



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

FACULDADE DE GEOFÍSICA

MICHAEL DE ALMEIDA ALVES

IMAGEAMENTO SÍSMICO DE REFLEXÕES PRIMÁRIAS E MÚLTIPLAS
SIMÉTRICAS APLICANDO O MÉTODO DE EMPILHAMENTO MULTIFOCO

BELÉM

2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

FACULDADE DE GEOFÍSICA

MICHAEL DE ALMEIDA ALVES

IMAGEAMENTO SÍSMICO DE REFLEXÕES PRIMÁRIAS E MÚLTIPLAS
SIMÉTRICAS APLICANDO O MÉTODO DE EMPILHAMENTO MULTIFOCO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Geofísica da Universidade Federal
do Pará como requisito parcial à obtenção de
grau de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Andrés Chira
Oliva.

BELÉM

2014

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

A474i Alves, Michael de Almeida, 1984-

Imageamento sísmico de reflexões primárias e múltiplas simétricas aplicando o método de empilhamento multifoco / Michael de Almeida Alves – 2014.

49 f. : il.

Orientador: Pedro Andrés Chira Oliva

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica, Belém, 2014.

1. Método de reflexão sísmica - Processamento de dados. 2. Ondas sísmicas. I.
Título.

CDD 22. ed.: 622.1592

MICHAEL DE ALMEIDA ALVES

IMAGEAMENTO SÍSMICO DE REFLEXÕES PRIMÁRIAS E MÚLTIPLAS
SIMÉTRICAS APLICANDO O MÉTODO DE EMPILHAMENTO MULTIFOCO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Geofísica da Universidade Federal
do Pará como requisito parcial à obtenção de
grau de Bacharel em Geofísica.

Data da aprovação: 12 /03 / 2014

Conceito: _____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Pedro Andrés Chira Oliva (Orientador)

Doutor em Geofísica

Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. João Carlos Ribeiro Cruz

Doutor em Geofísica

Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Manuel de Jesus dos Santos Costa

Doutor em Geofísica

Universidade Federal do Pará

*Dedico a minha mãe Lucilia Rufino de Almeida,
minha esposa Edivanhia Pamplona Maceió
e minha filha Mikaeli Beatriz Maceió Alves vocês são tudo na minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por estar sempre presente em minha vida e ter me dado saúde e forças pra cumprir essa meta.

À minha família, Mãe Lucília Rufino, padrasto Aprígio Junior, esposa Edivanhia Maceió e Filha Mikaeli Beatriz Alves, obrigado pela força, sacrifícios e companheirismo.

Ao meu irmão Rodrigo Alves por sempre dar força.

Ao Prof. Dr. Pedro Chira Oliva pela orientação, atenção e disposição para compartilhar seus conhecimentos neste trabalho.

Ao PIBIC/UFGA pelo suporte financeiro enquanto bolsista.

Ao IECOS (Instituto de Estudos Costeiros – Campus de Bragança/UFGA) pela infraestrutura.

À UFGA e todos os professores que contribuíram com a minha formação.

Ao Prof. Dr. Cristiano Mendel por sempre estar incentivando e “provocando” seus alunos a buscarem seus objetivos.

Ao Prof. Dr. Vitor Tocantins por sempre tentar me ajudar quando precisei.

À Professora Lúcia Costa e Silva por sua imparcialidade e constante incentivo.

À Coordenação do Curso de Graduação em Geofísica em especial à Professora Ellen Gomes pelo apoio durante a graduação.

Ao Professor Jessé Costa por compartilhar seus conhecimentos quando solicitado.

Aos meus amigos de turma Alan, Anderson Manoel, Ângela, Alípio, Carlos Eduardo, Dheymison Alves, Diego Rogério, Erlane Pereira, Hugo Santos, Iverson, Jeferson, Jéssica Pena, João Paulo, Leonardo dos Reis, Natiê, Rodolfo, Victor Hugo, Victor Barros.

RESUMO

Aproximações de tempos de trânsito utilizadas no empilhamento sísmico de eventos de reflexão ou difração são importantes para o imageamento e a inversão de dados sísmicos. Nas últimas décadas têm surgido diversos métodos de empilhamento sísmico, com a finalidade de superar limitações do empilhamento Common-Midpoint (CMP) chamado também de empilhamento convencional. O objetivo do empilhamento sísmico é obter uma imagem mais detalhada e mais realística possível da subsuperfície. Diante desta necessidade que será utilizado o método de empilhamento sísmico chamado Multifoco. Este método simula seções sísmicas de afastamento-nulo (AN) a partir de dados de cobertura múltipla, independente do macro-modelo de velocidade. Para meios 2-D, a função tempo de trânsito Multifoco depende de três parâmetros, o ângulo de emergência do raio normal e as curvaturas das ondas hipotéticas Normal-incidence-point (NIP) e Normal (N). Neste trabalho será aplicada esta técnica de empilhamento Multifoco em dados sintéticos de cobertura múltipla contendo reflexões primárias e reflexões múltiplas simétricas. Posteriormente serão comparados os resultados deste método com o clássico empilhamento sísmico convencional ou empilhamento CMP com a finalidade de analisar o desempenho desta aproximação para simular seções AN com reflexões múltiplas simétricas.

Palavras-chave: Aproximação de tempos de trânsito Multifoco; Empilhamento Sísmico 2-D; Reflexões múltiplas simétricas.

ABSTRACT

Approximate transit times used in seismic stacking diffraction or reflection events are important for imaging and inversion of seismic data. In the past decades there have been several methods of seismic stacking, in order to overcome the limitations of the Common Midpoint Stacking (CMP) also called conventional stacking. The objective of seismic stacking is to generate the most detailed and most realistic picture of the subsurface. And before this need to be used the method called seismic stacking Multifoco. This method simulates seismic sections expulsion-null (AN) data from multiple coverage, regardless of the macro-velocity model. For media 2-D, the transit time Multifoco function depends on three parameters, the emergence angle of the normal ray and the curvatures of the hypothetical wave normal-incidence-point (NIP) and Normal (N). This work will apply this technique of stacking Multifoco on synthetic data multiple coverage containing primary reflections and multiple reflections symmetrical. Subsequently will be compared the results of this method with the classic conventional seismic stacking or stacking CMP in order to analyze the performance of this approach to simulate sections AN with symmetric multiple reflections.

Keywords: Approximation of transit times Multifoco. Seismic stacking 2-D. Multiple Reflections symmetrical.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Modelo Sísmico 2-D. A trajetória de uma reflexão primária é dada pelo raio SRG, constituído pelos segmentos de raios, SR e RG, respectivamente.....	14
Figura 3.1	Reflexões primárias tem apenas uma reflexão para cima na subsuperfície (linhas amarelas) e reflexões múltiplas têm pelo menos uma reflexão para baixo (linhas verdes).....	17
Figura 3.2	a) Reflexão múltipla de curto percurso e (b) Reflexão múltipla de longo percurso.....	18
Figura 3.3	(a) Reflexão múltipla simétrica e (b) Reflexão múltipla assimétrica..	18
Figura 3.4	(a) Múltipla de superfície livre e (b) Múltiplas internas (intercamadas).....	19
Figura 3.5	(a) Reflexão fantasma (ghost reflection) e (b) Múltiplas combinadas	19
Figura 4.1	(a) Onda NIP compressional de amplitude unitária na superfície. (b) Onda Normal compressional de amplitude unitária na superfície.....	20
Figura 4.2	Modelo sísmico 2-D, para 3 camadas de isovelocidades e um semi-espaço infinito mostrando um raio entre uma fonte S e um receptor G. A parte em movimento é indicada no ponto do raio P. Os pontos O1, O2 e O4 são pontos de refração (OT), e O3 e O5 são pontos de reflexão (O8).....	21
Figura 4.3	Modelo de camadas curvadas 2-D mostrando um raio normal e um raio CDP para o afastamento.....	25
Figura 4.4	Onda Normal compressional de amplitude unitária na superfície.....	27
Figura 4.5	Modelo sísmico 2-D com n-camadas e interfaces curvas e a trajetória do raio normal SG e do raio paraxial $S'G'$	29
Figura 4.6	Eventos primários, aplicando as leis de propagação e refração.....	30
Figura 4.7	Eventos de reflexões múltiplas aplicando as leis de propagação, reflexão e refração.....	31
Figura 5.1	Em A o registro de campo é organizado em famílias CMP, B é feita a Correção NMO e em C o dado é empilhado.....	33
Figura 5.2	Representação esquemática de um meio homogêneo com refletor inclinado.....	35

Figura 5.3	Observa-se um raio normal $XOROXO$ e um par de pontos fonte-receptor (S, G) junto com um raio de reflexão primária SRG, referido ao refletor objetivo Σ . Focaliza-se o raio SRG com o raio central no ponto P em profundidade. Vemos também duas frentes de onda, uma viaja para baixo do refletor (ΣS) e a outra viaja acima do refletor sentido da superfície (ΣG) e o ângulo de emergência do raio normal denotado por β_0	37
Figura 5.4	Construção geométrica do sobretempo Multifoco ΔTS	38
Figura 6.1	Modelo 2-D constituído por duas camadas separadas com interfaces curvas e suaves sob um semi-espaço.....	40
Figura 6.2	Seção afastamento-nulo (AN) obtida através do traçamento de raio com o software SEIS88. Reflexões múltiplas destacadas pelo retângulo vermelho.....	41
Figura 6.3	(a) Seção AN simulada utilizando a aproximação CMP. (b) Seção AN simulada utilizando a aproximação Multifoco. As reflexões múltiplas com uma amplitude muito baixa são apresentadas nos respectivos retângulos vermelhos.....	42
Figura 6.4	Trecho destacado em vermelho da Figura 6.2 mostrando as reflexões múltiplas obtidas pelo traçamento de raios com o software SEIS88.....	43
Figura 6.5	Trecho destacado em vermelho da Figura 6.3a mostrando as reflexões múltiplas simuladas com a aproximação CMP.....	43
Figura 6.6	Trecho destacado em vermelho da Figura 6.3b mostrando as reflexões múltiplas simuladas com a aproximação Multifoco.....	44
Figura 6.7	Comparação dos traços sísmicos empilhados (modelo da Figura 6.1) correspondentes à posição do raio normal (central) em $X_o = 2,875$ km, da seção de afastamento-nulo (SZO), seção empilhada CMP e seção empilhada Multifoco.....	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	TEORIA DO RAIOS PARAXIAL: CASO 2-D.....	13
2.1	Definição de Sistema Sísmico.....	13
2.1.1	Modelo Sísmico 2-D.....	13
2.1.2	Configurações Sísmicas.....	14
3	REFLEXÕES MÚLTIPLAS.....	16
3.1	Definição.....	16
3.2	Classificação das Reflexões Múltiplas.....	17
4	GEOMETRIA DE FRENTES DE ONDA.....	20
4.1	Ondas Fundamentais.....	20
4.2	Curvaturas de Frentes de Ondas.....	21
4.3	Curvatura de Frente de Onda ao Longo de uma Trajetória de Raio.....	22
4.4	Raios de Curvatura de Frente de Onda.....	24
4.5	Raio de Curvatura da Frente de Onda NIP.....	24
4.6	Raio de Curvatura da Frente de Onda Normal.....	26
4.7	Cálculo dos Parâmetros das Ondas N e NIP.....	28
4.7.1	Caso I - Reflexões Primárias P-P.....	29
4.7.2	Caso II - Reflexões Múltiplas.....	31
5	MÉTODOS DE EMPILHAMENTO SISMICO.....	33
5.1	Método de Empilhamento CMP (Convencional).....	33
5.2	Método Empilhamento Sísmico Múltifoco (não convencional).....	35
5.2.1	Correção Multifoco.....	36
5.2.2	Reparametrização do tempo de trânsito Multifoco.....	37
5.2.3	Recíproco do parâmetro Multifoco.....	39
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
6.1	Modelo.....	40
7	CONCLUSÕES.....	45
8	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	46
	REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

Nas bacias sedimentares brasileiras, principalmente da região amazônica, a presença de rochas intrudidas (e.g. díques e soleiras de diabásio) nas camadas paleozóicas, é um dos principais problemas para o imageamento sísmico desta região. Estas rochas deterioram a qualidade das seções sísmicas porque causam perda do sinal, formação de reflexões múltiplas e divergência esférica, e podem prejudicar a interpretação dos dados devido à formação de falsas estruturas (pull-down e pull-up) (IMAGAM, 2002).

Melhorar a qualidade do imageamento sísmico é muito importante e relevante para a interpretação sísmica, e.g. na localização de falhas geológicas, fraturas, estruturas em forma de cunha, flancos de domos ou indicar possível presença de saltos ou terminações de soleiras, etc (IMAGAM, 2002).

Mesmo com o advento do imageamento em profundidade pré-empilhamento, as técnicas de imageamento no domínio do tempo (ex: o empilhamento sísmico) são importantes por várias razões. Um imageamento no domínio do tempo de alta qualidade pode fornecer uma base para a interpretação na sequência do processamento e muitas vezes uma utilidade, mesmo no caso da má qualidade dos dados ou de uma forte complexidade estrutural. O imageamento no tempo é basicamente independente do modelo de velocidade na subsuperfície e não precisa estimar ou construir o mesmo, o qual é um problema crucial no imageamento sísmico (LANDA et al., 2010).

O empilhamento no domínio do tempo desempenha um papel fundamental em várias técnicas de imageamento independente do modelo (HUBRAL, 1999). Por estas razões, a melhoria na qualidade de seções no domínio do tempo continua sendo o foco de intensa investigação, em particular, no sentido de melhorar a precisão da correção Normal-moveout (NMO, e.g. TANER e KOEHLER, 1969; de BAZELAIRE, 1988; CAUSSE et al 2000; CAUSSE, 2002; TANER et al., 2007).

Por cerca de mais de uma década, duas técnicas aparentemente similares tem aparecido e coexistido com a finalidade de obter uma melhor aproximação de tempos de trânsito para pares fonte-receptor cujo afastamento é nulo a partir de dados sísmicos de cobertura múltipla. Estas técnicas são Multifoco (MF) (GELCHINSKY et al, 1997; BERKOVITCH et al, 1998; LANDA et al, 1999, CHIRA OLIVA, 2000; LANDA et al, 2010) e o Common-Reflection-Surface (CRS) (MÜLLER, 1999; JÄGER et al, 2001, GARABITO,

2001, entre outros). Ambos os métodos consideram uma coleção de traços cujas fontes e receptores estão na vizinhança do traço imageado (uma superfamília de traços), em lugar de considerar uma única família de traços Common-Midpoint (CMP). Eles são referidos como os métodos com orientação distinta do CMP (LANDA et al., 2007, TYGEL E SANTOS, 2007).

Os métodos MF e CRS destacam nos resultados, pois a relação sinal/ruído é melhorada consideravelmente. Eles precisam determinar através da análise de coerência três parâmetros que correspondem ao ângulo de emergência do raio normal (raio central) e as curvaturas dos eventos sísmicos correspondentes a duas ondas hipotéticas Normal-Incidence-Point (NIP) e Normal (N) introduzidas por Hubral (1983).

Diversas aplicações satisfatórias dos métodos MF e CRS têm sido reportadas na literatura (HÖCHT et al., 1999; LANDA et al., 1999; GUREVICH et al., 2002; MANN et al., 1999; TRAPPE et al., 2001; MENYOLI et al., 2004; HEILMANN et al., 2006; GIERSE E PRUESSMANN, 2006).

Cabral (2002) realizou a simulação de reflexões múltiplas utilizando a aproximação de tempos de trânsito CRS de segunda ordem. Os resultados mostraram um bom desempenho desta aproximação na simulação de uma seção AN observando um posicionamento correto dos eventos e a preservação da forma do pulso da fonte. Desta maneira o método CRS realça as reflexões múltiplas contidas nos dados sísmicos, além de identificar esses eventos.

Silva (2012) aplicou a expansão de Taylor da aproximação de tempos de trânsito CRS, também conhecida como aproximação de tempo de trânsito de 4ª ordem, para simular reflexões primárias e múltiplas na configuração sísmica de afastamento nulo (AN). O autor considerou dados sintéticos e os resultados gerados foram satisfatórios.

Sendo as reflexões múltiplas um tipo de evento sísmico que aparece particularmente no imageamento de áreas com presença de diques, soleiras de diabásio, etc (IMAGAM, 2002) e devido às vantagens apresentadas pelo método Multifoco (LANDA et al., 1999, LANDA et al., 2010) é que será aplicada esta aproximação em dados sintéticos de cobertura múltipla para simular seções sísmicas AN na presença de reflexões múltiplas do tipo simétrica. Posteriormente será comparado este resultado com o empilhamento CMP para ver o desempenho do mesmo neste tipo de simulação.

2 TEORIA DO RAIOS PARAXIAL: CASO 2-D

Neste capítulo será apresentado os fundamentos teóricos da Teoria do Raio Paraxial para o caso bidimensional (2-D), que é utilizado mais na frente para a geração dos dados e obtenção dos resultados.

2.1. Definição de sistema sísmico

Considerando um sistema de coordenadas cartesianas bidimensionais (X,Z) e assumindo a linha sísmica estar na direção do eixo X e a profundidade na direção do eixo Z , sendo positivo para abaixo, então é definido um sistema sísmico como o conjunto de camadas isotrópicas, homogêneas ou não homogêneas, de número arbitrário, separadas por interfaces suaves e curvadas (Figura 2.1, BORTFELD 1989).

2.1.1. Modelo Sísmico 2-D

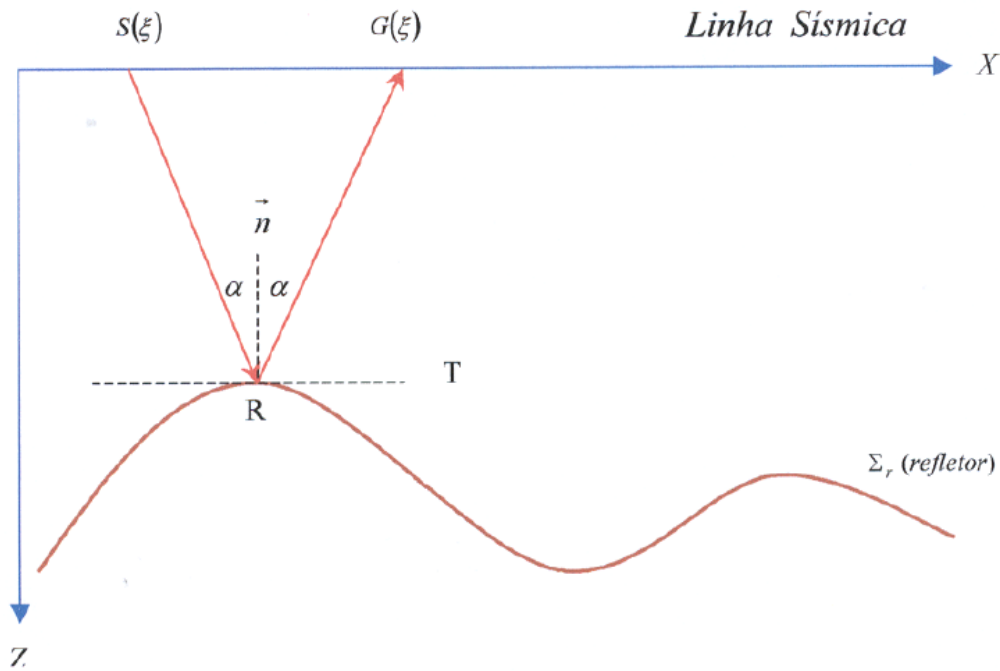
Assume-se que a subsuperfície é descrito por um modelo de camadas isotrópicas e estratificadas. Cada i -ésima camada possui uma velocidade dada por $v = v_i, (i = 1,2,3, \dots N)$, tendo curvas suaves como limites anterior e posterior. Considera-se que existe somente reflexões primárias P-P com pares fonte – receptor (S,G) , com as respectivas coordenadas no eixo X representadas parametricamente por

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

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

A trajetória da onda compressional das reflexões primárias de alta frequência é descrita pelo raio SRG, que parte da fonte em S , atinge o refletor Σ_r no ponto de reflexão R , reflete retornando à superfície da terra em G (figura 2.1). Nesta figura T é a tangente à interface no ponto de reflexão R e n é a normal a esta *tangente* neste ponto R . Segundo a Lei de Snell o ângulo α entre o seguimento do raio incidente SR e a normal n é igual ao ângulo entre o segmento de raio refletido RG e esta normal.

Figura 2.1 Modelo Sísmico 2-D. A trajetória de uma reflexão primária é dada pelo raio SRG, constituído pelos segmentos de raios, SR e RG, respectivamente.



Fonte: (CHIRA OLIVA, 2000).

2.1.2. Configurações Sísmicas

Conforme a equação (2.1), a posição de uma par fonte – receptor é especificada por um único parâmetro, no caso ξ . Para qualquer configuração de medida especificada (SCHLEICHER et al. 1993b), em duas dimensões, tem-se

$$x_S = x_{S_0} + \Gamma_S(\xi - \xi_0) \quad , \quad x_G = x_{G_0} + \Gamma_G(\xi - \xi_0) \quad , \quad (2.2)$$

onde x_{S_0} e x_{G_0} são coordenadas de um par fonte – receptor fixo definido por $\xi = \xi_0$. Γ_S e Γ_G são constantes que dependem somente da configuração de medida, sendo determinados por

$$\Gamma_S = \frac{\partial x_S}{\partial \xi} \quad , \quad \Gamma_G = \frac{\partial x_G}{\partial \xi} \quad . \quad (2.3)$$

As configurações sísmicas mais usadas são:

- a) **Ponto médio comum (CMP):** configuração dada para os levantamentos onde o ponto entre a fonte e o receptor é fixo. Este nome foi uma adaptação do modelo **Common-Depth-Point (CDP, ou Ponto Comum em Profundidade)**. Essa adaptação ocorreu devido a algumas condições que restringiam o nome CMP, quando, por exemplo, ocorriam variações laterais das velocidades do meio um par fonte-receptor é deslocado na superfície tal que seu ponto

médio $\frac{1}{2}(x_S + x_G) = \frac{1}{2}(x_{S_0} + x_{G_0})$ é fixo. Esta configuração é descrita pelas equações (2.2) se $\Gamma_S = 1$ e $\Gamma_G = -1$.

b) Fonte comum (CS): a posição da fonte x_S é fixa em x_{S_0} e os receptores estão distribuídos ao longo da linha sísmica. Esta configuração é descrita pelas equações (2.2) se $\Gamma_S = 0$ e $\Gamma_G = 1$.

c) Afastamento comum ou afastamento nulo (AN) ou Zero offset (ZO): um par fonte–receptor de coordenadas x_S, x_G é deslocado na superfície $z = 0$ tal que os deslocamentos $(x_S - x_{S_0})$ e $(x_G - x_{G_0})$ são iguais. Esta configuração é descrita pelas equações (2.2) se $\Gamma_S = 1$ e $\Gamma_G = 1$. Caso $x_{S_0} = x_{G_0}$, tem-se a configuração de afastamento-nulo (AN).

d) Receptor comum (CR): a posição do receptor é fixa em $x_G = x_{G_0}$, e a fonte é deslocada ao longo da linha sísmica. Esta configuração é descrita pelas equações (2.2) com $\Gamma_S = 1$ e $\Gamma_G = 0$.

3. REFLEXÕES MÚLTIPLAS

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

Geralmente nos levantamentos sísmicos de reflexão é realizado o posicionamento de fonte e receptor na superfície da terra e/ou no mar, no caso do levantamento marinho, o objetivo é registrar as reflexões a partir das heterogeneidades na subsuperfície.

Segundo Verschuur (2006), os algoritmos de imageamento sísmico buscam focalizar a energia que retorna aos pontos de reflexão na subsuperfície, criando assim uma imagem das propriedades de reflexão da Terra. A maioria destes algoritmos assume que toda a energia espalhada reflete na subsuperfície apenas uma vez, como mostrado pelas linhas amarelas na Figura 3.1.

Na prática, cada reflexão ou objeto espalhado na subsuperfície não faz qualquer diferença entre as ondas que viajam para baixo ou para cima. Em outras palavras, as ondas acústicas que estão no caminho de volta à superfície irão passar pelas heterogeneidades do meio o que resultará em uma dispersão dessa energia. Como resultado uma reflexão múltipla acontecerá, o que pode, eventualmente, terminar nos receptores sísmicos na superfície, indicado pelas linhas verdes na Figura 3.1.

3.1. Definição

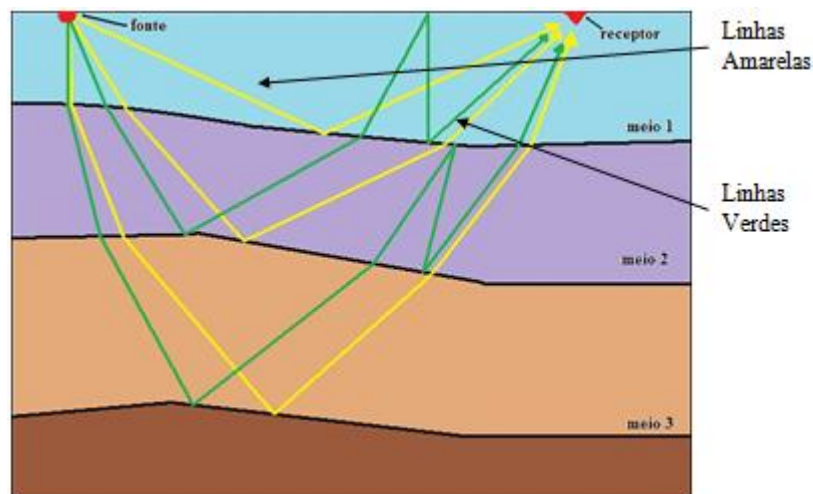
As reflexões múltiplas são eventos que sofrem mais de uma reflexão. A energia das múltiplas resulta dos coeficientes de reflexão. Quanto maior for o contraste de impedância entre as interfaces envolvidas, mais fortes serão as múltiplas geradas. Isso representa um problema para os resultados do empilhamento sísmico, uma vez que várias dessas múltiplas podem ser erroneamente reconhecidas como eventos de reflexões primárias.

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

3.2. Classificação das Reflexões Múltiplas

As reflexões múltiplas são classificadas de diferentes maneiras. Quanto à ordem, uma múltipla é definida de acordo com o número de vezes que o raio é refletido na superfície antes de ser detectada pelos receptores. Quando a ordem da múltipla for zero, há somente uma reflexão, sendo o evento denominado de reflexão primária, já as múltiplas com ordem diferente de zero são caracterizadas de reflexões múltiplas. A ordem é considerada quando a reflexão é voltada para baixo da superfície.

Figura 3.1 Reflexões primárias tem apenas uma reflexão para cima na subsuperfície (linhas amarelas) e reflexões múltiplas têm pelo menos uma reflexão para baixo (linhas verdes).

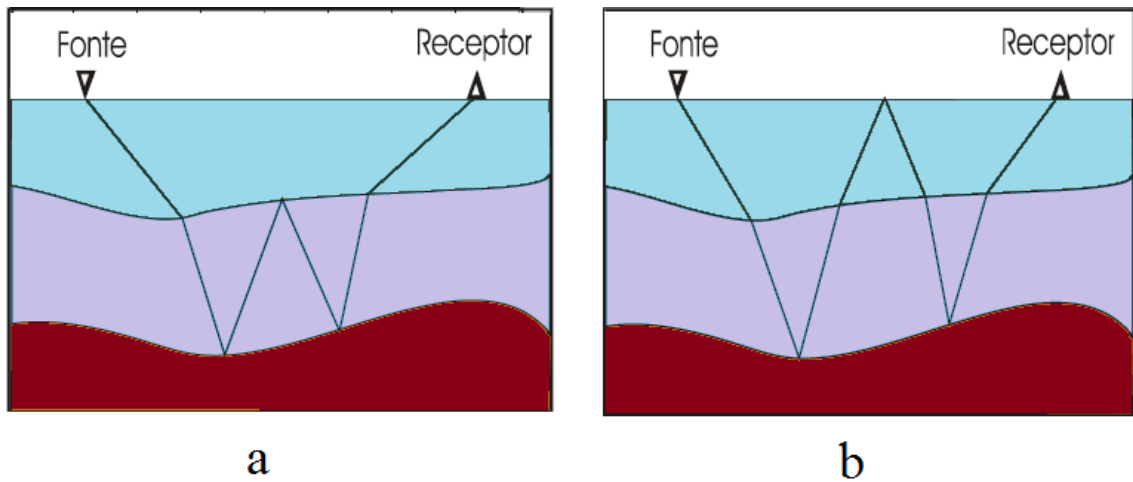


Fonte: (VERSCHUUR, 2006).

As reflexões múltiplas também podem ser classificadas quanto ao tempo de percurso: múltiplas de curto percurso (*peg-legs*) e múltiplas de longo percurso (Figura 3.2), respectivamente.

As 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.

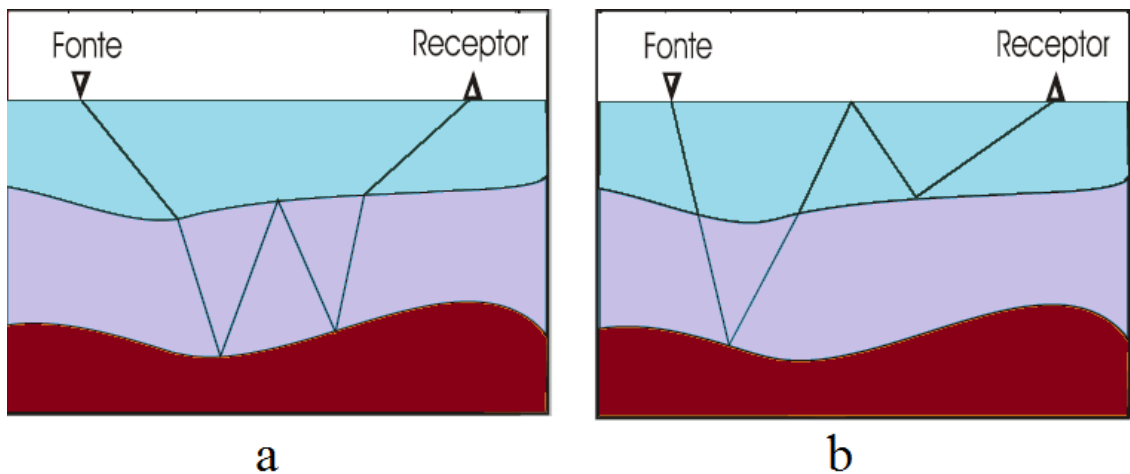
Figura 3.2 a) Reflexão múltipla de curto percurso e (b) Reflexão múltipla de longo percurso.



Fonte: (VERSCHUUR, 2006).

As reflexões múltiplas também podem ser simétricas ou assimétricas como mostrado na Figura 3.3, 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 à múltipla é chamado de assimétrica.

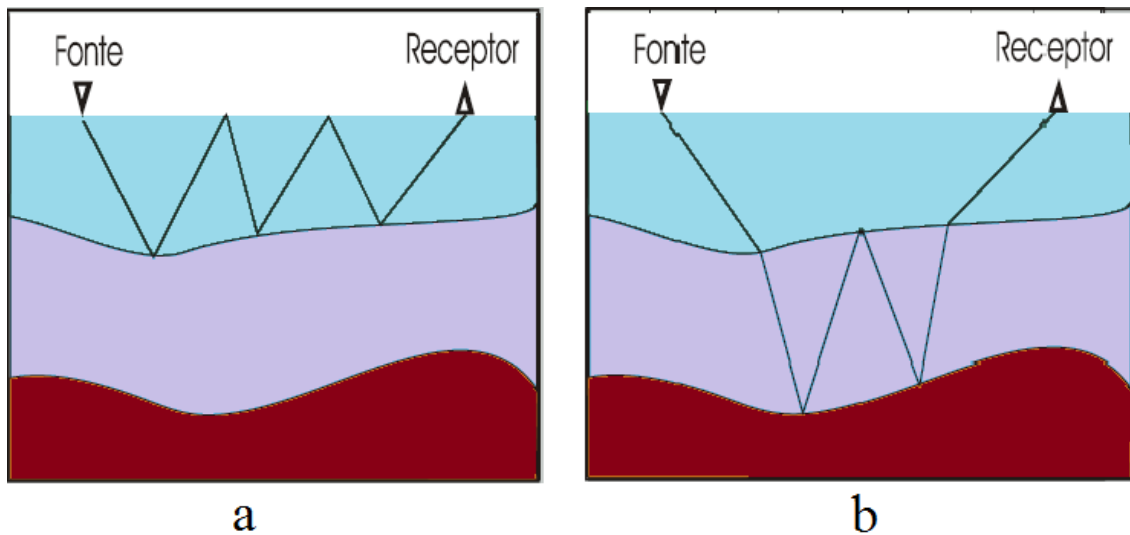
Figura 3.3 (a) Reflexão múltipla simétrica e (b) Reflexão múltipla assimétrica.



Fonte: (VERSCHUUR, 2006).

Existem também as múltiplas da superfície livre e as múltiplas internas, como mostrado na Figura 3.4, respectivamente. Múltipla da superfície livre é aquela que se reflete na interface terra/ar ou água/ar. Um tipo especial desta 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 intercamadas) são as que ocorrem em camadas mais profundas.

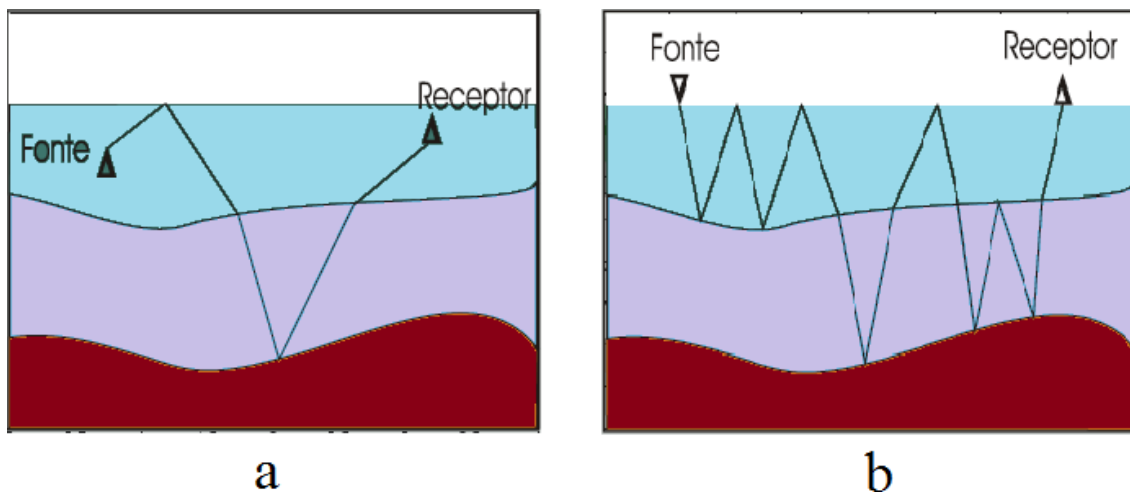
Figura 3.4 (a) Múltipla de superfície livre e (b) Múltiplas internas (intercamadas).



Fonte: (VERSCHUUR, 2006).

Outras múltiplas que podemos observar são as reflexões fantasmas (ghost reflection) (Figura 3.5 a) e as múltiplas combinadas (Figura 3.5 b). A reflexão fantasma é uma múltipla própria da geometria dos levantamentos sísmicos, em que a fonte e o receptor encontram-se abaixo da superfície. Parte da energia expedita pela fonte é refletida na superfície, gerando reflexões defasadas em curto período de tempo que interferem nas reflexões primárias. Mas na prática as múltiplas ocorrem associadas e daí sua denominação como múltiplas combinadas.

Figura 3.5 (a) Reflexão fantasma (ghost reflection) e (b) Múltiplas combinadas.



Fonte: (VERSCHUUR, 2006).

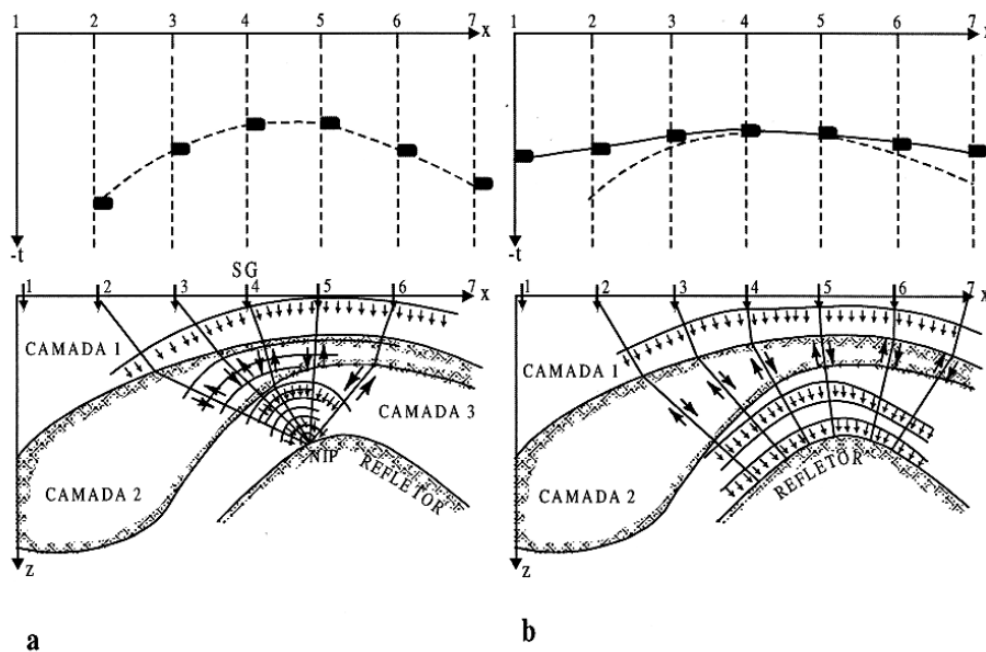
As reflexões múltiplas de interesse para este trabalho serão as múltiplas simétricas de curto percurso, intercamada.

4. GEOMETRIA DE FRENTES DE ONDA

4.1. Ondas Fundamentais

Duas ondas hipotéticas foram introduzidas por Hubral (1983), as quais são denominadas de onda normal (N) e onda Normal-Incidence-Point (NIP) (Figuras 4.1a, b), é utilizado um modelo com metade da velocidade e uma superfície densamente coberta por fontes geradoras de deslocamento ao redor do ponto SG. Onde é esperado criar na superfície com respeito a cada refletor um campo de vetores deslocamento de uma onda chamada NIP de amplitude unitária.

Figura 4.1 (a) Onda NIP compressional de amplitude unitária na superfície. (b) Onda Normal compressional de amplitude unitária na superfície.



Fonte: adaptado de (HUBRAL, 1983).

Na interface na qual esta focalizada o ponto NIP é assumido que cada onda NIP coincide nesse mesmo ponto nessa profundidade (Figura 4.1a), no tempo zero. Essas ondas NIPs retornam a superfície com a mesma frente de onda (mas com amplitudes distintas) com que foram transmitidas em profundidades.

O mesmo é feito para a onda Normal (N) de amplitude unitária com respeito a cada refletor considerando o mesmo modelo e condições anteriores. A onda Normal (Figura 4.1b) propaga-se por definição perpendicularmente a todos os raios normais ao refletor e batem

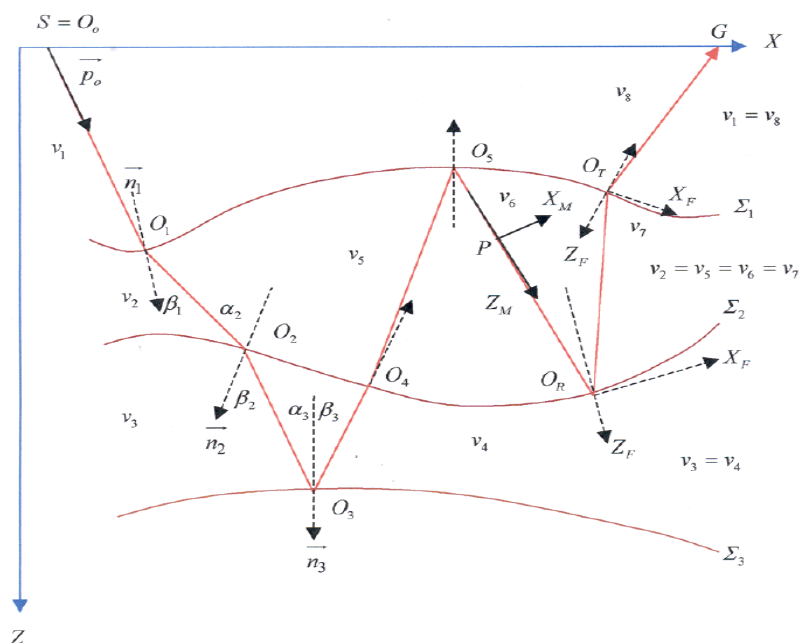
num mesmo instante em todos os pontos no tempo zero. Por consequência esta onda N chegará com a mesma frente de onda com que foi transmitida no modelo. A frente de onda N pode ser observada como a envelope de todas as ondas NIP sobre um refletor (HUBRAL E KREY, 1980).

4.2. Curvaturas de Frentes de Ondas

De acordo com Hubral e Krey (1980) a curvatura da frente de onda é expressa analiticamente em termos dos parâmetros ao longo da trajetória do raio. São as leis de Reflexão, Refração e Transmissão que em qualquer raio arbitrário requerem um cálculo das curvaturas de frente de onda. O raio deve estar associado com a frente de onda em trânsito com velocidades de onda P ou S.

Estas Leis de curvatura são usadas para o cálculo das velocidades intervalares a partir da velocidade de empilhamento ou velocidade de migração. Também são utilizados para o processo de empilhamento sísmico através do cálculo das curvaturas de frentes de onda e também para obter as curvaturas dos refletores em profundidade quando é realizada a migração em tempo ou em profundidade. A utilidade destas leis facilita também a solução de vários problemas inversos de tempo de trânsito sísmico.

Figura 4.2 Modelo sísmico 2-D, para 3 camadas de isovelocidades e um semi-espaco infinito mostrando um raio entre uma fonte S e um receptor G. A parte em movimento é indicada no ponto do raio P. Os pontos O_1 , O_2 e O_4 são pontos de refração (O_T), e O_3 e O_5 são pontos de reflexão (O_R).



Fonte : adaptado de (HUBRAL ; KREY, 1980).

Segundo Cerveny e Ravindra (1971) as leis de curvatura podem ser usadas para fornecer soluções aproximadas para o cálculo do espalhamento geométrico, um conceito intrinsecamente relacionado á curvatura da frente de onda.

São introduzidos os sistemas de coordenadas cartesianas bidimensionais, fixo (X,Z) , em movimento (X_M,Z_M) e permite-se definir um sistema adicional auxiliar (X_F,Z_F) em todos os pontos de interface de refração O_T e reflexão O_R (ver Figura 4.2). Este novo sistema facilita descrever a interface nestes pontos em uma direção adequada para a derivação das leis da curvatura da frente de onda.

Na figura 4.2, $\vec{\rho}_0$ indica o vetor vagarosidade inicial do raio que se inicia a partir da fonte $S = O_0$, n_i é a normal à tangente à interface no ponto de reflexão ou refração e Σ_i é a interface i ($i=1,2,3\dots$). Pode-se aproximar a frente da onda em P (Figura 4.2) pela seguinte expressão quadrática no sistema em movimento:

$$2z_M = -Ax_M^2, \quad (4.1)$$

onde A é a *curvatura da frente de onda*. Em particular, A_I , A_T e A_R designam as *curvaturas da frente de onda incidente, refratada e refletida* em um ponto da interface com respeito ao sistema em movimento neste ponto. Da mesma maneira como é usada a equação (4.1) para expressar a forma da frente de onda com respeito ao sistema em movimento (X_M,Z_M) , pode-se aproximar cada interface em um ponto de interseção do raio com respeito ao sistema (X_F,Z_F) pelo seguinte expressão de segunda ordem

$$2z_F = Bx_F^2 \quad (4.2)$$

sendo B a curvatura da interface.

4.3. Curvatura de Frente de Onda ao Longo de uma Trajetória de Raio

De acordo com Hubral e Krey (1980) as três leis, referidas às curvaturas de transmissão, de reflexão e de refração, são suficientes para o cálculo da curvatura da frente de onda em qualquer ponto ao longo de um raio traçado através de um modelo de terra estratificado. Iniciando desde uma curvatura de onda conhecida, podem-se aplicar as três leis em cascata para encontrar uma expressão analítica para a *curvatura da frente de onda* em qualquer outro ponto desejado. Se a frente de onda origina-se em uma *fonte pontual*, então o *raio de curvatura* é expresso por $R = A^{-1}$. Por outro lado no caso da onda plana, então o raio de curvatura é *infinito*. Se o raio de curvatura do refletor é menor, que o raio de curvatura da

frente de onda encontrado, aparecem difrações marcadas. Esta situação pode ser facilmente especificada pelo procedimento recorrente descrito posteriormente.

Os procedimentos recorrentes aplicados à trajetória de um raio selecionado fornecem uma curvatura da frente de onda resultante que é sempre expressado no sistema (X_M, Z_M) e a curvatura A conhecido em algum ponto do raio, então $2z_M = -Ax_M^2$ fornece a aproximação de segunda ordem desta frente de onda.

De acordo com Hubral e Krey (1980) para obter a curvatura da frente de onda emergindo em G, é aplicado um procedimento recorrente. A seguinte notação é usada,

$$D_i = \cos \delta_i, \quad (4.3)$$

$$S_i = \cos \alpha_i / \cos \beta_i, \quad S'_i = -\cos \alpha_i / \cos \beta_i, \quad S_{T,i} = \cos \beta_i, \quad S_{R,i} = -\cos \beta_i, \quad (4.4)$$

$$\rho_i = \frac{v_{i+1}}{v_i} \cos \alpha_i - \cos \beta_i, \quad \rho'_i = \frac{v_{i+1}}{v_i} \cos \alpha_i + \cos \beta_i, \quad (4.5)$$

onde o índice i pertence a i -ésima interface. δ_i é o ângulo entre as tangentes em O_i e O_{i+1} . O_i é o ponto de interseção de um raio com a i -ésima interface que o raio encontra. O_i pode ser um ponto de reflexão, O_R , ou um ponto de refração, O_T . Os segmentos do raio e as interfaces são calculados sucessivamente desde S e G, iniciando com $i=1$; B_i é a curvatura da interface no ponto O_i , o ponto final do i -ésimo segmento; s_i é o comprimento do segmento na direção do raio desde O_{i-1} até O_i ; α_i é o ângulo de incidência do i -ésimo segmento na direção do raio em O_i ; β_i é o ângulo de reflexão ou de refração correspondente; e v_i é a velocidade intervalar ao longo do i -ésimo segmento do raio. As curvaturas da frente de onda com respeito à parte em movimento podem ser calculadas como segue:

- (1) Curvatura no lado incidente de O_1 :

$$A_{I,1} = 1/s_1 \quad (4.6a)$$

- (2) Curvatura do lado refratado de O_1 :

$$A_{T,1} = D_1^{-1} \left(\left(\frac{v_2}{v_1} \right) S_1 A_{I,1} S_1 + \rho_1 S_{T,1}^{-1} B_1 S_{T,1}^{-1} \right) D_1 \quad (4.6b)$$

- (3) Curvatura no lado incidente de O_2 :

$$A_{I,2}^{-1} = A_{T,1}^{-1} + s_2 \quad (4.6c)$$

- (4) Curvatura no lado refratado de O_2 :

$$A_{T,2} = D_2^{-1} \left(\left(\frac{v_3}{v_2} \right) S_2 A_{I,2} S_2 + \rho_2 S_{T,2}^{-1} B_2 S_{T,2}^{-1} \right) D_2 \quad (4.6d)$$

- (5) Curvatura no lado incidente de O_3 :

$$A_{I,3}^{-1} = A_{T,2}^{-1} + s_3 \quad (4.6e)$$

- (6) Curvatura no lado refletido de O_3 :

$$A_{R,3} = D_3^{-1} \left(\left(\frac{v_4}{v_3} \right) S'_{3} A_{I,3} S'_{3} + \rho'_{3} S_{R,3}^{-1} B_3 S_{R,3}^{-1} \right) D_3 \quad (4.6f)$$

Este procedimento recorrente é continuado para encontrar a curvatura no ponto G com respeito à parte do sistema em movimento que está emergindo.

4.4. Raios de Curvatura de Frente de Onda

De acordo com Hubral e Krey (1980) A é a curvatura da frente de onda com respeito ao sistema em movimento (X_M, Z_M) e B é a curvatura da interface com respeito ao sistema fixo (X_F, Z_F) ligado em algum ponto da interface.

O sistema (X_M, Z_M) pode ser definido em cada ponto P ao longo de um raio. Permita-se K_A se a curvatura da frente de onda em P no sistema (X_M, Z_M) então:

$$K_A = 1/R_A, \quad (4.7)$$

onde R_A é o raio de curvatura da frente de onda no sistema especificado. Substituindo A na equação (4.7) por B correspondente, tem-se a curvatura da interface no sistema (X_F, Z_F) . As inversas $R_A = A^{-1}$ e $R_B = B^{-1}$, subsequentemente referidos como raios de curvatura, são tão úteis como as curvaturas A e B .

As ondas propagando-se através das camadas curvadas podem ter os raios de curvatura de frente de onda que podem ser negativos ou positivos. A escolha do sinal é uma matéria de definição. Quando a frente de onda é côncava ao eixo X_M em P, então o raio de curvatura, R_A , é positivo. Se a frente de onda é convexa ao eixo X_M então este raio será negativo. Esta convenção, explica a escolha do sinal menos na equação (4.1). Também, o raio da interface R_B é positivo se a interface aparece convexa à frente de onda chegando em O_T ou O_R e será negativo se a interface aparece côncava. Isto explica a escolha do sinal positivo na equação (4.2).

4.5. Raio de Curvatura da Frente de Onda NIP

O raio de curvatura da onda NIP, R_0 , é derivado para frente de onda NIP hipotética emergindo ao longo do raio normal desde o ponto NIP até o CDP (Figura 4.3). Usam-se as leis de curvatura seguintes para este caso (HUBRAL; KREY, 1980), assim:

Lei da Refração:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{V_T \cos^2 \epsilon_I}{V_I \cos^2 \epsilon_T} \frac{1}{R_I} + \frac{1}{\cos^2 \epsilon_T} \left[\frac{V_T}{V_I} \cos \epsilon_I - \cos \epsilon_T \right] \frac{1}{R_F}, \quad (4.8)$$

onde ϵ_I e ϵ_T são os ângulos da onda incidente e refratada respectivamente. R_I, R_T são os raios de curvatura da frente de onda incidente, e refratada respectivamente e R_F o raio de curvatura da interface que será positivo se a interface aparece convexa. v_I e v_T são as velocidades da camada onde propagam-se as ondas de incidência e refratada.

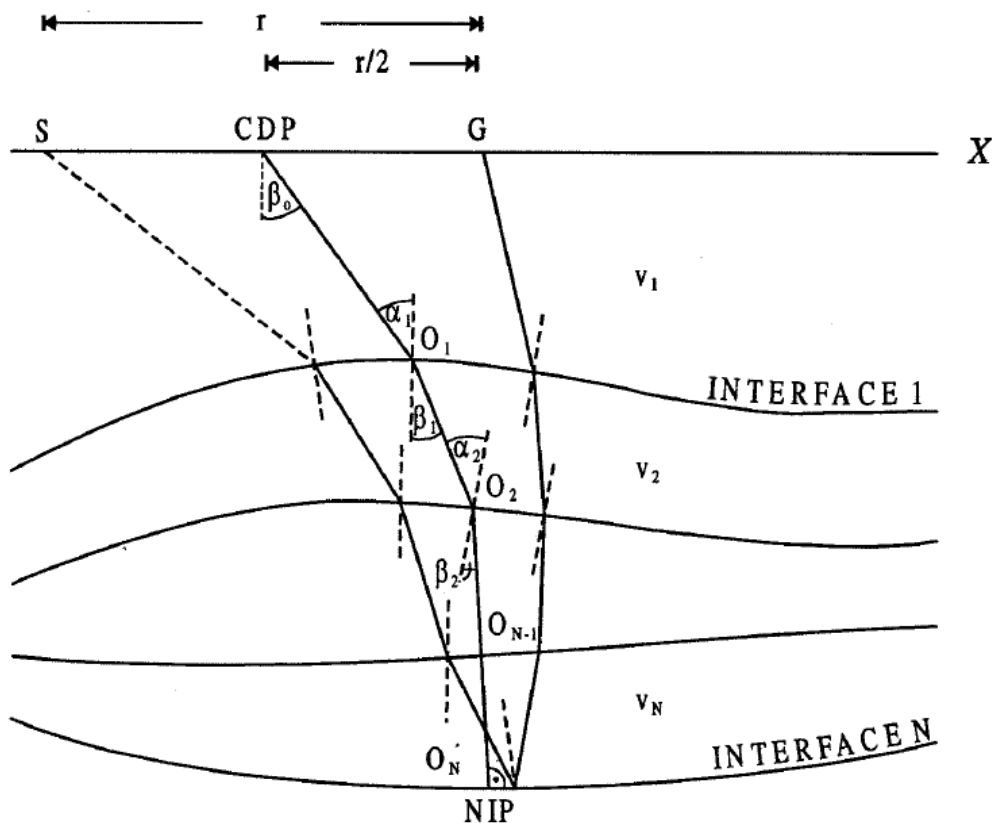
Lei da Reflexão:

$$\frac{1}{R_R} = \frac{V_R \cos^2 \epsilon_I}{V_I \cos^2 \epsilon_R} \frac{1}{R_I} + \frac{1}{\cos^2 \epsilon_R} \left[\frac{V_R}{V_I} \cos \epsilon_I - \cos \epsilon_R \right] \frac{1}{R_F}, \quad (4.9)$$

Sendo R_R o raio de curvatura da frente de onda refletida, ϵ_R o ângulo da onda refletida, v_R a velocidade da camada onde se propagam a onda refletida.

No caso de N interfaces, o raio R_0 pode ser calculado por um procedimento recorrente como é ilustrada na Figura 4.3.

Figura 4.3 Modelo de camadas curvadas 2-D mostrando um raio normal e um raio CDP para o afastamento.



Fonte: adaptado de (HUBRAL E KREY, 1980).

Para o caso de $N=3$ camadas o processo recorrente é o seguinte:

Raio de curvatura no lado inferior de O_2 :

$$R_{I,2} = v_3 \Delta t_3 = s_3 \quad (4.10)$$

Raio de curvatura no lado superior de O_2 :

$$\frac{1}{R_{T,2}} = \frac{v_2 \cos^2 \beta_2}{v_3 \cos^2 \alpha_2} \frac{1}{R_{I,2}} + \frac{1}{\cos^2 \alpha_2} \rho_2 \frac{1}{R_{F,2}} \quad (4.11)$$

$$\rho_2 = \frac{v_2}{v_3} \cos \beta_2 - \cos \alpha_2 \quad (4.12)$$

Raio de curvatura no lado inferior de O_1 :

$$R_{I,1} = R_{T,2} + v_2 \Delta t_2 \quad (4.13)$$

Continuando com o procedimento anterior eventualmente produzira R_0 para frente de onda NIP emergindo. Para o modelo de três camadas, o resultado é:

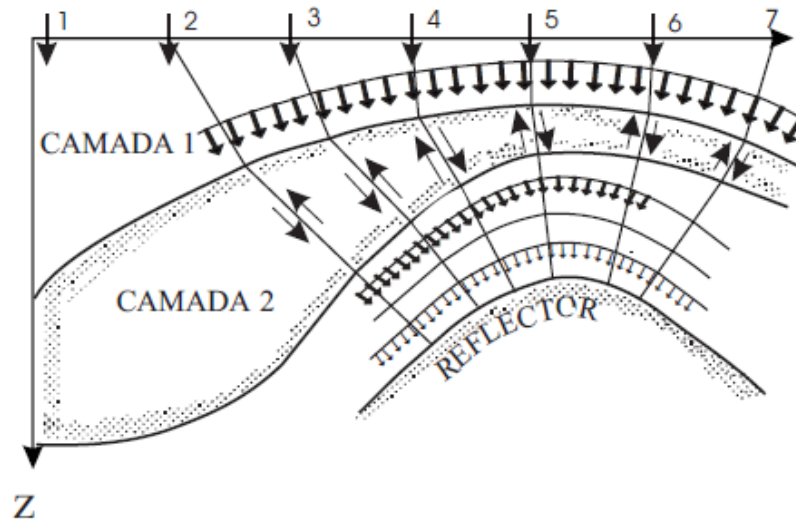
$$R_0 = \frac{1}{v_1} \left[s_1 v_1 + \left(\frac{\rho_1}{v_1 \cos^2 \alpha_1} \frac{1}{R_{F,1}} + \left\{ s_2 v_2 \frac{\cos^2 \alpha_1}{\cos^2 \beta_1} + \left[\frac{2\rho \cos^2 \beta_1}{v_2 \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2} \frac{1}{R_{F,2}} + \left(s_3 v_3 \frac{\cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2}{\cos^2 \beta_1 \cos^2 \beta_2} \right)^{-1} \right]^{-1} \right)^{-1} \right) \right] \quad (4.14)$$

4.6. Raio de Curvatura da Frente de Onda Normal

De acordo com Hubral e Krey (1980) as curvaturas das frentes de ondas normais, são incluídas em migrações em tempo ou profundidade, porque elas fornecem também a curvatura dos estratos refletidos, requeridos posteriormente para calculo das velocidades intervalares de horizontes ainda mais profundos.

O mapeamento das reflexões empilhadas CDP (Ponto de profundidade Comum) em profundidade é realizado com auxilio dos raios normais. O processo é também referido como migração do raio normal. Na figura 4.4 apresenta-se uma família de raios normais tracejados desde a superfície até o terceiro refletor. Os raios normais podem ser associados com uma frente de onda normal hipotética que se origina em uma interface refletida selecionada e propaga-se para acima na superfície da terra. Os tempos de trânsito pertencendo a todos os raios normais na vizinhança do raio desde o NIP's até a superfície pode ser aproximado com o auxílio das leis da curvatura da frente de onda.

Figura 4.4 Onda Normal compressional de amplitude unitária na superfície.



Fonte: adaptado de (HUBRAL, 1983).

Para uma frente de onda propagando-se ascendentemente, considera-se o eixo Z_M do sistema (X_M, Z_M) e o eixo Z_F do sistema (X_F, Z_F) . Seja B_N a *curvatura da interface do N-ésimo refletor no ponto NIP*. É igual à curvatura da frente de onda negativa da onda normal hipotética originada. No seguinte são ignoradas as especificações das quantidades do processo recorrente (4.15). Não obstante, a curvatura, da frente de onda, A_0 , da frente da onda normal emergindo na superfície pode ser obtida realizando a mesma sequencia aplicada (4.6) ao longo do raio normal desde o NIP até os pares fonte-receptor,

$$\begin{aligned}
 A_{I,N-1}^{-1} &= -B_N^{-1} + s_N \\
 A_{T,N-1} &= D_{N-1}^{-1} \left[\frac{V_{N-1}}{V_N} S_{N-1} A_{I,N-1} S_{N-1} + \rho_{N-1} S_{T,N-1}^{-1} B_{N-1} S_{T,N-1}^{-1} \right] D_{N-1} \\
 A_{I,N-2}^{-1} &= A_{T,N-1}^{-1} + s_{N-1} \\
 &\dots\dots\dots \\
 &\dots\dots\dots \\
 A_0^{-1} &= A_{T,1}^{-1} + s_1
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Assume-se que todos os detalhes das camadas são conhecidos, mas não incluídos, até a N-ésima interface. Em particular, as curvaturas da interface $B_j (j = 1, 2, \dots, N - 1)$ estão disponíveis. Elas devem ser obtidas pela interpolação de curvaturas observadas nos pontos vizinhos ao longo das interfaces respectivas (porque em geral, os NiPs para diferentes interfaces descansam ao longo de diferentes raios) ajustando uma superfície ao ser calculado NiPs para diferentes localizações na superfície. Uma característica da aproximação NIP é que

uma superfície que deve ser ajustada aos pontos definidos pela interface $j - 1$ antes de proceder para uma solução para interface j .

4.7. Cálculo dos Parâmetros das Ondas N E NIP

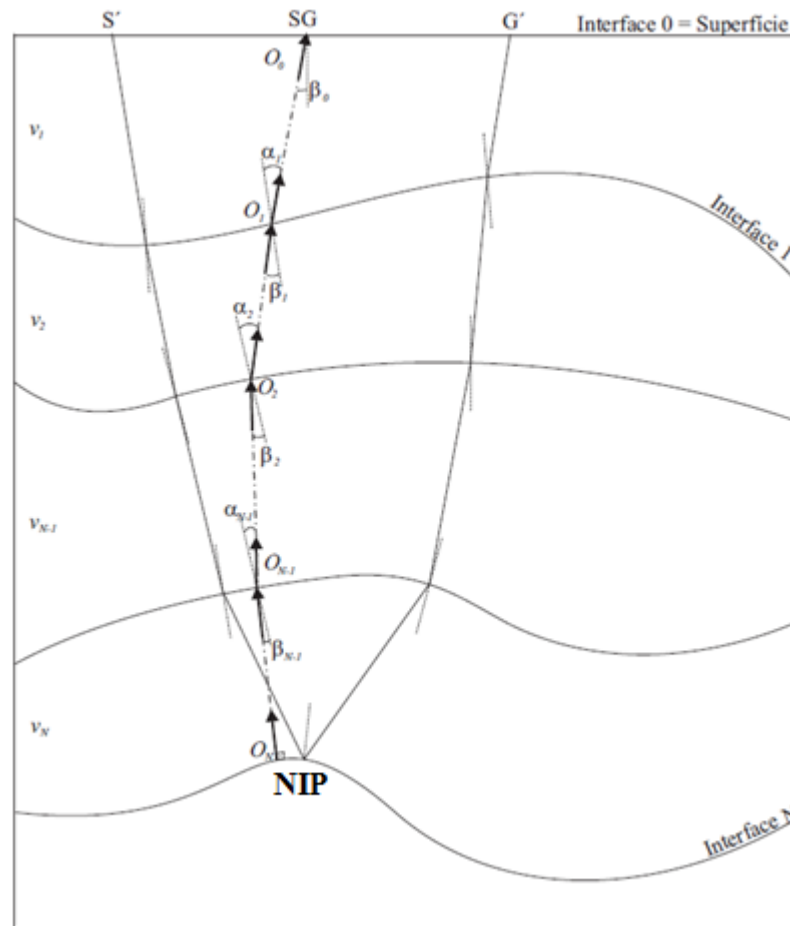
A partir de um ponto com curvatura de frente de onda conhecida podemos aplicar as três leis em cascata para encontrar uma expressão que represente a curvatura da frente de onda em algum outro ponto desejado no raio.

Segundo Hubral e Krey (1980) os raios de curvatura podem ser calculados através do procedimento recursivo mostrado na Equação (4.16), o qual foi obtido com base nas leis de propagação, Refração e reflexão para o caso de $n = 3$ camadas sobre um semi-espaço infinito e meio 2-D, conforme ilustrado na Figura 4.5.

$$R_{NIP} = \frac{1}{v_1} \left\{ s_1 v_1 + \left[\frac{\rho_1}{v_1 \cos^2 \alpha_1} \frac{1}{R_{F,1}} + \left(s_2 v_2 \frac{\cos^2 \alpha_1}{\cos^2 \beta_1} + \left\{ \frac{\rho_2 \cos^2 \beta_1}{v_2 \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2} \frac{1}{R_{F,2}} + \left[s_3 v_3 \frac{\cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2}{\cos^2 \beta_1 \cos^2 \beta_2} \right]^{-1} \right\}^{-1} \right)^{-1} \right] \right\} \quad (4.16)$$

Na equação (4.16), R_{NIP} é o raio de curvatura da onda NIP (relativa à terceira interface) emergindo na superfície. Para cada camada, $i=1, 2, 3$, s_i é o comprimento do raio, v_i a velocidade do meio, α_i é o ângulo de reflexão ou Refração, β_i é o ângulo de incidência, $R_{F,i}$ é o raio de curvatura da interface e $\rho_N = \frac{V_{R \text{ ou } T}}{v_i} \cos \epsilon_I - \cos \epsilon_{R \text{ ou } T}$ (Figura 4.5).

Figura 4.5 Modelo sísmico 2-D com n-camadas e interfaces curvas e a trajetória do raio normal SG e do raio paraxial S'G'.



Fonte: modificado de (CABRAL, 2002).

4.7.1 Caso I - Reflexões Primárias P-P

Segundo Hubral e Krey (1980), para calcular os raios de curvatura (R_N, R_{NIP}) e o ângulo de emergência normal, β_0 , que são associados às duas frentes de onda hipotéticas sobre um ponto O_n , localizado na n-ésima interface de um modelo composto por um sistema de camadas homogêneas, (Figura 4.5) deve-se utilizar o seguinte algoritmo:

- Primeiro considera-se o raio de incidência normal com origem em $O_n = NIP$. Isto fornecerá todos os ângulos de incidência e de refração para todas as interfaces ($i = 1..n - 1$) e o ângulo de emergência β_0 no ponto O_0 na superfície.

▪ Ajusta-se $R_{inicial} = 0$ para determinar R_{NIP} ou $R_{inicial} = R_{F_n}$ para determinar R_N . Lembrando que R_{F_n} é o raio de curvatura na n -ésima interface considerando o ponto O_n .

▪ Primeira refração: $R_{I_{n-1}} = R_{inicial} + v_{n-1}\Delta T_{O_n \rightarrow O_{n-1}}$ (4.17)

▪ Recursão: ($i = n - 1 \dots 1$)

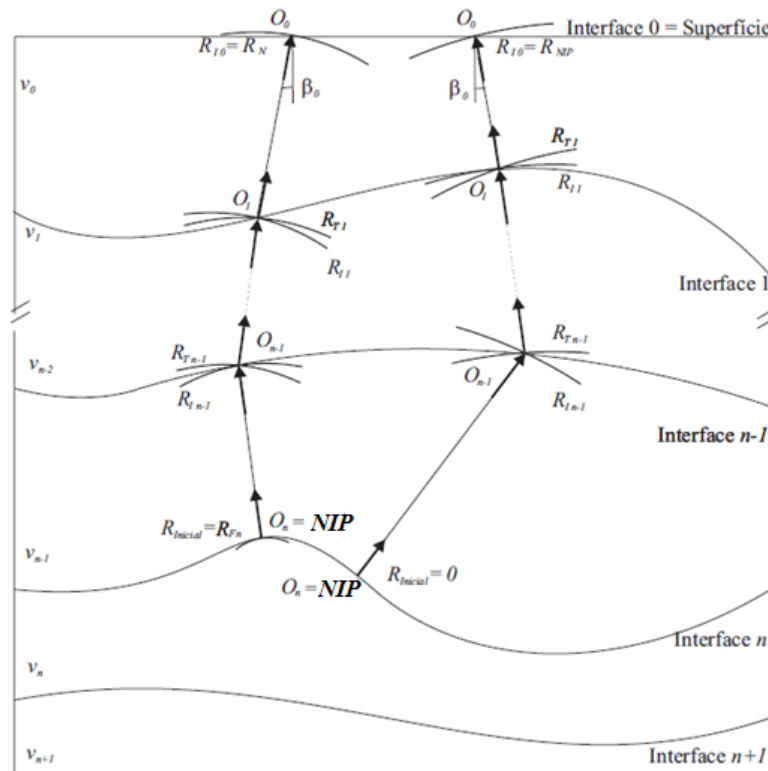
$$\frac{1}{R_{T_i}} = \frac{v_{i-1} \cos^2 \beta_i}{v_i \cos \alpha_i R_{I_i}} + \frac{1}{\cos^2 \alpha_i} \left(\frac{v_{i-1}}{v_i} \cos \beta_i - \cos \alpha_i \right) \frac{1}{R_{F_i}} \quad (4.18)$$

$$R_{I_{i-1}} = R_{T_i} + v_{i-1}\Delta T_{O_i \rightarrow O_{i-1}} \quad (4.19)$$

▪ Finalmente, têm-se os raios de curvatura da frente de onda hipotética considerada para o ponto de observação O_0 dado por R_{I_0} .

Cada ponto localizado na interface em subsuperfície é conectado pela posição de emergência x_0 e o tempo de trânsito t_0 do raio NIP para um ponto $P_0(x_0, t_0)$ na seção AN conforme mostrado na Figura 4.6. Consequentemente podemos atribuir os parâmetros R_{NIP} , R_N e β_0 correspondentes às ondas N e NIP para um ponto P_0 . Ao aplicarmos este algoritmo para todos os pontos localizados nas interfaces em subsuperfície e atribuirmos os parâmetros resultantes para os pontos P_0 na seção AN teremos os parâmetros para todos os eventos de reflexões primárias associados aos pontos P_0 .

Figura 4.6 Eventos primários, aplicando as leis de propagação e refração.

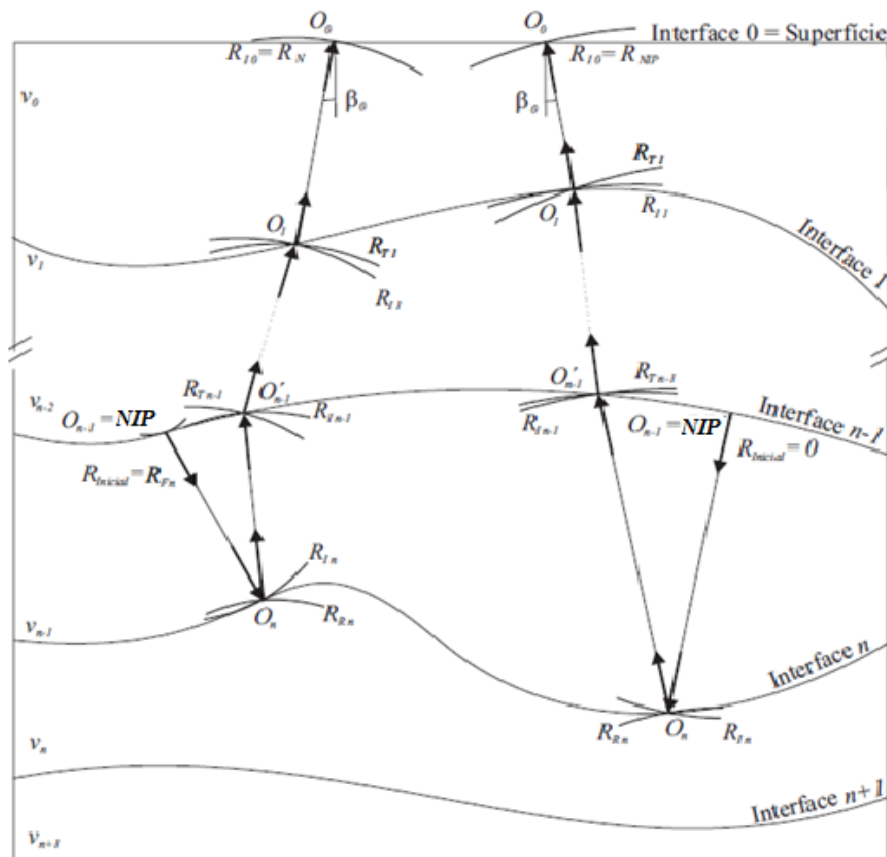


Fonte: modificado de (CABRAL, 2002).

4.7.2 Caso II - Reflexões Múltiplas

Podemos agora, de forma similar ao procedimento para reflexões primárias, colocar uma fonte hipotética no ponto NIP do raio normal múltiplo produzindo assim à frente de onda múltipla associada ao ponto NIP. Vale ressaltar que as leis de curvatura podem ser aplicadas apenas às ondas de reflexões múltiplas simétricas (Figura 4.7), pois as frentes de onda do raio normal de reflexões múltiplas simétricas atravessam o meio estratificado fornecendo informações de forma similar às reflexões primárias. Entretanto raios com reflexões múltiplas assimétricas não podem ser associados a uma frente de onda hipotética NIP; conseqüentemente as leis de curvatura não podem ser aplicadas da mesma maneira (Hubral e Krey, 1980).

Figura 4.7 Eventos de reflexões múltiplas aplicando as leis de propagação, reflexão e refração.



Fonte: modificado de (CABRAL, 2002).

Neste trabalho consideramos além dos eventos de reflexões primárias, os eventos de reflexões múltiplas simétricas intercambiadas. Dessa forma tornam-se necessárias algumas

alterações, mostradas a seguir, no algoritmo acima apresentado para o cálculo dos parâmetros da frente de onda N e NIP (Figura 4.7).

Para calcular o trio de parâmetros referentes aos eventos de reflexões múltiplas intercamadas é aplicado o mesmo princípio recursivo, descrito no algoritmo acima, incrementado de uma parcela referente à reflexão na interface n. Conseqüentemente o cálculo da primeira refração deverá ser efetuado em relação à interface n - 1 (Equação 4.20). Deve-se então, antes de iniciar o cálculo das demais refrações (Equação 4.18), inserir a equação (4.21) referente ao evento de reflexão, conforme o algoritmo a seguir:

- Considera-se o raio de incidência normal com origem em $O_{n-1} = NIP$. Isto fornecerá todos os ângulos de incidência e de refração 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_{NIP} ou $R_{inicial} = R_{F_n}$ para determinar R_N .
- Primeira transmissão (neste caso incidindo na interface n)

$$R_{I_n} = R_{inicial} + v_{n-1} \Delta T_{0_{n-1} \rightarrow 0_n} \quad (4.20)$$

- Reflexão na interface n

$$\frac{1}{R_{R_n}} = \frac{1}{R_{I_n}} + \frac{2}{\cos^2 \alpha_n} \frac{1}{R_{F_n}} \quad (4.21)$$

Assim, ao aplicarmos este algoritmo considerando reflexões múltiplas obteremos, de forma similar ao caso I, os parâmetros R_{NIP} , R_N e β_0 correspondentes às ondas N e NIP para o ponto P_0 . Conseqüentemente, ao aplicarmos este algoritmo para todos os pontos localizados nas interfaces em subsuperfície e atribuímos os parâmetros resultantes para os pontos P_0 na seção AN e então teremos os parâmetros para todos os eventos de reflexões múltiplas referidos aos pontos P_0 .

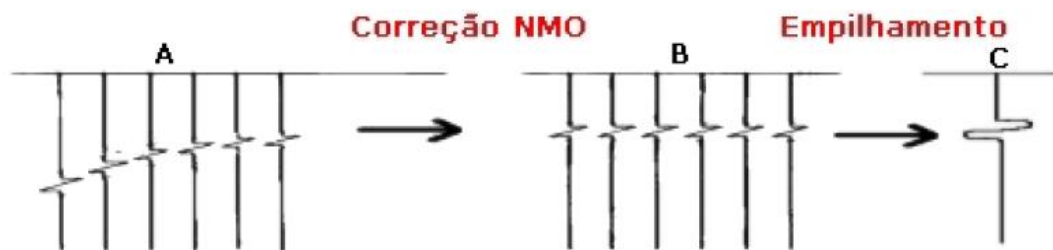
5. MÉTODOS DE EMPILHAMENTO SÍSMICO

Este capítulo tratará da base teórica do Método de Empilhamento Sísmico Multifoco (MF) e do Método do empilhamento CMP para o caso de meios 2-D com raio central de configuração ZO.

5.1. Método de Empilhamento CMP (convencional)

O empilhamento é uma das três cruciais etapas do processamento de dados sísmicos (deconvolução, empilhamento e migração), esta etapa desempenha o importante papel de aumentar a relação sinal-ruído no dado sísmico (YILMAZ, 2000). É interessante introduzir a ideia de que o empilhamento convencional, ou empilhamento CMP, cujo objetivo de sobrepor as amplitudes dos traços de cada família CMP, após a correção NMO, de modo que o resultado final determine um único traço. O traço resultante simula uma aquisição de afastamento nulo, ou zero offset, onde a fonte e o receptor estão posicionados coincidentemente (o que é fisicamente impossível), sobre o ponto médio comum (CMP). Observando a Figura 5.1 é possível obter uma ideia mais clara do empilhamento CMP.

Figura 5.1 Em A o registro de campo é organizado em famílias CMP, B é feita a Correção NMO e em C o dado é empilhado.



Fonte: (PINTO, 2010).

Para que seja realizado o empilhamento CMP, faz-se necessária a correção de sobretempo normal, ou simplesmente correção NMO. A correção NMO é a horizontalização dos dados coletados no levantamento sísmico (vide Figura 5.1, de A para B). Teoricamente, a correção NMO pode ser aplicada sob a hipótese de que o meio apresente mais de uma camada homogênea, sobrepostas e com interfaces planas. Desta forma, se considerarmos um meio composto por n camadas planas horizontais, com velocidades intervalares (v_1, v_2, \dots, v_n) e espessuras (e_1, e_2, \dots, e_n), segundo Taner e Koehler (1969), o tempo de trânsito para a

trajetória do raio que parte da fonte atravessa as n camadas e por reflexão retorna à superfície, associado com o afastamento x , é dado pela expressão 5.1

$$t^2(x) = C_0 + C_1x^2 + C_2x^4 + C_4x^6 + \dots \quad (5.1)$$

onde os coeficientes C_0, C_1, C_2, \dots dependem das espessuras e das velocidades das camadas. Além disso, Taner e Koehler (1969) também mostram que a aproximação de segunda ordem da série 5.1 já produz um ajuste hiperbólico do evento de reflexão satisfatório, para dados sísmicos com pequenos afastamentos. Resultando assim na relação matemática 5.2

$$t^2(x) = \tau_0^2 + \frac{x^2}{v_{emp}^2} \quad (5.2)$$

sendo $C_0 = \tau_0^2$ e $C_1 = \frac{1}{v_{emp}^2}$. A velocidade de empilhamento v_{emp} corresponde nesse caso à velocidade média quadrática (root mean square) denotada por v_{rms} , cuja expressão é dada em 5.3

$$v_{rms} = \frac{1}{\tau_0} \sum_{i=1}^n v_i^2 \Delta t_i(0) \quad (5.3)$$

onde Δt_i é o tempo duplo vertical através da i -ésima camada e τ_0 o tempo duplo da trajetória vertical com afastamento nulo. Portanto, a correção NMO em meios horizontalmente estratificados é realizada com base nas expressões 5.2 e 5.3. Em casos com refletores inclinados a velocidade de empilhamento deve sofrer o efeito do ângulo de inclinação da camada. Haja vista que se deve corrigir a não unicidade na iluminação de um ponto em profundidade. Este problema é corrigido pela aplicação da correção DMO (do inglês, Dip MoveOut). Levin (1971) mostra que a correção DMO, aplicada para a configuração CMP em um meio homogêneo e com um refletor inclinado (figura 5.2), é expressa pela relação do tempo de trânsito da reflexão primária (equação 5.4).

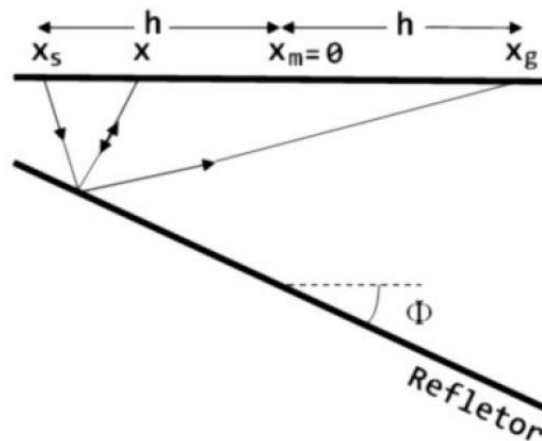
$$t^2(h) = \tau_0^2 + \frac{4h^2}{v_{emp}^2} \quad (5.4)$$

sendo

$$v_{emp} = \frac{v}{\cos \Phi} \quad (5.5)$$

onde τ_0 é o tempo duplo de afastamento nulo, h é a metade do afastamento fonte-receptor, v é a velocidade do meio e Φ é a inclinação do refletor. Nota-se que quando Φ tende a zero, a equação retorna à correção NMO (que é a equação 5.2).

Figura 5.2 Representação esquemática de um meio homogêneo com refletor inclinado



Fonte: (PINTO, 2010).

O empilhamento convencional pode também atenuar a influência de eventos indesejáveis, por meio de interferência destrutiva. É o caso da supressão das ondas diretas, também classificadas como superficiais, as quais não apresentam curvas de tempo previstas pela correção NMO.

Mesmo com as disparidades entre as considerações ideais para o uso do operador de empilhamento convencional e as reais condições geológicas ao qual o mesmo é submetido, o processo de empilhamento é uma técnica muito bem consolidada. Este processo é extensivamente usado na indústria petrolífera para produzir seções de afastamento nulo com um baixo esforço computacional. Contudo, este processo requer o conhecimento prévio do modelo de velocidades.

Dada algumas limitações do empilhamento convencional, é o caso dos refletores com forte curvatura e também a presença de fortes variações laterais de velocidade, podendo ou não estar os dois fatores associados, surgem diretrizes alternativas de empilhamento sísmico. Sobre estas possíveis vertentes a abordagem deste trabalho continua.

5.2. Método Empilhamento Sísmico Multifoco (não convencional)

Tem sido demonstrado que as fórmulas de tempo de trânsito Multifoco não só fornece uma representação adequada dos tempos de chegada para as configurações de fonte-receptor arbitrárias exatamente como a correção NMO convencional faz com conjunto de CMP, mas é

na verdade mais precisa para vários modelos de ambientes. Em particular, eles são muito precisos para um refletor esférico sob um ambiente homogêneo, e para um refletor suavemente curvo (TYGEL et al., 1997).

Uma interessante alternativa de expansão de tempo de trânsito, usando também os três parâmetros ($\beta_0, K_N, e K_{NIP}$) das aproximações paraxiais (parabólica e hiperbólica) propostas por Gelchinsky et al. (1997). Nesta nova representação, os raios paraxiais podem ser especificados como o foco de um certo ponto de afastamento nulo ou em uma extensão deste raio. Em razão disto, a expressão de Gelchinsky tem-se referido como o tempo de trânsito Multifoco.

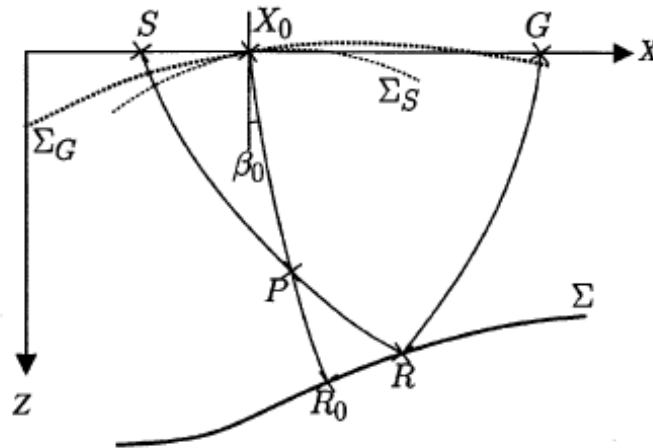
5.2.1. Correção Multifoco

É dado um modelo 2-D lateralmente não homogêneo com camadas isotrópicas. Neste modelo assumimos apenas reflexões primárias P-P e considera-se que a cinemática dos campos de onda é bem descrita pela Teoria do Raio de ordem zero (CERVENY, 1987). São adotadas coordenadas cartesianas (x, z) e supondo um experimento sísmico de uma densa cobertura múltipla em uma linha sísmica, ao longo do eixo x . Isto implica que cada ponto da linha sísmica está envolvido por um conjunto de pares fonte-receptor (dentro de um certo intervalo de afastamento).

A discretização de todos os dados reais pode requerer interpolação de traços, para substituir os traços perdidos.

Observando a Figura 5.3, temos um refletor objetivo fixo Σ em profundidade, na linha sísmica encontra-se o ponto central fixo X_0 (considerado como um par de fonte-receptor coincidente $S_0 = G_0 = X_0$). Observamos também que a reflexão do raio normal de ida e volta, $X_0R_0X_0$, de afastamento nulo, denominado como *raio central*, sendo R_0 seu ponto de incidência normal (NIP) no refletor Σ .

Figura 5.3 Observa-se um raio normal $X_0R_0X_0$ e um par de pontos fonte-receptor (S, G) junto com um raio de reflexão primária SRG, referido ao refletor objetivo Σ . Focaliza-se o raio SRG com o raio central no ponto P em profundidade. Vemos também duas frentes de onda, uma viaja para baixo do refletor (Σ_S) e a outra viaja acima do refletor sentido da superfície (Σ_G) e o ângulo de emergência do raio normal denotado por β_0 .



Fonte: adaptado de (TYGEL et al. 1999).

Na figura acima no par fonte-receptor (S,G) será considerado na vizinhança do ponto central uma descrição genérica de todos os pares fonte-receptor. O raio SRG corresponde à reflexão. São usadas as coordenadas horizontais x_0, x_S e x_G especificando a localização do ponto central, da fonte S e do receptor G, respectivamente.

As distancias relativas desde um par fonte – receptor (S,G) dado ao ponto central fixo X_0 , são

$$\Delta x_S = x_S - x_0 \text{ e } \Delta x_G = x_G - x_0, \quad (5.6)$$

onde são chamados os afastamentos da fonte e receptor respectivamente.

5.2.2. Reparametrização do tempo de trânsito Multifoco

Analisando a Figura 5.4, será realizada uma aproximação do tempo de trânsito do raio de reflexão SRG na vizinhança do raio central, de reflexão e afastamento nulo $X_0R_0X_0$. Supomos que o tempo de trânsito do raio $X_0R_0X_0$ é denotado por T_0 , e a velocidade da onda sísmica no ponto central é denotado por v_0 . Assumimos que os raios SRG e $X_0R_0X_0$ se encontram em um ponto desconhecido P, de acordo com a Figura 5.3.

Sem perda de generalidade, assumimos que P está no segmento de raio da fonte SR. A aproximação Multifoco surge uma onda hipotética originadas no ponto P. Desta onda surge

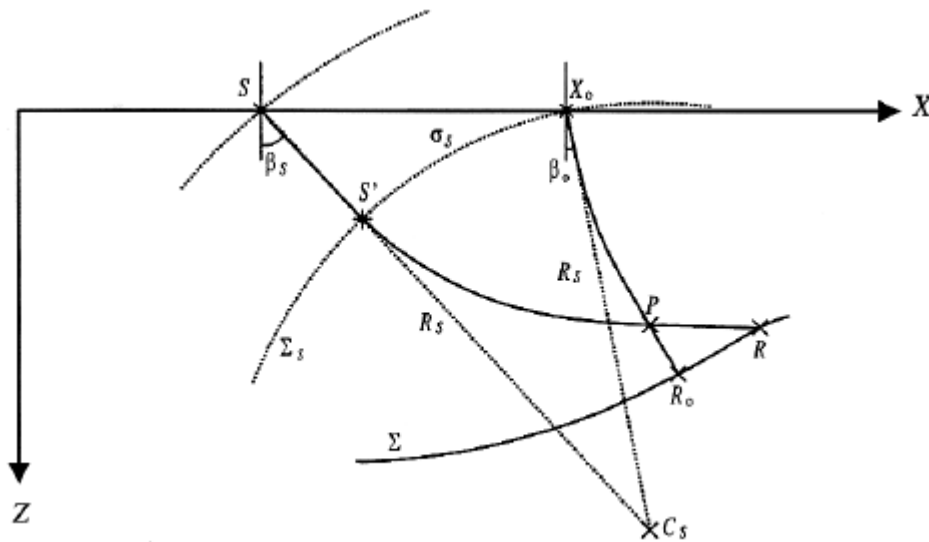
duas frentes de ondas ilustradas na Figura 5.3. Uma delas é denotada por Σ_S , propaga-se de P para fonte pontual S, contendo X_0 e a outra frente de onda denotada por Σ_G , propaga-se a partir do ponto P refletindo em R no refletor Σ em seguida vai para o receptor pontual G. As curvaturas dessas frentes de onda são denotadas por K_S e K_G , respectivamente. Nota-se que a verdadeira onda origina-se em S com uma curvatura inicial de $-K_S$, focaliza-se em P, e emerge em G com uma curvatura K_G . Esta onda é chamada de *onda de focalização* e é fictícia.

Em razão disso, vamos para o tempo de trânsito da onda focalizada desde a frente de onda Σ_S até Σ_G , é dado pelo tempo de trânsito Multifoco T para o raio SRG,

$$T = T_0 + \Delta T_S + \Delta T_G, \quad (5.7)$$

Onde ΔT_S e ΔT_G são as correções do sobretempo Multifoco para a fonte e receptor respectivamente. Admite-se que a velocidade na vizinhança do ponto central X_0 é constante e denotada por v_0 . Aproximam-se as frentes de onda Σ_S e Σ_G por círculos com raios $R_S = \frac{1}{K_S}$ e $R_G = \frac{1}{K_G}$ (Figura 5.4).

Figura 5.4 Construção geométrica do sobretempo Multifoco ΔT_S .



Fonte: adaptado de (TYGEL et al. 1999).

Nesta Figura 5.4 a situação é explicada para a fonte pontual S. Para um receptor pontual G também é válida para essa construção. A correção ΔT_S é o tempo de trânsito desde S até S', supondo o segmento SS' ser uma linha reta. Dentro do triângulo $\widehat{SC_SX_0}$ temos pela Lei dos Cossenos que:

$$\overline{SC_S}^2 = \overline{SX_0}^2 + \overline{C_SX_0}^2 - 2\overline{SX_0C_SX_0} \cos\left(\frac{\pi}{2} + \beta_0\right), \quad (5.8)$$

sendo

$$\overline{SX_0} = \Delta x_s, \quad \overline{C_S S'} = \overline{C_S X_0} = R_S = \frac{1}{K_S}, \quad \overline{SC_S} = R_S + \overline{SS'} , \quad (5.9)$$

resolvendo a equação (5.3) para $\overline{SS'}$, e dividindo por v_0 , obtém-se

$$\Delta T_S = \frac{1}{v_0 K_S} [\sqrt{1 + 2K_S \sin \beta_0 \Delta x_s + (K_S \Delta x_s)^2} - 1] , \quad (5.10)$$

Foi escolhido o sinal da raiz quadrada de acordo com a condição física que ΔT_S tem que ser positivo para a curvatura positiva K_S . O mesmo se aplica para o receptor pontual G onde os índices são trocados de S para G para ΔT_G , assim

$$\Delta T_G = \frac{1}{v_0 K_G} [\sqrt{1 + 2K_G \sin \beta_0 \Delta x_G + (K_G \Delta x_G)^2} - 1] \quad (5.11)$$

5.2.3. Recíproco do parâmetro Multifoco

Previamente devemos considerar o recíproco do parâmetro Multifoco $\gamma, \Gamma = 1/\gamma$, ou parâmetro de foco modificado, ligeiramente mais geral e estável. Estão, por meio da Teoria do Raio de ordem zero, a curvatura das ondas focalizadas hipotéticas podem ser reescritas (TYGEL et al. 1999).

$$K_S = \frac{K_N + \Gamma K_{NIP}}{1 + \Gamma} , \quad K_G = \frac{K_N - \Gamma K_{NIP}}{1 - \Gamma} , \quad (5.12)$$

onde Γ é dado por

$$\Gamma^{orig} = \frac{\Delta x_G + \Delta x_S + 2 \sin \beta_0 K_{NIP} \Delta x_G \Delta x_S}{\Delta x_S - \Delta x_G} \quad (5.13)$$

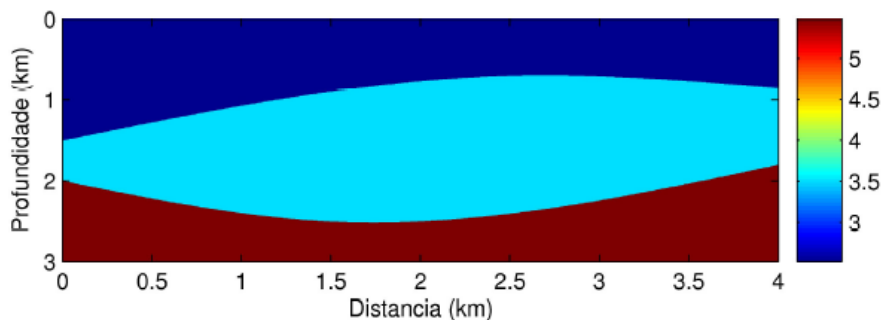
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a finalidade de testar a aproximação de empilhamento Multifoco em relação ao seu potencial para simular eventos de reflexões primária e múltiplas simétricas, foi considerado um modelos sintético.

6.1. Modelo

O modelo 2-D considerado neste estudo está constituído por duas camadas homogêneas sob um semi-espaço e separadas por interfaces curvas e suaves (Figura 6.1). As velocidades para cada camada, desde o topo até a base, são: 2,5 km/s, 3,5km/se 5,5km/s. As dimensões do modelo são: 4 km de comprimento por 3,0 km de profundidade. A simulação de aquisição foi realizada considerando uma linha horizontal.

Figura 6.1. Modelo 2-D constituído por duas camadas separadas com interfaces curvas e suaves sob um semi-espaço.



Fonte: do Autor

Baseado neste modelo foi gerado o conjunto de dados sintéticos de reflexão de cobertura múltipla utilizando o algoritmo de traçamento de raio, SEIS88 (CERVENY E PSENSIK, 1988). Os dados não contêm ruído e foram gerados utilizando a configuração common-shot (CS) ou de tiro comum. O mínimo e máximo afastamento foram 0,6 km e 2,9 km respectivamente.

Foi considerada uma fonte tipo Gabor com uma frequência dominante de 50 Hz e uma intervalo de amostragem de tempo de 0,002 s. A primeira fonte foi posicionada em $X_G = 0,5$ km e o primeiro geofone em $X_G = 1,1$ km, sendo distribuídos 48 geofones com espaçamentos de 0,025 km entre eles. Consideramos 70 tiros com intervalos de 0,05 km cada. A seção

sísmica de afastamento nulo a ser simulada é mostrada na Figura 6.2 e consta de 81 traços com intervalos de 0,025 km.

Figura 6.2. Seção afastamento-nulo (AN) obtida através do traçamento de raio com o software SEIS88. Reflexões múltiplas destacadas pelo retângulo vermelho.

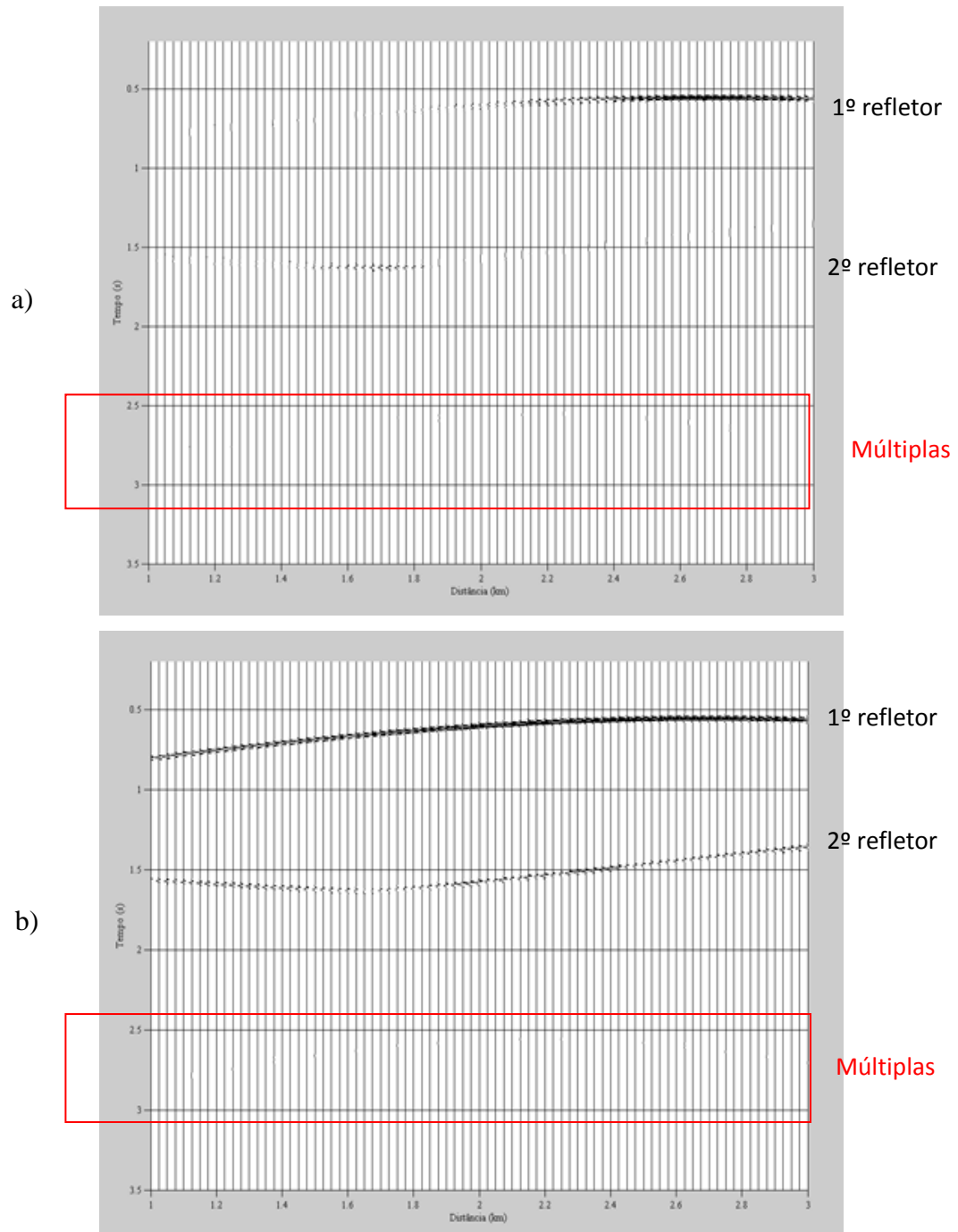


Fonte: do Autor

Ao aplicar o empilhamento CMP (convencional) e o empilhamento Multifoco (não convencional) foram obtidas as seções simuladas (Figura 6.3). Podemos observar a presença das reflexões primárias e das reflexões múltiplas geradas na segunda camada. A seção CMP apresenta um resultado não satisfatório na simulação de eventos de reflexões primárias e múltiplas.

Comparando a seção AN original com as seções CMP e Multifoco (Figura 6.3), observamos um melhor imageamento dos eventos na seção com Multifoco, tanto de reflexões primárias quanto de reflexões múltiplas. Desta forma, nota-se uma boa definição dos refletores e uma boa aproximação da seção original.

Figura 6.3 (a) Seção AN simulada utilizando a aproximação CMP. (b) Seção AN simulada utilizando a aproximação Multifoco. As reflexões múltiplas com uma amplitude muito baixa são apresentadas nos respectivos retângulos vermelhos.

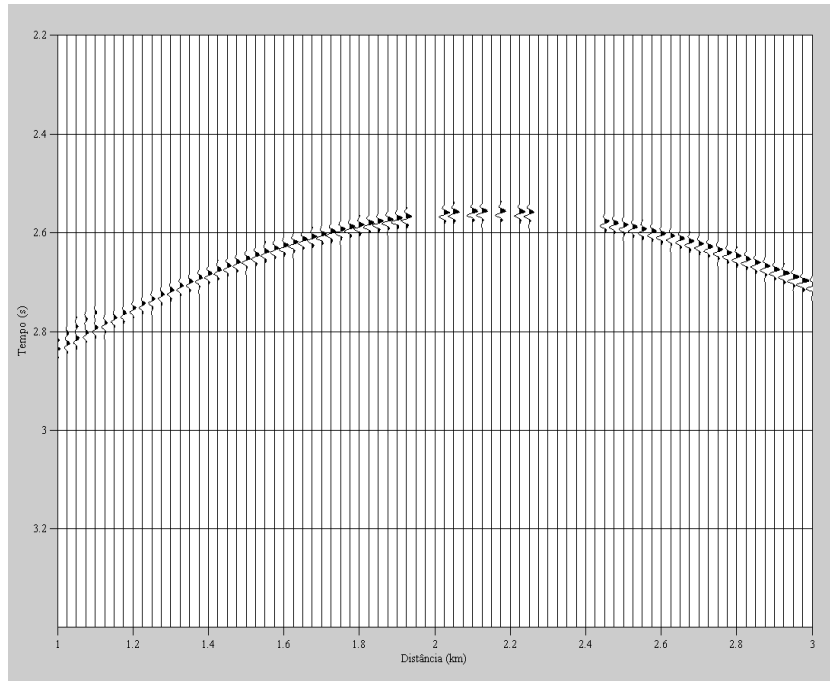


Fonte: do Autor

Em seguida, com o objetivo de destacar melhor as múltiplas imageadas nas seções ZO (original e as empilhadas) são apresentadas estas reflexões através da aplicação de um ganho para realçar as mesmas (ver Figuras 6.4, 6.5 e 6.6). No caso dos empilhamentos Multifoco, as

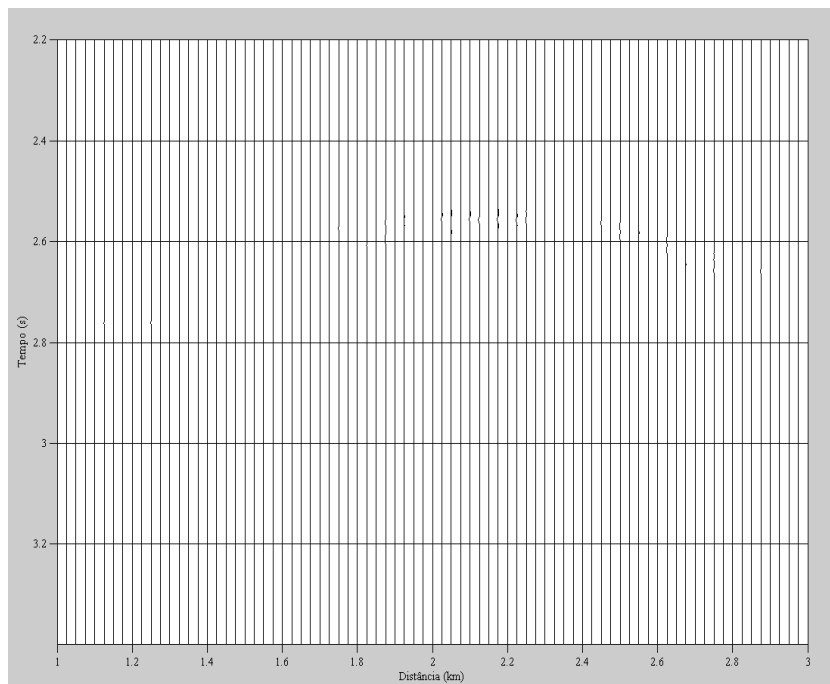
múltiplas imageadas foi a que obteve uma aproximação mais precisa dos eventos de múltiplas em relação à seção ZO original.

Figura 6.4 Trecho destacado em vermelho da Figura 6.2 mostrando as reflexões múltiplas obtidas pelo traçamento de raios com o software SEIS88.



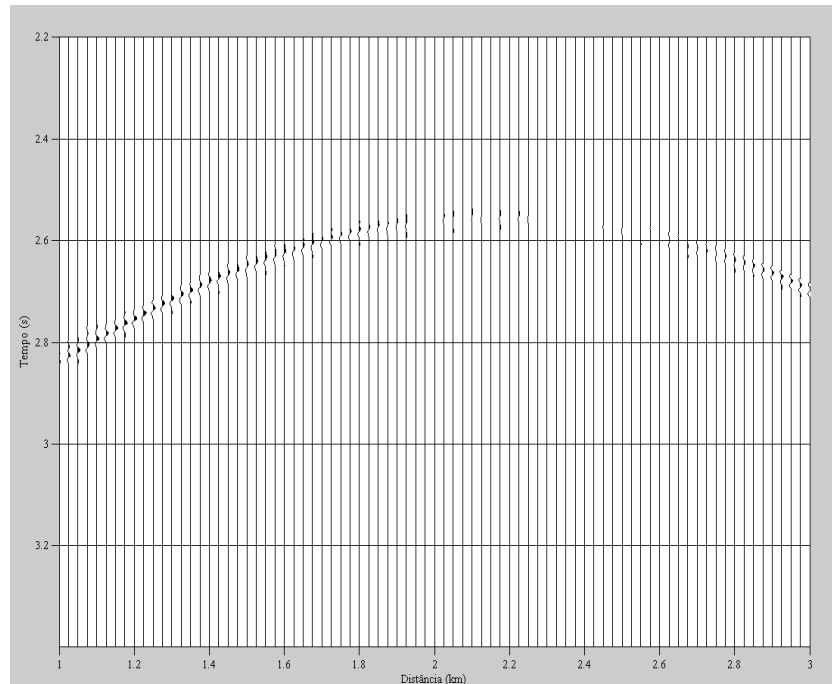
Fonte: do Autor

Figura 6.5 Trecho destacado em vermelho da Figura 6.3a mostrando as reflexões múltiplas simuladas com a aproximação CMP.



Fonte: do Autor

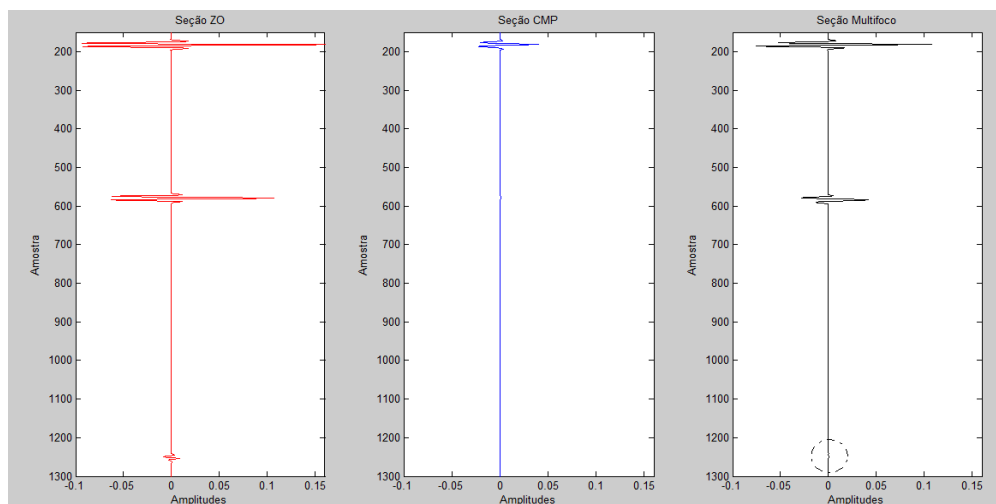
Figura 6.6 Trecho destacado em vermelho da Figura 6.3b mostrando as reflexões múltiplas simuladas com a aproximação Multifoco.



Fonte: do Autor

Na Figura 6.7 apresenta-se uma comparação entre o traço AN original correspondente à coordenada do ponto médio, $x = 2,875$ km, e os traços AN obtidos a partir do empilhamento CMP e empilhamento Multifoco, respectivamente. O método Multifoco apresenta um bom desempenho na simulação da forma do traço AN já o método CMP não obteve um bom desempenho nesta simulação. Os traços AN não preservam as amplitudes originais.

Figura 6.7. Comparação dos traços sísmicos empilhados (modelo da Figura 6.1) correspondentes à posição do raio normal (central) em $X_0 = 2,875$ km, da seção de afastamento-nulo (SZO), seção empilhada CMP e seção empilhada Multifoco.



Fonte: do autor

7. CONCLUSÕES

Como consequência deste trabalho pode-se concluir o seguinte:

- A aproximação de tempos de trânsito Multifoco simula satisfatoriamente e coerentemente as seções com afastamento fonte-receptor nulo (AN). Segundo os resultados obtidos podemos observar um bom posicionamento dos tempos de trânsito e uma boa visualização dos referidos eventos.
- Neste modelo podemos notar que a aproximação de tempos de trânsito MF tem um bom desempenho até afastamentos fonte-receptor de 3 km.
- Podemos notar que há uma grande diferença de imageamento entre as duas aproximações (CMP e MF) com destaque para o empilhamento MF que tem um melhor desempenho que o empilhamento convencional na simulação de reflexões primárias e múltiplas do tipo simétrica.
- O método Multifoco apresenta-se como uma importante alternativa para simular seções AN contendo reflexões múltiplas e primárias no caso de afastamentos longos.
- A importância em realçar as reflexões múltiplas deve-se ao fato de auxiliar aos intérpretes na identificação destas reflexões na etapa da interpretação sísmica.

8. PERSPECTIVAS FUTURAS

Com a finalidade de dar continuidade a este trabalho propõe-se o seguinte:

- Testar a aproximação de tempo de trânsito Multifoco com outros modelos mais complexos incluindo diversos tipos de estruturas geológicas (ex. domos, soleiras de diabásio, etc).
- Considerar modelos cujas apresentem velocidades decrescimento em relação às outras camadas em profundidade.
- Considerar modelos com afastamentos fonte-receptor maiores que 3 km para verificar os resultados obtidos por CHIRA OLIVA et al. (2002, 2003) em dados onde não existia a presença de reflexões múltiplas.
- Implementar os cálculos das leis de curvaturas das ondas NIP e NORMAL para o caso de reflexões múltiplas não simétricas.

REFERÊNCIAS

- BORTFELD, R. Geometrical ray theory: Rays and traveltimes in seismic systems (second order approximation of the traveltimes). **Geophysics** 54:342-349. 1989.
- CABRAL, R. C. M. **Simulação de reflexões múltiplas usando o método de empilhamento sísmico Superfície de Reflexão Comum**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2012.
- CAUSSE, E. Seismic traveltime approximations with high accuracy at all offsets. In: EAGE MEETING, 64., 2002, Florence, Italy. **Extended Abstracts**. Florence: EAGE, 2002.
- CAUSSE, E.; HANGEN, G. U.; ROMMELM, B. Large-offset approximation to seismic reflection traveltimes. **Geophysical Prospecting**, n. 48, p. 763-778, 2000.
- CERVENY, V. **Ray Methods for Three-Dimensional Seismic Modelling. Petroleum Industry Course**, The Norwegian Institute of Technology. Trondheim. 1987.
- ČERVENÝ, V., PSENCIK, I. **SEIS88, Ray Tracing Program Package**. 1988.
- CERVENY, V.; RAVINDRA, R. **Theory of seismic headwaves**. University of Toronto Press. 1971.
- CHIRA OLIVA, P. **Imageamento Multifoco de refletores sísmicos**. 2000. 91f. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 2000.
- DE BAZELAIRE, E. Normal moveout revisited – inhomogeneous media and curved interfaces. **Geophysics**, v. 52, p. 143–157, 1988.
- GARABITO CALLAPINO, G. **Empilhamento sísmico por superfície de reflexão comum: um novo algoritmo usando otimização global e local**. 2001. 65f. Tese (Doutorado em Geofísica) Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2001.
- GELCHISNKY, B ; BERKOVITCH, A ; KEYDAR, S. Multifocusing homeomorphic imaging: Part 1. Basic concepts and formulae. **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, p. 229-242, 1999a.
- GELCHISNKY, B ; BERKOVITCH, A ; KEYDAR, S. Multifocusing homeomorphic imaging: Part 2. Multifold data set and multifocusing. **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, p. 243-260, 1999b.
- GIERSE, G ; PRUESSMANN, J . CRS Stacking Velocity Estimation - A Key to High-Resolution Seismic. In: EAGE EXHIBITION & CONFERENCE, 68., 2006, Vienna.
- GUREVICH, B ; KEYDAR, S ; LANDA, E. Multifocusing imaging over an irregular topography. **Geophysics**, v. 67, p. 639-643. 2002.
- HEILMANN, Z., J. MANN, KOGLIN, I., CRS-stack-based seismic imaging considering top-surface topography: **Geophysical Prospecting**, 54, 681-695. 2006.
- HÖCHT, G., DE BAZELAIRE, E., MAJER, P. HUBRAL, P. Seismic and optics: hyperbolae and curvatures. **Journal of Seismic Exploration**, v. 12, p. 261-282. 1999.

- HUBRAL, P. Computing true amplitudes reflections in a laterally inhomogeneous earth. **Geophysics**, 48, 1051-1062. 1983.
- HUBRAL, P. Macro-model independent seismic reflection imaging. *Journal of Applied Geophysics*, Special Issue, 42:137–346. 1999.
- HUBRAL, P., KREY, T. **Interval Velocities from Seismic Reflection Time Measurements**. Texas: Soc. of Exploration Geophysicists. Western Geophysical Company Houston, 1980.
- IMAGAM. **Imageamento sísmico em Bacias Paleozóicas com soleiras de diabásio na Região Amazônica**: Report - CTPETRO-FINEP/PETROBRAS/FADESP/UFPA, Brazil. 2002.
- JÄGER, R., MANN, J., HÖCHT, G. AND HUBRAL, P., Common Reflection Surface: Image and attributes. **Geophysics**, 66, 97-109. 2001.
- LANDA, E., B. GUREVICH, KEYDAR, S., TRACHTMAN, P. Application of multifocusing method for subsurface imaging. **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, p. 283–300, 1999.
- LEVIN, F. K. Apparent velocity from dipping interface reflections: **Geophysics**. 36: 510-516. 1971.
- MANN, J., JÄGER, R., MÜLLER, T., HÖCHT, G., and HUBRAL, P. Common-reflection-surface stack - a real data example. **J. Appl. Geoph.**, 42(3,4):301–318. 1999.
- MENYOLI, E., GAJEWSKI, D., HÜBSCHER, C. Imaging of complex basin structures with the common reflection surface (CRS) stack method: **Geophysical Journal International** , 157 , 1206–1216. doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02268.x. 2004.
- MÜLLER, T. **The common reflection surface stack: seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model**. Der Andere Verlag. Bad Iburg. 1999.
- PINTO, F.R. **Estimativa automática de parâmetros de empilhamento**: aplicação ao método crs. Trabalho de conclusão de curso (graduação em geofísica) – Instituto Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.
- SCHLEICHER, T.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media. **Geophysical Prospecting**, 41(4): 495-514. 1993.
- SILVA, O. P., CHIRA. P, CRUZ, J. C. R. Simulação de reflexões primárias e múltiplas usando aproximação paraxial de tempos de trânsito CRS de 4^a ordem. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 5., 2012, Salvador.
- TANER, M. T., KOEHLER, F. Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity functions. **Geophysics**. 1969.
- TANER, M. T., TREITEL, S., AL-CHALABI, M., FOMEL, S. Na offset dependent NMO velocity model. In: EAGE MEETING, 69., 2007, London, UK, **Extended Abstracts**. 2007.

TRAPE, H., GIERSE, G., PRUESSMANN, J. Case Studies Show Potential of Common-Reflection- Surface Stack – Structural Resolution in the Time Domain beyond the Conventional NMO/DMO Stack. **First Break**, v. 19, n. 11, p. 625-633. 2001.

TYGEL, M., SANTOS, L. T. Quadratic normal moveouts of symmetric reflections in elastic media. A quick tutorial. **Studia Geophysica et Geodaetica**, 185-206. 2007.

VERSHUUR, D. J. & BERKHOUT, A. J. Estimation of multiple scattering by interative inversion, part II: Pratical aspects and examples. **Geophysics**, 62 (5): 1596-1611. 1997.

YILMAZ, O. Seismic data analysis. In : COOPER, M. R., DOHERTY, S. M., (ed). **Seismic Data Analysis** vol. 1, 01: Soc. of expl. Geophys., 1000: Society of Exploration Geophysicists. 2000.