



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

FACULDADE DE GEOFÍSICA

**IMAGEAMENTO SÍSMICO DE REFLEXÕES MÚLTIPLAS SIMÉTRICAS
UTILIZANDO O MÉTODO DE EMPILHAMENTO SÍSMICO i-CRS**

CARLOS EDUARDO AMANAJÁS SOARES

BELÉM-PARÁ

2015

CARLOS EDUARDO AMANAJÁS SOARES

IMAGEAMENTO SÍSMICO DE REFLEXÕES MÚLTIPLAS SIMÉTRICAS
UTILIZANDO O EMPILHAMENTO SÍSMICO i-CRS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Andrés Chira Oliva

BELÉM-PARÁ

2015

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Soares, Carlos Eduardo Amanajás, 1989 -

Imageamento sísmico de reflexões múltiplas simétricas utilizando o método de empilhamento sísmico i-CRS / Carlos Eduardo Amanajás Soares. – 2015.

56 f : il.; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Pedro Andrés Chira Oliva

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica, Belém, 2015.

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

CDD 22 ed. 622.1592

CARLOS EDUARDO AMANAJÁS SOARES

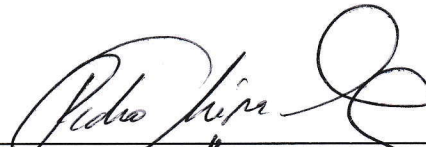
IMAGEAMENTO SÍSMICO DE REFLEXÕES PRIMÁRIAS E MÚLTIPLAS
SIMÉTRICAS UTILIZANDO O MÉTODO DE EMPILHAMENTO SÍSMICO I-CRS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Geofísica do
Instituto de Geociências da Universidade
Federal do Pará, como requisito parcial à
obtenção de grau de Bacharel em
Geofísica.

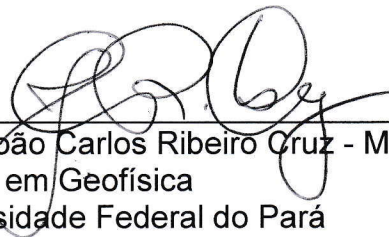
Data da defesa: 29 de outubro de 2015.

Conceito: EXCELENTE

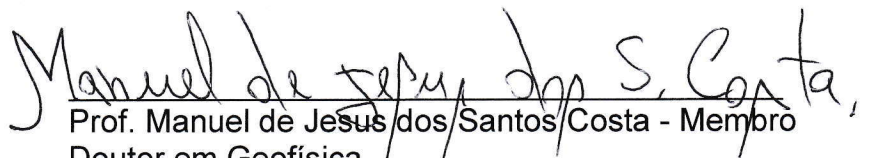
Banca Examinadora:



Prof. Pedro Andrés Chira Oliva - Orientador
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Federal do Pará



Prof. João Carlos Ribeiro Cruz - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará



Prof. Manuel de Jesus dos Santos Costa - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

*Aos meus pais, pela presença e dedicação que me deram
esperança para seguir e a certeza de que não estou sozinho*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me concedido o dom do conhecimento e por ter permitido que tudo isso acontecesse.

Aos meus pais, pelo constante incentivo aos meus estudos.

Ao prof. e orientador Pedro Chira, pela oportunidade e ajuda na elaboração deste trabalho.

Aos professores do Instituto de Geociências, pelos ensinamentos repassados.

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/UFPA) pelo suporte financeiro enquanto bolsista.

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

Às amigas Cássia Morais e Graziela Pinho pelo incentivo e compressão em meus momentos de ausência.

A todos os amigos que fiz ao longo do curso, em especial João Silva, Jéssica Pena, Angela Montalvão, Carol Sena e Jéssica Costa, pelo companheirismo, incentivo e ótimos momentos juntos.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, obrigado.

*“Quer você ache que pode, quer você ache que não pode,
em ambos os casos você está certo”*

(Henry Ford)

RESUMO

A simulação de uma seção sísmica zero-offset (ZO) a partir de dados sísmicos de cobertura múltipla é um método de imageamento padrão amplamente utilizado no processamento sísmico para reduzir a quantidade de dados e aumentar a razão sinal/ruído. Nos últimos anos, surgiram diversos métodos de empilhamento como extensões do método de imageamento convencional, o empilhamento Common-midpoint (CMP), para simular seções ZO. Como exemplo de tais métodos temos o empilhamento Common-Reflection-Surface (CRS), o Multifoco (MF) e o empilhamento CRS não-hiperbólico. A exatidão destes métodos difere e depende não somente do afastamento, mas também da curvatura do refletor. E nenhum destes considera a anisotropia sísmica. Recentemente uma aproximação de tempos de trânsito implícita foi proposta para a simulação de seções ZO para ondas monotípicas em meios anisotrópicos, o chamado implicit Common-Reflection-Surface (i-CRS). Esta nova aproximação depende dos mesmos três parâmetros que o método de empilhamento sísmico CRS. Neste trabalho testamos o desempenho desta aproximação na simulação de seções sísmicas ZO, considerando reflexões primárias e múltiplas simétricas.

Palavras-chave: Empilhamento i-CRS. Reflexões múltiplas simétricas. Seção afastamento-nulo simulada.

ABSTRACT

The simulation of a zero-offset (ZO) seismic section from multi-coverage seismic data is a standard imaging method widely used in seismic processing to reduce the amount of data and increase the signal-to-noise ratio. In the last years, have appeared diverse stacking methods as an extension of the conventional imaging method, the Common-midpoint (CMP) stacking, to simulate ZO sections. Examples of such methods are the well-known Common-Reflection-Surface (CRS) stack, Multifocusing stack and Non-Hyperbolic CRS stack. The accuracy of these methods differs and depends not only on distance but also the reflector curvature and do not consider the seismic anisotropy. Recently an implicit traveltime approximation for monotypic waves in anisotropic media was proposed to simulate ZO sections, called implicit Common-Reflection-Surface (i-CRS). This new approximation depends on the same three parameters as the conventional CRS method. In this work, we tested the performance of this approximation to simulate ZO seismic sections by considering primary and symmetric multiple reflections.

Key words: i-CRS stack. Symmetric multiple reflections. Simulated zero-offset section.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema sísmico de um modelo 2-D. O raio SRG descreve a trajetória de uma reflexão primária.	17
Figura 2 – Representação de um sismograma. O sismograma possui ruído aleatório. ..	18
Figura 3 - Configuração Common-Offset ou Afastamento Comum.	19
Figura 4 - Configuração Zero-Offset ou Afastamento Nulo.	20
Figura 5 - Seção de afastamento nulo idealizada: A seção estrutural da esquerda é imageada pelo sismograma em afastamento nulo à direita.	20
Figura 6 - Configuração Common-Midpoint.	21
Figura 7 - Configuração Common-Midpoint com refletor inclinado.	21
Figura 8 - Configuração Common-Shot ou Fonte Comum.	22
Figura 9 – Esquerda: reflexão múltipla de curto percurso. Direita: reflexão múltipla de longo percurso.	23
Figura 10 – Esquerda: reflexão múltipla simétrica. Direita: reflexão múltipla assimétrica.	24
Figura 11 – Esquerda: múltipla de superfície livre. Direita: múltipla interna (intercamada).	24
Figura 12 – Direita: reflexão fantasma (ghost reflection). Esquerda: múltiplas combinadas.	25
Figura 13 - Propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico.	27
Figura 14 - Transmissão do raio de curvatura da frente de onda através do sistema. nI , nR e nF são os vetores normais às curvaturas KI , KR e KF , respectivamente.	28
Figura 15 - Reflexão do raio de curvatura da frente de onda através de uma interface.	29
Figura 16 – Esquerda: convenção de sinais das curvaturas das frentes de onda; Direita: convenção de sinais das curvaturas das interfaces.	30
Figura 17 – Descrição dos atributos das frentes de onda: (a) ângulo de incidência (β_0), (b) raio de curvatura da onda NIP ($RNIP$) e (c) raio de curvatura da onda N (RN).	31
Figura 18 - $KNIP$ e KN são os raios de curvatura de duas ondas hipotéticas. Ambas as frentes de onda emergem com o ângulo β_0 na superfície de registro.	32
Figura 19 - Trajetória dos raios considerados no processo recursivo para obter R_N e R_{NIP} . Eventos primários, aplicando as leis de propagação e transmissão.	34

Figura 20 - Eventos de reflexões múltiplas, aplicando as leis de propagação, reflexão e transmissão.....	35
Figura 21 - Dados de cobertura múltipla no domínio do ponto médio e meio-afastamento (azul) e o operador CMP (verde) descrevendo uma linha ao longo da direção do meio-afastamento.....	38
Figura 22 - Dados de cobertura múltipla no domínio do ponto médio e meio-afastamento (azul), operador CMP (verde), e o operador CRS (vermelho), descrevendo uma superfície na direção do ponto médio e meio-afastamento.....	39
Figura 23 - Geometria do refletor e (b) aquisição para um refletor esférico. O ponto de reflexão é definido pelo ângulo θ . Os ângulos θ_i são os ângulos de raio e de grupo, respectivamente.....	41
Figura 24 - Modelo 2-D constituído por duas camadas separadas com interfaces curvas e suaves sobre um semi-espaço.....	44
Figura 25 - Seção zero-offset (ZO) original obtida através do traçamento de raios com o software SEIS88. As reflexões multiplas estão destacadas pelo retângulo vermelho.....	45
Figura 26 - Seção de afastamento-nulo (ZO) simulada a partir da aplicação do empilhamento sísmico i-CRS. As reflexões múltiplas simétricas estão destacadas pelo retângulo vermelho.....	45
Figura 27 - Trecho destacado em vermelho da Figura 25, mostrando as reflexões múltiplas simétricas obtidas pelo traçamento de raios com o software SEIS88.....	46
Figura 28 - Trecho destacado em vermelho da figura 6, destacando as reflexões múltiplas simétricas simuladas pelo empilhamento sísmico i-CRS.....	46
Figura 29 - Comparação do traço sísmico da seção original com o traço correspondente ao empilhamento i-CRS. Os traços correspondem a posição $x=1,475$ km na linha sísmica.....	48
Figura 30 - Comparação do traço sísmico referente apenas às reflexões múltiplas da seção original com o traço correspondente ao empilhamento i-CRS. Os traços correspondem a posição $x=1,475$ km na linha sísmica.....	48
Figura 31 - Comparação do traço sísmico da seção original com o traço correspondente ao empilhamento i-CRS. Os traços correspondem a posição $x=1,975$ km na linha sísmica.....	49

- Figura 32 - Comparação do traço sísmico referente apenas às reflexões múltiplas da seção original com o traço correspondente ao empilhamento i-CRS. Os traços correspondem a posição $x=1,975$ km na linha sísmica..... 50
- Figura 33 - Comparação do traço sísmico da seção original com o traço correspondente ao empilhamento i-CRS. Os traços correspondem a posição $x=2,6$ km na linha sísmica..... 51
- Figura 34 - Comparação do traço sísmico referente apenas às reflexões múltiplas da seção original com o traço correspondente ao empilhamento i-CRS. Os traços correspondem a posição $x=2,6$ km na linha sísmica..... 51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
2.1 O método sísmico	16
2.2 Sistema sísmico	16
2.3 Configurações sísmicas	18
2.3.1 Common-Offset (CO) ou Afastamento Comum	19
2.3.2. Common-Midpoint (CMP) ou Ponto Médio Comum	21
2.3.3 Common-Shot (CS) ou Fonte Comum	22
2.4 Reflexões múltiplas	22
2.4.1 Classificação das reflexões múltiplas	22
3 LEIS DE CURVATURAS DE FRENTE DE ONDA	26
3.1 Lei de propagação	26
3.2 Lei de transmissão	27
3.3 Lei de reflexão	28
3.4 Convenção de sinais	29
4 ATRIBUTOS DA FRENTE DE ONDA	31
4.1 Reflexões primárias	33
4.2 Reflexões múltiplas	35
5 O EMPILHAMENTO SÍSMICO	37
5.1 Definição	37
5.2 O empilhamento Common-Midpoint (CMP)	37
5.3 O empilhamento multiparamétrico	38
5.3.1 O empilhamento sísmico Common-Refletion-Surface (CRS)	39
5.3.2 Empilhamento sísmico Common-Reflection-Surface implícito (i-CRS)	40
6 RESULTADOS	44
7 CONCLUSÃO	52
8 PERSPECTIVAS FUTURAS	53
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A simulação de seções zero offset (ZO) ou de afastamento nulo é uma das principais etapas do processamento sísmico. Existem diversos métodos de empilhamento que simulam seções ZO utilizando diversos tipos de aproximações de tempos de trânsito. Dentre os métodos de empilhamento convencionais está o Comomidpoint (CMP) ou Ponto médio comum, que organiza os dados ao longo da curva CMP, onde os dados consistem em pares fonte-receptor localizados simetricamente em relação ao CMP. Para empilhar os dados ao longo da curva 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.

Nas últimas décadas, um variado número de aproximações de tempos de trânsito foram introduzidos como uma extensão do método de empilhamento sísmico CMP, onde se destacam o Polystack (e.g. de BAZELAIRE, 1988), o método Common-Reflection-Surface (CRS, e.g. JÄGER et al., 2001; MÜLLER, 1999; MANN et al., 1999), e método Multifoco (MF, e.g. GELCHINSKY et al, 1999 a,b; CHIRA OLIVA, 2000; GUREVICH et al., 2002; LANDA et al., 2010). A exatidão destes métodos difere e depende não somente do afastamento, mas também da curvatura do refletor. Outro ponto importante é que nenhum destes métodos considera a anisotropia sísmica.

O método Common-Reflection-Surface (CRS), por exemplo, determina por meio de análise de coerência, três parâmetros: um que corresponde ao ângulo de emergência do raio normal (raio central) e os outros dois que são as curvaturas dos eventos sísmicos correspondentes a duas ondas hipotéticas, Normal-Incidence-Point (NIP) e Normal (N) introduzidas por Hubral (1983). O CRS convencional utiliza uma aproximação hiperbólica multiparamétrica para a superfície de tempos de reflexão (SCHLEICHER et al., 1993; TYGEL et al., 1997) também conhecida como aproximação CRS de 2ª ordem ou aproximação CRS convencional. Esta aproximação pode ser explicada a partir da expansão da série de Taylor truncada da aproximação de tempos de trânsito elevada ao quadrado ao redor de um raio de referência ou raio normal. Esta aproximação é sempre exata para pequenos afastamentos (por exemplo menores que 3 km) ou desvios a partir do raio central, porém perde exatidão em grandes afastamentos (maiores que 3 km) ou grandes separações de pontos médios.

Na busca de uma aproximação de tempo de trânsito que melhore a aproximação CRS de 2ª 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 2ª ordem denominando-a como aproximação CRS de 4ª ordem. Esta nova aproximação é descrita com o mesmo número de parâmetros da aproximação anterior.

Chira Oliva et al. (2003) revisaram a aproximação CRS de 4ª ordem e discutiram as primeiras comparações para diversas configurações sísmicas em relação à aproximação CRS de 2ª 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, do que a aproximação CRS convencional. Silva (2012) aplicou a aproximação CRS de 4ª ordem para simular reflexões primárias e múltiplas na configuração sísmica ZO. O autor considerou dados sintéticos e os resultados gerados foram satisfatórios. Chira Oliva et al. (2010) aplicaram satisfatoriamente a aproximação de tempos de trânsito CRS de 4ª ordem em dados reais da bacia de Tacutu (Brasil).

Vanelle et al. (2010) introduziram uma aproximação de tempos de trânsito implícita para ondas monotípicas em meios anisotrópicos. Segundo os autores esta aproximação foi derivada a partir da Lei de Snell considerando uma superfície esférica e isto conduziu a uma expressão implícita para a superfície de tempos de trânsito. Vanelle et al. (2012) aplicaram esta aproximação em meios isotrópicos e anisotrópicos. Os resultados demonstraram uma exatidão superior quando comparados com o método CRS convencional (2ª ordem) para uma grande variedade de formas de refletores, desde refletores planos até formas mais complexas com características de gerar eventos de difrações.

Moreira e Chira Oliva (2014) aplicaram a aproximação de tempo de trânsito do CRS-implícita (i-CRS) em dados sintéticos. O método demonstrou ter um bom desempenho na simulação de refletores bem curvos e além de se apresentar como uma excelente alternativa para simular seções ZO no caso de estruturas com flancos íngremes. Os autores também determinaram que o i-CRS aproxima-se mais da forma do pulso ZO original que as aproximações CRS de 2ª e 4ª ordem, respectivamente.

Sendo assim, um dos principais problemas e a principal motivação deste trabalho é tentar melhorar a qualidade do imageamento sísmico com a aplicação de aproximações de tempos de trânsito que melhor ajustem os dados sísmicos.

Em virtude das vantagens citadas, neste trabalho do método de empilhamento i-CRS, será utilizado este método na simulação de seções ZO considerando eventos de reflexões primárias e múltiplas simétricas. Os resultados, a fim de analisar o desempenho da aproximação i-CRS, serão comparados com a seção ZO verdadeira, respectivamente.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 O método sísmico

O método sísmico de reflexão tem como objetivo fornecer uma imagem da subsuperfície a partir de dados de cobertura múltipla, tanto pelo aumento do sinal das reflexões desejadas, quanto pela atenuação da energia de sinais não desejados, ruídos coerentes e aleatórios (GAMBOA, 2007).

Em uma aquisição sísmica, as ondas sísmicas são criadas por uma fonte controlada e se propagam em subsuperfície. Após serem criadas, algumas ondas voltam à superfície após sofrerem refração ou reflexão nas interfaces geológicas em subsuperfície. Receptores distribuídos ao longo da superfície detectam o movimento do terreno causado pelas ondas que retornam e medem os tempos de chegada a diferentes afastamentos em relação à fonte. Esses tempos de percurso podem ser convertidos em valores de profundidade e, a partir daí a distribuição de interfaces geológicas pode ser sistematicamente mapeada.

A propagação de ondas sísmicas pode ser descrita pela Teoria do Raio usada na ótica geométrica que se baseia em duas condições físicas:

1. A direção do fluxo de energia não muda em meios homogêneos e isotrópicos.
2. A direção do raio muda quando as propriedades do meio mudam.

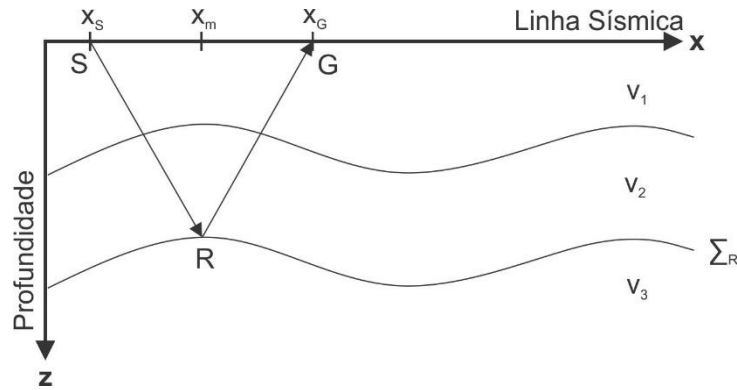
Para a análise do comportamento dos raios sísmicos utilizamos um sistema sísmico que é caracterizado como um meio em subsuperfície constituído por um número arbitrário de camadas isotrópicas homogêneas ou não, separadas por interfaces suaves e curvas (BORTFELD, 1989).

2.2 Sistema sísmico

Para a definição do sistema sísmico, considera-se um sistema de coordenadas cartesianas bidimensionais (modelo 2-D) (x, z) , localizando a linha sísmica (onde

localizam-se as fontes e receptores) no eixo x e a profundidade (onde se dá a propagação das ondas sísmicas) no eixo z , logo abaixo da linha sísmica (Figura 1).

Figura 1 - Sistema sísmico de um modelo 2-D. O raio SRG descreve a trajetória de uma reflexão primária.



Fonte: Modificado de Cardoso (2008).

A trajetória do raio inicia na fonte S , atinge o refletor Σ_R , representado por mudanças nas propriedades elásticas das rochas (interface), no ponto de reflexão R e retorna a superfície no receptor G , onde é gravado durante um certo intervalo de tempo decorrido desde o começo da emissão da fonte, descrevendo a trajetória SRG . O tempo de registro de um sinal sísmico é denominado tempo de trânsito.

Cada camada possui um campo de velocidade $v = v(x, z)$. O par fonte-receptor é dado por (S, G) , respectivamente:

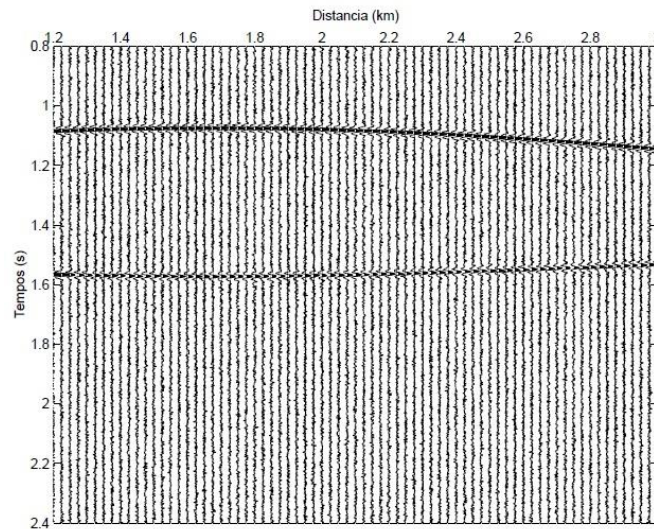
$$x_S = x_S(\xi), \quad x_G = x_G(\xi) \quad (1)$$

onde ξ é um parâmetro que identifica a posição de um par fonte-receptor na superfície. O número total de dados registrados é chamado de dados de cobertura múltipla, pois um mesmo ponto em subsuperfície é registrado várias vezes.

Ao atingir uma interface, uma parte da energia emitida pela fonte é refletida de volta a superfície e é registrada no receptor. Esta fração de energia é determinada pelo contraste de impedância das duas camadas. Os receptores recebem uma série de pulsos refletidos (traços sísmicos), cuja modulação de amplitude é função da distância percorrida e dos coeficientes de reflexão das várias interfaces. Os pulsos chegam

segundo tempos determinados pelas profundidades das interfaces e pelas velocidades de propagação entre elas. A coleção de vários traços sísmicos é denominada de sismograma (Figura 2) e a coleção de vários sismogramas constitui os dados sísmicos.

Figura 2 – Representação de um sismograma. O sismograma possui ruído aleatório.



Fonte: Cabral (2002)

2.3 Configurações sísmicas

Os dados de cobertura múltipla obtidos no registro, podem ser visualizados dentro de um volume (x_m, h, t) , onde x_m é a coordenada do ponto médio, h é o meio afastamento (metade da distância entre a posição da fonte e o receptor para cada par fonte-receptor) e t é o tempo de trânsito. x_m e h são dados por:

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

sendo x_S a coordenada x da fonte e x_G a coordenada x do receptor.

A posição de um par fonte-receptor pode ser especificada por um único parâmetro, segundo a equação (1), no caso (ξ) , para qualquer configuração de medida especificada (SCHLEICHER et al. 1993). Para o caso bidimensional, temos:

$$x_S = x_{(S_0)} + \Gamma_S(\xi - \xi_0), x_G = x_{(G_0)} + \Gamma_G(\xi - \xi_0) \quad (3)$$

sendo $x_{(S_0)}$ e $x_{(G_0)}$ as coordenadas de um par fonte-receptor fixo definido por $(\xi - \xi_0)$. Γ_S e Γ_G são constantes que dependem somente da configuração da medida. Deste modo, os traços sísmicos podem ser gravados em diversas configurações de acordo com o ordenamento fonte-receptor. As principais configurações utilizadas em levantamentos sísmicos 2D, são:

2.3.1 Common-Offset (CO) ou Afastamento Comum

Nesta configuração, os traços possuem a mesma distância fonte-receptor. Os traços são obtidos pelo deslocamento de um único par fonte-receptor com afastamento constante ao longo da linha sísmica (Figura 3). Existe um arranjo especial dentro desta configuração, o chamado Zero Offset (ZO) ou Afastamento nulo, no qual, como o próprio nome diz, o afastamento entre fonte e receptor é igual a 0, ou seja, as coordenadas x_S e x_G coincidem (Figura 4). Esta configuração não pode ser realizada em aquisições sísmicas reais, porém pode ser simulada por meio dos métodos de empilhamento, que serão descritos mais adiante.

Figura 3 - Configuração Common-Offset ou Afastamento Comum.

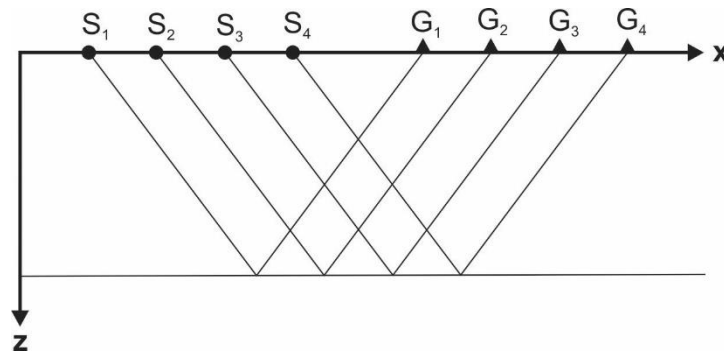
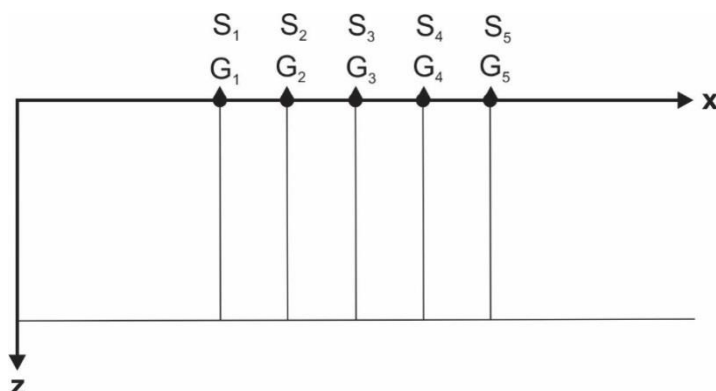
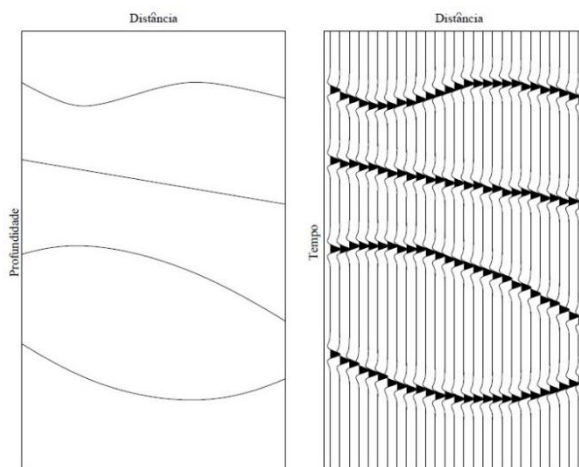


Figura 4 - Configuração Zero-Offset ou Afastamento Nulo.



Imaginemos agora repetir tal experimento com pares de fonte e receptor coincidentes sendo dispostos em uma série de pontos próximos e espaçados regularmente ao longo da superfície. Em cada posição, o receptor grava as ondas refletidas da estrutura subjacente. Plotando os registros em função do tempo e a localização dos receptores (isto é, dos pares fonte-receptor coincidentes), uma imagem da estrutura em subsuperfície pode ser produzida (Figura 5). Esta imagem é conhecida como Seção de Afastamento Nulo (ZO), uma vez que em sua configuração não há separação entre cada par fonte e receptor.

Figura 5 - Seção de afastamento nulo idealizada: A seção estrutural da esquerda é imageada pelo sismograma em afastamento nulo à direita.



Fonte: Gamboa (2007)

2.3.2 Common-Midpoint (CMP) ou Ponto Médio Comum

Configuração onde o ponto médio entre a fonte e o receptor é fixo, aumentando apenas o afastamento para outros pares fonte-receptor. Para o caso de modelos geológicos de multicamadas homogêneas, planas e horizontais, a configuração CMP pode também ser chamada de Common Deep Point (CDP) ou Ponto Comum em Profundidade, pois suas coordenadas coincidem (Figura 6). Quando essas condições do modelo geológico não são satisfeitas, as coordenadas dos pontos CMP e CDP diferem (Figura 7).

Figura 6 - Configuração Common-Midpoint.

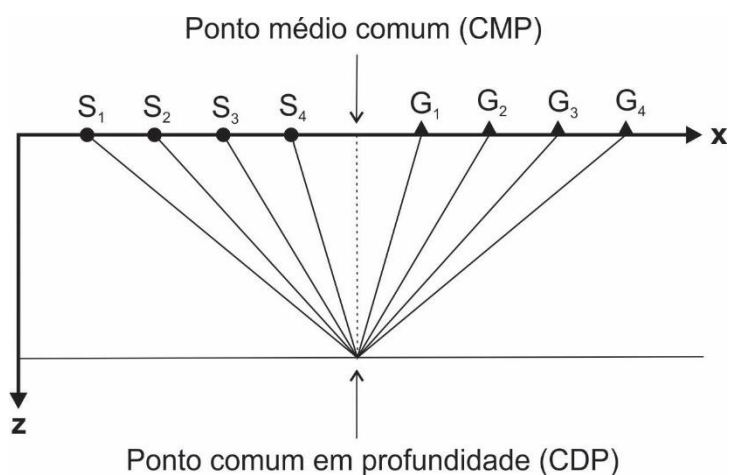
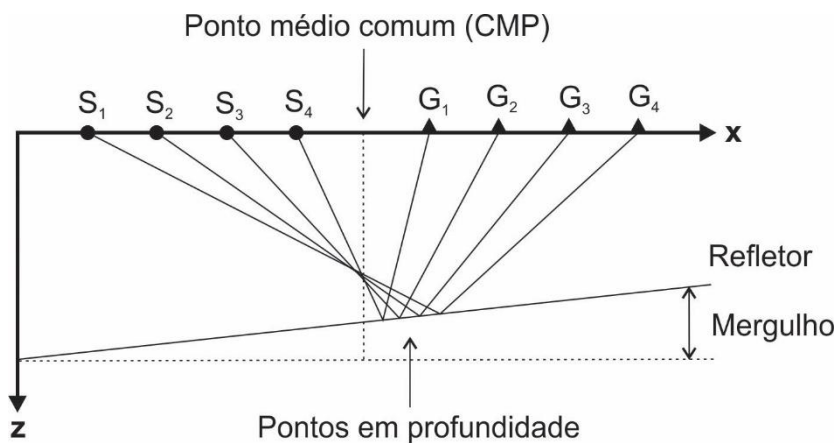


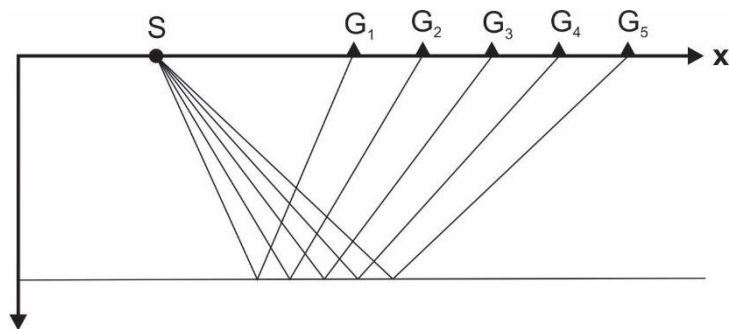
Figura 7 - Configuração Common-Midpoint com refletor inclinado.



2.3.3 Common-Shot (CS) ou Fonte Comum

Nesta configuração, a fonte é fixa e os receptores são distribuídos ao longo da linha sísmica. As seções Common-Shot contêm reflexões dos mesmos refletores na região da subsuperfície (Figura 8). A coleção total dos dados é chamada de dados de cobertura múltipla.

Figura 8 - Configuração Common-Shot ou Fonte Comum.



2.4 Reflexões múltiplas

Reflexões múltiplas são eventos sísmicos que sofreram mais de uma reflexão ascendente dentro de uma certa porção da subsuperfície. A trajetória dos raios das reflexões primárias é repetida pelos raios das reflexões múltiplas total ou parcialmente. Reflexões múltiplas podem se assemelhar às primárias em certas características, tais como: velocidade, amplitude e forma do pulso, dependendo de sua trajetória e do modelo geofísico. As reflexões múltiplas têm como principal característica o tempo de trânsito maior que o das reflexões primárias.

2.4.1 Classificação das reflexões múltiplas

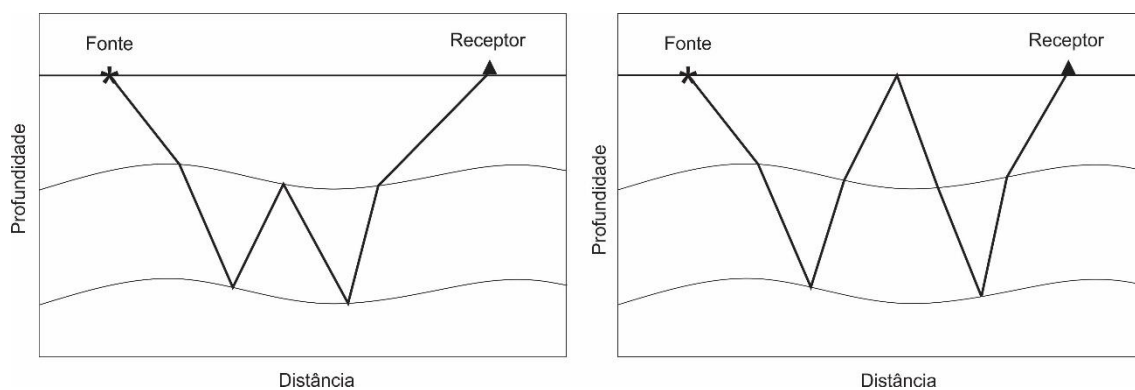
As reflexões múltiplas podem ser classificadas quanto ao tempo de percurso (Figura 9):

1. Múltiplas de curto percurso,

2. Múltiplas de longo percurso.

As múltiplas de curto percurso são associadas as 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 9 – Esquerda: reflexão múltipla de curto percurso. Direita: reflexão múltipla de longo percurso.



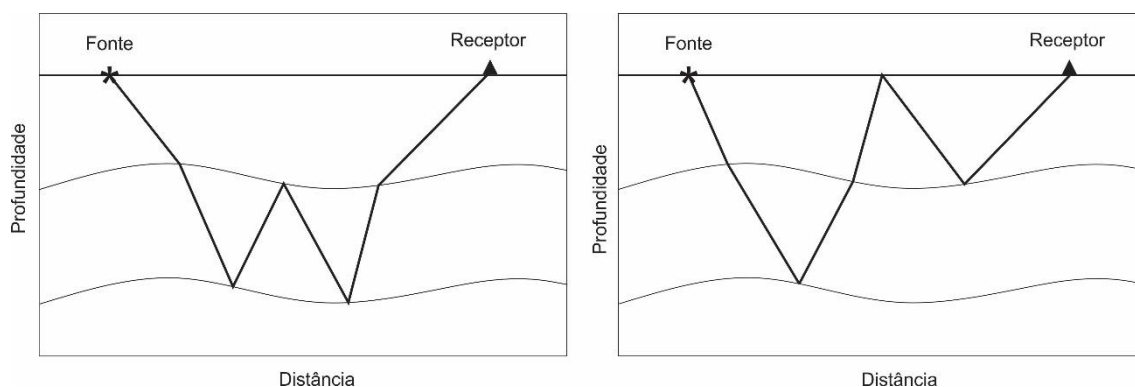
Fonte: Modificado de Souza (2005)

As reflexões múltiplas (Figura 10) também podem ser:

1. Simétricas,
2. Assimétricas.

Uma reflexão múltipla é chamada de simétrica quando seus segmentos de raios elementares refletem e transmitem em trajetórias idênticas de ida e volta. Caso contrário a múltipla é chamada de assimétrica.

Figura 10 – Esquerda: reflexão múltipla simétrica. Direita: reflexão múltipla assimétrica.



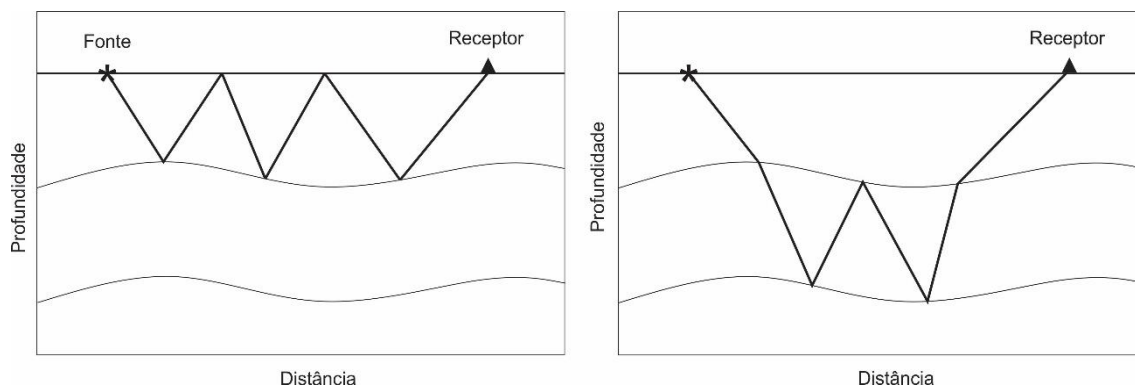
Fonte: Modificado Souza (2005)

Existem também (Figura 11):

1. Múltiplas de superfície livre,
2. Múltiplas internas.

Múltiplas de superfície livre são aquelas que refletem 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 intracamadas) são as que ocorrem em camadas mais profundas.

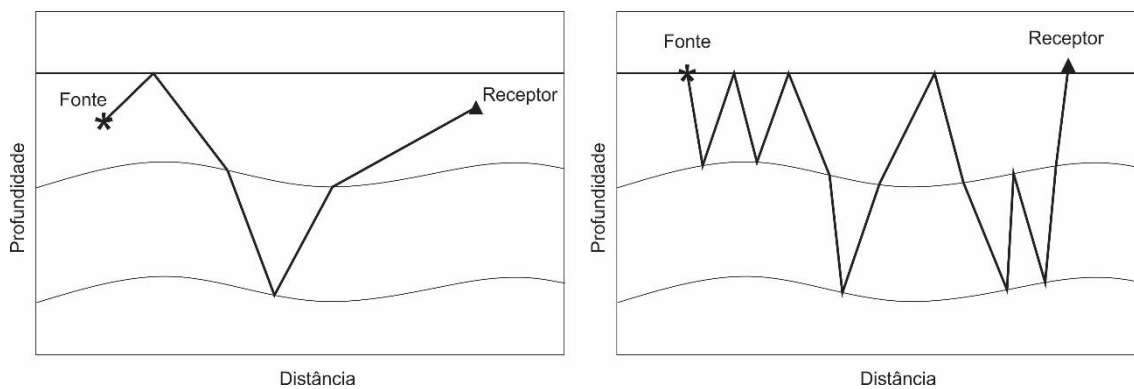
Figura 11 – Esquerda: múltipla de superfície livre. Direita: múltipla interna (intercamada).



Fonte: Modificado Souza (2005)

Existe ainda a reflexão fantasma (ghost reflection) (Figura 12). A reflexão fantasma é uma múltipla própria da geometria dos levantamentos sísmicos onde a fonte e o receptor encontram-se abaixo da superfície. Parte da energia expedita pela fonte é refletida na superfície, gerando reflexões defasadas em curto período de tempo que interferem nas reflexões primárias. Na prática, porém, as reflexões múltiplas ocorrem associadas, daí sua denominação como múltiplas combinadas

Figura 12 – Direita: reflexão fantasma (ghost reflection). Esquerda: múltiplas combinadas.



Fonte: Modificado Souza (2005)

3 LEIS DE CURVATURAS DE FRENTE DE ONDA

As curvaturas de frente de onda são muito utilizadas para explicar inúmeros problemas na exploração sísmológica, como os problemas de tempo de trânsito inversos (SHAH, 1973; HUBRAL; KREY, 1980). Elas podem, por exemplo, ser utilizadas para o cálculo das velocidades intervalares a partir da velocidade de empilhamento ou velocidade de migração. Essas curvaturas podem ser úteis também na obtenção da curvatura dos refletores em profundidade, na realização da migração em tempo ou em profundidade.

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

As curvaturas de frente de onda podem ser expressas analiticamente em termos dos parâmetros ao longo do raio normal (HUBRAL; 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 13), devido a transmissões (Figura 14) e reflexões (Figura 15) nas interfaces.

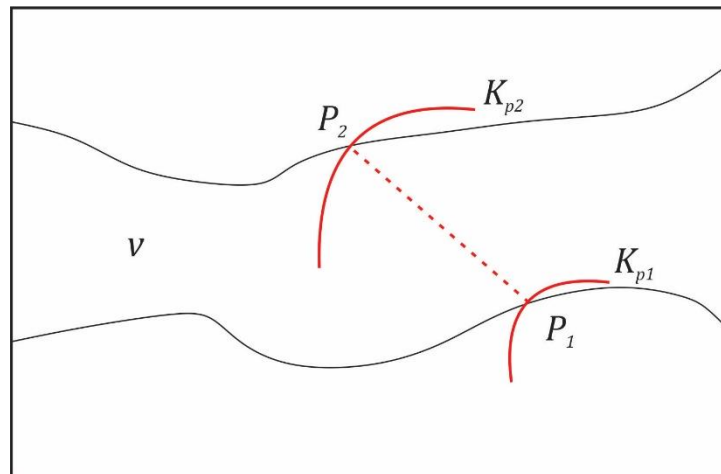
3.1 Lei de propagação

A lei de propagação expressa como o raio de curvatura da frente de onda muda devido à propagação através de camadas homogêneas (HUBRAL; KREY, 1980). É expressa por:

$$K_{P_2} = K_{P_1} + v\Delta T \quad (4)$$

em que, os raios de curvatura das frentes de onda nos pontos P_1 e P_2 são dados por $K_{P_1} = 1/K_{p1}$ e $K_{P_2} = 1/K_{p2}$, respectivamente, v é a velocidade do meio e ΔT é o tempo de trânsito ao longo do raio que liga P_1 e P_2 (Figura 13).

Figura 13 - Propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico.



Fonte: Modificado de Souza (2005)

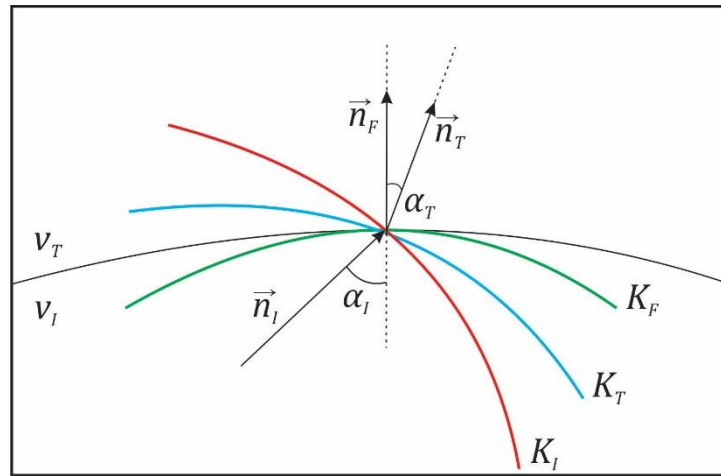
3.2 Lei de transmissão

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 (HUBRAL; KREY, 1980). É expressa por:

$$\frac{1}{K_T} = \frac{v_T \cos^2 \alpha_I}{v_I \cos^2 \alpha_T} \frac{1}{K_I} + \frac{1}{\cos^2 \alpha_T} \left(\frac{v_T}{v_I} \cos \alpha_I - \cos \alpha_T \right) \frac{1}{K_F} \quad (5)$$

em que K_T e K_I são, respectivamente, os raios de curvatura da frente de onda transmitida e incidente, v_T e v_I são as velocidades dos meios de transmissão e incidência, respectivamente, K_F é o raio de curvatura da interface no ponto de transmissão, α_I e α_T são ângulos de incidência e transmissão do raio (Figura 14). O primeiro termo da Equação (5) descreve a mudança da frente de onda que resultaria caso a interface fosse plana e 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.

Figura 14 - Transmissão do raio de curvatura da frente de onda através do sistema. n_I , n_R e n_F são os vetores normais às curvaturas K_I , K_R e K_F , respectivamente.



Fonte: Modificado de Souza (2005)

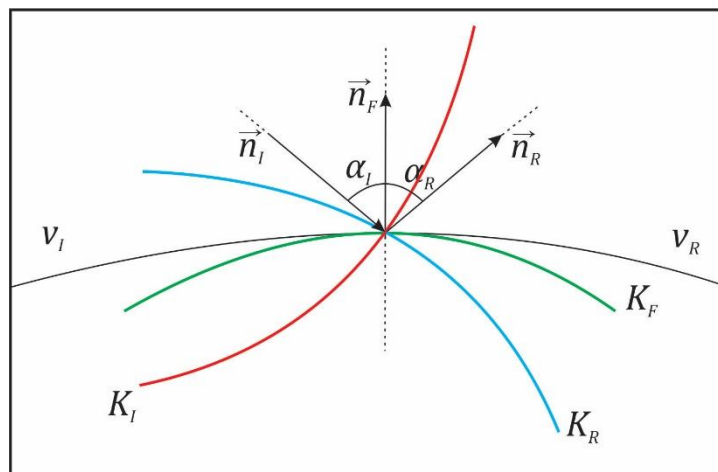
3.3 Lei de reflexão

A lei da reflexão descreve como muda a curvatura da frente de onda pela sua reflexão numa interface (HUBRAL; KREY, 1980). É expressa por:

$$\frac{1}{K_R} = \frac{v_R \cos^2 \alpha_I}{v_I \cos^2 \alpha_R K_I} + \frac{1}{\cos^2 \alpha_I} \left(\frac{v_R}{v_I} \cos \alpha_I - \cos \alpha_R \right) \frac{1}{K_F} \quad (6)$$

onde K_R é o raio de curvatura da frente de onda refletida e v_I e α_I representam a velocidade e o ângulo de saída da onda refletida. Os ângulos são medidos em relação à normal da superfície (Figura 15). Em que o raio de curvatura da frente de onda refletida K_R pode ser expresso através da soma dos dois termos da lei de transmissão, substituindo v_T e α_T por v_R e α_R , respectivamente. O primeiro termo da equação (6) descreve a mudança da frente de onda no caso da interface ser plana. Na hipótese de não haver conversão do tipo de onda ($v_R = v_I$ e conseqüentemente $\alpha_I = \alpha_R$), o primeiro termo resultaria na identidade e o segundo descreve somente a influência da curvatura da interface.

Figura 15 - Reflexão do raio de curvatura da frente de onda através de uma interface.



Fonte: Modificado de Souza (2005)

3.4 Convenção de sinais

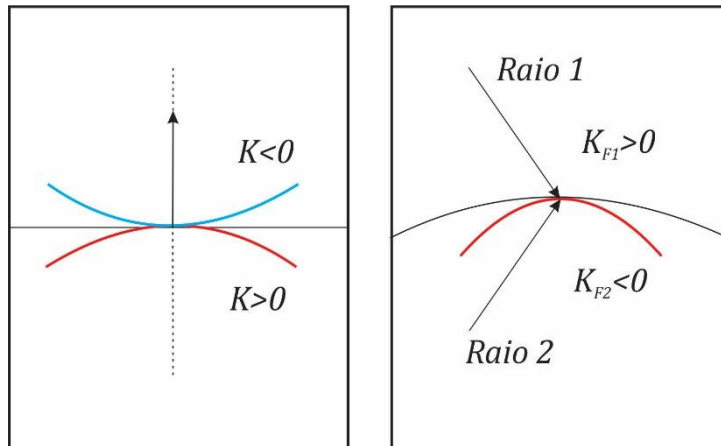
As ondas que se propagam através de um modelo com interfaces suaves e curvas e camadas de velocidades constantes podem ter os raios de curvatura da frente de onda positivos ou negativos.

Segundo Hubral e Krey (1980) a escolha do sinal é uma questão de convenção e é definido da seguinte forma:

- Quando uma frente de onda se apresenta atrás de seu plano tangencial (Figura 16-esquerda), então a curvatura da frente de onda é positiva, caso contrário, a curvatura é negativa.
- A curvatura da interface, K_F , é positiva ($K_{F1} > 0$) se a interface aparece convexa ao raio incidente e negativa ($K_{F2} < 0$) se for côncava.

Baseando-se em Hubral e Krey (1980) e analisando a Figura 10 (b), observa-se que a curvatura da interface é positiva para o raio 1, porém para o raio 2 é negativa.

Figura 16 – Esquerda: convenção de sinais das curvaturas das frentes de onda; Direita: convecção de sinais das curvaturas das interfaces.



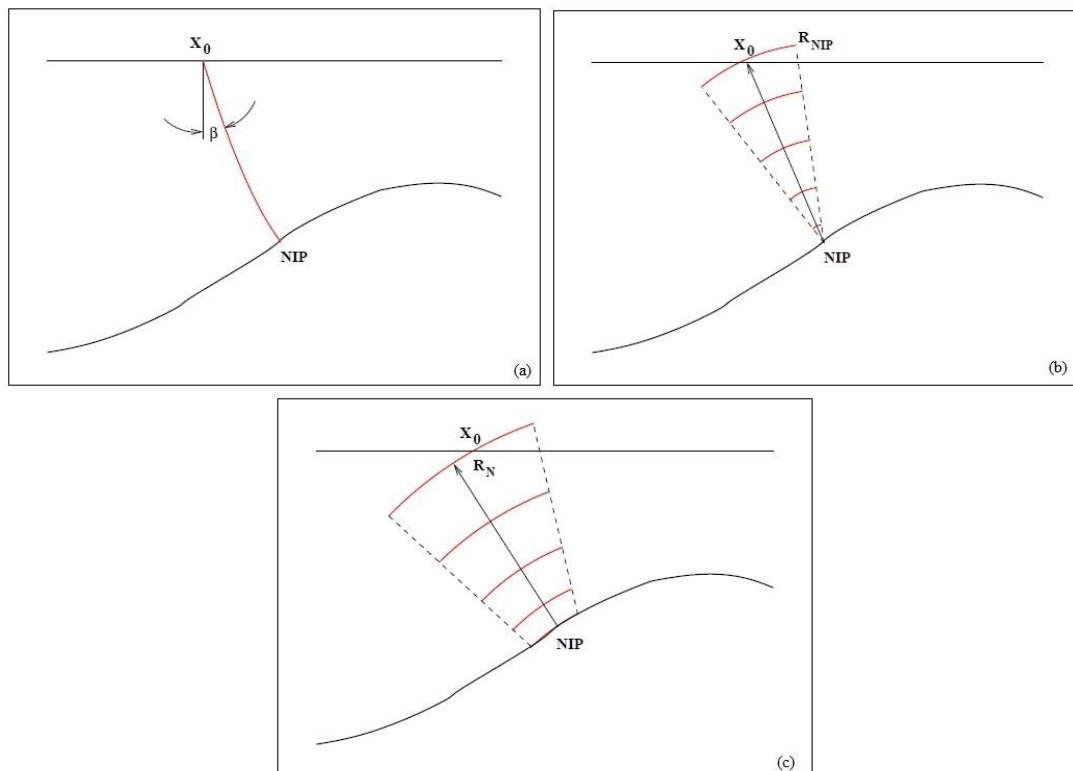
Fonte: Modificado de Souza (2005)

4 ATRIBUTOS DA FRENTE DE ONDA

Os coeficientes das aproximações de tempo de trânsito parabólica, hiperbólica e não-hiperbólica ou atributos da frente de onda fictícias podem ser expressos em termos do ângulo de incidência, β_0 , do raio normal, e dos raios de curvatura R_N e R_{NIP} das chamadas ondas Normal (N) e Normal Incidence Point (NIP), respectivamente (HUBRAL, 1983).

As ondas N e NIP são ondas fictícias que partem do refletor no tempo zero em uma vizinhança do ponto NIP e se propaga para cima com velocidade igual à metade da velocidade do meio. O ponto NIP representa o ponto de incidência do raio normal a partir do ponto central x_0 em superfície. O raio normal é o que tem incidência normal no refletor (Figura-a). A onda N é caracterizada por uma frente de onda que se inicia coincidente com o refletor na vizinhança do ponto NIP (Figura-b). Da mesma forma, a onda NIP é definida como aquela que se inicia como uma fonte pontual no ponto NIP (Figura-c)

Figura 17 – Descrição dos atributos das frentes de onda: (a) ângulo de incidência (β_0), (b) raio de curvatura da onda NIP (R_{NIP}) e (c) raio de curvatura da onda N (R_N)



Fonte: Gamboa, 2007

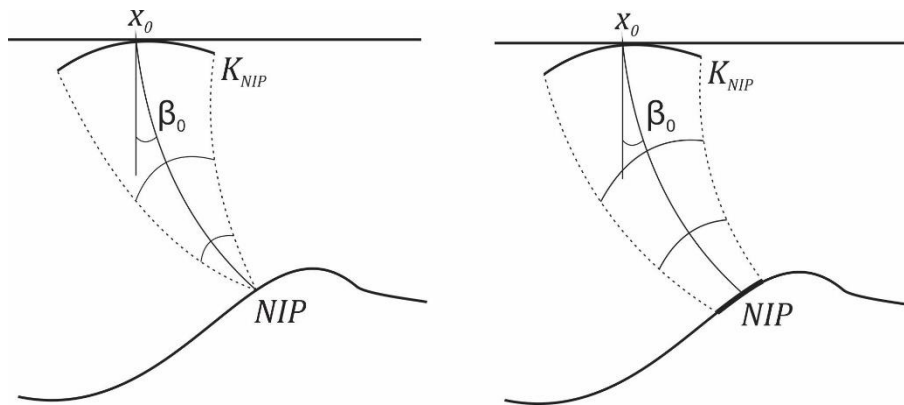
Os atributos da frente de onda são obtidos com base na teoria paraxial do raio. As curvaturas correspondentes são: $K_N = 1/R_N$ para a onda N e $K_{NIP} = 1/R_{NIP}$ para a onda NIP (HUBRAL; KREY, 1980) (Figura 18).

Na modelagem, os atributos da frente de onda podem ser propagados através das leis da refração e reflexão obedecendo a lei de Snell. O raio de curvatura é propagado segundo a lei (HUBRAL; KREY, 1980):

$$R_{i+1} = R_i + v_i \Delta t_i \quad (7)$$

onde R_{i+1} é o raio de curvatura na camada $i + 1$, R_i é o raio de curvatura na camada anterior.

Figura 18 - K_{NIP} e K_N são os raios de curvatura de duas ondas hipotéticas. Ambas as frentes de onda emergem com o ângulo β_0 na superfície de registro.



Fonte: Modificado de Schwarz (2011)

A curvatura da frente de onda para ondas transmitidas no meio segue a lei:

$$\frac{1}{R_{i+1}} = \frac{v_{i+1} \cos^2 \alpha_i}{v_i \cos^2 \beta_i} \frac{1}{R_i} + \frac{1}{\cos^2 \beta_i} \left(\frac{v_{i+1}}{v_i} \cos \alpha_i - \cos \beta_i \right) \frac{1}{R_{i+F}} \quad (8)$$

E para ondas refletidas a lei é dada por:

$$\frac{1}{R_{i+1}} = \frac{1}{R_i} + \frac{2}{\cos^2 \beta_i} \frac{1}{R_{i,F}} \quad (9)$$

onde α_i é o ângulo de incidência do raio na camada i , β_i é o ângulo de transmissão do raio para a camada $i + 1$ e $R_{i,F}$ é o raio de curvatura relacionado a interface i . Com as equações 8 e 9 se pode calcular os raios de curvatura das ondas NIP e N, sabendo que a partir de uma posição inicial sobre um ponto do refletor se tem:

$$R_i^{NIP} = 0 \quad (10)$$

$$R_i^N = R_{i,F}$$

onde o raio de curvatura R_{NIP} é nulo e o raio R_N é igual ao raio de curvatura ao redor do ponto onde essas ondas são originadas.

4.1 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, 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 transmissão para todas as interfaces ($i = 1 \dots n - 1$) e o ângulo de emergência β_0 no ponto O_0 na superfície.

Ajustar $R_{inicial} = 0$ para determinar R_{NIP} ou $R_{inicial} = R_{Fn}$ para determinar R_N . Lembrando que R_{Fn} é o raio de curvatura da n -ésima interface considerando o ponto O_n .

Primeira transmissão:

$$R_{I_{n-1}} = R_{inicial} + v_{n-1} \Delta T_{O_n \rightarrow O_{n-1}} \quad (11)$$

Recursão: ($i = n - 1 \dots 1$)

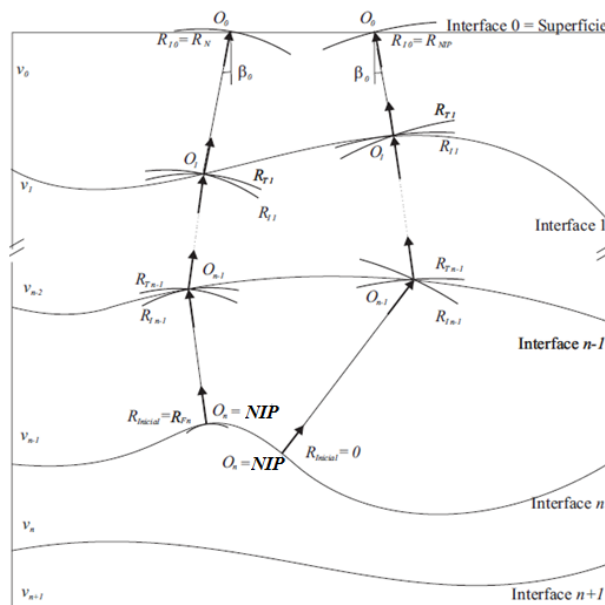
$$\frac{1}{R_{Ti}} = \frac{v_{i-1} \cos^2 \beta_i}{v_i \cos^2 \alpha_i R_{Ii}} + \frac{1}{\cos^2 \alpha_i} \left(\frac{v_{i-1}}{v_i} \cos \beta_i - \cos \alpha_i \right) \frac{1}{R_{Fi}} \quad (12)$$

$$R_{I_{i-1}} = R_{T_i} + v_{i-1} \Delta T_{O_1 \rightarrow O_{i-1}} \quad (13)$$

Finalmente, tem-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 no raio NIP para um ponto $P(x_0 t_0)$ na seção ZO conforme mostrado na figura 18. Conseqüentemente 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 ZO teremos os parâmetros para todos os eventos de reflexões primárias associados aos pontos P_0 .

Figura 19 - Trajetória dos raios considerados no processo recursivo para obter R_N e R_{NIP} . Eventos primários, aplicando as leis de propagação e transmissão.



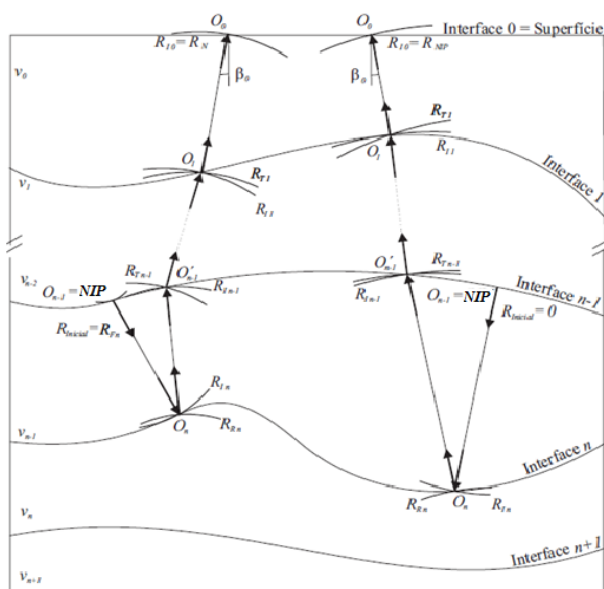
Fonte: Modificado de Cabral (2002).

4.2 Reflexões múltiplas

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, 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; KREY, 1980).

Neste trabalho consideramos além dos eventos de reflexões primárias, os eventos de reflexões múltiplas simétricas intracamada. Dessa forma tornam-se necessárias algumas considerações segundo a Figura 20.

Figura 20 - Eventos de reflexões múltiplas, aplicando as leis de propagação, reflexão e transmissão.



Fonte: Modificado de Cabral (2002).

Para calcular os atributos da frente de onda referentes aos eventos de reflexões múltiplas são aplicados o mesmo princípio recursivo, descrito no algoritmo acima,

incrementado de uma parcela referente à reflexão na interface n (Figura 20). Conseqüentemente o cálculo da primeira transmissão deverá ser efetuado em relação à interface $n - 1$ (Equação 14). Deve-se então, antes de iniciar o cálculo das demais transmissões, inserir a Equação 14 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):

$$R_{I_n} = R_{inicial} + v_{n-1} \Delta T_{0_{n-1} \rightarrow 0_n} \quad (14)$$

- Reflexão na interface n :

$$\frac{1}{R_{R_n}} = \frac{1}{R_{I_n}} + \frac{2}{\cos^2 \alpha_n} \frac{1}{R_{F_n}} \quad (15)$$

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.

5 O EMPILHAMENTO SÍSMICO

5.1 Definição

O empilhamento sísmico é definido como a soma dos traços sísmicos de cobertura múltipla, em um único traço. Esta soma é realizada ao longo de curvas ou superfícies de tempos de trânsito, que representam reflexões. O empilhamento melhora a razão sinal/ruído do dado e conseqüentemente permite uma melhor identificação dos eventos de reflexão.

Existem diversos métodos de empilhamento sísmico. Entre os mesmos destacam-se os empilhamentos Common-Midpoint (CMP), Common-Reflection-Surface (CRS), entre outros.

5.2 O empilhamento Common-Midpoint (CMP)

Em uma aquisição sísmica 2D, fontes e os receptores são distribuídos ao longo de uma linha reta. A energia sísmica iniciada em x_S , viaja em subsuperfície. Porções refletidas e difratadas desta energia são registradas nos receptores localizados em x_G , como na Figura 1, tendo com resultado um traço sísmico. Geralmente os traços sísmicos são adquiridos de forma redundante, contendo as mesmas informações sobre a subsuperfície. Essa redundância resulta em uma maior necessidade de armazenamento, mas que pode ser reduzida pela técnica de empilhamento CMP (MAYNE, 1962). Essa técnica não só permite reduzir consideravelmente a capacidade de armazenamento exigida, como também aumenta a razão sinal-ruído, uma vez que o ruído aleatório é reduzido.

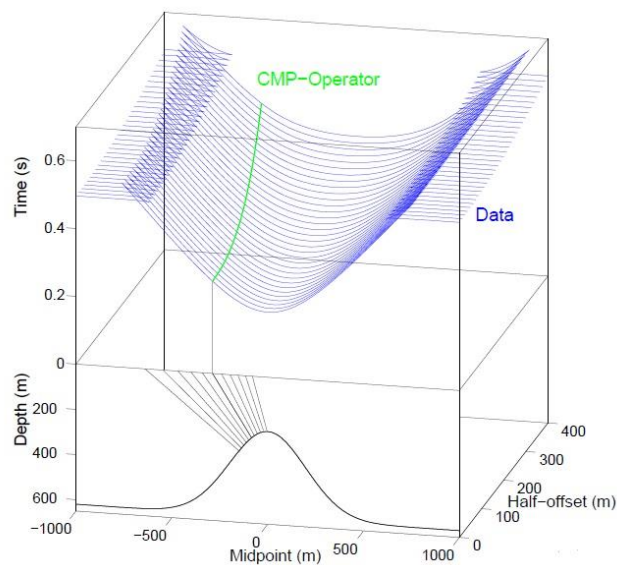
Com o intuito de produzir seções de afastamento nulo (ZO), neste método o tempo de trânsito hiperbólico (MAYNE, 1962) para eventos de reflexão é representado por:

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{NMO}^2} \quad (16)$$

também chamada de equação de tempo de trânsito NMO, onde t_0 é o tempo de trânsito de reflexão normal, h é o meio afastamento entre as fontes e receptores e v_{NMO} é a velocidade de empilhamento ou velocidade NMO.

Este método utiliza como único parâmetro, a velocidade de empilhamento que é determinada pelo processo iterativo de análise de velocidades realizada nos sismogramas de família CMP (Figura 21). Após serem aplicadas as correções dinâmicas normal-moveout (NMO) e dip-moveout (DMO), 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 21 - Dados de cobertura múltipla no domínio do ponto médio e meio-afastamento (azul) e o operador CMP (verde) descrevendo uma linha ao longo da direção do meio-afastamento.



Fonte: Müller (1999)

5.3 O empilhamento multiparamétrico

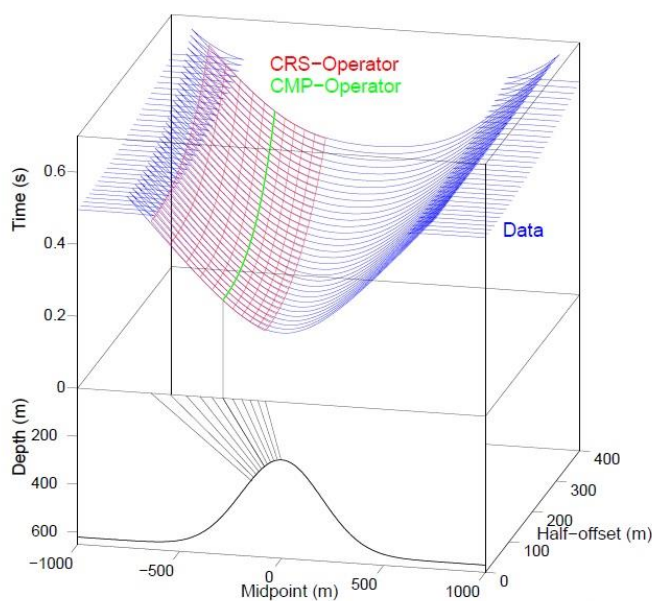
Na seção anterior o tempo de trânsito foi parametrizado por apenas um único parâmetro, a velocidade normal moveout (v_{NMO}). Em áreas de geologia complexa, no entanto, o tempo de trânsito não pode ser descrito com precisão por uma simples

hipérbole. Dois passos óbvios no sentido de uma melhor descrição em tais áreas, é aumentar o número de parâmetros livres e encontrar uma descrição mais geral para o moveout.

5.3.1. O empilhamento sísmico Common-Reflection-Surface (CRS)

Uma extensão do empilhamento CMP é o método chamado Common Reflection Surface (CRS) ou superfície de reflexão comum. Este método, como o CMP, reduz a redundância no volume de dados e aumenta a razão sinal/ruído. O CRS aumenta ainda mais esta razão somando não só em todos os afastamentos, mas em todos os pontos médios. Isto significa que todos os traços na vizinhança da família de traços CMP são incluídos dentro de uma super-família de traços. Devido ao tempo de trânsito em geral, não variar somente com o afastamento, mas também com o ponto médio, a trajetória do empilhamento já não é uma curva, mas sim uma superfície (Figura 22).

Figura 22 - Dados de cobertura múltipla no domínio do ponto médio e meio-afastamento (azul), operador CMP (verde), e o operador CRS (vermelho), descrevendo uma superfície na direção do ponto médio e meio-afastamento.



Fonte: Müller (1999)

Com o objetivo de descrever com precisão a verdadeira resposta cinemática da reflexão de um refletor, o número de parâmetros que comandam a superfície de percurso deve ser aumentado (SCHWARZ, 2011). Hubral (1983) introduziu três atributos cinemáticos do campo de onda, chamados β_0 , R_{NIP} e R_N , que podem ser interpretados no âmbito da ótica geométrica (figura). R_{NIP} e R_N são os raios de curvatura de duas ondas hipotéticas, o primeiro deles provém de uma fonte pontual fictícia colocada no ponto de incidência normal (NIP) do refletor (onda NIP), o segundo é o resultado do experimento de um refletor explosivo nas imediações de NIP (onda normal). Ambas as ondas contém propriedades do refletor que se propagaram até a superfície para o registro, como a distância, curvatura e orientação. Apesar de ser um subproduto do empilhamento, o conhecimento desses atributos, permite a construção de um macro-modelo de velocidade (DUVENECK, 2004) e permite suprir eficientemente múltiplas nos dados (DÜMMONG; GAJEWSKI, 2008).

A aproximação de tempo de trânsito CRS pode ser expressa em função do trio paramétrico β_0 , R_{NIP} e R_N (TYGEL et. al, 1997):

$$t_{2,ref}^2(\Delta x_m, h) = \left[t_0 + \frac{2s\text{en}\alpha}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} [K_N (x_m - x_0)^2 + K_{NIP} h^2] \quad (16)$$

sendo t_0 o tempo duplo do raio central de afastamento nulo e v_0 a velocidade próxima a superfície em torno do ponto de emergência do raio central. As coordenadas x_m e h são o ponto médio e o meio afastamento entre a fonte e o receptor, respectivamente.

O único conhecimento a priori de velocidade para a aproximação do tempo de trânsito CRS é o da velocidade próxima à linha de aquisição v_0 . Assim, com as coordenadas x_m e h bem definidas e com os três parâmetros cinemáticos (β_0 , R_{NIP} e R_N) bem determinados para um ponto de amostragem $P_0(x_0, t_0)$, a aproximação do tempo de trânsito CRS define uma superfície ou curva de empilhamento CRS ou superfície CRS.

5.3.2 Empilhamento sísmico Common-Reflection-Surface implícito (i-CRS)

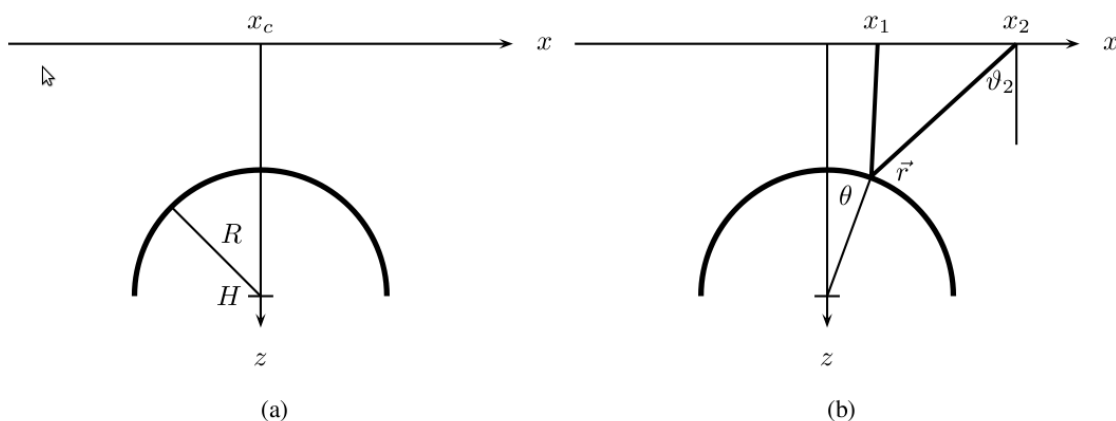
Com a intenção de superar as limitações do método de empilhamento sísmico CRS em relação à difrações e anisotropia, desenvolveu-se um novo operador não

hiperbólico com o objetivo de torná-lo aplicável em ambientes mais realísticos, meios com heterogeneidade e anisotropia arbitrárias e para a descrição de eventos de reflexão e difração com a mesma precisão. O princípio do novo método é baseado o mesmo princípio do CRS, mas de um modo implícito.

Vanelle et al. (2010) e Schwarz (2011) introduziram essa nova aproximação de tempos de trânsito de empilhamento sísmico para ondas monotípicas em meios isotrópicos que leva em consideração uma nova aproximação implícita para avaliar o ponto de reflexão sobre um círculo fazendo uso do princípio de Fermat. Esta aproximação é referida como a aproximação implicit common-reflection-surface (i-CRS) ou superfície de reflexão comum implícita.

Vanelle et al. (2012) consideraram um refletor esférico em um meio homogêneo. O raio do reflector é R , com o seu centro no local $(x_c, 0, H)$, como mostrado na Figura 23. x_1 e x_2 são coordenadas de uma fonte e de um receptor, respectivamente, ambos na profundidade $z = 0$ e $y = 0$. O ângulo θ define o ponto de reflexão em $\vec{r} = (R \sin\theta, 0, R \cos\theta)$. As velocidades dos raios dos dois seguimentos do raio de ida e volta são $v_i(\vartheta_i)$, sendo ϑ_i o ângulo de grupo.

Figura 23 - Geometria do refletor e (b) aquisição para um refletor esférico. O ponto de reflexão é definido pelo ângulo θ . Os ângulos θ_i são os ângulos de raio e de grupo, respectivamente.



Fonte: Vanelle et al. (2012).

O tempo de percurso t_i dos segmentos de raios de ida e volta são dado por:

$$t_i^2 = \frac{(x_i - x_c - R \sin \theta)^2 + (H - R \cos \theta)^2}{v_i^2(\vartheta_i)} \quad (17)$$

ou, em função das coordenadas do ponto médio e meio-afastamento (x_m, h) expresso por:

$$t_1^2 = \frac{(x_m - h - x_c - R \sin \theta)^2 + (H - R \cos \theta)^2}{v_1^2(\vartheta_1)} \quad (18)$$

$$t_2^2 = \frac{(x_m - h - x_c - R \sin \theta)^2 + (H - R \cos \theta)^2}{v_2^2(\vartheta_2)} \quad (19)$$

$$t_i = t_1 + t_2 \quad (20)$$

A soma de t_1 e t_2 deve satisfazer a Lei de Snell, ou seja, $\partial(t_1 + t_2)/\partial\theta = 0$.

A aproximação i-CRS também pode ser expressa em função dos três parâmetros do CRS convencionais (SCHWARZ, 2011): o ângulo de emergência do raio de reflexão normal em relação à normal da linha de medição (β_0), a curvatura da onda hipotética NIP ($K_{NIP} = 1/R_{NIP}$) e a curvatura da onda hipotética N ($K_N = 1/R_N$). Onde os parâmetros CRS correspondentes são:

$$\beta_0 = \theta \quad (21)$$

$$K_N = \frac{H}{\cos \theta} \quad (22)$$

$$K_{NIP} = \frac{H}{\cos \theta} - R \quad (23)$$

Para cada amostra (x_0, t_0) na seção empilhada, i.e. a seção ZO a ser simulada, temos que determinar os três parâmetros i-CRS que produzem o melhor ajuste para um determinado evento de reflexão a ser simulado. Isto é feito através da análise de coerência (semblance, TANER; KOEHLER, 1969) ao longo da aproximação de tempos de trânsito i-CRS nos dados de cobertura múltipla.

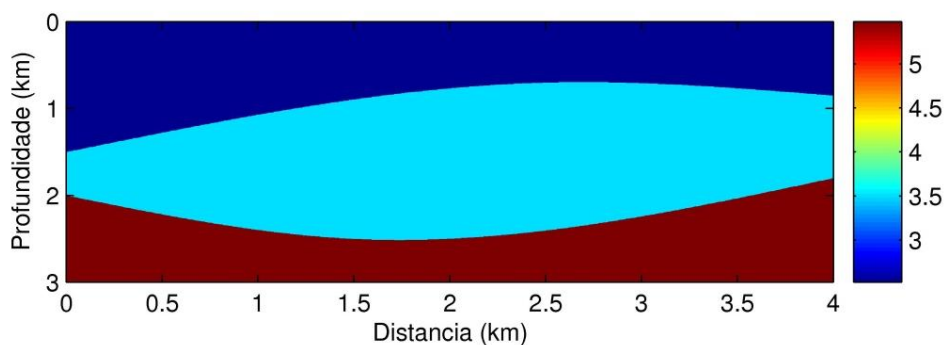
Após a determinação do trio paramétrico do i-CRS procedemos à aplicação do empilhamento i-CRS. O empilhamento i-CRS consiste na soma das amplitudes dos traços sísmicos em dados de cobertura múltipla, ao longo da superfície definida pela aproximação de tempos de trânsito CRS implícita, que melhor se ajusta 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.

6 RESULTADOS

A fim de testar o desempenho do método de empilhamento i-CRS em relação ao seu potencial para simular eventos de reflexões primárias e, principalmente, múltiplas simétricas, considerou-se um modelo 2-D constituído por duas camadas homogêneas sobre um semi-espço e separadas por interfaces suavemente curvas (Figura 24). As velocidades para cada camada, desde o topo até a base, são: 2,5 km/s, 3,5 km/s e 5,5 km/s respectivamente. As dimensões do modelo são: 4 km de comprimento por 3 km de profundidade. A aquisição dos dados foi realizada considerando uma linha sísmica horizontal.

Figura 24 - Modelo 2-D constituído por duas camadas separadas com interfaces curvas e suaves sobre um semi-espço.



Baseado neste modelo, foram gerados um conjunto de dados sintéticos de reflexão de cobertura múltipla utilizando o algoritmo de traçamento de raios, SEIS88 (CERVENY; 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 de 0,6 km e 2,9 km respectivamente.

Foi considerado 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 primeiro geofone em $x_G = 1,1$ km, sendo distribuídos 48 geofones com espaçamentos de 0,025 km entre eles. Foram considerados 70 tiros com intervalos de 0,05 km cada. A seção sísmica zero-offset (ZO) a ser simulada é mostrada na Figura 25 e consta de 81 traços com intervalos de 0,025 km.

Figura 25 - Seção zero-offset (ZO) original obtida através do traçamento de raios com o software SEIS88. As reflexões múltiplas estão destacadas pelo retângulo vermelho.

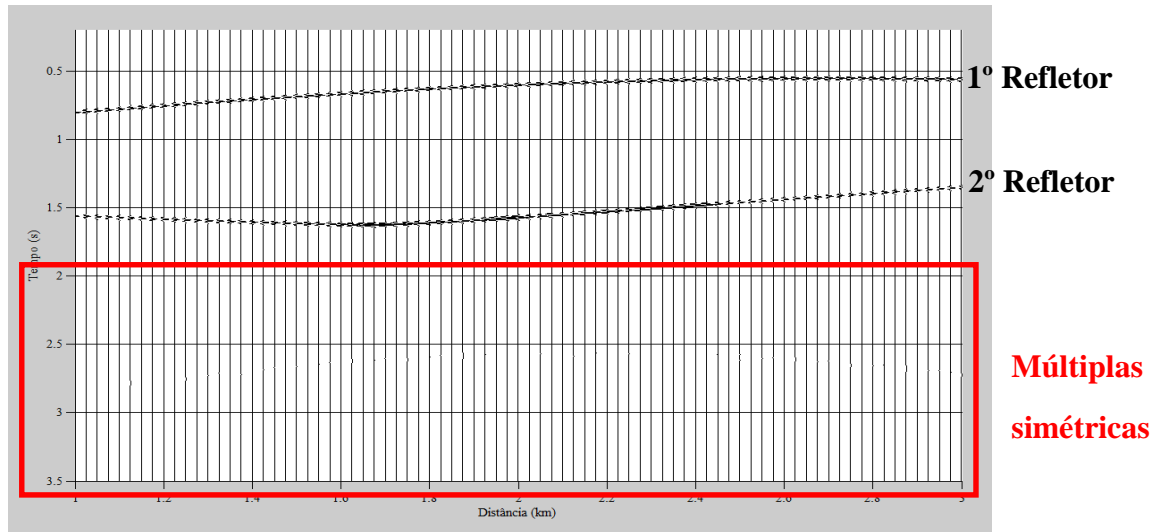
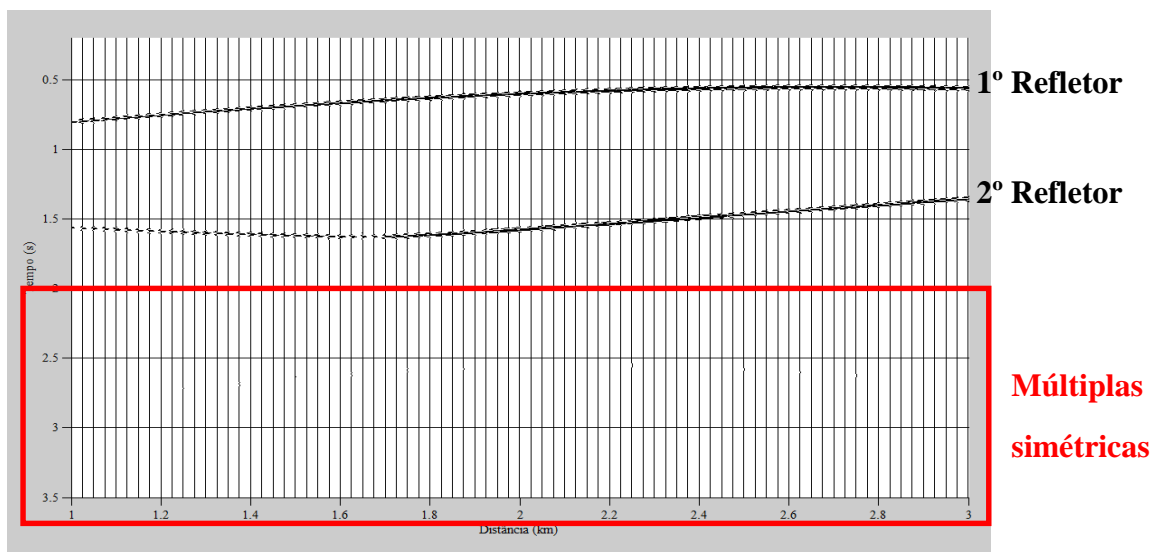


Figura 26 - Seção de afastamento-nulo (ZO) simulada a partir da aplicação do empilhamento sísmico i-CRS. As reflexões múltiplas simétricas estão destacadas pelo retângulo vermelho.



O resultado da simulação da seção ZO com o método de empilhamento sísmico i-CRS é apresentado na Figura 26. Podemos observar a presença das reflexões primárias e das reflexões múltiplas (com menor amplitude) geradas na segunda camada. A aproximação i-CRS apresenta um bom desempenho na simulação de eventos de reflexões primárias e múltiplas.

Comparando a seção ZO original (Figura 25) com a seção ZO simulada com o empilhamento sísmico i-CRS (Figura 26) observamos um bom imageamento dos eventos, tanto de reflexões primárias quanto de reflexões múltiplas. Notando-se assim, uma boa definição dos refletoras e uma boa aproximação da seção original.

Posteriormente com a finalidade de realçar as reflexões múltiplas simétricas obtidas com o software SEIS88 (Figura 25) e as simuladas com o método i-CRS (Figuras 26) foi aplicado um ganho que é visualizado através de um zoom ampliado (Figuras 27 e 28).

Figura 27 - Trecho destacado em vermelho da Figura 25, mostrando as reflexões múltiplas simétricas obtidas pelo traçamento de raios com o software SEIS88.

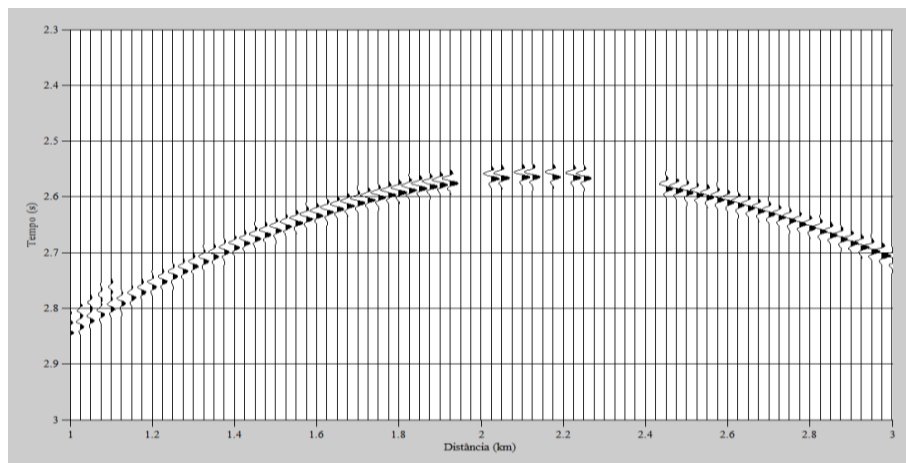
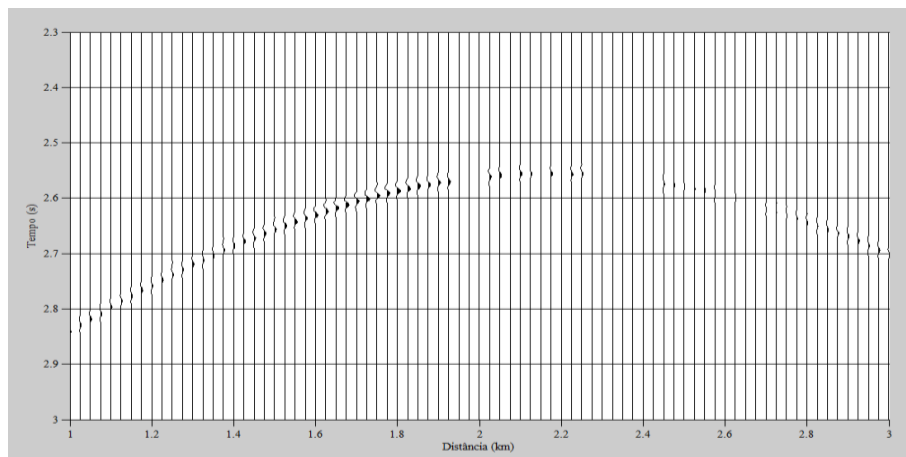


Figura 28 - Trecho destacado em vermelho da figura 6, destacando as reflexões múltiplas simétricas simuladas pelo empilhamento sísmico i-CRS.



O método de empilhamento i-CRS apresenta uma boa performance na simulação das reflexões múltiplas simétricas (Figura 28) em relação ao sismograma original (Figura 27). A ausência de alguns traços no sismograma da se dá devido à ausência de registro pelos receptores como consequência da forma dos refletores.

As Figuras 29, 30 e 31 a seguir, apresentam-se uma comparação entre os traços da seção ZO original e os traços simulados obtidos a partir do empilhamento i-CRS, correspondentes aproximadamente nos flancos direito, esquerdo e na parte central do modelo da Figura 24. As coordenadas dos pontos médios nos locais selecionados são $x_0 = 1,475$ km (Figura 29), $x_0 = 1,975$ km (Figura 30) e $x_0 = 2,6$ km, respectivamente (Figura 31), respectivamente. Em geral o método i-CRS apresenta bom desempenho na simulação da forma dos traços ZO, mas não preserva as amplitudes dos mesmos.

O primeiro traço ZO simulado que foi escolhido (Figura 29) corresponde à posição $x=1,475$ km e está localizado aproximadamente no flanco esquerdo do modelo da Figura 24. Na Figura observa-se a boa recuperação da forma do traço da seção ZO original para as reflexões primárias, com uma ligeira diminuição na amplitude do traço correspondente a segunda camada devido à perda de energia por esta se encontrar mais profundo. As reflexões múltiplas simétricas aparecem com amplitudes muito baixas devido à perda de energia com as sucessivas reflexões sofridas antes do seu registro.

Em relação as reflexões múltiplas simétricas, que perdem energia com a profundidade, as mesmas foram destacadas na Figura 30. Analisando esta Figura observa-se que os traços simulados recuperaram bem a forma e aumentam ligeiramente a amplitude do traço ZO original.

Figura 29 - Comparação do traço sísmico da seção original com o traço correspondente ao empilhamento i-CRS. Os traços correspondem a posição $x=1,475$ km na linha sísmica.

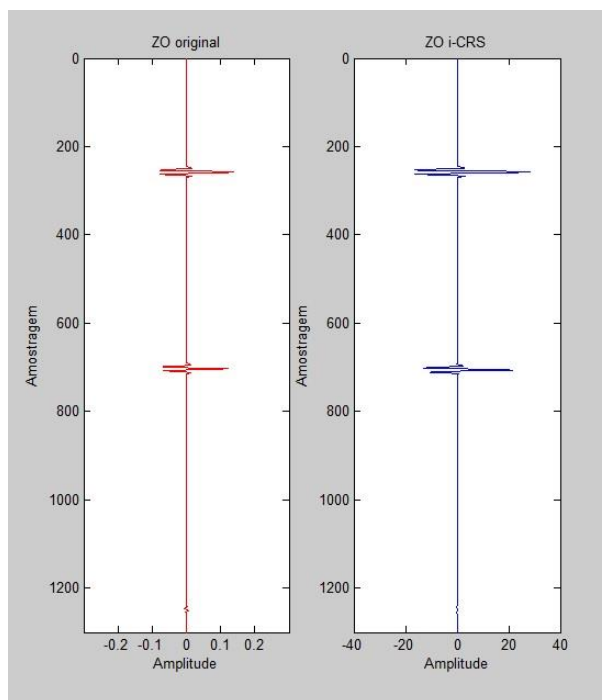
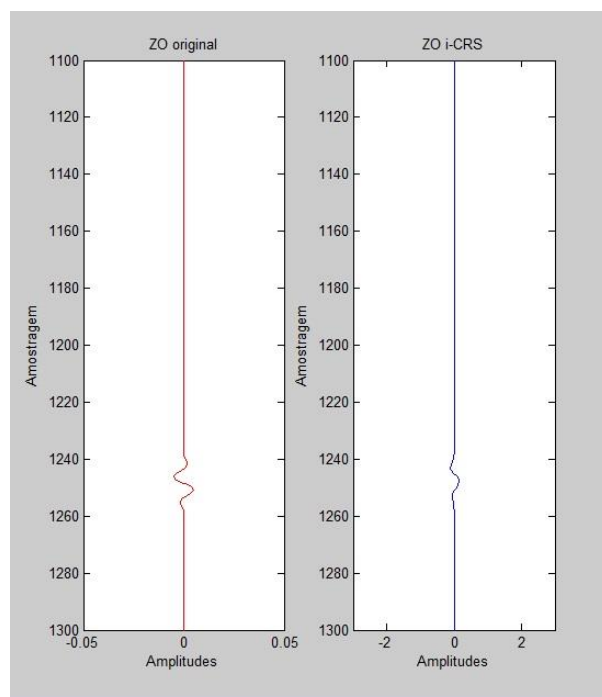


Figura 30 - Comparação do traço sísmico referente apenas às reflexões múltiplas da seção original com o traço correspondente ao empilhamento i-CRS. Os traços correspondem a posição $x=1,475$ km na linha sísmica.



Analisando o traço ZO simulado (Figura 31) na parte central do modelo da Figura 24, correspondente a posição $x_0 = 1,975$ km, observamos o mesmo comportamento do pulso anterior. Temos uma boa recuperação da forma dos traços em relação a seção original referentes as reflexões primárias, bem como do traço referente a reflexão múltipla simétrica (Figura 32), pelo método de empilhamento sísmico i-CRS.

Figura 31 - Comparação do traço sísmico da seção original com o traço correspondente ao empilhamento i-CRS. Os traços correspondem a posição $x=1,975$ km na linha sísmica.

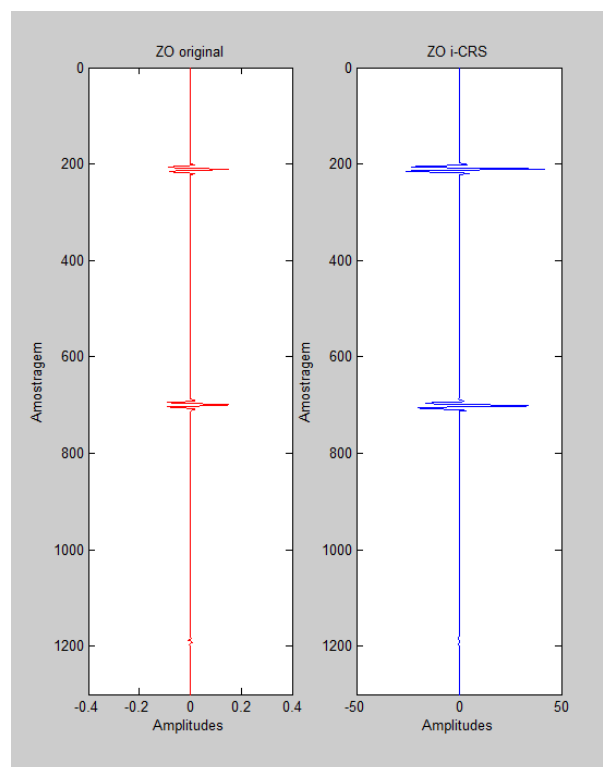
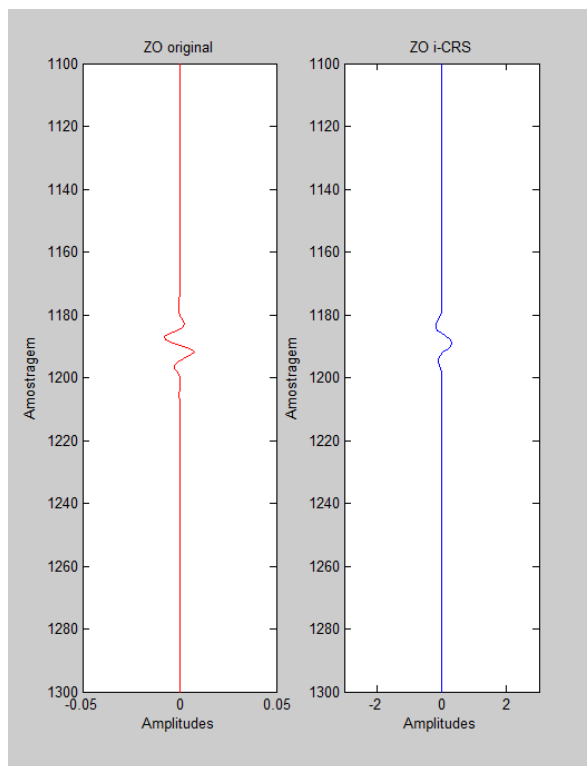


Figura 32 - Comparação do traço sísmico referente apenas às reflexões múltiplas da seção original com o traço correspondente ao empilhamento i-CRS. Os traços correspondem a posição $x=1,975$ km na linha sísmica.



No traço ZO simulado correspondente ao flanco direito do modelo da Figura 24, localizado na coordenada $x_0 = 2,6$ km, observou-se mais uma vez uma boa recuperação dos traços referentes às reflexões primárias obtidos com o método i-CRS (Figura 33).

Quanto as reflexões múltiplas simétricas destacadas na Figura 34, a recuperação dos traços também se mostrou satisfatória com o método i-CRS, já que acompanhou a forma do traço original (com uma menor amplitude).

Figura 33 - Comparação do traço sísmico da seção original com o traço correspondente ao empilhamento i-CRS. Os traços correspondem a posição $x=2,6$ km na linha sísmica.

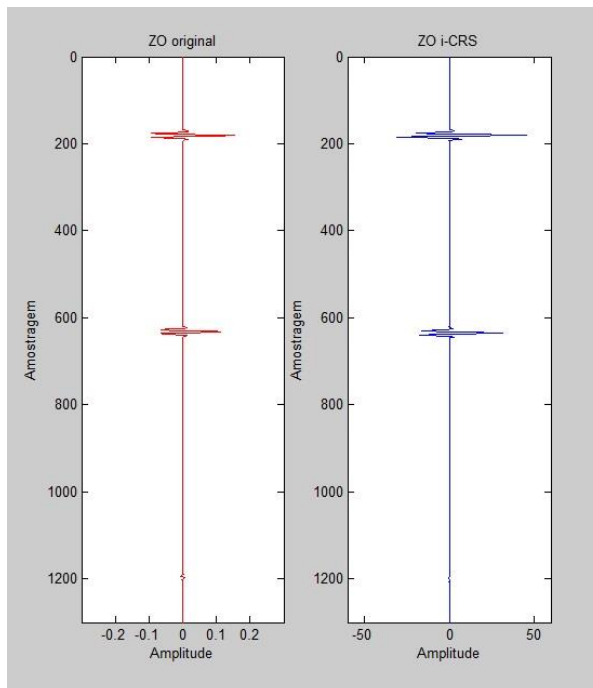
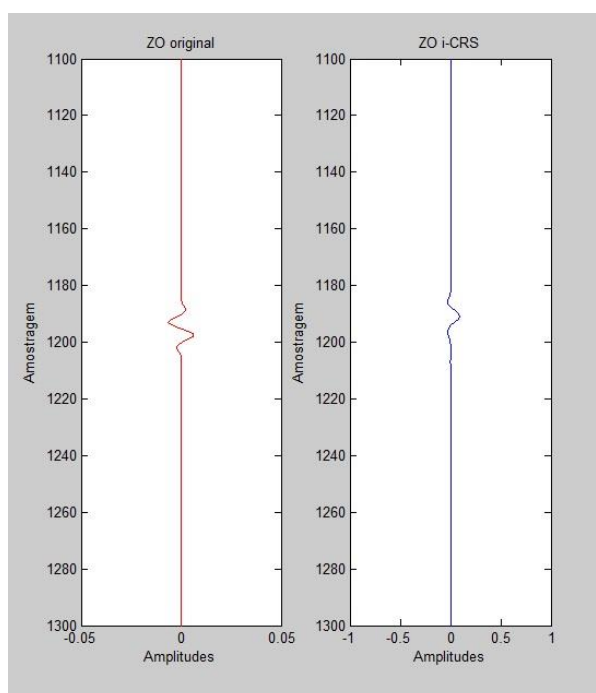


Figura 34 - Comparação do traço sísmico referente apenas às reflexões múltiplas da seção original com o traço correspondente ao empilhamento i-CRS. Os traços correspondem a posição $x=2,6$ km na linha sísmica.



7 CONCLUSÃO

A aproximação de tempos de trânsito i-CRS apresenta um bom desempenho na simulação de seções sísmicas ZO levando em consideração as reflexões primárias e múltiplas simétricas. Segundo os resultados obtidos podemos observar um bom posicionamento dos tempos de trânsito e uma boa visualização dos referidos eventos quando comparados com os traços de afastamento-nulo originais.

No que se refere à amplitude e forma dos pulsos das reflexões múltiplas, o método de empilhamento sísmico i-CRS se aproxima satisfatoriamente da forma do pulso original levando em consideração diferentes afastamentos em relação à fonte.

O método de empilhamento sísmico i-CRS apresenta-se como uma importante alternativa para simular seções zero-offset (ZO) contendo reflexões múltiplas e primárias para diversos afastamentos.

8 PERSPECTIVAS FUTURAS

- Aplicar esta comparação de resultados considerando dados sintéticos com ruído, dados reais com estruturas geológicas complexas.
- Considerar modelos 2-D com afastamentos fonte-receptor maiores que 3 km para ver qual é o desempenho da aproximação i-CRS para o caso de reflexões múltiplas do tipo simétrica.
- Considerar modelos que apresentem velocidades com decrescimento em relação às outras camadas em profundidade.

REFERÊNCIAS

- BORTFELD, R. Geometrical ray theory: rays and traveltimes in seismic systems (second order approximation of the traveltimes). **Geophysics**, v. 54, n. 3, p. 342-349. 1989.
- CARDOSO, M. **Imageamento de refletores sísmicos usando o operador de empilhamento superfície de reflexão comum (CRS) ZO 2-D de 4ª ordem**. 2008. 52f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - UFPA, Belém, 2008.
- ČERVENÝ, V.; PSENCIK, I. **SEIS88, ray tracing Program Package**. Prague, Czechoslovakia: Charles University, 1988.
- ČERVENÝ, V. & RAVINDRA, R. **Theory of seismic head waves**. Toronto, Canada: University of Toronto Press, 1971
- CABRAL, R. C. M. **Simulação de reflexões múltiplas usando o método de empilhamento sísmico superfície de reflexão comum**. 2002. 43f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.
- CHIRA OLIVA, P. A. **Imageamento multifocos de refletores sísmicos**. 2000. 91f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Pós-Graduação em Geofísica-CPGF, Belém, 2000.
- CHIRA OLIVA, P. A.; GARABITO CALLAPINO, G.; CRUZ, J. C. R. Fourth-order stacking method - examples. In: EAGE CONFERENCE & EXHIBITION INCORPORATING SPE EUROPEC, 72nd., 2010, Barcelona. **Extended abstracts**. Barcelona: EAGE SPE EUROPEC, 2010. v. 1 p. 1-5.
- CHIRA OLIVA, P. A.; TYGEL, M.; HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J. A fourth-order CRS moveout for reflection or diffraction events: numerical examples. **Journal of Seismic Exploration**, v. 12, p. 197–219, 2003.
- DE BAZELAIRE, E. Normal moveout revisited – inhomogeneous media and curved interfaces. **Geophysics**, v. 53, n. 2, 143–157, Feb. 1988.
- DÜMMONG, S.; GAJEWSKI, D. A multiple suppression method via CRS attributes. In: ANNUAL MEETING, 2008, Las Vegas, Nevada. **Expanded Abstracts**. Las Vegas, Nevada: SEG, 2008. v. 27, p. 2531–2535.
- DUVENECK, E. Velocity model estimation with data-derived wavefront attributes: **Geophysics**, v. 69, n. 1, p. 265–274, 2004.
- GAMBOA, F. **Aplicações do método de superfície comum de reflexão (CRS) ao processamento sísmico**. 2007. 187f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- 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.

GUREVICH, B.; KEYDAR, S.; LANDA, E. Multifocusing imaging over an irregular topography. **Geophysics**, v. 67, p. 639-643, 2002.

HÖCHT, G., DE BAZELAIRE, E., MAJER, P. AND 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**, v. 48, n. 8, p. 1051-1062, 1983.

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.; HUBRAL, P. Common reflection surface: image and attributes. **Geophysics**, v. 66, n. 1, p. 97-109, Jan. 2001.

LANDA, E., KEYDAR, MOSER, T. J. Multifocusing revisited – inhomogeneous media and curved interfaces. **Geophysical Prospecting**, v. 58, n. 6, p. 925-938, 2010

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.

MAYNE, W. H. Common reflection point horizontal data stacking techniques: **Geophysics**, v. 27, n. 6, p. 927–938, 1962.

MOREIRA, D. A. ; CHIRA OLIVA, P. A. Empilhamento i-CRS: uma nova alternativa para o imageamento sísmico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 6., 2014, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. **Extended abstracts**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: SBGf, 2014.1 CD-ROM.

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

SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. Parabolic and hyperbolic paraxial two points traveltimes in 3D media. **Geophysical Prospecting**, v. 41, n.4, p.495-513, 1993.

SCHWARZ, B. **A new nonhyperbolic multiparameter stacking operator**. 2011. 105f. (Diploma Thesis) - University of Hamburg, Germany, 2011.

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

SOUZA, F. J. M. **Identificação de reflexões múltiplas, utilizando os parâmetros das frentes de onda PIN e normal**. 2005. 69f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, CPGf, Belém, 2005.

SILVA, O. P.; CHIRA OLIVA. P.; CRUZ, J. C. R. Simulação de reflexões primárias e múltiplas usando aproximação paraxial de tempos de trânsito CRS de 4ª ordem. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 5., 2012, Salvador, Bahia. **Extended abstracts**. Salvador, Bahia: SBGf, 2012. 1 CD-ROM.

TANER, M. T. & KOEHLER, F. Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity functions. **Geophysics**, v. 34, n. 6, p. 859-881, 1969.

TYGEL, M.; MUELLER, T.; HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J. Eigenwave based multiparametertraveltime expansions. In: ANNUAL MEETING OF SEG, 67. 1997 [S.l.]. **Expanded abstracts**. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1997. p. 1770-1773.

VANELLE, C.; BOBSIN, M.; SCHEMMERT, P.; KASHTAN, B.; GAJEWSKI, D. RSO - a new multiparameter stacking operator for an/isotropic media. In: EAGE Conference & Exhibition incorporating, 74th., 2012, Copenhagen, Denmark. **Extended abstracts**. Copenhagen, Denmark: SPE EUROPEC, 2012. 1 CD-ROM.

VANELLE, C.; KASHTAN, B.; DELL, S.; GAJEWSKI, D. A new stacking operator for curved subsurface structures (SPNA 3.2). In: ANN. INT. MTG. SOC. EXPL. GEOPH., 80th., 2010, Denver, Colorado. **Expanded abstracts**. Denver, Colorado: Society of Exploration Geophysicists, 2010. p. 3609-3613.