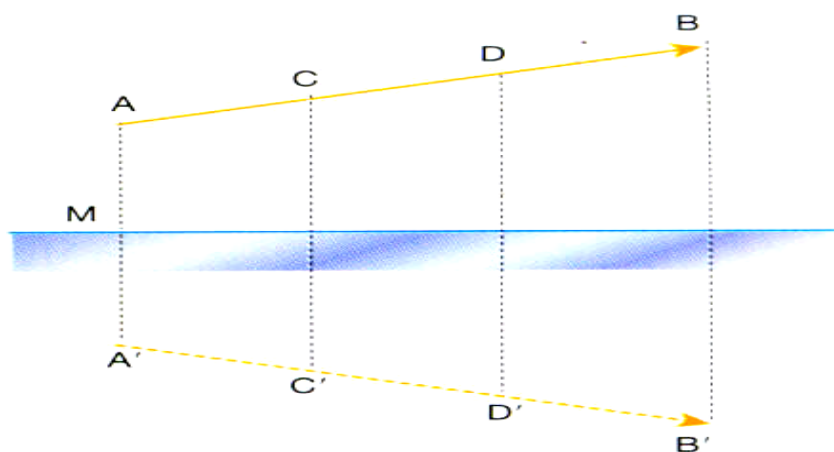


Figura A3 – Formação da imagem de um objeto extenso, em um espelho plano, a imagem tem o mesmo tamanho do objeto e é simétrica dele em relação ao espelho.