



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

FACULDADE DE GEOFÍSICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DIEGO ROGÉRIO DA CONCEIÇÃO PEREIRA

**IMAGEAMENTO SÍSMICO DE REFLEXÕES PRIMÁRIAS E
MÚLTIPLAS SIMÉTRICAS APLICANDO O MÉTODO DE
EMPILHAMENTO CRS NÃO-HIPERBÓLICO**

BELÉM
2014

Diego Rogério da Conceição Pereira

IMAGEAMENTO SÍSMICO DE REFLEXÕES PRIMÁRIAS E MÚLTIPLAS SIMÉTRICAS APLICANDO O MÉTODO DE EMPILHAMENTO CRS NÃO-HIPERBÓLICO

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

P436i Pereira, Diego Rogério da Conceição, 1989-

Imageamento sísmico de reflexões primárias e múltiplas simétricas aplicando o método de empilhamento CRS não-hiperbólico / Diego Rogério da Conceição Pereira – 2014.

51 f. : il.

Orientadora: 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

Diego Rogério da Conceição Pereira

**IMAGEAMENTO SÍSMICO DE REFLEXÕES PRIMÁRIAS E MÚLTIPLAS
SIMÉTRICAS APLICANDO O MÉTODO DE EMPILHAMENTO CRS
NÃO-HIPERBÓLICO**

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)

Prof. Dr. João Carlos Ribeiro Cruz - UFPA (Membro)

Prof. Dr. Manuel de Jesus dos Santos Costa - UFPA (Membro)

À minha mãe Iracirene da Conceição.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por sempre ter colocado em meu caminho pessoas que vieram a me ajudar.

À minha mãe Iracirene da Conceição pelo incentivo, apoio, amor e sua luta, muito grato á você, obrigado por tudo.

Ao meu Pai José Pereira, pela criação e ensinamentos.

À minha madrinha e segunda mãe, Rita Souza, pelo apoio, amor e o incentivo.

Aos meus irmãos Thiago Pereira e Dayse Pereira por sempre terem-me 'aturado' durante esta jornada.

À Lurdinha, Graci e Guilherme, pelo apoio e incentivo.

À minha namorada, amiga, Ritiane Sena, obrigada por fazer parte da minha vida e por sempre ter me dado apoio nos momentos difíceis.

Ao CNPq pelo suporte financeiro enquanto bolsista.

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

Ao meu orientador Dr. Pedro Andrés Chira Oliva pela orientação e disposição para dividir seus conhecimentos na ajuda da construção deste trabalho.

Aos amigos que fiz na minha rápida passagem pela UFRA: Janaina Galvão e Jefferson Willian, vulgo 'Jefgol'.

Aos amigos: Alexandre Silva, Bruna Nascimento, Débora Silva, Diego Dias e Mirna Arruda e Luciana Ferreira, Patrícia Souza.

A todos os amigos de turma: Alípio Moraes, Ângela, Carlos Augusto, Carlos Eduardo, Erlane Santos, Glessiane Vasconcelos, Jéssica Pena, João Alves, Nati Almeida, Rodolfo André, em especial, Anderson Clemente, Carol Sena, Dheymison Moreira, Hugo Souza, Leonardo Reis, Michael Alves e Vítor Alfaia, e também aos que além de amigos de turma foram companheiros nos jogos do Clube do Remo : Alan Almeida, Iverson Angelim .

Aos amigos que fiz na faculdade de Geofísica: Aline Ohashi, Augusto Cesar, Celina Raphael Di Carlo, Monteiro, Marcelo, Caio Toledo, David Ribeiro, Diogo Lopes, Jéssica Lia, Paula.

RESUMO

O empilhamento sísmico tem como objetivo obter um produto final de imagens sísmicas mais realistas possível da subsuperfície, e na tentativa de melhorar a qualidade dessas imagens. Nos últimos anos têm aparecido diversos métodos de empilhamento sísmico, com a finalidade de superar restrições do empilhamento common-midpoint (CMP). Entre estes métodos destacam o empilhamento Common-Reflection-Surface (CRS) cuja aproximação de tempos de trânsito é hiperbólica. Recentemente foi proposta outra aproximação de tempos de trânsito para o método CRS do tipo não-hiperbólico para também simular seções sísmica zero-offset (ZO). Neste trabalho, testamos o desempenho desta nova aproximação de tempos de trânsito CRS para simular eventos de reflexão primária e múltiplas simétrica. Os resultados demonstraram ser uma importante alternativa no empilhamento sísmico devido ao bom desempenho na simulação de seções sísmicas ZO com eventos de reflexões primária e múltiplas simétricas.

Palavras - Chave: Aproximações de Tempos de Trânsito CRS não-Hiperbólica. Reflexões Múltiplas Simétricas. Parâmetros CRS. Empilhamento Sísmico.

ABSTRACT

The seismic stacking has as objective to obtain a final product of seismic imagem more realistic in the subsurface. In the last years, has been used several seismic stacking methods in order to overcome constraints of stacking commom midpoint gathers (CMP). Among these methods, stands out the Stacking Common-Reflection-Surface (CRS), in which the traveltime aproximattion is hyperbolic. Recently, it has been pruposed the non-hyperbolic traveltime approximation to simulate ZO sections . This work, we tested the performance of the non-hyperbolic CRS approximation to simulate primary reflections and symmetrical multiple events. The results shown to be an important alternative in seismic stacking, obtaining a good performance in simulating seismic sections with ZO with reflections primary and symmetrical multiple events.

Keywords: Approximations traveltime CRS non-hyperbolic. Symmetric Multiple Reflections. CRS parameters. Seismic stacking.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 2.1	Representação esquemática, do método geofísico sísmica de reflexão, através do comportamento das reflexões das ondas sísmicas.	16
Figura 2.2	Esquema de um sistema sísmico, representado pelo modelo 2-D constituído por duas camadas sobre um semi-espço, ocorrendo apenas reflexão primária. As camadas estão separadas por uma interface suave e curva. A trajetória da reflexão primaria é dado pelo raio SRG, constituído pelos segmentos de raios, SR e RG.	17
Figura 2.3	Configuração CO (common-offset) caracterizada pelo afastamento fonte-receptor constante.....	19
Figura 2.4	Configuração ZO (zero-offset) caracterizada pelo afastamento fonte-receptor igual à zero.....	19
Figura 2.5	Configuração CMP (Common-midpoint) caracterizada pelo ponto médio que é comum a todos os pares fonte-receptor deste levantamento. As fontes estão à esquerda do ponto médio e seus correspondentes receptores à direita.	20
Figura 2.6	CMP para um modelo planar horizontal.....	20
Figura 2.7	Configuração CMP para um modelo de superfície inclinada.....	21
Figura 2.8	Configuração CS caracterizada por manter a fonte (S) fixa e dispor de vários receptores G_i ($i = 1, \dots, n$)	21
Figura 2.9	Configuração CR caracterizada por manter o receptor fixo G.....	22
Figura 2.10	Reflexões primárias tem apenas uma reflexão para cima na subsuperfície (linhas amarelas) e reflexões múltiplas têm pelo menos uma reflexão para baixo (linhas verdes)	23
Figura 2.11	(a) Reflexão múltipla de curto percurso e (b) Reflexão múltipla de longo percurso.....	24
Figura 2.12	(a) Reflexão múltipla simétrica e (b) Reflexão múltipla assimétrica..	25
Figura 2.13	(a) Múltipla de superfície livre e (b) Múltipla interna (intracamada)..	25
Figura 3.1	Propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico.....	27
Figura 3.2	Propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico: (a) transmissão e (b) Reflexão.....	28

Figura 3.3	Onda NIP compressional de amplitude unitária na superfície. (b) Onda Normal compressional de amplitude unitária na superfície...	29
Figura 3.4	Modelo sísmico 2-D com n-camadas e interfaces curvas e a trajetória do raio normal SG e do raio paraxial $S'G'$	30
Figura 3.5	Eventos primários, aplicando as leis de propagação e transmissão.	32
Figura 3.6	Reflexão múltipla do tipo simétrica.....	33
Figura 3.7	Eventos de reflexões múltiplas aplicando as leis de propagação, reflexão e transmissão.....	33
Figura 4.1	Esquema da configuração CMP, para um refletor horizontal.....	35
Figura 4.2	Desenho esquemático da aplicação da correção NMO.....	37
Figura 6.1	Modelo 2-D constituído por duas camadas separadas com interfaces curvas e suaves sob um semi-espaço.....	41
Figura 6.2	Seção zero-offset (ZO) obtida através do traçamento de raio com o software SEIS 88. O retângulo em vermelho destaca as reflexões múltiplas.....	42
Figura 6.3	Seção zero-offset (ZO) simulada com empilhamento CMP. O retângulo em vermelho destaca as reflexões múltiplas.....	43
Figura 6.4	Seção zero-offset (ZO) simulada com empilhamento CRS não-hiperbólico. O retângulo em vermelho destaca as reflexões múltiplas..	43
Figura 6.5	Trecho destacando as reflexões múltiplas obtidas pelo traçamento de raios com o software SEIS 88.....	44
Figura 6.6	Trecho mostrando as reflexões múltiplas simuladas da seção zero-offset (ZO) simulada com empilhamento CMP.....	45
Figura 6.7	Trecho mostrando as reflexões múltiplas simuladas com a aproximação CRS não-hiperbólica.....	45
Figura 6.8	Comparados dos traços sísmicos empilhados correspondentes à posição do raio normal (central) em $x_0 = 1,25$ km da seção ZO, seção empilhada CMP e da seção empilhada CRS não-hiperbólica.....	46

LISTA DE SIGLAS DE TERMOS

ZO	Zero-offset
CMP	Common-midpoint
CRS	Common-reflection-surface
NIP	Normal-incidence-point
N	Normal
NMO	Normal-moveout
DMO	Dip-moveout
S	Source
G	Geophone
CO	Common-offset
CS	Common-shot
CR	Common-receiver

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
2.1 Sísmica de Reflexão	16
2.2 Sistema Sísmico	17
2.3 Configurações Sísmicas	18
2.4 Reflexões Múltiplas	22
2.4.1 Classificação das Reflexões Múltiplas	24
3. FRENTES DE ONDAS	26
3.1 Curvaturas e Leis	26
3.1.1 Lei de Propagação	26
3.1.2 Lei de transmissão	27
3.1.3 Lei da reflexão	27
3.2 Parâmetros	28
3.3 Cálculos do Raio de Curvatura	30
3.3.1 Reflexões Primárias	31
3.3.2 Reflexões múltiplas	32
4 MÉTODO CMP	35
5 MÉTODO CRS NÃO-HIPERBÓLICO	38
5.1 Aproximações dos Tempos de Trânsito	39
5.1.1 Tempos de Trânsito CRS Não-Hiperbólico	39
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
6.1 Modelo	41
7 CONCLUSÕES	47
8 PERSPECTIVAS FUTURAS	48
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Sísmica de reflexão é um método de prospecção geofísica que utiliza os princípios da sismologia para estimar as propriedades da subsuperfície da Terra com base na reflexão de ondas sísmicas. Quando se determinar o tempo que uma onda refletida demora até atingir um receptor, é possível estimar a profundidade da estrutura que gerou a reflexão.

O objetivo da sísmica de reflexão é obter uma imagem de qualidade das estruturas geológicas em subsuperfície a partir de dados sísmicos de cobertura múltipla. Com este intuito, os dados são submetidos a uma série de operações /etapas (processamento sísmico) as quais tem por produto final uma imagem da subsuperfície (seção sísmica).

Melhorar a qualidade das seções sísmicas é relevante para a interpretação sísmica, e.g. na localização de falhas geológicas, estruturas em forma de cunha, flancos de domos ou indicar possível presença de saltos ou terminações de soleiras.

O empilhamento de dados tem um importante papel na sísmica, pois gera seções sísmicas das regiões de interesse. O empilhamento sísmico é realizado ao longo de aproximações de tempos de trânsito que depende de um ou mais parâmetros, que são determinados através da análise de coerência. Além da seção simulada obtida com uma qualidade de imagem melhorada, são obtidas as seções dos atributos (parâmetros) que podem ser utilizadas para outros processos sísmicos, e.g. estimativa dos atributos em verdadeiras amplitudes, inversão do modelo de velocidades, dentre outras aplicações.

Dentre os principais métodos de empilhamento convencionais, temos o conhecido método de empilhamento Comom-midpoint (CMP). Este método consiste na captação de diversas reflexões originadas num mesmo ponto em subsuperfície, obtidas a partir de diferentes offsets. Para empilhar os dados ao longo das configurações CMP, este método considera o tempo de trânsito Normal-moveout (NMO), cuja formula é hiperbólica e só depende de um único parâmetro chamado de velocidade de empilhamento ou NMO, mas o empilhamento CMP, não produz resultados satisfatórios quando é aplicado em dados de meios com comportamento geológico complexo, devido apresentarem fortes variações laterais de velocidades.

Com a finalidade de superar os problemas do empilhamento common-midpoint (CMP) têm surgido métodos alternativos de empilhamento sísmico. Estes métodos

são referidos na literatura geofísica como métodos independentes do macro-modelo de velocidades (Hubral, 1999). Porque não trabalham apenas com um único parâmetro ou a velocidade de empilhamento (método CMP), os novos métodos fornecem dois ou três parâmetros para cada ponto da seção zero-offset (ZO) simulada.

Dentre os métodos alternativos ao empilhamento CMP, destacam-se o Common-Reflection-Surface (CRS), (MÜLLER, 1999; JÄGER et al, 2001, GARABITO CALLAPINO, 2001), o empilhamento Multifoco (MF), (GELCHINSKY et al, 1997; BERKOVITCH et al, 1998; LANDA et al., 1999, CHIRA OLIVA, 2000; LANDA et al., 2010), entre outros. Como resultados adicionais, esses métodos fornecem atributos de frentes de ondas hipotéticas que podem ser usadas para a determinação do modelo de velocidades (MAJER, 2000), análises de amplitude versus Afastamento (AVO), amplitude versus Ângulo (AVA) (BILOTI et al, 2001), dentre outras aplicações.

O método CRS convencional utiliza uma aproximação hiperbólica multiparamétrica da superfície de tempos de reflexão (SCHLEICHER et al., 1993; TYGEL et al., 1997) também conhecida como aproximação CRS de segunda-ordem. A mesma é justificada a partir da expansão da série de Taylor truncada da aproximação de tempos de trânsito elevada ao quadrado ao redor de um raio de referencia ou raio normal. Esta aproximação é sempre exata em pequenos afastamentos ou desvios a partir do raio central, porém perde exatidão em grandes afastamentos ou grandes separações de pontos médios.

O método CRS é um novo método de empilhamento que tem várias características consideradas superiores ao empilhamento NMO/DMO. O método CRS não apenas melhora a resolução das reflexões sísmicas, mas também recupera certos atributos cinemáticos e dinâmicos do campo de onda refletido, a partir de dados de cobertura múltipla pré-empilhados (MANN, 2002).

O método CRS tem sido aplicado em dados sintéticos (e.g. MÜLLER et al., 1998; JÄGER et al., 2001; GARABITO CALLAPINO et al., 2008; DÜMMONG, 2010; SOLEIMANI et al., 2010;) e reais (e.g. MANN et al., 1999; TRAPE et al., 2001; MANN et al., 2004; BAYKULOV, 2009), apresentando resultados satisfatórios e ainda mostrando ser mais eficiente que os métodos convencionais (e.g. método CMP ou NMO/DMO (Normal-moveout/Dip-moveout)).

Na busca de uma aproximação de tempo de trânsito, mas que melhore a aproximação CRS de segunda-ordem, Höcht et al. (1999), consideraram a reflexão de uma interface como um conjunto contínuo de elementos de reflexão circular que osculam o refletor original. Eles derivaram uma expansão de Taylor da aproximação CRS de segunda-ordem denominado como a aproximação CRS de quarta-ordem. Esta nova aproximação é descrita com o mesmo número de parâmetros da aproximação anterior ou aproximação CRS convencional.

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 ZO observando-se 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.

Chira Oliva et al. (2003) revisaram a aproximação CRS de quarta-ordem e discutiram as primeiras comparações para diversas configurações sísmicas em relação à aproximação CRS de segunda-ordem. Para esta comparação os autores utilizaram dados sintéticos e sugeriram que esta nova aproximação pode fornecer uma aproximação melhor para os tempos de trânsito verdadeiros de eventos de reflexão ou difração que a aproximação CRS convencional.

Cardoso (2008) testou a aproximação de tempo de trânsito CRS de quarta-ordem em dados sintéticos sem ruído para simular seções zero-offset (ZO). Ele obteve bons resultados a partir desta nova aproximação quando comparada com a aproximação CRS convencional.

Chira Oliva et al. (2008) testaram a aproximação CRS de quarta-ordem em modelos com dados sintéticos para simular seções ZO. Eles consideraram dados com grandes afastamentos (e.g. afastamento de 4 km) e obtiveram bons resultados a partir desta nova aproximação quando comparada com a aproximação CRS convencional.

Chira Oliva et al. (2010 a,b) testaram a aproximação CRS de quarta-ordem para simular seções sísmicas ZO. Eles utilizaram dados sintéticos com ruído e dados reais da Bacia do Tacutu (Brasil) e mostraram um bom desempenho da expressão proposta comparada à aproximação CRS convencional.

Silva (2012) aplicou a aproximação CRS de quarta-ordem para simular reflexões primárias e múltiplas na configuração sísmica ZO. O autor considerou dados sintéticos e os resultados gerados foram satisfatórios.

Fomel e Kazinnik (2012) propuseram uma aproximação de tempos de trânsito não-hiperbólico para simular seções ZO. Eles aplicaram essa aproximação em dados sintéticos e mostraram que essa aproximação pode prolongar significativamente a faixa de precisão da aproximação CRS de segunda-ordem, enquanto usando essencialmente o mesmo conjunto de parâmetros.

Um dos problemas e principal motivação deste trabalho são obter imagens sísmicas de qualidade. Em virtude da aproximação CRS não-hiperbólica proposta por Fomel e Kazinnik (2012) terem melhor destaque que as aproximações hiperbólicas CRS, a mesma será aplicada neste trabalho para testar o desempenho desta aproximação na simulação de eventos de reflexão primária e múltipla do tipo simétrica cujo afastamento fonte-receptor seja nulo (ZO). Serão utilizados dados sintéticos e os resultados serão comparados com os resultados do empilhamento convencional para verificar seu respectivo desempenho.

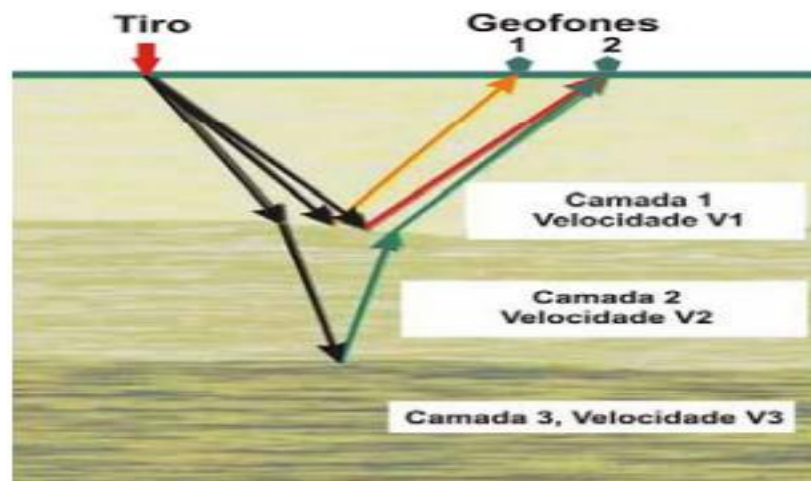
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Sísmica de Reflexão

Sísmica de Reflexão é a técnica geofísica mais utilizada, devido à indústria do petróleo emprega-la em grande escala. É um método indireto, de exploração da subsuperfície da Terra, que vem sendo largamente utilizado devido a sua capacidade de mapear extensas áreas e ser mais econômico em comparação a um método direto, e.g. geofísica de poço (TecnoPetro BR, 2008).

Na sísmica de reflexão, observa-se o comportamento de ondas de reflexões geradas pelo espalhamento da energia de ondas diretas quando estas atingem uma interface que separa dois meios, denominadas Reflexões Primárias, onde parte da energia permanece no mesmo meio gerando as ondas refletidas, enquanto que a outra parte da energia é transferida para o outro meio gerando as ondas transmitidas (Figura 2.1). O comportamento das reflexões de ondas elásticas se dá, a partir do acionamento de uma fonte, e.g. fontes explosivas e a fonte vibratória. A perturbação no meio geológico causada a partir de fontes de energia, gera ondas elásticas que se propagam no meio geológico e, que após serem refratadas, difratadas e refletidas nas interfaces do meio, retornam à superfície onde são captadas por receptores, e.g. geofones, na aquisição terrestre, e os hidrofones na aquisição marítima. Parte da energia incidente é transmitida para camadas subjacentes, onde é captada pelo receptor (YILMAZ, 2001).

Figura 2.1 - Representação esquemática, do método geofísico sísmica de reflexão, através do comportamento das reflexões das ondas sísmicas.



Fonte: X.Neto.P. (2006).

2.2 Sistema Sísmico

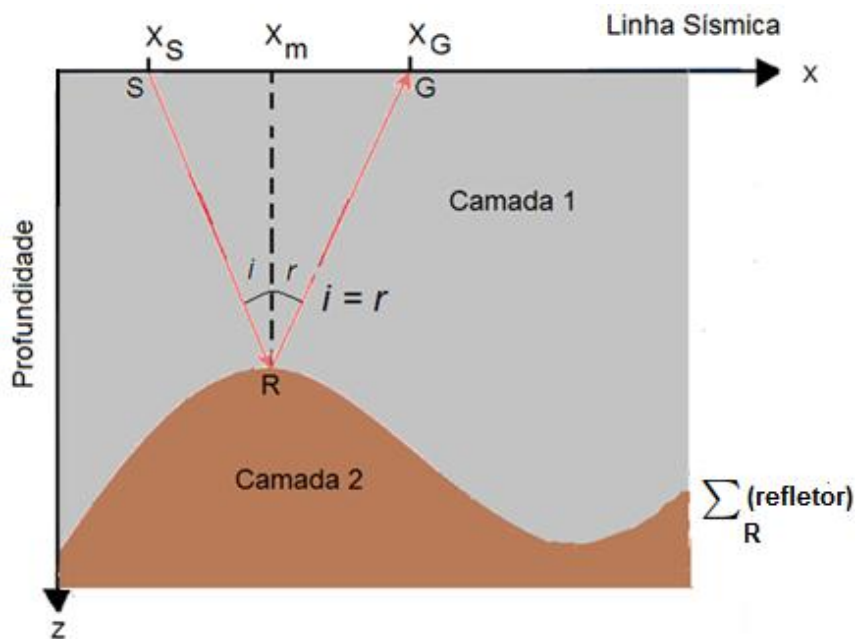
Um sistema sísmico é definido como o conjunto de camadas isotrópicas, homogêneas ou não homogêneas, de número arbitrário, separadas por interfaces suaves e curvas (Bortfeld,1989). Para a definição de um sistema sísmico 2-D consideramos um sistema de coordenadas cartesianas bidimensionais (x, z) , existindo somente reflexões primárias e, assumimos que a linha sísmica está na direção do eixo x e a profundidade na direção do eixo z , sendo positivo para abaixo (Figura 2.2).

Na Figura 2.2, existência de somente reflexão primária, com pares fonte-receptor (S, G) , com as respectivas coordenadas no eixo X representadas parametricamente por:

$$X_s = X_s(\xi), X_g = X_g(\xi) \quad (2.1)$$

Onde ξ é um parâmetro que identifica a posição de um par fonte-receptor na superfície e o Vetor posição $\vec{X} = (X, Z)$ é usado para definir a direção da linha sísmica (x) na superfície terrestre, que é considerada plana.

Figura 2.2 - Esquema de um sistema sísmico, representado pelo modelo 2-D constituído por duas camadas sobre um semi-espaço, ocorrendo apenas reflexão primária. As camadas estão separadas por uma interface suave e curva. A trajetória da reflexão primária é dado pelo raio SRG, constituído pelos segmentos de raios, SR e RG, respectivamente.



Fonte: Modificada de Chira Oliva (2000).

2.3 Configurações Sísmicas

O levantamento sísmico 2-D tem como base as fontes (vibroscis, dinamite ou airgun) que ficam na superfície de medição ao longo de uma linha sísmica gerando ondas que se propagam em profundidade até o encontro com uma interface geológica e em seguida são refletidas ou difratadas e retornam a superfície. As ondas refletidas ao retornarem a superfície são captadas por vários receptores distribuídos, obedecendo a uma geometria, na mesma linha sísmica. Esses receptores são chamados de geofones para o caso de levantamentos terrestres e hidrofones para o caso de levantamentos marítimos.

Os registros nos receptores constituem os traços sísmicos, cuja coleção é denominada de sismograma. A coleção de vários sismogramas constitui os dados sísmicos.

Esses registros fornecem um conjunto de dados de cobertura múltipla, que podem ser visualizados dentro do volume (x_m, h, t) . Onde x_m é a coordenada do ponto médio, h é o afastamento e t o tempo de trânsito. As coordenadas x_m e h são dadas por:

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

em que x_s e x_G são as coordenadas de S e G. Segundo a equação abaixo, a posição do par fonte-receptor é especificada por um único parâmetro, nesse caso (x) . Para qualquer configuração de medida especificada (SCHLEICHER et al, 1993), em duas dimensões (2-D), tem-se:

$$x_s = x_{(s_0)} + \Gamma_s(\xi - \xi_0), \quad x_G = x_{(G_0)} + \Gamma_G(\xi - \xi_0) \quad (2.3)$$

onde $x_{(s_0)}$ e $x_{(G_0)}$ são as coordenadas de um par fonte-receptor fixo definido por $(\xi - \xi_0)$, Γ_G e Γ_s são constantes que dependem somente da configuração do levantamento.

As principais configurações utilizadas nos levantamentos sísmicos são o common offset (CO) ou afastamento comum, o CMP ou ponto-médio-comum, o common-shot ou fonte-comum (CS) e o common-receiver (CR) ou receptor-comum.

- Common-Offset (CO) ou afastamento comum: Configuração dada para levantamentos em que os traços apresentam a mesma distância fonte-receptor (Figura 2.3), descrita pela Equação 2.3, onde $\Gamma_s = 1$ e $\Gamma_G = 1$. Se $x_{(s_0)} = x_{(G_0)}$, tem-se configuração Zero-Offset ou afastamento nulo (Figura 2.4).

Figura 2.3 - Configuração CO (common-offset) caracterizada pelo afastamento fonte-receptor constante.

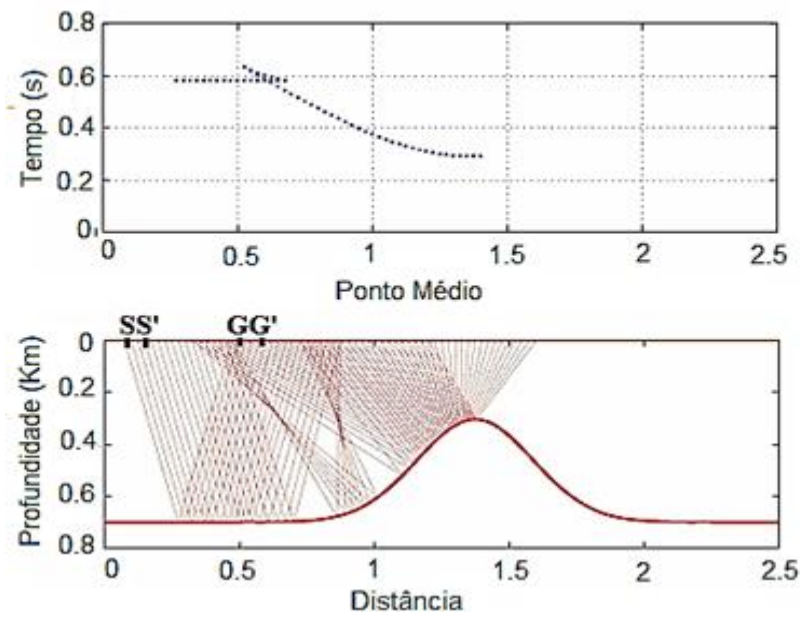
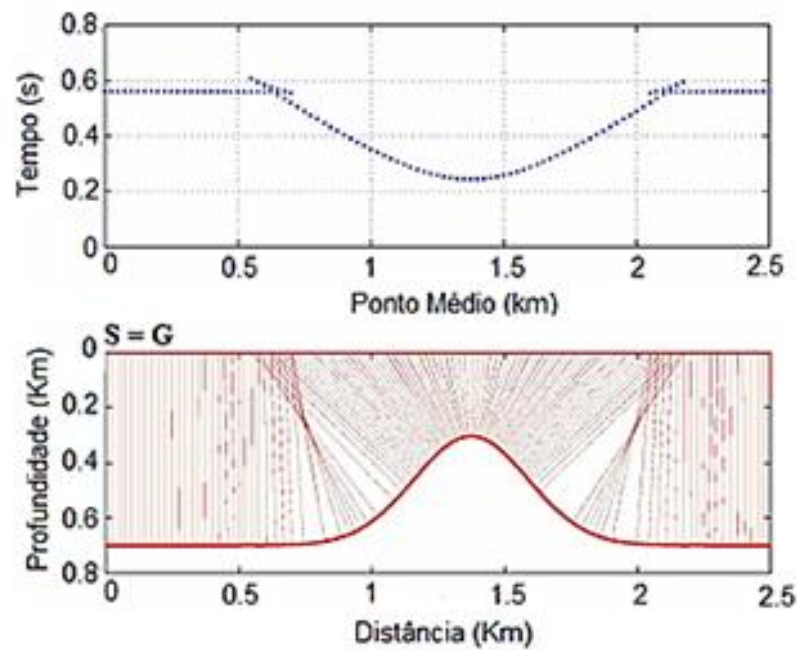


Figura 2.4 - Configuração ZO (zero-offset) caracterizada pelo afastamento fonte-receptor igual à zero.



Common-midpoint (CMP) ou Ponto médio comum: Configuração dada para os levantamentos onde o ponto médio entre a fonte e o receptor é fixo. Este nome foi uma adaptação do modelo Common-Depth-Point (CDP, ou ponto comum em profundidade), devido a algumas restrições do mesmo, e.g. variação das velocidades do meio. A configuração CMP é descrito pela Equação 2.3, onde $I_s = 1$ e $I_G = -1$ (Figura 2.5 à 2.7).

Figura 2.5 - Configuração CMP (Common-midpoint) caracterizada pelo ponto médio que é comum a todos os pares fonte-receptor deste levantamento. As fontes estão à esquerda do ponto médio e seus correspondentes receptores à direita.

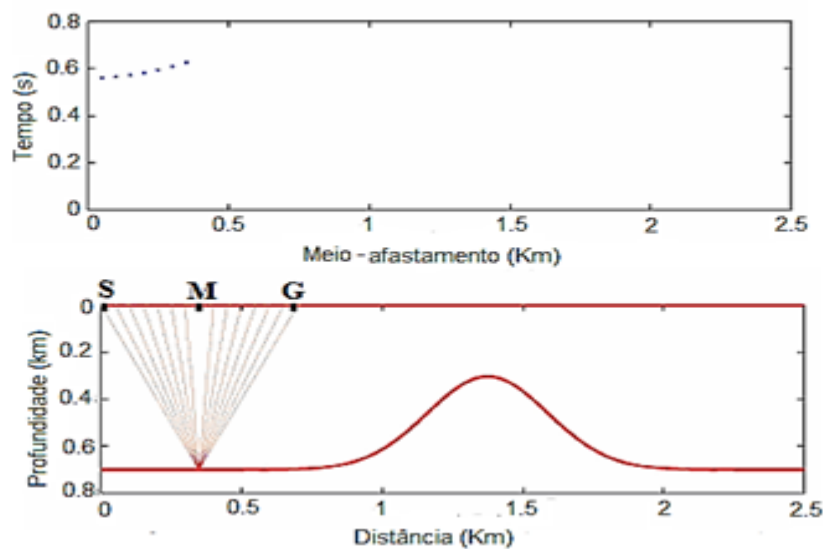


Figura 2.6 - Configuração CMP para um modelo planar horizontal.

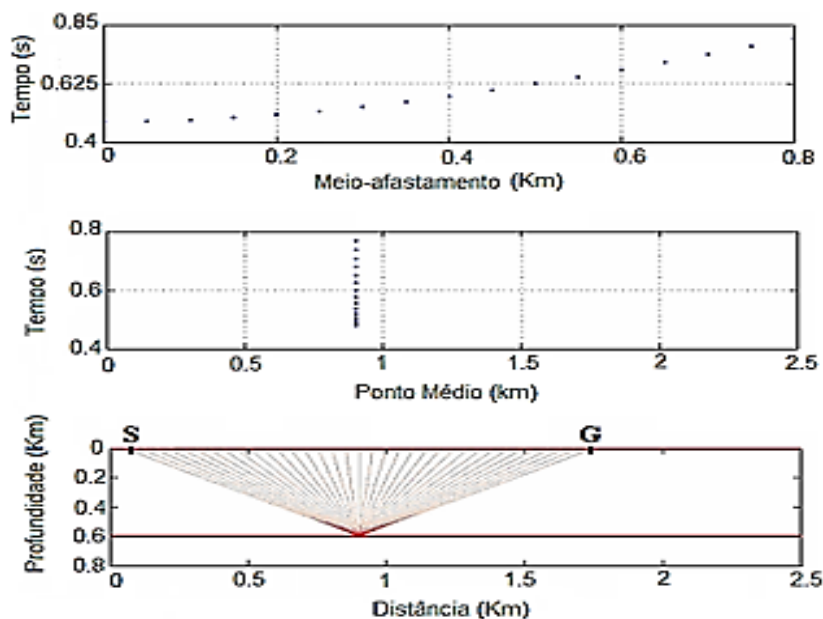
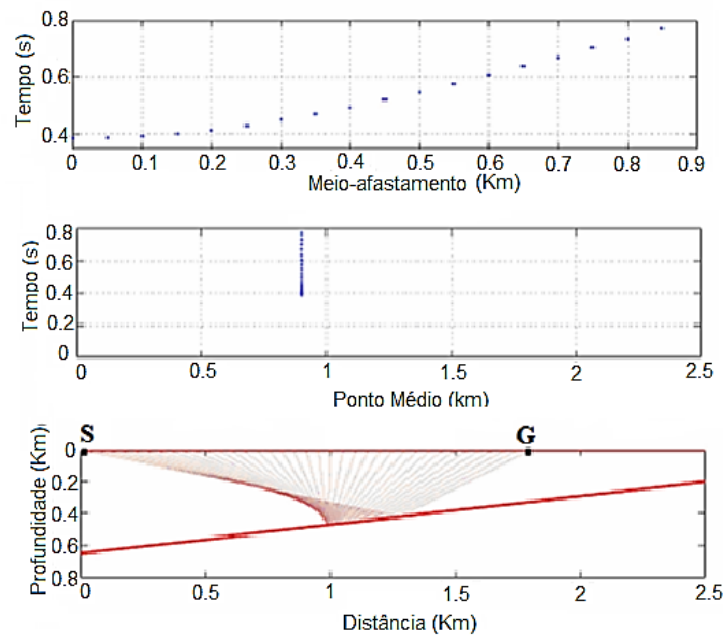
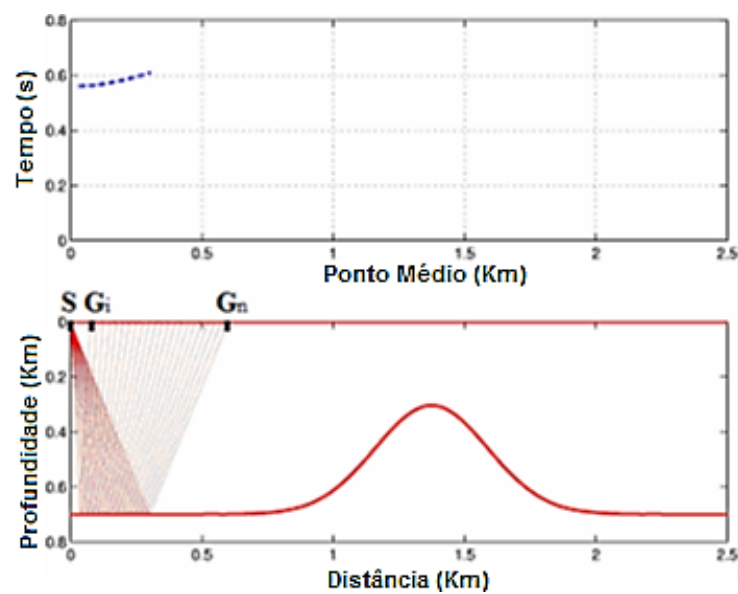


Figura 2.7 - Configuração CMP para um modelo de superfície inclinada.



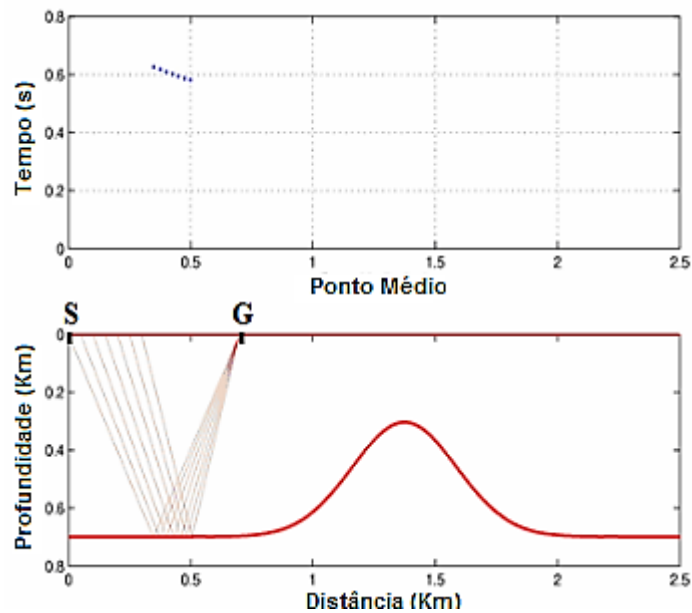
- Common-shot ou fonte-comum (CS): configuração dada com fonte fixa. O receptor é deslocado ao longo da linha sísmica. Ela é descrita pela equação 2.3, quando $I_s = 0$ e $I_G = 1$, (Figura 2.8).

Figura 2.8 - Configuração CS caracterizada por manter a fonte (S) fixa e dispor de vários receptores G_i ($i = 1, \dots, n$).



- Common-receiver (CR) ou receptor-comum: nesta configuração é mantido o receptor fixo e a fonte é deslocada ao longo da linha sísmica. Essa configuração é descrita pela Equação 2.3, quando $I_s = 1$ e $I_G = 0$, (Figura 2.9).

Figura 2.9 - Configuração CR caracterizada por manter o receptor fixo G.



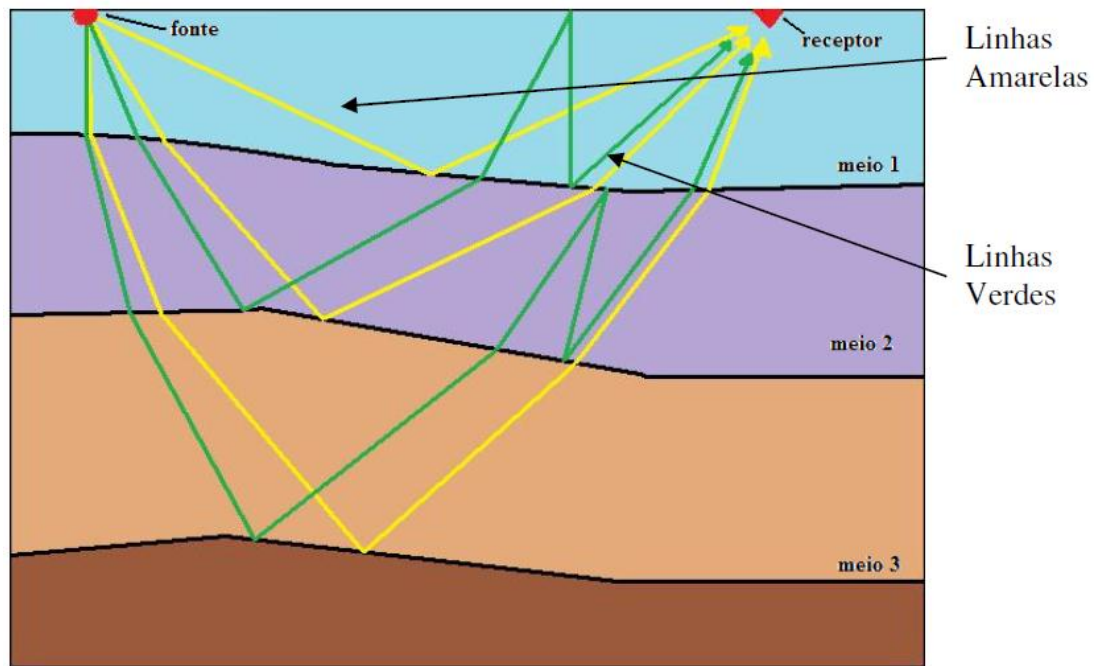
2.4 REFLEXÕES MÚLTIPLAS

As reflexões sísmicas podem ser classificadas em primárias e secundárias (múltiplas). De uma maneira simples, as reflexões múltiplas podem ser definidas como eventos repetitivos em uma trajetória que apresentam pelo menos uma reflexão descendente. As reflexões primárias são desejadas, pois, a partir delas, podemos obter imagens de boa qualidade da subsuperfície, livres de ruídos. A presença de reflexões múltiplas no dado sísmico tem constituído um grande problema e desafio para os geofísicos, pois possui um efeito obscuro na interpretação, podendo, inclusive, mascarar importantes informações em uma seção sísmica (Santos, 2012).

Os levantamentos sísmicos de reflexão geralmente são realizados com fontes e receptores posicionados na superfície da terra e/ou no mar, no caso do levantamento marinho, em que objetiva-se 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, indicado pelas linhas amarelas (Figura 2.10).

Figura 2.10 - 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).

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 2.10.

As Reflexões múltiplas são eventos que sofrem mais de uma 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.

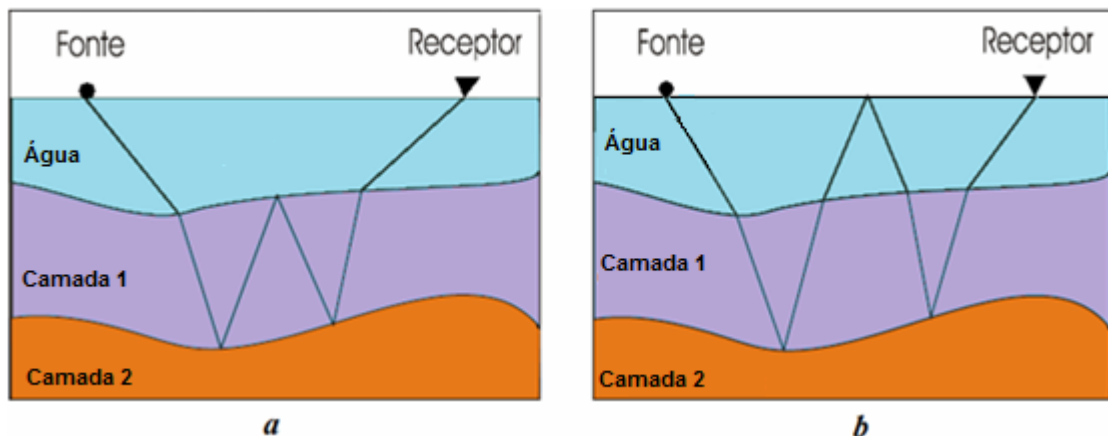
Uma reflexão múltipla pode ter diversas classificações. Quanto à ordem, uma múltipla é definida de acordo com o número de vezes que o raio é refletido na superfície antes de ser detectada pelos receptores.

2.4.1 Classificação das Reflexões Múltiplas

As reflexões múltiplas podem ser classificadas, baseado em Verschuur (2006), quanto ao percurso, à simetria, e a origem.

Quanto ao percurso são classificadas de acordo com as distâncias percorridas da fonte até sua captação nos sensores. Segundo essa classificação, as múltiplas podem apresentar percursos curtos (*peg-legs*) ou longos às 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.

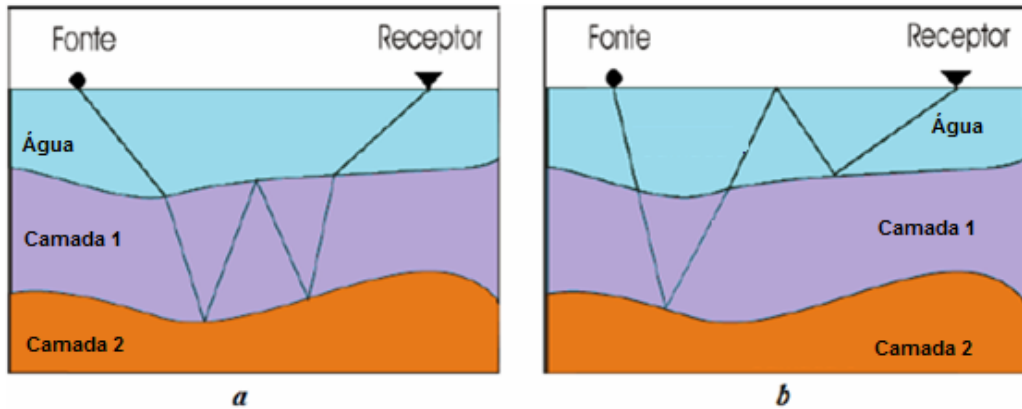
Figura 2.11 - (a) Reflexão múltipla de curto percurso e (b) Reflexão múltipla de longo percurso.



Fonte: Verschuur (2006).

Quanto à simétrica podem ser simétricas ou assimétricas (Figura 2.12). 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.

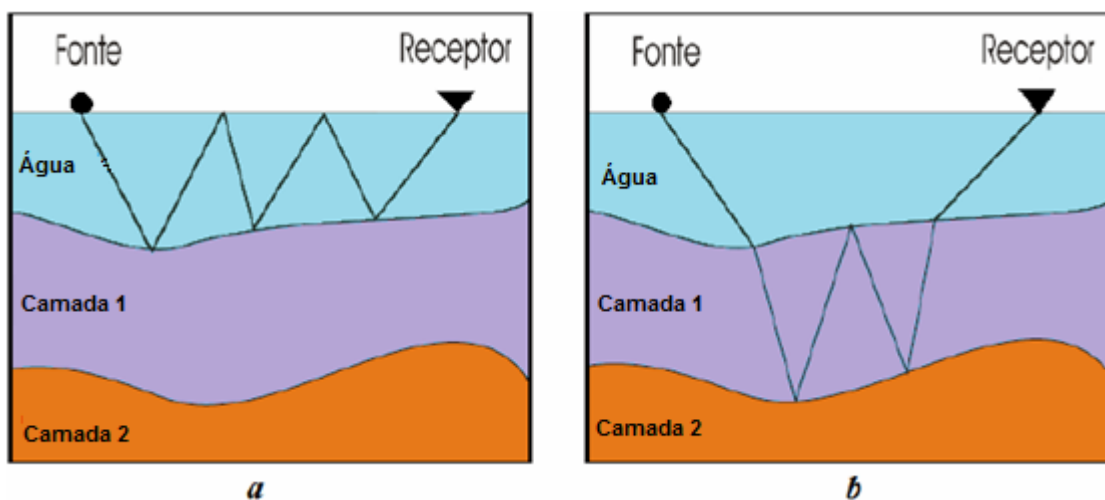
Figura 2.12 - (a) Reflexão múltipla simétrica e (b) Reflexão múltipla assimétrica.



Fonte: Verschuur (2006).

Quanto à origem, diz respeito ao local onde as múltiplas são geradas e estão relacionadas com as diferenças nas impedâncias sísmicas entre as interfaces em subsuperfície. Podem ser classificadas em: múltiplas da superfície livre e as múltiplas internas, como mostrado na Figura 2.13, 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 intercamadas) são as que ocorrem em camadas mais profundas.

Figura 2.13 (a) Múltipla de superfície livre e (b) Múltipla interna (intracamada).



Fonte: Verschuur (2006).

3 FRENTES DE ONDAS

As curvaturas da frente de onda são muito aplicadas para explicar inúmeros problemas na exploração sísmológica, em particular, os problemas de tempo de trânsito inversos (SHAH, 1973; HUBRAL; KREY, 1980).

Curvaturas da frente de onda podem ser utilizadas para o cálculo das velocidades intervalares a partir da velocidade de empilhamento ou velocidade de migração. Essas curvaturas podem ser úteis também para obter as curvaturas dos refletores em profundidade na realização da migração no tempo ou na profundidade.

As leis de curvatura podem também ser utilizadas para calcular soluções aproximadas do espalhamento geométrico de ondas pelo método do raio (CERVENÝ e RAVINDRA, 1971).

3.1 Curvaturas e Leis

As curvaturas da frente de onda podem ser expressas analiticamente em termos do trio dos parâmetros, que são: o ângulo de emergência (β_0), curvatura da frente de onda N (K_N) e a curvatura da frente de onda NIP (K_{NIP}), ao longo do raio normal (HUBRAL e KREY, 1980). O cálculo destas curvaturas em qualquer ponto de um raio arbitrário está intrinsecamente associado às leis de Transmissão e Reflexão, pois a curvatura da frente de onda que se propaga através de um sistema sísmico pode mudar devido à propagação na camada de velocidade constante (Figura 3.1) e devido a transmissões (Figura 3.2a) e reflexões (Figura 3.2b).

Quando uma onda sísmica com amplitude A_0 incide perpendicularmente em uma interface entre duas camadas, parte da energia é transmitida para outra camada (onda transmitida) e parte é refletida de volta para o meio de partida inicial.

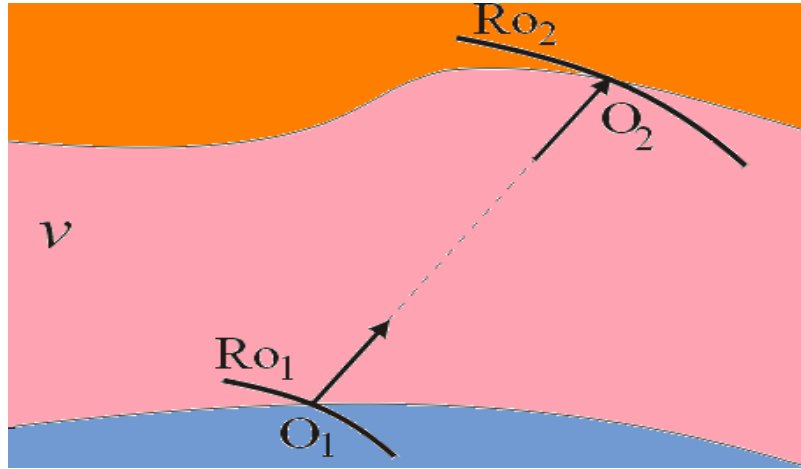
3.1.1 Lei de Propagação

A lei de propagação expressa como o raio de curvatura da frente de onda muda devido à propagação através de camadas homogêneas, representadas por:

$$R_{O_2} = R_{O_1} + v\Delta T \quad (3.1)$$

Conforme a Figura 3.1, R_{O_1} e R_{O_2} são raios de curvatura das frentes de onda nos pontos O_1 e O_2 , v é a velocidade do meio e ΔT é o tempo de trânsito ao longo do raio (reta) que conecta O_1 e O_2

Figura 3.1 - Propagação da frente de onda dentro de uma camada e ao longo do raio normal.



Fonte: Souza (2005).

3.1.2 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. Assim temos:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{v_T \cos^2 \epsilon_I}{v_I \cos^2 \epsilon_T} \frac{1}{R_I} + \frac{1}{\cos^2 \epsilon_T} + \left(\frac{v_T}{v_I} \cos \epsilon_I - \cos \epsilon_T \right) \frac{1}{R_F} \quad (3.2)$$

em que, 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 dos meios de propagação, por a frente de onda se propaga, R_F é o raio de curvatura da interface no ponto de transmissão, α_I e α_T são os ângulos de incidência e transmissão do raio (Figura 3.2a).

O primeiro termo da Equação 3.2 descreve a mudança da frente de onda que resultaria caso a interface fosse plana, já o segundo termo fornece a mudança na curvatura da frente de onda devido somente à curvatura da interface. Isto pode ser interpretado como a contribuição à curvatura da frente de onda transmitida resultante quando uma onda plana incidente chega ao ponto de transmissão.

3.1.3 Lei da reflexão

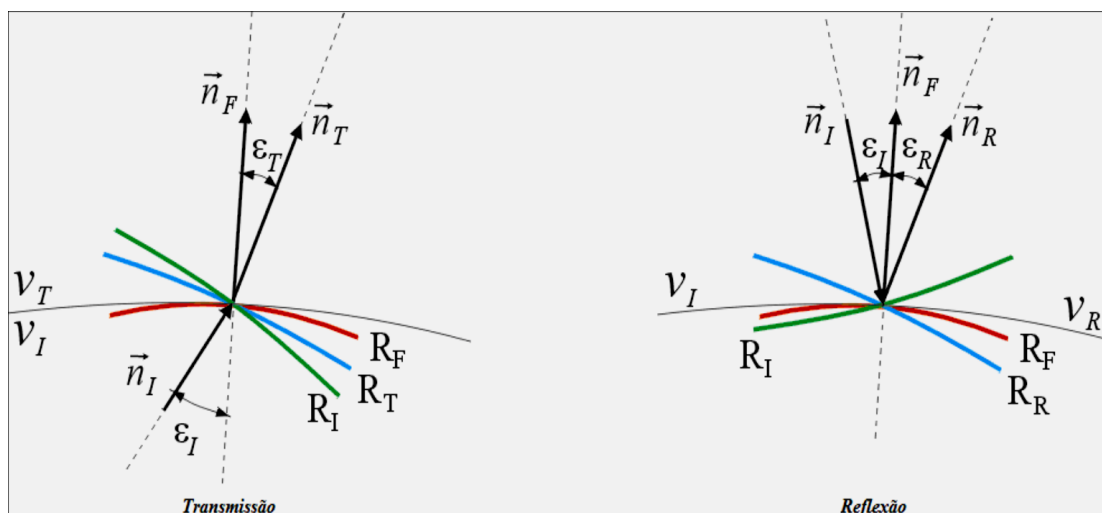
A lei da reflexão descreve a mudança da curvatura da frente de onda pela sua reflexão numa interface e é expressa por:

$$\frac{1}{R_R} = \frac{v_R \cos^2 \epsilon_I}{v_I \cos^2 \epsilon_R} + \frac{1}{\cos^2 \epsilon_R} + \left(\frac{v_R}{v_I} \cos \epsilon_I - \cos \epsilon_R \right) \frac{1}{R_F} \quad (3.3)$$

onde o raio de curvatura da frente de onda refletida R_R pode ser expresso através da soma dos dois termos da lei de transmissão, substituindo v_T e ε_T , respectivamente, por v_R e ε_R .

O primeiro termo da Equação 3.3 descreve a mudança da frente de onda no caso da interface ser plana. Na hipótese de não haver conversão do tipo de onda (isto é, $v_R = v_I$ e consequentemente $\varepsilon_I = \varepsilon_R$), o primeiro termo resultaria na identidade e o segundo termo descreve somente a influência da curvatura da interface.

Figura 3.2 - Propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico: (a) transmissão e (b) Reflexão.



Fonte: Souza (2005).

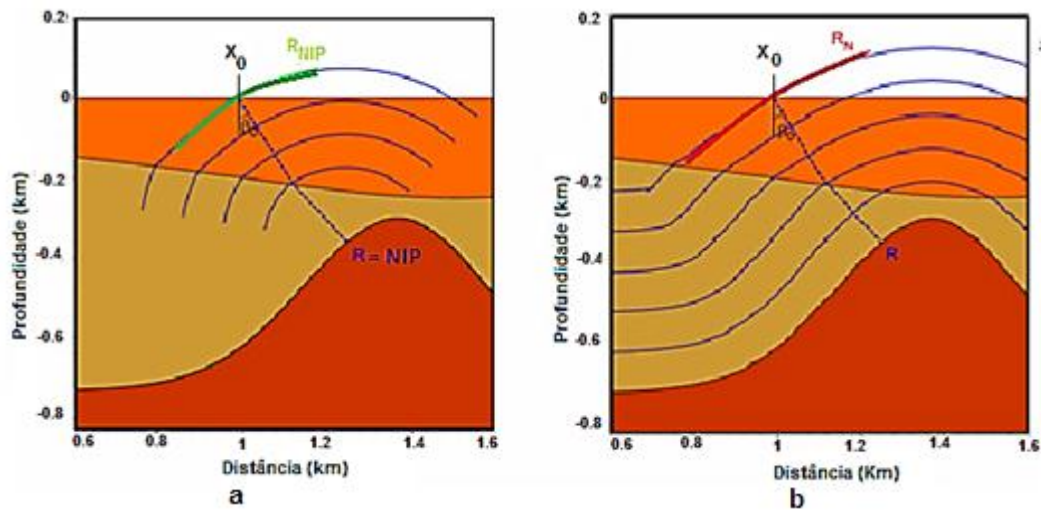
3.2 Parâmetros

Neste tópico são apresentados os princípios teóricos utilizados para calcular o trio de parâmetros, o ângulo de emergência (β_0), curvatura da frente de onda N (K_N) e a curvatura da frente de onda NIP (K_{NIP}) envolvidos no método de empilhamento Sísmico CRS.

Estes conceitos foram introduzidos por Hubral (1983). A onda Normal (N) e a onda Normal-Incidence-Point (NIP) são ondas fictícias clássicas geradas hipoteticamente e relacionadas ao experimento de zero-offset (ZO), que partem do refletor no tempo zero em uma vizinhança do ponto NIP (ponto de incidência do raio normal a partir do ponto central x_0 , sendo o raio normal àquele que tem incidência

normal no refletor) e se propagam para cima com velocidade igual à metade da velocidade do meio (Figura 3.3).

Figura 3.3 – (a) Onda NIP compressional de amplitude unitário na superfície; (b) Onda Normal compressional de amplitude unitária na superfície.



Fonte: Modificada de Jäger et al. (2001).

A partir das ondas hipotéticas e do raio de reflexão normal, torna-se possível obter o trio de parâmetros que são: o ângulo de emergência (β_0), curvatura da frente de onda N (k_N) e a curvatura da frente de onda NIP (k_{NIP}).

É assumido que cada onda NIP coincide em um mesmo ponto NIP na profundidade na interface na qual esta focalizada no tempo zero. Então, as ondas NIP retornam à superfície com idênticas frentes de onda (porém com as mesmas amplitudes) com que foram transmitidas em profundidade.

Da mesma maneira considera-se o mesmo modelo e condições anteriores e cria-se a denominada onda Normal (N) de amplitude unitária em relação a cada refletor. Uma onda Normal propaga-se, por definição, perpendicular a todos os raios normais ao refletor e tocam simultaneamente em todos os pontos no tempo zero. Então a onda N aparece na superfície com a mesma frente de onda com que foi transmitida no modelo. De fato a frente de onda de uma onda Normal pode ser observada como o envelope de todas as ondas NIP sobre um refletor.

3.3 Cálculos do Raio de Curvatura

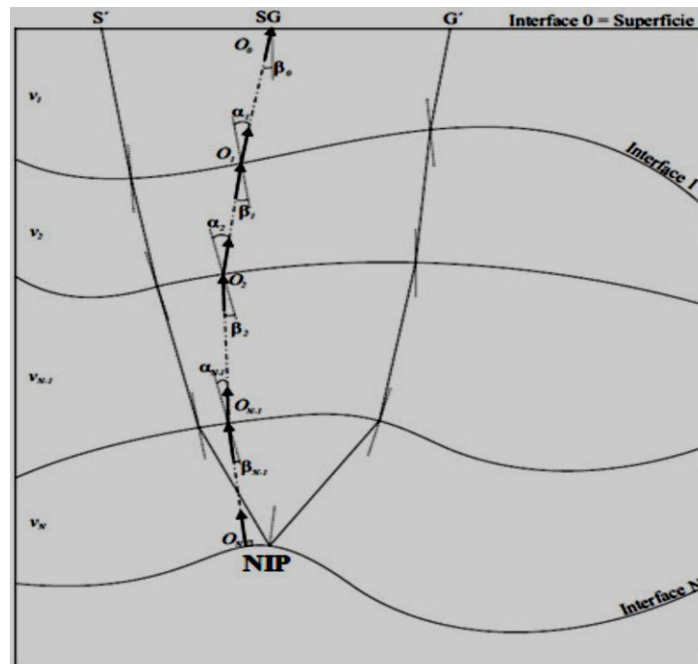
As três leis de curvaturas apresentadas anteriormente são suficientes para o cálculo da curvatura de frente de onda em qualquer ponto ao longo do raio traçado através de um determinado modelo 2-D estratificado. A partir de um ponto com curvatura de frente de onda conhecida podemos aplicar as três leis 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 3.4 o qual foi obtido com base nas leis de propagação, transmissão e reflexão para o caso de n camadas sobre um semi-espaco infinito e meio 2-D, (Figura 3.4).

$$R_{NIP} = \frac{1}{v_0} \sum_{j=0}^{n-1} v_j^2 \Delta t_j \prod_{k=1}^j \left(\frac{\cos^2 \alpha_k}{\cos^2 \beta_k} \right) \quad (3.4)$$

Na Equação 3.4, R_{NIP} é o raio de curvatura da onda NIP emergindo na superfície. Sendo, v_j a velocidade do meio, α_k é o ângulo de reflexão ou transmissão e β_k é o ângulo de incidência.

Figura 3.4 - 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 (2012).

3.3.1 Reflexões Primárias

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 3.4, deve-se utilizar o algoritmo :

- ✓ Primeiro considera-se o raio de incidência normal 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.
- ✓ Ajusta-se $R_{inicial} = 0$ para determinar R_{NIP} ou $R_{inicial} = R_{Fn}$ para determinar R_N . Lembrando que R_{Fn} é o raio de curvatura na n-ésima interface considerando o ponto O_n .
- ✓ Primeira transmissão de:

$$R_{I_{n-1}} = R_{inicial} + v_{n-1} \Delta T_{O_n \rightarrow O_{n-1}} \quad (3.5)$$

Recursão: ($i = n-1 \dots 1$)

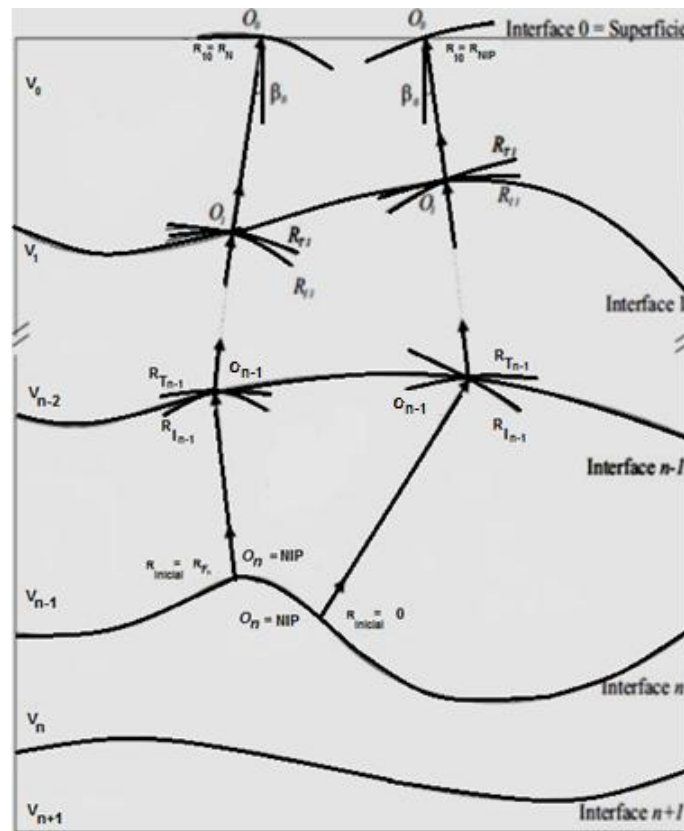
$$\frac{1}{R_{Ti}} = \frac{v_{i-1} \cos^2 \beta_i}{v_i \cos^2 \alpha_i R_{Ii}} + \frac{1}{\cos^2 \alpha_i} \left(\frac{v_{i-1}}{v_i} \cos \beta_i - \cos \alpha_i \right) \frac{1}{R_{Fi}} \quad (3.6)$$

$$R_{I_{n-1}} = R_{Ti} + v_{i-1} \Delta T_{O_1 \rightarrow O_{i-1}} \quad (3.7)$$

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 ZO (Figura 3.5). 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 atribuírmos os parâmetros resultantes para os pontos P_0 na seção ZO teremos os parâmetros para todos os eventos de reflexões primárias associados aos pontos P_0 .

Figura 3.5 - Eventos primários, aplicando as leis de propagação e transmissão.



Fonte: Modificado de Cabral (2002).

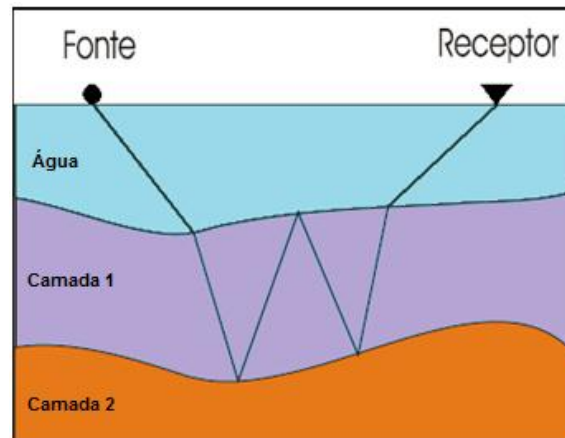
3.3.2 Reflexões múltiplas

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 refletor-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.

Para levar em consideração as reflexões múltiplas devemos colocar uma fonte hipotética no ponto NIP do raio normal múltiplo produzindo assim a 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 3.6), 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).

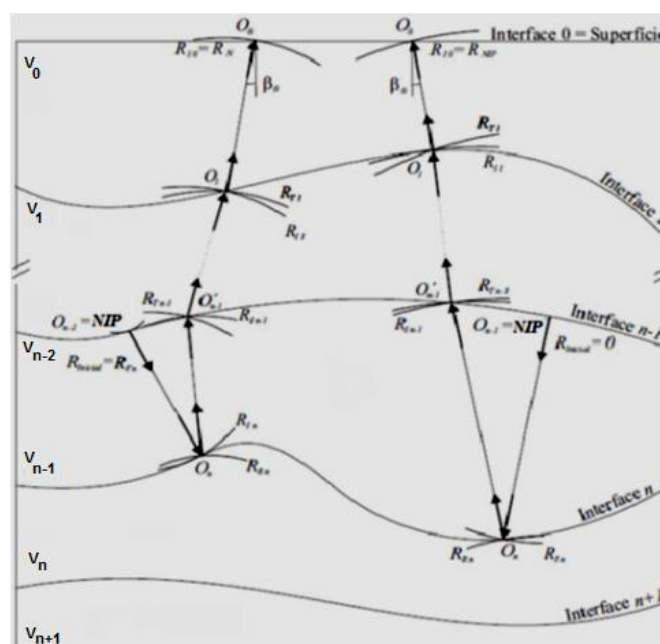
Figura 3.6 - Reflexão múltipla do tipo simétrica.



Fonte: Verschuur (2006).

Neste trabalho consideramos além dos eventos de reflexões primárias, os eventos de reflexões múltiplas simétricas intracamada. Dessa forma tornam-se necessárias algumas considerações (Figura 3.7)

Figura 3.7 - Eventos de reflexões múltiplas aplicando as leis de propagação, reflexão e transmissão



Fonte: Modificado de Cabral (2002).

Para calcular o trio de parâmetros CRS referentes aos eventos de reflexões múltiplas intracamadas é aplicado um princípio recursivo, incrementado de uma parcela referente à reflexão na interface n . Consequentemente o cálculo da primeira transmissão deverá ser efetuado em relação à interface $n - 1$ (Equação 3.8). Deve-se então, antes de iniciar o cálculo das demais transmissões, inserir a Equação 3.9 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 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_{NIP} ou $R_{inicial} = R_{F_n}$ para determinar R_N .
- ✓ Primeira transmissão (neste caso incidindo na interface n)

$$R_{I_n} = R_{inicial} + v_{n-1} \Delta T_{O_{n-1} \rightarrow O_n} \quad (3.8)$$

Reflexão na interface n

$$\frac{1}{R_{R_n}} = \frac{1}{R_{I_n}} + \frac{2}{\cos^2 \alpha_n} \frac{1}{R_{F_n}} \quad (3.9)$$

Dessa forma, ao aplicarmos este algoritmo agora considerando as reflexões múltiplas simétricas, obtemos os parâmetros R_{NIP} , R_N e β_0 correspondentes às ondas N e NIP para cada ponto P_0 na seção ZO a ser simulada.

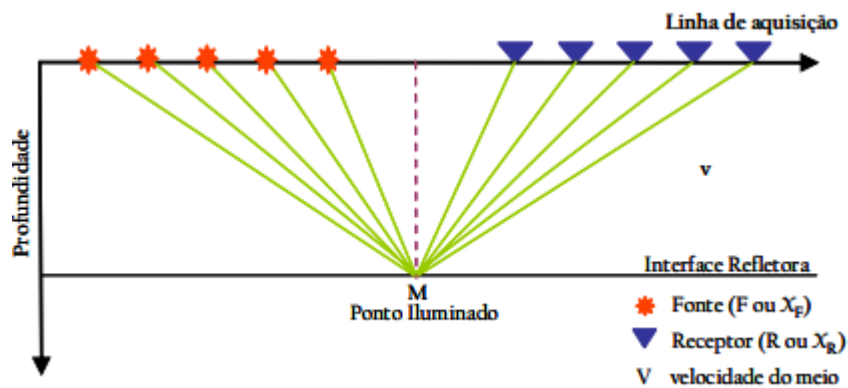
Para cada amostra (x_0, t_0) na seção empilhada, i.e. a seção ZO a ser simulada, temos que determinar os três parâmetros CRS que produzem o melhor ajuste para um determinado evento de reflexão a ser simulado. Isto é feito através da análise de coerência ao longo da aproximação de tempos de trânsito CRS nos dados de cobertura múltipla.

Após a determinação do trio paramétrico do CRS procederemos à aplicação do empilhamento CRS não-hiperbólico. O empilhamento CRS consiste na soma das amplitudes dos traços sísmicos em dados de cobertura múltipla, ao longo da superfície definida pela aproximação de tempos de trânsito CRS não-hiperbólico (Equação 5.1), que melhor se ajusta aos dados. O resultado é assinalado a pontos de uma malha pré-definida na seção ZO. Como resultado tem-se a simulação de uma seção sísmica ZO. Isto significa que para cada ponto da seção ZO deve-se estimar o trio de parâmetros ótimos que produz a máxima coerência entre os eventos de reflexão sísmica.

4 MÉTODO CMP

O método de empilhamento ponto médio comum (CMP - common midpoint) é um método de imageamento no domínio do tempo para a simulação de seções de afastamento nulo (ZO - zero offset) a partir de dados sísmicos com múltipla cobertura (Figura 4.1). Este método utiliza como único parâmetro, as velocidades de empilhamento que são determinadas pelo processo iterativo de análise de velocidades realizada nos sismogramas de família CMP. Após serem aplicadas as correções dinâmicas NMO (normal-moveout) e DMO (dip-moveout), os traços sísmicos dos sismogramas de família CMP são somados resultando num único traço por sismograma de família CMP considerado como o equivalente a um traço com fonte-receptor coincidente ou de afastamento nulo (ZO).

Figura 4.1 - Esquema da configuração CMP, para um refletor horizontal.



Fonte: Fonte: Adaptado de Yilmaz (1987).

No empilhamento CMP, cada família de traços CMP é transformada num único traço que é considerado como o equivalente ao traço que seria obtido com a fonte e o receptor no ponto médio da seção CMP, resultando assim, num conjunto de traços que conformam a seção afastamento nulo (ZO), onde somente os eventos de reflexão correspondentes aos refletores horizontais (na escala de um sismograma de família CMP) correspondem a um mesmo ponto de reflexão. Assim, as velocidades pré-computadas são repassadas a uma próxima etapa denominada correção NMO. Posteriormente, é realizado o empilhamento com o objetivo de gerar uma seção de afastamento nulo e a migração com a finalidade de posicionar corretamente os refletores sísmicos.

A análise de velocidade é uma etapa diretamente ligada ao êxito do processamento sísmico, uma vez que as qualidades da seção sísmica empilhada e de outros processos como a migração dependem do grau de precisão alcançado na determinação das velocidades das camadas em subsuperfície. Esta etapa consiste de um tratamento aplicado aos dados sísmicos com o objetivo de encontrar as velocidades mais apropriadas para a correção de NMO (Normal moveout).

A velocidade que horizontaliza as hipérboles (Velocidade de empilhamento) não representa a velocidade real da camada acima do refletor em consideração, denominada velocidade RMS. Vale salientar que existe uma diferença entre a velocidade de empilhamento V_{stack} e a velocidade RMS. Para camadas horizontais e o offsets curtos a velocidade de empilhamento e a velocidade RMS são similares, entretanto, para eventos de reflexão com offsets longos, as duas velocidades não são iguais, mas a velocidade de empilhamento é igual à velocidade que resulta na melhor horizontalização da reflexão.

As reflexões com maiores afastamentos fonte-receptor sofrem um atraso significativo nos tempos de chegada, o qual deve ser corrigido. Essa correção é realizada na tentativa de que cada reflexão encontre coerência traço a traço, ou seja, horizontalizem-se (Figura 4.2). Isso só é possível quando a velocidade inerente ao grupo de traços CDP é conhecida.

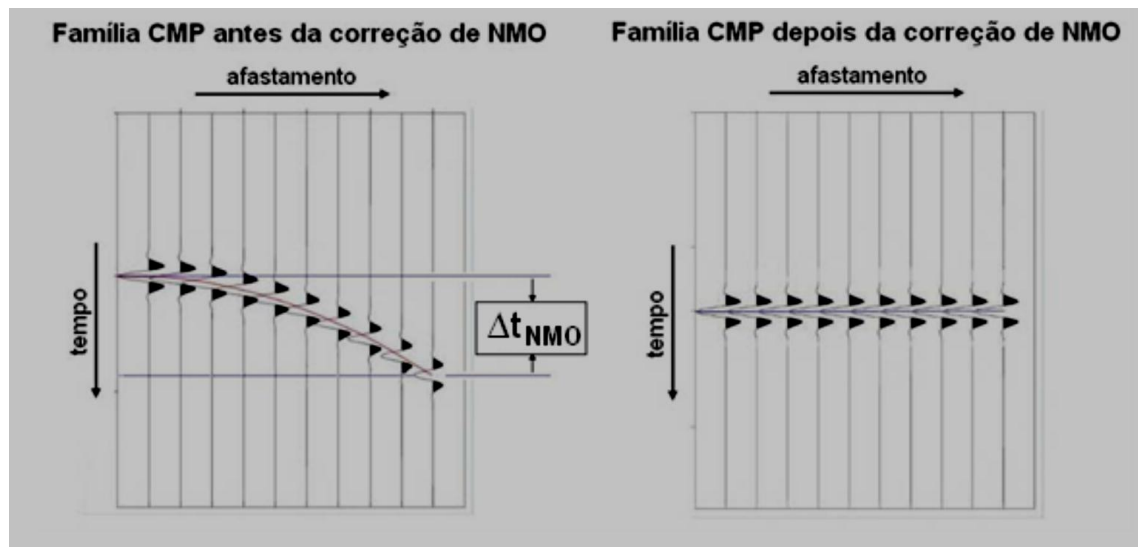
Admitindo-se um modelo composto por refletores planos e horizontais, a correção de NMO é calculada pela equação:

$$\Delta t = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{(V_{stack})^2}} \quad (4.1)$$

$$\Delta t_{NMO} = t(x) - t_0, \text{ onde } t(x) = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{(V_{stack})^2}} - t_0 \quad (4.2)$$

onde, x representa o afastamento fonte-receptor, $t(x)$ é o tempo de reflexão, t_0 corresponde ao tempo duplo de trânsito na posição $x = 0$ (ápice da hipérbole) e V_{stack} é a velocidade de empilhamento estimada durante a análise de velocidade.

Figura 4.2- Desenho esquemático da aplicação da correção NMO.



Fonte: Adaptado de Yilmaz (1987).

Geralmente, a análise de velocidade é executada diversas vezes dentro de um fluxograma de processamento, combinadas a outras etapas, com o objetivo de garantir um refinamento maior das informações.

5 MÉTODO CRS NÃO-HIPERBÓLICO

O método CRS (Superfície de Reflexão Comum) simula seções de zero offset. Trata-se de um método recente de imageamento que se destaca por ser independente do macro-modelo de velocidades, o que não ocorre nos métodos tradicionais Comom-midpoint (CMP). Três parâmetros (que são: ângulo de emergência (β_0), raio de curvatura (R_N) e o raio de curvatura (R_{NIP}), e obtidos através das ondas fictícias chamadas onda Ponto de Incidência Normal (PIN) e onda Normal (N)), cinemáticos das frentes de ondas hipotéticas e a velocidade próxima a superfície definem a superfície de empilhamento CRS, Garabito Callapino et al (2005).

O método CRS convencional é calculado, diretamente sobre os dados multicobertura, a partir da fórmula hiperbólica de tempo de trânsito obtida através da expansão de segunda-ordem em série de Taylor, em torno de um raio de referência, (TYGEL e SANTOS 2007). No entanto ele perde sua precisão em grandes deslocamentos ou grandes separações ponto médio, Fomel e Kazinnik (2012).

Com intuito de aprimorar o método CRS Fomel e Kazinnik (2012) propuseram uma nova aproximação não-hiperbólica. Antes deles essa ideia foi proposta pela primeira vez por Moser e Landa (2009) e Moser (2010), no entanto, estas primeiras publicações não obtiveram resultados plausíveis. Já Fomel e Kazinnik (2012), apresentaram trabalhos satisfatórios, proporem uma aproximação que decorre de uma equação analítica para a reflexão de tempo trânsito de um refletor hiperbólico (segundos os autores, a utilizaram de refletor hiperbólico, deve-se pela propriedade especial deste refletor, onde reduz um refletor plano ou um ponto difrator com uma escolha especial de parâmetros, $z_0 = 0$ ou $\alpha = \frac{\pi}{2}$, ao analisarem a precisão da aproximação não-hiperbólico mostraram que esta, pode prolongar significativamente a faixa de precisão do CRS, enquanto utilizando essencialmente o mesmo conjunto de parâmetros do convencional CRS e uma aproximação multifocal pode ser ainda mais precisa, mas usa um conjunto diferente de parâmetros, o que torna mais difícil de estendê-lo para 3D.

5.1 Aproximações dos Tempos de Trânsito

Os tempos de trânsito dos raios na vizinhança (paraxial) do raio normal (central) fixo podem ser descritos por um determinado número de parâmetros os quais se referem somente ao raio central.

Independentemente de qualquer configuração sísmica, as aproximações são corretas até primeira ordem das distâncias entre os raios paraxial e central, entre o ponto inicial e o ponto final correspondente. As aproximações do tempo de trânsito, diretamente obtidas da Teoria do Raio Paraxial, são as expansões parabólica e hiperbólica (SCHLEICHER et al.,1993).

Se o raio de afastamento-nulo ($S = G$) é escolhido como raio central e sendo a propagação em um meio 2-D, temos que os tempos de trânsito parabólico e hiperbólico podem ser expressos através de três parâmetros simples. Supõe-se ainda que a velocidade do meio na vizinhança do ponto central é constante e conhecida. Os três parâmetros (Hubral,1983):

$[\beta_0]$ O ângulo de emergência do raio central em relação à direção normal à superfície da terra;

$[k_{NIP}]$ A curvatura da frente de onda ponto de incidência normal, onda NIP;

$[k_N]$ A curvatura da frente de onda normal, onda N.

5.1.1 Tempos de Trânsito CRS Não-Hiperbólico

O método de empilhamento sísmico CRS permite simular seções sísmicas ZO a partir de dados sísmicos de cobertura múltipla, independente do macro-modelo de velocidades.

A aproximação de tempos de trânsito não-hiperbólica proposta por Fomel e Kazinnik (2012) para o método CRS é expressa por:

$$t_{CRS,NH}^2(x_m, h) = \frac{1}{2} \left[t_0 + \frac{2 \sin \beta_0}{v_0} x_m \right]^2 + \left[\frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{NIP}} + \frac{2 \sin^2 \beta_0}{v_0^2} - \frac{t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} \right] h + \frac{t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} + \sqrt{\frac{F * G}{2}} \quad (5.1)$$

sendo :

$$F = \left[\left(t_0 + \frac{2\text{sen}\beta_0}{v_0} (x_m - h) \right)^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} (x_m - h)^2 \right],$$

$$G = \left[\left(t_0 + \frac{2\text{sen}\beta_0}{v_0} (x_m + h) \right)^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} (x_m + h)^2 \right]$$

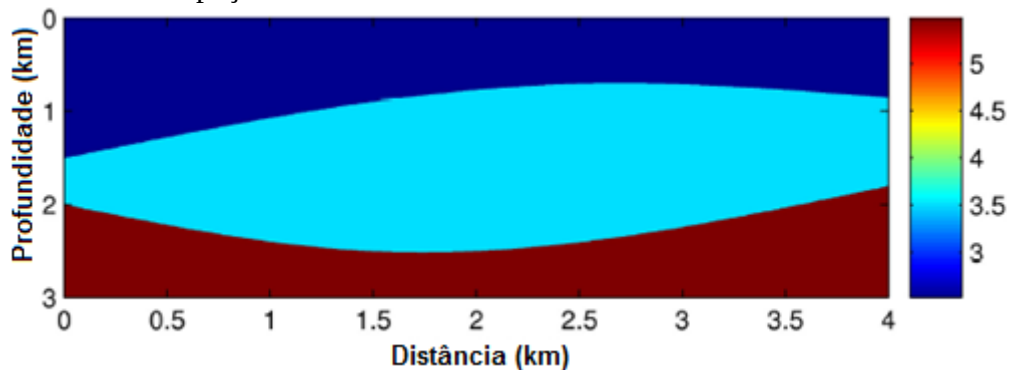
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a finalidade de testar o desempenho do método de empilhamento sísmico CRS não-hiperbólico em relação ao seu potencial e compara-lo com o método convencional CMP, foi considerado um modelo sintético e simulados eventos de reflexões primárias e múltiplas do tipo simétricas, cujo afastamento fonte-receptor é nulo (ZO) usando a aproximação de tempos de trânsito Common-Reflection-Surface (CRS) não-hiperbólica, propostas por Fomel e Kazinink (2012).

6.1 Modelo

O modelo 2-D considerado neste trabalho, está constituído por duas camadas homogêneas sob um semi-espço 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-espço.

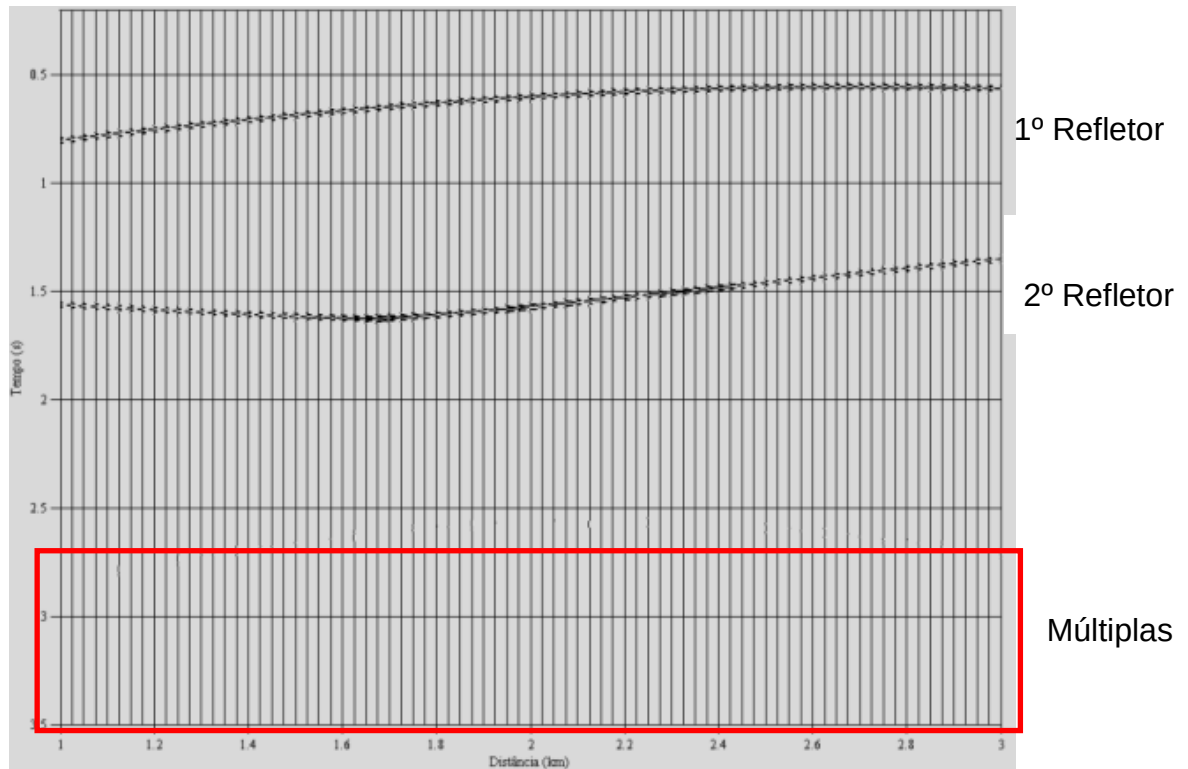


Baseando-se neste modelo foi gerado um conjunto de dados sintéticos de reflexão de cobertura múltipla utilizando o algoritmo de traçamento de raio, SEIS88 (Cerveny e Psensik, 1988). Os dados foram gerados utilizando a configuração common-shot (CS) ou de tiro comum. O mínimo e máximo afastamento foram 0,6 km e 2,9 km, respectivamente.

Considerou-se uma fonte tipo Gabor com uma frequência dominante de 50 Hz e um intervalo de amostragem de tempo de 0,002 s. A primeira fonte foi posicionada em $x_s = 0,5$ km e o primeiro geofone em $x_g = 1,1$ km, sendo distribuídos 48 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 zero-offset (ZO) obtida através do traçamento de raio com o software SEIS 88. O retângulo em vermelho destaca as reflexões múltiplas.



Foram simuladas seções ZO a partir dos métodos de empilhamento convencional ou CMP (Figura 6.3) e CRS não-hiperbólico (Figura 6.4). Ao serem comparadas com a seção ZO original (Figura 6.2) percebe-se um melhor desempenho na simulação dos traços ZO por parte do empilhamento CRS não-hiperbólico quando comparado com o empilhamento CMP.

Figura 6.3 - Seção zero-offset (ZO) simulada com empilhamento CMP. O retângulo em vermelho destaca reflexões múltiplas.

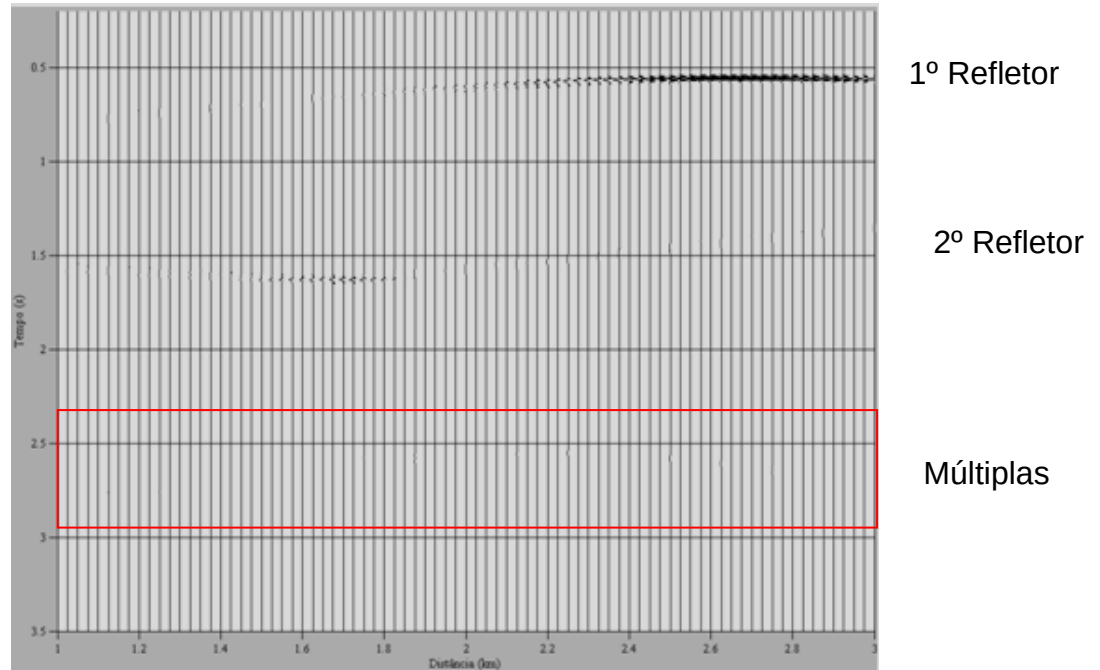
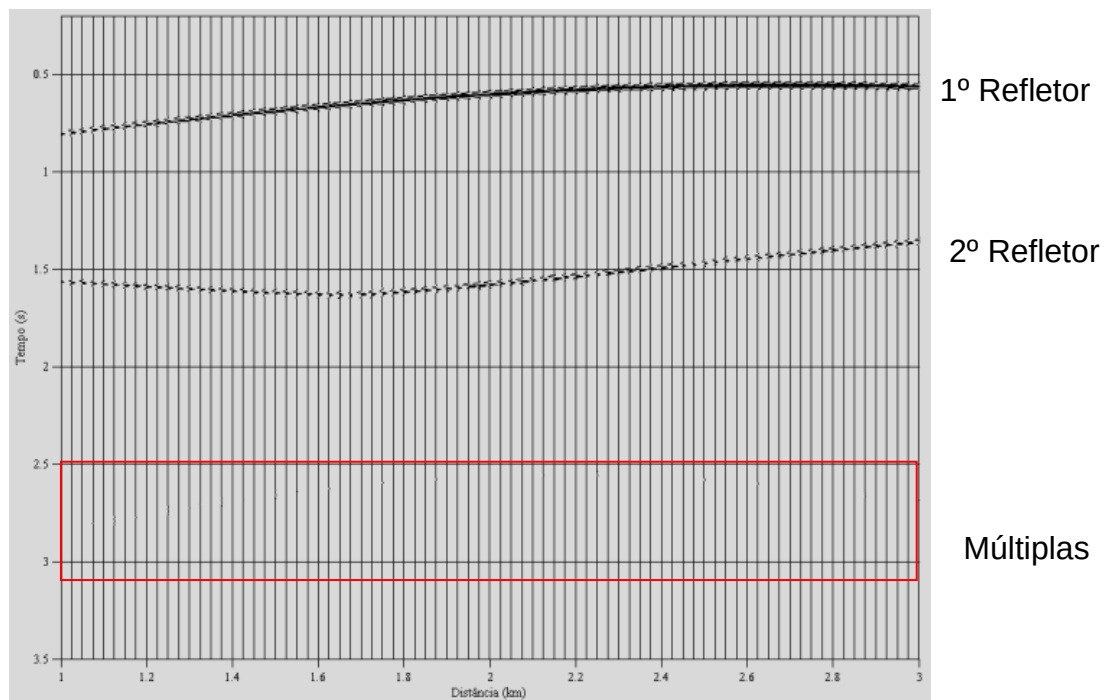


Figura 6.4 – Seção zero-offset (ZO) simulada com empilhamento CRS não-hiperbólico. O retângulo em vermelho destaca as reflexões múltiplas.



Com a finalidade de destacar melhor as múltiplas simétricas simuladas foi aplicado um realce nos traços ZO simulados como podemos observar nas Figuras 6.5 a 6.7, respectivamente.

Figura 6.5 – Trecho destacando as reflexões múltiplas simétricas obtidas pelo traçamento de raios com o software SEIS88.

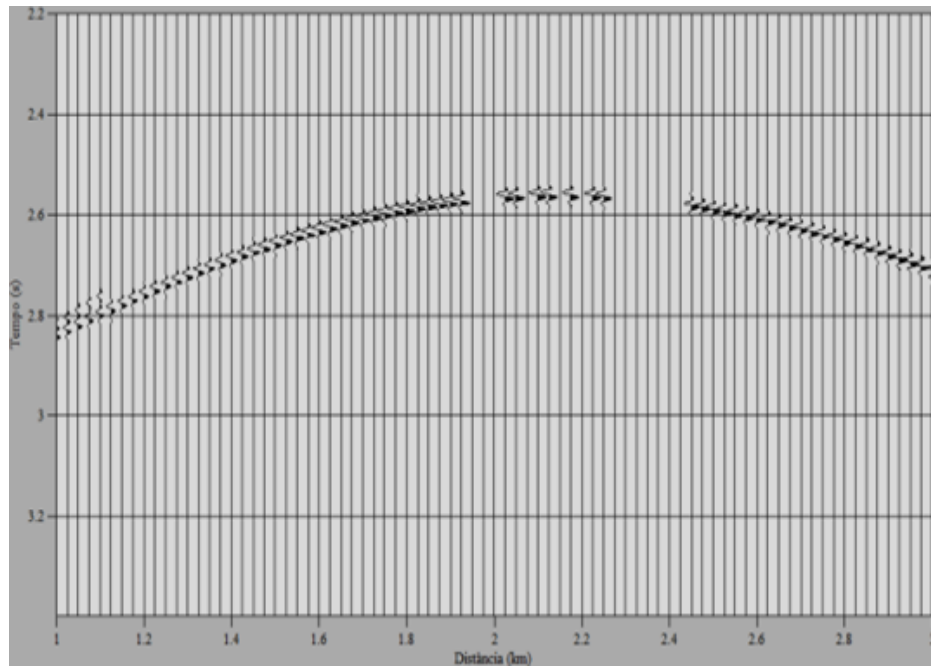


Figura 6.6 - Trecho mostrando as reflexões múltiplas simuladas da seção zero-offset (ZO) simulada com empilhamento CMP.

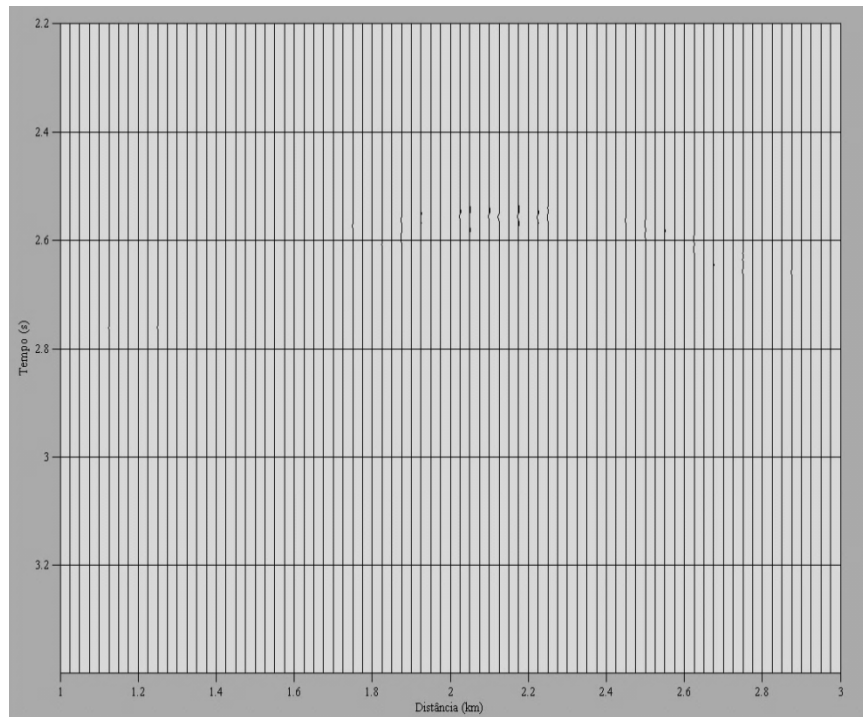
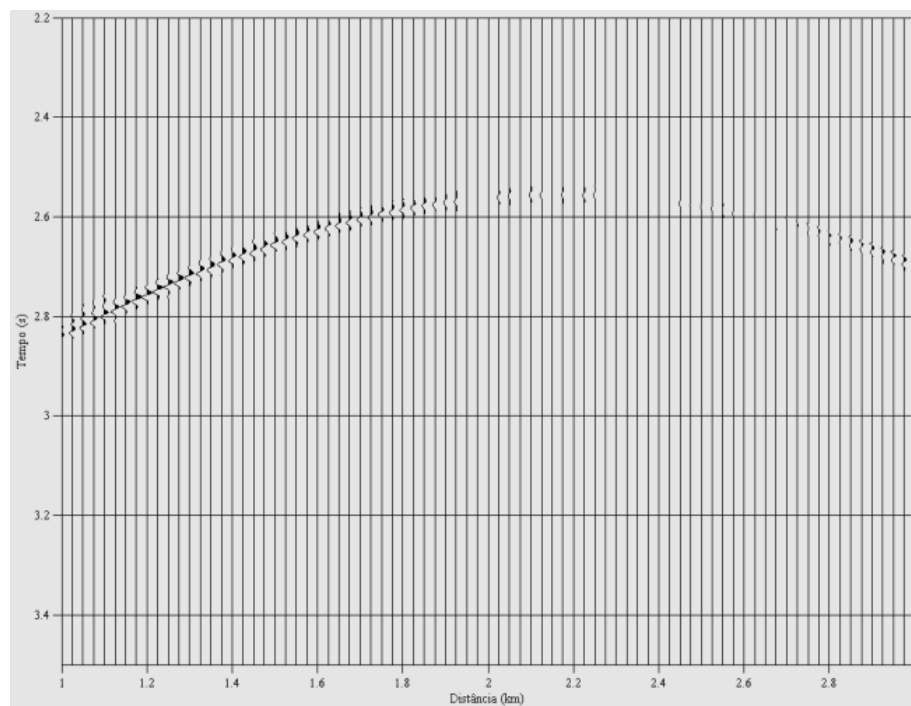
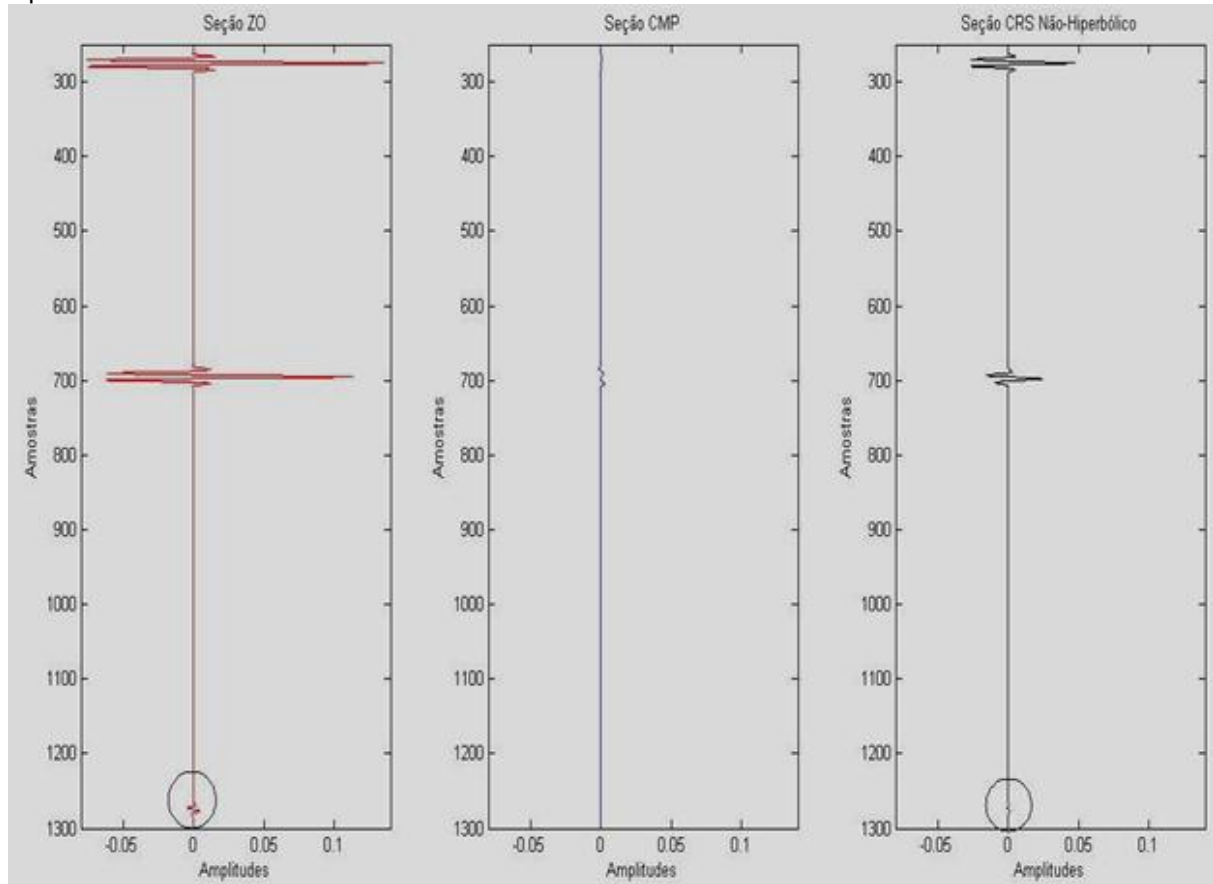


Figura 6.7 - Trecho mostrando as reflexões múltiplas simuladas com a aproximação CRS não-hiperbólica.



Na Figura 6.8 apresenta-se uma comparação entre o traço ZO original correspondente à coordenada do ponto médio, $x_0 = 1,25$ km, e os traços ZO obtidos a partir do empilhamento CRS não-hiperbólico e CMP, respectivamente. O método CRS não-hiperbólico apresentou resultados satisfatórios na simulação da forma do traço ZO quando comparado com o método convencional CMP.

Figura 6.8 – Comparados dos traços sísmicos empilhados correspondentes à posição do raio normal (central) em $x_0 = 1,25$ km da seção ZO, seção empilhada CMP e da seção empilhada CRS não-hiperbólica.



7 CONCLUSÕES

Ao analisarmos os resultados conclui-se:

- ✓ A aproximação de tempos de trânsito CRS não-hiperbólico apresentou um melhor resultado em relação ao empilhamento CMP na simulação de seções sísmicas com afastamento fonte-receptor nulo levando em consideração reflexões primárias e múltiplas simétricas.
- ✓ No modelo usado pode-se notar que a aproximação de tempos de trânsito CRS não-hiperbólica apresenta um bom comportamento para dados com afastamentos fonte-receptor de até 2,9 km.
- ✓ O método CRS não-hiperbólico apresenta-se como uma importante alternativa para simular seções ZO contendo reflexões primárias e múltiplas simétricas para o caso de dados com afastamentos curtos e intermediários, ou seja menores que 4 km.

8 PERSPECTIVAS FUTURAS

- ✓ Aplicar o método CRS não-hiperbólico em dados reais.
- ✓ Considerar modelos com ruídos, mais complexos incluindo diversos tipos de estruturas geológicas complexas (ex. falhas, fraturas, domos, dique, soleiras de diabásio, etc).
- ✓ Considerar modelos 2-D com afastamentos fonte-receptor maiores que 4 km para ver qual é o desempenho da aproximação CRS não-hiperbólica proposta por Fomel e Kazinnik (2012).
- ✓ Estender o cálculo das leis de curvaturas das ondas para o caso de reflexões múltiplas não simétricas.

REFERÊNCIAS

- BERKOVITCH, A.; KEYDAR, S.; LANDA, E.; TRACHTMAN, P. Kinematic Multifocusing in Practice. In: ANNUAL INT. MTG., 68., 1998. *Expanded abstracts*. [S.l.]: Soc.Exp. Geophys, 1998.
- BILOTI, R.; SANTOS, L.; TYGEL, M. *Multiparametric Traveltime Inversion*. Technical Report IMECC-UNICAMP, RP 48/01. 2001.
- BORTFELD, R. Geometrical Ray Theory: Rays and traveltimes in seismic systems (second order approximation of the traveltimes). *Geophysics*, n. 54: p. 342-349, 1989.
- CABRAL, R. *Simulação de reflexões múltiplas usando o método de empilhamento sísmico Superfície de Reflexão Comum*. 2002. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2002.
- CARDOSO, M. *Imageamento de refletores sísmicos usando o operador de Empilhamento Superfície de Reflexão Comum (CRS) ZO 2-D de 4ª ordem*. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2008.
- CHIRA OLIVA, P. *Imageamento Multifocos de Refletores Sísmicos*. 2000. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2000.
- CHIRA-OLIVA, P., CRUZ, J. C. R., CARDOSO, M. *Fourth order CRS stack: synthetic examples*. Germany: WIT Consortium, 2008. (WIT report 2008).
- CHIRA OLIVA, P.; GARABITO CALLAPINO, G.; CRUZ, J. C. R. Fourth Order CRS Stacking Method: Examples. In: EAGE CONFERENCE & EXHIBITION INCORPORATING SPE EUROPEC, 72., 2010, Barcelona. *Abstracts...* Barcelona: EAGE, 2010.
- CHIRA OLIVA, P., TYGEL, M., HUBRAL, P., SCHLEICHER, J. A fourth-order CRS moveout for reflection or diffraction events: numerical examples. *Journal of Seismic Exploration*, 12:197–219, 2003.
- FOMEL, S., KAZINNIK, R. Non-hyperbolic common reflection surface. *Geophysical Prospecting*, n. 61: p. 21–27, 2012.
- GARABITO CALLAPINO, G., COSTA, M. J. S., Cruz, J. C. R. Verificação do desempenho do empilhamento CRS-2D com operador de quarta ordem em dados reais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 3., 2008, Belém. *Resumo*. Belém: SBGf, 2008.
- GARABITO CALLAPINO, G., MACIEL, R., PORSANI, M. Uma Estratégia de Combinação do De Filtragem Multicanal de Wiener-Levinson com o Método CRS de Empilhamento de Dados para Atenuação de Reflexões Múltiplas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3., 2005. *Resumo*. 2005.

GELCHISNKY, B.; BERKOVITCH, A.; KEYDAR, S. *Multifocusing homeomorphic imaging: Parts I and II: Course Notes*. Special Course on Homeomorphic Imaging, Seeheim, Germany. 1997.

HÖCHT, G., DE BAZELAIRE, E., MAJER, P. AND HUBRAL, P. Seismic and optics: hyperbolae and curvatures. *Journal of Seismic Exploration*, n. 12, p. 261-282, 1999.

HUBRAL, P. *Macro-model independent seismic reflection imaging*. *Journal of Applied Geophysics, Special Issue*, n. 42, p.137–346, 1999.

HUBRAL, P.; KREY, T. *Interval Velocities from Seismic Reflection Time Measurements*. Houston, Texas: Soc. Of Exploration Geophysicists. Western Geophysical Company, 1980.

JÄGER, R., MANN, J., HÖCHT, G. AND HUBRAL, P., 2001. Common Reflection Surface: Image and attributes. *Geophysics*, 66, 97-109.

LANDA, E., B. GUREVICH, S. KEYDAR, P. TRACHTMAN. Application of multifocusing method for subsurface imaging. *Journal of Applied Geophysics*, n. 42, p. 283–300, 1999.

LANDA, E., KEYDAR, S., MOSER, T. J. Multifocusing revisited -Inhomogeneous media and curved interfaces. *Geophysical Prospecting*, 2010.

MANN, J. *Extensions and Applications of the Common Reflection Surface Stack Method*. 2002. Tese (Doutorado) - Universidade de Karlsruhe, Alemanha, 2002.

MANN, J., HEILMANN, Z., DUVECK, E., HERTWECK, T. CRS-stack-based seismic reflection imaging - a real data example. In: MTG.EUR. ASSN. GEOSCI. ENG., 66., 2004. *Extended Abstracts*. 2004. Session P211.

MANN, J., JÄGER, R., MÜLLER, T., HÖCHT, G., HUBRAL, P. Common-reflection-surface stack - a real data example. *J. Appl. Geoph.*, v. 42, n. 3, 4, p. 301–318, 1999.

MÜLLER, T. *The common reflection surface stack method: Seismic imaging without explicit knowledge of velocity model*. 1999. Thesis (Ph. D) - Karlsruhe University, Germany, 1999.

SANTOS, I.T. *Atenuação de Múltiplas Relacionadas à Superfície Livre em um Dado Marinho 2D*. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Instituto de Geociências, UFPA, Belém, 2012.

SCHLEICHER, J., TYGEL, M., HUBRAL, P. Parabolic and hyperbolic paraxial two points traveltimes in 3D media. *Geophysical Prospecting*, n. 41, p. 495-513, 1993.

SHAH, P. M. Use of curvature to relate seismic data with subsurface parameters. *Geophysics*, v. 38, n. 5, p. 812-825, 1973.

SILVA, O.P. *Imageamento Sísmico de Reflexões Primárias e/ou Múltiplas Usando a Aproximação de Tempos de Trânsito CRS de 4ª ordem*. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Instituto de Geociências, UFPA, Belém, 2012.

Tecno Petro BR. *blog direcionado para essa nova janela do mercado que são os Tecnólogos, mais especificamente para os Tecnólogos em Petróleo e Gás*. 1 de novembro, 2008. Disponível em: <<http://tecnopetrobr.blogspot.com.br/2008/11>>. Acesso em: 20 jan. 2014.

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.; MUELLER, T.; HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J. Eigenwave based multiparameter traveltimes expansions. In: ANNUAL MEETING OF SEG, 67., 1997. *Expanded abstracts*. 1997.

VERSCHUUR, D.J. *Seismic multiple removal techniques: past, present and future*. EAGE Publications BV, 2006.

X. NETO, P. *Processamento e Interpretação de Dados 2D e 3D de GPR: Aplicações no Imageamento de Feições Kársticas e Estruturas de Dissolução no Campo de Petróleo de Fazenda*, 2006. Tese (Doutorado) – UFRN, Natal, 2006.

YILMAZ, O. *Seismic data processing*. Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration - SEG, 1987. 526p

YILMAZ , O., *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2001.