



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOFÍSICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DIONIS FÁBIO CAMPOS DO ROSÁRIO

PERFORMANCE DAS APROXIMAÇÕES DE TEMPOS DE TRÂNSITO CRS  
CONVENCIONAL E NÃO-CONVENCIONAL PARA O IMAGEAMENTO SÍSMICO DE  
REFLEXÕES MÚLTIPLAS SIMÉTRICAS

BELÉM – PA  
2015

DIONIS FÁBIO CAMPOS DO ROSÁRIO

PERFORMANCE DAS APROXIMAÇÕES DE TEMPOS DE TRÂNSITO CRS  
CONVENCIONAL E NÃO-CONVENCIONAL PARA O IMAGEAMENTO SÍSMICO DE  
REFLEXÕES MÚLTIPLAS SIMÉTRICAS

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 de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Andrés Chira Oliva

BELÉM – PA  
2015

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

---

Rosário, Dionis Fábio Campos do, 1989 -

Performance das aproximações de tempos de trânsito CRS convencional e não-convencional para o imageamento sísmico de reflexões múltiplas simétricas / Dionis Fábio Campos do Rosário. – 2015.

49 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. Geofísica. I. Título.

CDD 22 ed. 622.1592

---

DIONIS FÁBIO CAMPOS DO ROSÁRIO

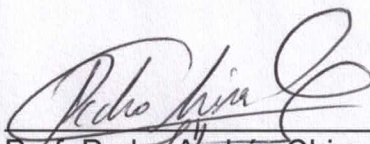
IMAGEAMENTO SÍSMICO DE REFLEXÕES PRIMÁRIAS E MÚLTIPLAS  
SIMÉTRICAS APLICANDO APROXIMAÇÕES DE TEMPOS DE TRÂNSITO CRS  
CONVENCIONAL E NÃO CONVENCIONAL

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.

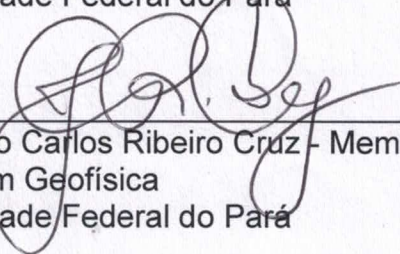
Conceito: *EXCELENTE*

Banca Examinadora:



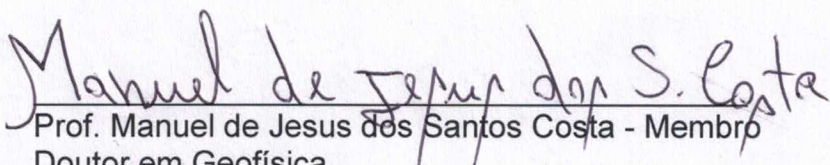
---

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

À minha mãe, que sempre acreditou  
no meu potencial e esteve ao meu lado em  
todas as circunstâncias.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, sabedoria e fé alcançar meus objetivos mesmo diante das dificuldades.

A minha Mãe, Raimunda de Jesus, principal motivadora dos meus esforços nos estudos, sempre me dando apoio e incentivo para nunca desistir dos meus objetivos.

A toda minha família por acreditarem no meu sucesso e estarem sempre dispostos a ajudar e apoiar-me no que precisasse.

Ao Professor Pedro Chira, pela sua orientação, auxílio, atenção e disposição para compartilhar seus conhecimentos neste trabalho.

Ao PIBIC pelo apoio financeiro.

Aos professores Cristiano Martins, Ellen Gomes, Geraldo das Virgens, Jessé Costa, João Jadson, Lucia Costa e Silva pelos ensinamentos no decorrer da minha graduação.

Aos meus amigos, Glauter Takeda, Walber Leal, Elen Amorim, Fabricio da Silva, Caio perdigão, Thiago Marques, Aline Ohashi, David Rocha, pelo apoio nos estudos no decorrer do curso.

Aos todos os amigos da turma 2011, e da Faculdade de Geofísica, que me apoiaram e me ajudaram, compartilhando conhecimentos e com companheirismos durante curso.

## RESUMO

No processamento de dados sísmicos, a etapa de empilhamento sísmico, simula seções zero-offset (ZO) a partir de dados de cobertura múltipla. Isso permite reduzir a quantidade de dados utilizados e aumentar a relação sinal/ruído. Nos últimos anos, alguns métodos de imageamento sísmico alternativos, surgiram com o intuito de superar as restrições do método de empilhamento convencional Common-Midpoint (CMP), que consideram uma curva para o empilhamento sísmico e um único parâmetro de empilhamento, e entre estes métodos, não convencionais, destacam-se o Common-Reflection-Surface (CRS) e o Common-Reflection-Surface não-hiperbólico (CRS-NH). Neste trabalho, foram testados os desempenhos das aproximações de tempos de trânsito CRS hiperbólico e não-hiperbólico, em dados sintéticos, para simular seções zero-offset (ZO), considerando reflexões primárias e múltiplas simétricas. Foram comparados os resultados gerados com as aproximações de tempo de trânsito CRS hiperbólica para analisar o desempenho desta aproximação CRS não-hiperbólica na simulação de seções ZO, assim como, analisar o comportamento das mesmas na recuperação da forma e amplitude dos traços ZO simulados.

Palavras-chave: Empilhamento sísmico. Seções zero-offset (ZO). Aproximação de tempo de trânsito CRS hiperbólico. Aproximação de tempo de trânsito CRS não-hiperbólico.

## ABSTRACT

In seismic data processing, the seismic stacking simulates zero-offset (ZO) sections from multiple coverage data. This reduces the amount of data used and increases the signal/noise ratio. In recent years, some alternative methods of seismic imaging have emerged to improve the restrictions of the conventional stacking method Common-Midpoint (CMP), and among these non-conventional methods, from the Common-Reflection-Surface (CRS) and the non-hyperbolic Common-Reflection-Surface (NH-CRS). In this study, we tested the performance of the non-hyperbolic and hyperbolic CRS traveltimes approximations in synthetic seismic data to simulate zero-offset sections considering primary and symmetrical multiple reflections. We also analyzed the behavior of these approximations in the recovery of the shape and amplitude of the ZO seismic traces.

**Keywords:** Seismic stacking. Zero-offset sections. Hyperbolic CRS traveltimes approximations. Non-hyperbolic CRS traveltimes approximation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema sísmico composto por n camadas com variações de velocidade e separada por interfaces suavemente curvas.....	13
Figura 2 – Configuração CMP. O ponto médio é comum a todos os pares fonte-receptor.....	15
Figura 3 – Configuração CO, cada par fonte-receptor tem o mesmo afastamento.....	16
Figura 4 – Configuração ZO, posição fonte/receptor coincidente. E o afastamento entre eles é nulo.....	17
Figura 5 – Configuração Fonte Comum (CS) caracterizada por manter a fonte (s) fixa e dispor de vários receptores (G) ao longo da mesma linha sísmica.....	17
Figura 6 – Representação da propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico.....	20
Figura 7 – Representação da propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico. (a) Transmissão e (d) Reflexão.....	21
Figura 8 – Representação da convenção de sinais das curvaturas das (a) frente de onda e (b) interfaces.....	22
Figura 9 – Experimentos hipotéticos: (a) Onda NIP produzida ao colocarmos uma fonte no ponto R, (b) Onda Normal (N) gerada pela excitação do refletor. As frentes de onda são indicadas atravessando as camadas se estendendo acima da linha sísmica.....	23
Figura 10 – Modelo sísmico 2-d com n-camadas e interfaces curvas suaves – trajetórias do raio normal SG e do raio paraxial S'G'.....	24
Figura 11 – Trajetória do raio considerado no processo recursivo para obter $R_N$ e $R_{NIP}$ , considerando eventos primários, aplicando as leis de propagação e transmissão..	26
Figura 12 – Trajetória do raio considerado no processo recursivo para obter $R_N$ e $R_{NIP}$ , considerando eventos de reflexões múltiplas, aplicando as leis de propagação, reflexão e transmissão.....	28
Figura 13 – Parte inferior (frontal): Modelo 2-D constituído por duas camadas sob um semi-espaço, cuja interface é similar a um domo. Parte superior: curvas de tempos de trânsito ZO dos dados pré-empilhados (linhas cor cinza) e as superfícies CRS de segunda-ordem (em verde) e de quarta-ordem (em vermelho).....	30
Figura 14 – Modelo 2-D constituído por três camadas separadas com interfaces curvas e suaves sob um semi-espaço.....	34
Figura 15 – Seção ZO obtida através do traçamento de raios com o software SEIS88 apresentando as reflexões primárias e/ou múltiplas (destacados no retângulo em vermelho).....	35

Figura 16 – Reflexões múltiplas-simétricas ZO simuladas com o traçamento de raios utilizando o software SEIS88.....	35
Figura 17 – Topo: Seção ZO simulada utilizando a aproximação CRS hiperbólica de 2ª ordem. Base: Seção ZO simulada utilizando a aproximação CRS hiperbólica de 4ª ordem. As reflexões múltiplas (ver retângulo vermelho) apresentam-se com uma amplitude muito baixa devido a perda do sinal com a profundidade.....	37
Figura 18 – Reflexões múltiplas-simétricas ZO simuladas com as aproximações CRS hiperbólicas de 2ª ordem (topo) e 4ª ordem (base), respectivamente.....	38
Figura 19 – Seção ZO simulada utilizando a aproximação CRS não-hiperbólica.....	39
Figura 20 – Reflexões múltiplas-simétricas ZO simuladas com as aproximações CRS não-hiperbólica.....	39
Figura 21 – Comparação dos traços sísmicos empilhados na posição $x_0 = 1,4$ km, da seção zero-offset (SZO): traço empilhada ZO original; traços de segunda, quarta-ordem e CRS não-hiperbólico, respectivamente.....	40
Figura 22 – Múltiplas decorrente do traço da seção zero-offset (SZO), localizada na posição $x_0 = 1,4$ km.....	41
Figura 23 – Comparação dos traços sísmicos empilhados localizado na posição $x_0 = 2,2$ km, da seção zero-offset (SZO) do modelo da figura 14: traço empilhada ZO original; traço CRS de segunda, quarta-ordem e CRS não-hiperbólico, respectivamente.....	42
Figura 24 – Múltiplas decorrente do traço da seção zero-offset (SZO), localizada na posição $x_0 = 2,2$ km.....	43
Figura 25 – Comparação do traço sísmico empilhado localizado na posição $x_0 = 2,8$ km, da seção zero-offset (SZO): traço empilhado ZO original, traços CRS de segunda, quarta-ordem e CRS não-hiperbólico, respectivamente.....	44
Figura 26 – Múltipla decorrente do traço da seção zero-offset (SZO), localizado na posição $x_0 = 2,8$ km.....	45

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	13
<b>2.1 Sistema Sísmico</b> .....	13
<b>2.2 Levantamento e Configurações Sísmicas 2-D</b> .....	14
<b>2.3 O Empilhamento Sísmico</b> .....	18
<b>2.4 Curvaturas e Leis das Frentes de Onda</b> .....	19
2.4.1 Leis de Curvatura de Frente de Onda.....	19
2.4.2 Convenção de Sinais.....	21
<b>2.5 Parâmetros Cinemáticos da Onda</b> .....	22
2.5.1 Cálculo dos Parâmetros das Ondas N e NIP.....	23
2.5.1.1 Considerando Reflexões Primárias P-P.....	25
2.5.1.2 Caso das Reflexões Múltiplas.....	26
<b>3 APROXIMAÇÕES DE TEMPO DE TRÂNSITO</b> .....	29
<b>3.1 Aproximações de Tempo de Trânsito CRS Hiperbólico</b> .....	29
3.1.1 Aproximação de Tempo de Trânsito CRS de 2ª ordem .....	30
3.1.2 Aproximação de Tempo de Trânsito CRS de 4ª ordem .....	31
<b>3.2 Aproximação de Tempo de Trânsito CRS Não-hiperbólico</b> .....	32
<b>4 RESULTADOS</b> .....	34
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	46
<b>6 PERSPECTIVAS FUTURAS</b> .....	47
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	48

## 1 INTRODUÇÃO

Investigar a subsuperfície terrestre em busca de detectar e explorar seus recursos minerais economicamente viáveis, como reservas de petróleo, gás natural e água, por exemplo, é um dos principais objetivos da geofísica. A sísmica de reflexão é um dos métodos sísmicos mais utilizados para este fim, pois ela permite obter uma imagem da subsuperfície e assim, evidenciar as principais feições e estruturas geológica de interesse. Isso é possível submetendo-se dados obtidos, a partir de uma aquisição sísmica, a uma série de operações (processamento sísmico) as quais levarão a uma seção sísmica final, a qual poderá ser interpretada.

Um das etapas dessas operações é o empilhamento sísmico, que simula uma seção sísmica zero-offset (ZO), a partir de dados de reflexão sísmica de cobertura múltipla para meios 2-D e 3-D. Isso permite reduzir a quantidade de dados e aumentar a relação sinal/ruído. Um dos métodos mais utilizados na etapa do empilhamento sísmico é o *Common-Midpoint (CMP)*, que é referido na literatura como um método de empilhamento convencional, porém este método é limitado ao considerar uma curva para o empilhamento e um único parâmetro, a velocidade de empilhamento.

Então, nos últimos anos, com o intuito de superar as restrições do CMP que depende de um único parâmetro, denominado velocidade *Normal-Moveout (NMO)*, surgiram diversos métodos alternativos ao método de empilhamento convencional, e estes são referidos na literatura geofísica como métodos independentes do macro-modelo de velocidades (HUBRAL, 1999). Entre estes métodos, não convencionais, destacam-se o Multifoco (MF) (e.g. CHIRA OLIVA, 2000; GELCHINSKY et al, 1999 a,b; GUREVICH et al., 2002), o *Common-Reflection-Surface (CRS)* (e.g. HÖCHT, 1998; JÄGER et al., 2001; MANN et al., 1999; MÜLLER, 1999; TRAPPE et al., 2001), o *Common-Reflection-Surface não-hiperbólico (CRS-NH)* (FOMEL; KAZINNIK 2012), entre outros métodos. Estes métodos, porém, utilizam aproximações de tempo de trânsito que levam em consideração uma superfície de empilhamento e mais de um parâmetro atribuído no empilhamento.

Höcht et al (1999) apresentaram uma expansão de Taylor da aproximação de tempos de trânsito CRS com a finalidade de melhorar esta aproximação para a etapa do empilhamento.

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

precisam determinar através da análise de coerência três parâmetros que correspondem ao ângulo de emergência do raio normal (raio central) e as curvaturas dos eventos sísmicos correspondentes a duas ondas hipotéticas Normal-Incidence-Point (NIP) e Normal (N) introduzidas por Hubral (1983). Desta maneira, estes métodos são também considerados multiparamétricos.

O método de empilhamento 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.

Segundo Müller (1999), diferentemente dos métodos convencionais que trabalham com estimativa da função velocidade, o que pode causar atenuação das múltiplas, o método CRS empilha os dados de maneira independente da velocidade em subsuperfície, definindo para cada evento uma superfície de empilhamento, necessitando apenas da velocidade próxima da superfície e do trio paramétrico, assim, este método realça eventos de reflexões primárias e também eventos de reflexões múltiplas.

Uma nova proposta de aproximação de tempos de trânsito não-hiperbólica para o método CRS foi apresentado por Fomel e Kazinnik (2012). A forma desta aproximação segue de uma equação analítica para o tempo de trânsito de reflexão segundo um refletor de forma hiperbólica. Eles analisaram a exatidão da aproximação não-hiperbólica proposta sobre exemplos e demonstraram que esta nova aproximação pode significativamente estender o intervalo de exatidão do método CRS.

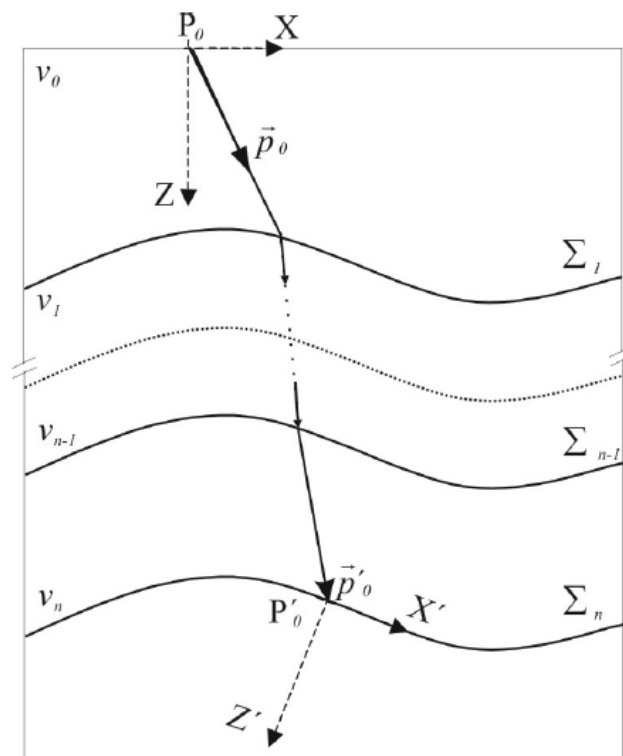
Neste trabalho, será testado o desempenho da aproximação de tempos de trânsito CRS não-hiperbólica para simular seções afastamento-nulo considerando além das reflexões primárias, as reflexões múltiplas simétricas. Da mesma maneira comparamos os resultados gerados com as aproximações de tempo de trânsito CRS hiperbólica para analisar o desempenho desta aproximação não-hiperbólica na simulação de seções ZO, considerando neste caso também as reflexões múltiplas do tipo simétrica.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Sistema Sísmico

O sistema sísmico pode ser representado por um modelo constituído de um meio isotrópico 2-D, composto por  $n$  camadas com variações suaves de velocidade, limitadas por interfaces suavemente curvas (Figura 1). Na descrição desse modelo, utilizamos um sistema com coordenadas cartesianas bidimensional  $(x, z)$ , onde a linha sísmica está na direção do eixo  $x$  e a profundidade na direção do eixo  $z$ , sendo positivo para baixo. Este sistema é limitado por uma superfície anterior e outra posterior, onde a superfície anterior é limitada por uma superfície plana, na direção do eixo  $x$ , e a superfície posterior é representada pela última interface do sistema sísmico.

Figura 1 – Sistema sísmico composto por  $n$  camadas com variações de velocidade e separada por interfaces suavemente curvas.



Fonte: Cabral (2002).

A trajetória do raio através do sistema sísmico inicia-se na superfície anterior e termina na superfície posterior (BORTFELD, 1989). No sistema sísmico (Figura 1), os símbolos não primados se referem a superfície anterior, enquanto que os uma vez primados correspondem à superfície posterior.

## 2.2 Levantamento e Configurações Sísmicas 2-D

O levantamento sísmico utiliza-se da sísmica de reflexão para obter-se uma imagem da subsuperfície a partir de dados de cobertura múltipla. Isso é possível, aumentando-se o sinal das reflexões desejadas e atenuando-se os das indesejadas, como ruídos coerentes e aleatório. No entanto, para se adquirir esses dados, são utilizadas ondas sísmicas geradas a partir de fontes controladas, a partir da qual, a onda gerada propaga-se em subsuperfície até atingir uma interface geológica. Assim, ao atingir a interface em profundidade, a onda sísmica pode sofrer refração ou reflexão (KEAREY et al., 2009). Parte da energia refletida nas interfaces, retorna a superfície até um receptor (geofone ou hidrofone), onde é gravada durante um certo intervalo de tempo decorrido, desde o início da excitação da fonte. Este tempo de registro, é correspondente a um sinal sísmico e, é denominado tempo de trânsito, que é denotado pela variável  $t$ .

Em uma representação em meios 2-D, fontes e receptores estão na mesma linha sísmica e as interfaces são consideradas curvas suaves no plano de propagação, e considera-se também que a propagação da onda sísmica está restrita ao plano vertical diretamente a baixo da linha sísmica. A aquisição de dados sísmicos, na sísmica de reflexão, é realizada principalmente na configuração fonte-comum (do inglês Common-Shot (CS)). A aquisição consiste na excitação da fonte comum, seguida de registro das ondas sísmicas refletidas nos receptores distribuídos na mesma linha sísmica.

Estes registros são os pulsos sísmicos, cujo conjunto é denominado de sismograma. O conjunto de vários sismogramas constitui os dados sísmicos. Os registros fornecem um conjunto de dados de cobertura múltipla, que podem ser visualizados dentro do volume  $(x_m, h, t)$ , onde  $x_m$  é a coordenada do ponto médio,  $h$  é o meio afastamento e  $t$  o tempo de trânsito. As coordenadas  $x_m$  e  $h$  são dadas por:

$$x_m = \frac{x_S + x_G}{2}, \quad (1)$$

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

onde,  $x_S$  e  $x_G$  são as coordenadas de S da fonte e de G dos receptores, respectivamente.

Segundo as equações abaixo, as quais são especificadas para qualquer configuração de medida 2-D (SCHLEICHER et al, 1993), as posições fonte-receptor são regidas por um único parâmetro,  $(\xi)$ . Assim, temos que:

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

$$x_G = x_{(G_0)} + \Gamma_G(\xi - \xi_0), \quad (4)$$

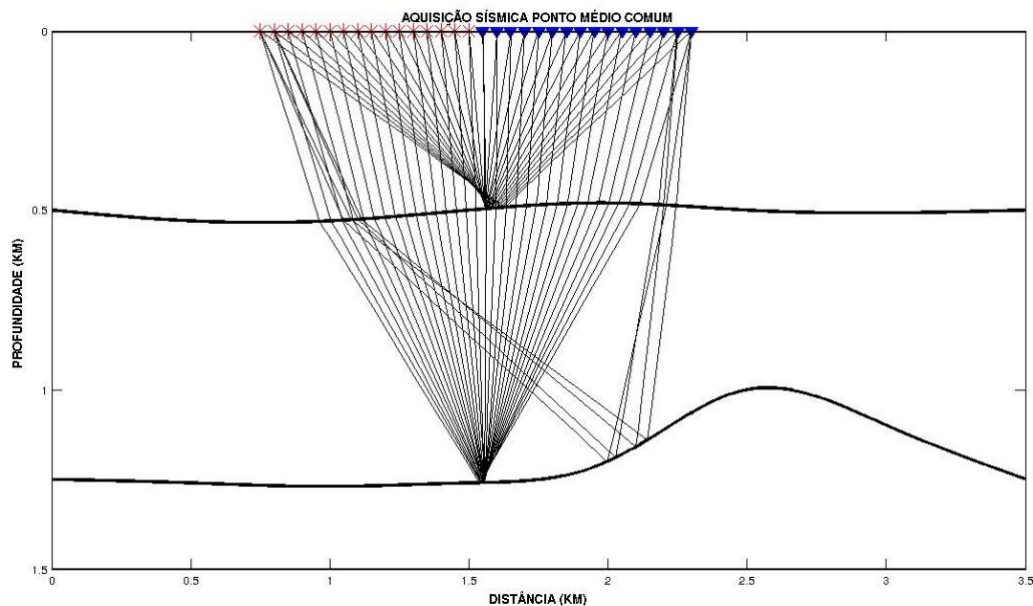
onde  $x_{(S_0)}$  e  $x_{(G_0)}$  são as coordenadas de um par fonte-receptor fixo, definido por  $(\xi - \xi_0)$ . E,  $\Gamma_S$  e  $\Gamma_G$  são constantes que dependem somente da configuração do levantamento.

Dentre as principais configurações sísmicas utilizadas em levantamentos sísmicos estão o *Common-Midpoint* (CMP), *Common-Offset* (CO), *Common-Shot* (CS) e a configuração *Zero-Offset* (ZO). Estas, serão apresentadas e detalhadas a seguir:

- **Configuração *Common-Midpoint* (CMP)**

Esta configuração, também conhecida como Ponto Médio Comum (CMP), tem como principal característica, um arranjo onde o ponto médio é comum a todas as fontes e receptores de um levantamento sísmico (Figura 2). A denominação Ponto Médio Comum (CMP), é uma adaptação da denominação anterior, Ponto Comum em Profundidade (CDP). Esta adaptação foi necessária devido a condições que restringiam a denominação CDP, como por exemplo, levantamentos onde o meio apresentava variações laterais de velocidade ou meios onde existiam refletor com mergulho. A configuração CMP é descrito pelas (Equações 3 e 4) quando,  $\Gamma_S = 1$  e  $\Gamma_G = -1$ .

Figura 2 – Configuração CMP. O ponto médio é comum a todos os pares fonte-receptor.

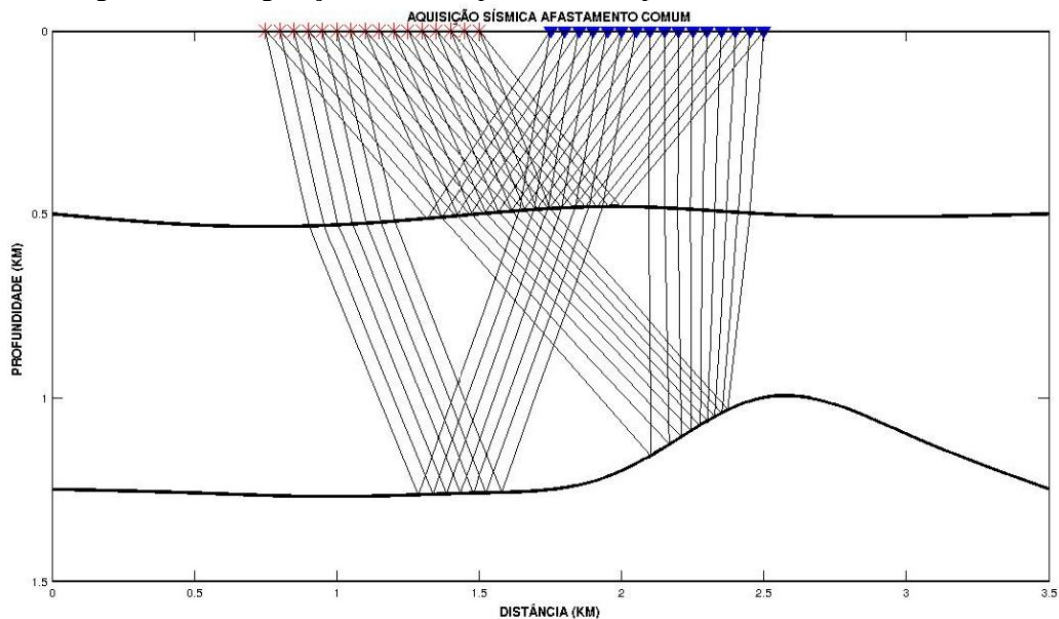


Fonte: Fernandes (2014).

- **Configuração *Common-Offset* (CO)**

Esta configuração, também conhecida como de Afastamento Comum, tem como característica, levantamentos em que os traços apresentam a mesma distância fonte-receptor, ou seja, as seções CO contém traços com afastamento constante e que são ordenados pelas coordenadas do ponto médio (Figura 3). Ela é descrita pelas (Equações 3 e 4) quando,  $\Gamma_S = 1$  e  $\Gamma_G = 1$ .

Figura 3 - Configuração CO, cada par fonte-receptor tem o mesmo afastamento.

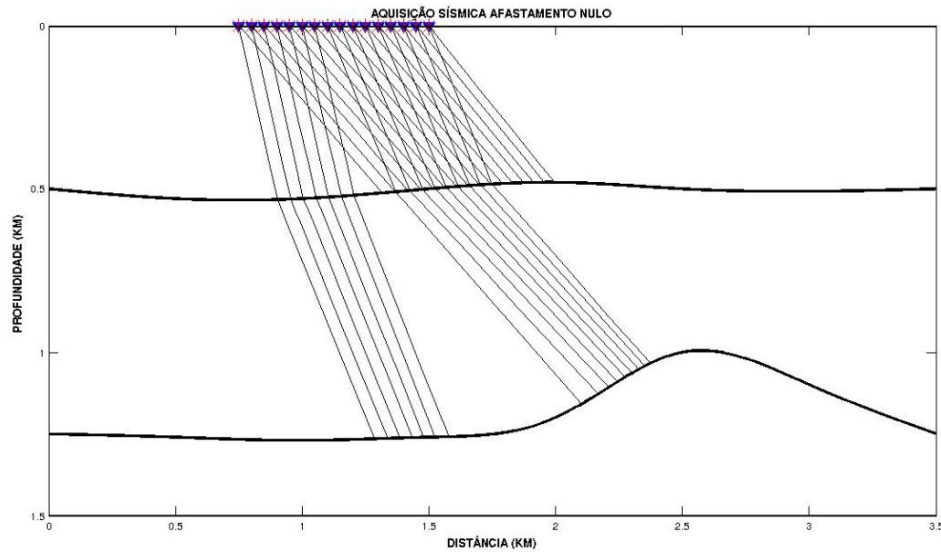


Fonte: Fernandes (2014).

- **Configuração *Zero-Offset* (ZO)**

Esta configuração também é chamada de Afastamento-Nulo. Ela surgiu a partir de uma condição especial na configuração afastamento-comum, onde o afastamento fonte-receptor é nulo, assim, as coordenadas  $x_S$  e  $x_G$  para um par fonte-receptor são coincidentes ou seja,  $x_S = x_G$  (Figura 4). Contudo, a pesar de sua grande importância para o processamento sísmico, esta configuração não pode ser realizada na prática em uma aquisição sísmica. Isto porque a fonte, quando detonada, destruiria o receptor coincidente. A seção ZO geralmente pode ser simulada através dos diversos métodos de empilhamento e é utilizada por ser uma configuração que melhor imagea a subsuperfície em relação a outras configurações.

Figura 4 - Configuração ZO, a posição das fontes e receptores são coincidentes. O afastamento é nulo.

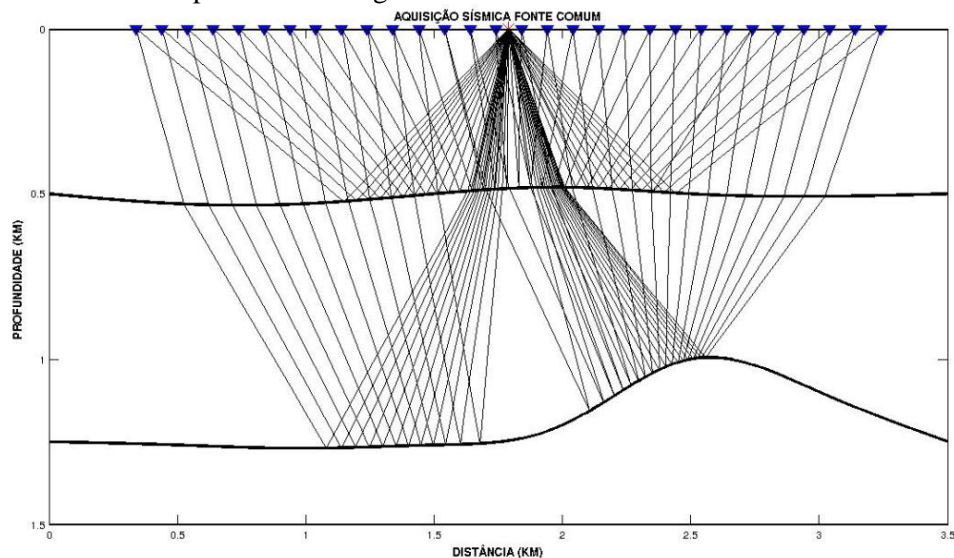


Fonte: Fernandes (2014).

- **Configuração *Comum-Shot* (CS)**

Nesta configuração, também chamada de Fonte Comum, a fonte é fixa e os receptores ficam distribuídos ao longo da linha sísmica. As seções CS contêm reflexões de uma mesma região de um refletor em subsuperfície, a qual é iluminada pelos sinais emitidos (Figura 5). A coleção total de dados registrados é chamada de dados de cobertura múltipla e possui redundância de informação, pois um mesmo ponto em profundidade é iluminado várias vezes. Ela é descrita pelas (Equações 3 e 4), quando  $\Gamma_S = 0$  e  $\Gamma_G = 1$ .

Figura 5 – Configuração Fonte Comum (CS) caracterizada por manter a fonte (S) fixa e dispor de vários receptores G ao longo da mesma linha sísmica.



Fonte: Fernandes (2014).

### 2.3 O Empilhamento Sísmico

O Empilhamento sísmico, compreende a apenas uma das diversas etapas do processamento sísmico, e é utilizado para simular seções sísmicas com afastamento nulo (AN) a partir de dados de cobertura múltipla, produzindo um aumento da razão sinal/ruído na seção simulada. Nesta etapa, o empilhamento é feito somando-se todas as amplitudes em subconjuntos, ou seções, do volume de dados sísmicos. Esta soma é feita ao longo de curvas, ou superfícies de tempo de trânsito, que representam as reflexões.

Consideremos curvas ou superfícies de empilhamento destinadas a simular reflexões ZO devidas aos pares fonte-receptor na vizinhança de traços da seção ZO a ser construída. Se a curva ou superfície de empilhamento, associada a um ponto (isto é, posição do traço e amostra temporal) da seção ZO a ser construída, concorda (é tangente) com um ou mais eventos de reflexão registrados nos dados sísmicos, então as amplitudes coerentes são somadas construtivamente. O resultado é posicionado no correspondente ponto na seção ZO a ser simulada.

É importante obter-se um bom resultado na seção simulada ZO, pois ela é a base para que muitos procedimentos de inversão obtenham uma imagem mais confiável da subsuperfície. Por exemplo, Landa et. al. (1998) mostraram a importância na escolha do modelo geológico para os resultados nos processos de inversão. Nestes processos, o número de camadas do modelo geológico é usualmente determinado pela interpretação da seção empilhada. Dentro da seção empilhada ZO, muitos eventos de reflexão, e seus atributos correspondentes, são escolhidos. Por esta razão, a seção ZO deve estar a mais limpa possível de ruído coerente e aleatório.

Como o empilhamento aumenta a razão sinal/ruído, é possível identificar os eventos de reflexão desejados, meio aos eventos indesejados inerentes ao dado, como os ruídos coerentes e aleatórios, por exemplo. A relação sinal/ruído é definida como o quociente da amplitude máxima de todos os eventos da reflexão dentro de um conjunto de dados sobre a raiz quadrada da média dos quadrados da amplitude do ruído. Uma relação sinal/ruído menor que a unidade, significa que os sinais dos eventos da reflexão não podem, na maior parte, ser distinguidos visualmente do ruído porque sua amplitude é menor do que aquelas existentes no ruído. Desta forma, valores elevados da razão sinal/ruído, é o que se deseja obter nas seções provenientes do processamento sísmico.

## 2.4 Curvaturas e Leis das Frentes de Onda

Curvaturas de frente de onda são muito aplicadas para explicar diversos problemas na exploração sísmológica, em particular, os problemas de tempo de trânsito inversos (SHAH, 1973, HUBRAL; KREY, 1980), assim como, serem utilizadas para o cálculo das velocidades intervalares a partir da velocidade de empilhamento ou velocidade de migração.

Curvaturas de frente de onda também podem ser úteis na obtenção das curvaturas dos refletores em profundidade (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 (ČERVENÝ; RAVINDRA, 1971). Estas leis serão apresentadas a continuação.

### 2.4.1 Leis de Curvatura de Frente de Onda

Segundo Hubral e Krey (1980), as curvaturas de frente de onda são expressas analiticamente em termos dos parâmetros ao longo da trajetória do raio. 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 6) e devido a transmissões (Figura 7a) e reflexões (Figura 7b) nas interfaces.

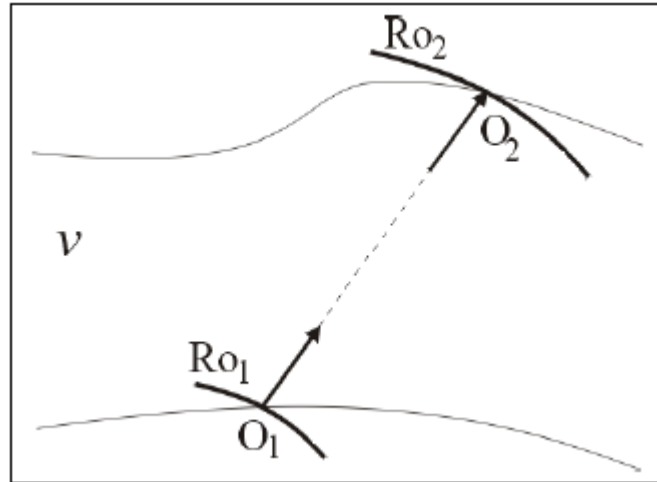
- **Lei de Propagação**

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

$$R_{0_2} = R_{0_1} + v\Delta T \quad (4)$$

onde,  $R_{0_1}$  e  $R_{0_2}$  denotam os raios de curvatura das frentes de onda nos pontos  $0_1$  e  $0_2$ , respectivamente,  $v$  é a velocidade do meio e  $\Delta T$  é o tempo de trânsito ao longo do raio (linha reta) que liga  $0_1$  e  $0_2$  (Figura 6).

Figura 6 – Representação da propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico.



Fonte: Cabral (2002).

- **Lei de Transmissão**

A lei de Transmissão de curvaturas de frente de onda é representada pela equação (HUBRAL; KREY, 1980).

$$\frac{1}{R_T} = \frac{v_T \cos^2 \varepsilon_I}{v_I \cos^2 \varepsilon_T} \frac{1}{R_I} + \frac{1}{\cos^2 \varepsilon_T} \left( \frac{v_T}{v_I} \cos \varepsilon_I - \cos \varepsilon_T \right) \frac{1}{R_F}, \quad (6)$$

onde,  $R_I$  denota o raio de curvatura da frente de onda incidente,  $R_T$  o raio de curvatura da frente de onda transmitida e  $R_F$  é o raio de curvatura da interface no ponto de transmissão. O ângulo de incidência do raio é denotado por  $\varepsilon_I$  e o de transmissão é  $\varepsilon_T$ . E finalmente temos  $v_I$  e  $v_T$ , que representam as velocidades dos meios, ver Figura 7a. O primeiro termo da equação 6 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 no ponto de transmissão.

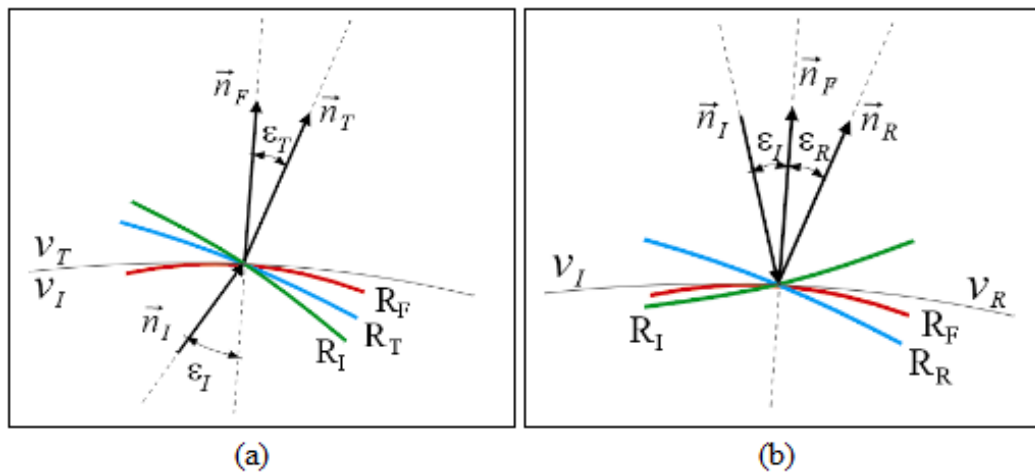
- **Lei de Reflexão**

A lei de reflexão de curvaturas tem a forma da equação (HUBRAL; KREY, 1980)

$$\frac{1}{R_R} = \frac{v_R \cos^2 \varepsilon_I}{v_I \cos^2 \varepsilon_R} \frac{1}{R_I} + \frac{1}{\cos^2 \varepsilon_R} \left( \frac{v_R}{v_I} \cos \varepsilon_I - \cos \varepsilon_R \right) \frac{1}{R_F}, \quad (7)$$

onde 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  $\varepsilon_T$  por  $v_R$  e  $\varepsilon_R$ , respectivamente. O primeiro termo da equação 7 descreve a mudança de frente de onda, no caso de a 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. Já o segundo termo descreve somente a influência da curvatura da interface.

Figura 7 – Representação da propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico. (a) Transmissão e (b) Reflexão.



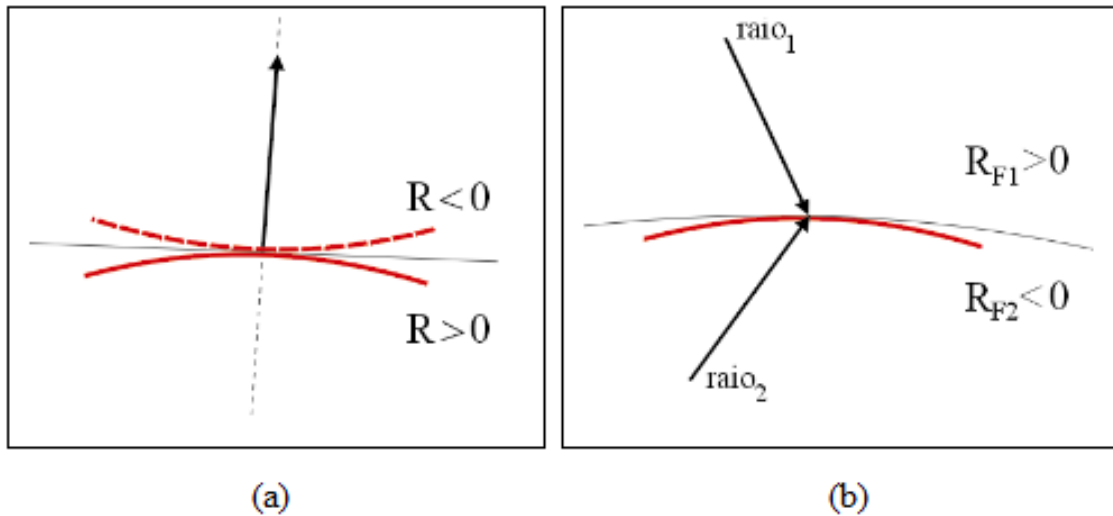
Fonte: Modificado de Cabral (2002).

#### 2.4.2 Convenção de Sinais

A teoria de convenção de sinais define que, as ondas que se propagam através de um modelo com interfaces curvas suaves e camadas de velocidades constantes, podem ter os raios de curvatura da frente de onda positivos ou negativos.

A escolha do sinal, portanto, é uma questão de convenção. E, é determinado segundo a definição proposta por Hubral e Krey (1980): quando uma frente de onda se apresenta atrás do seu plano tangencial, então o raio da curvatura é dito positivo (frente de onda mostrada em linha contínua na Figura 8a). Se a frente de onda está à frente do plano tangencial, o raio da curvatura é negativo (frente de onda mostrada em linha tracejada na Figura 8a). O raio da curvatura da interface  $R_F$  é positivo se a interface aparecer convexa ao raio incidente e negativo se for côncava. Consequentemente na Figura 8b, a curvatura da interface é positiva para o raio 1, mas negativa para o raio 2. A demonstração das equações de curvatura acima pode ser encontrada em Hubral e Krey (1980).

Figura 8 – Representação da convenção de sinais das curvaturas das (a) frentes de onda e (b) interfaces.



Fonte: Modificado de Cabral (2002).

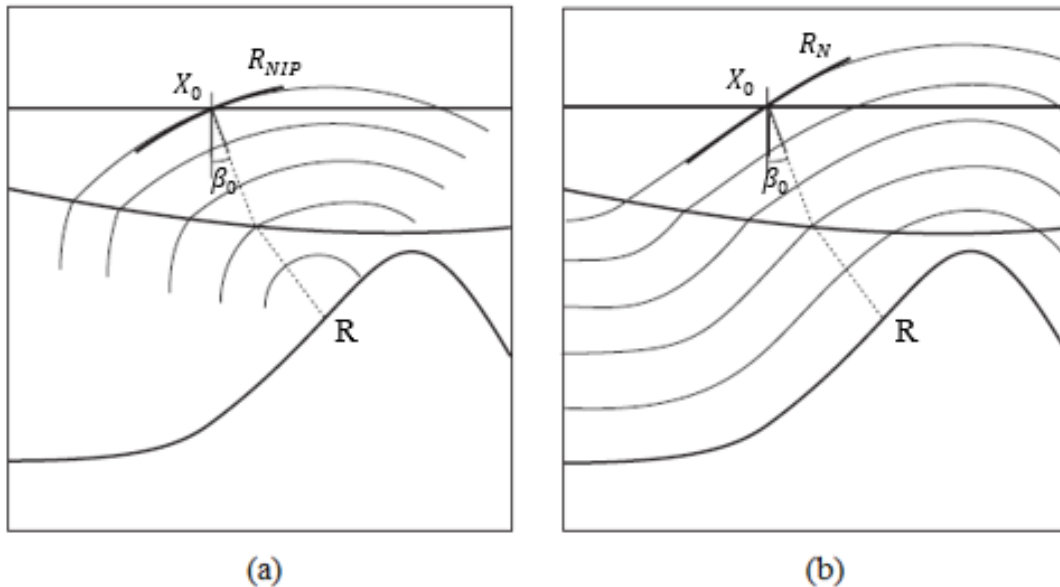
## 2.5 Parâmetros Cinemáticos da Onda

As ondas, NIP (*Normal-Incidence-Point*) e onda N (*Normal*), introduzidas por Hubral (1983), são ondas geradas em um experimento hipotético (*ondas hipotéticas*), levando em consideração a condição de zero-offset (ZO).

A partir das ondas anteriores e do raio de reflexão normal, é possível obter o trio paramétrico: ângulo de emergência ( $\beta_0$ ), curvatura da frente de onda N ( $K_N$ ) e a curvatura da frente de onda NIP ( $K_{NIP}$ ), que são fundamentais para a construção da curva ou superfície da aproximação de tempo de trânsito do método de empilhamento sísmico que será abordado neste trabalho, além de que podem ser aplicados também na determinação da velocidade intervalar, na estimativa da zona de Fresnel, no cálculo do espalhamento geométrico, entre outros.

Estas ondas hipotéticas são produzidas considerando-se dois experimentos hipotéticos, para um modelo constituído por duas camadas homogêneas sobre um semi-espço (Figura 9).

Figura 9 – Experimentos hipotéticos: (a) Onda NIP produzida ao colocarmos uma fonte no ponto R, (b) Onda Normal (N) gerada pela excitação do refletor.



Fonte: Modificado de Jäger et al (2001).

No primeiro experimento, assume-se que cada onda NIP coincide em um mesmo ponto NIP em profundidade, na interface na qual está focalizada, quando o tempo é igual a zero (Figura 9a). Então, as ondas NIP retornam à superfície com frente de onda idênticas com que foram transmitidas em profundidades e com as mesmas amplitudes.

O segundo experimento, considera o mesmo modelo e condições anteriores e, a partir dele, 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 igual a zero (Figura 9b). Então a onda N emerge na superfície com a mesma frente de onda com que foi transmitida no modelo. De fato, a frente de onda de uma onda N pode ser observada como o envelope de todas as ondas NIP sobre um refletor.

### 2.5.1 Cálculo dos Parâmetros das Ondas N e NIP

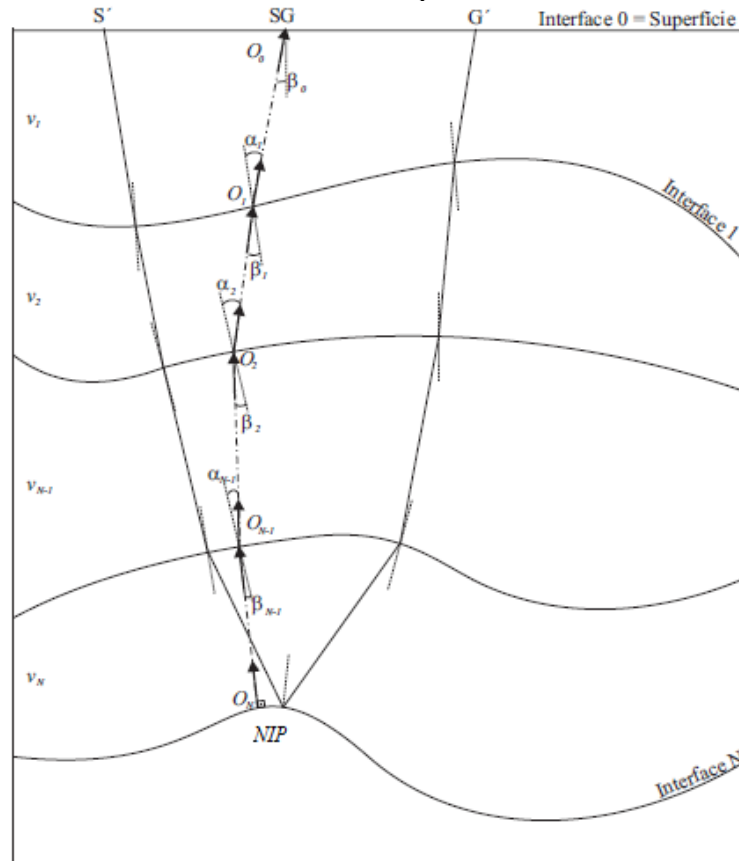
Com as três leis apresentadas acima, podemos calcular a curvatura de frente de onda em qualquer ponto ao longo do raio traçado através do modelo 2-D estratificado. Isso pode ser feito se, por exemplo, tivermos um ponto com curvatura de frente de onda conhecida, então, a partir dele, aplicamos as três leis em cascata para encontrar uma expressão que represente a curvatura de frente de onda em algum outro ponto desejado no raio.

Os raios de curvatura podem ser calculados através do procedimento recursivo segundo a equação 8 apresentada a continuação (HUBRAL; KREY, 1980):

$$\frac{1}{K_{NIP}} = \frac{1}{v_1} \left\{ s_1 v_1 + \left[ \frac{\rho_1}{v_1 \cos^2 \alpha_1} \frac{1}{R_{F,1}} + \left( s_2 v_2 \frac{\cos^2 \alpha_1}{\cos^2 \beta_1} + \left\{ \frac{\rho_2 \cos^2 \beta_1}{v_2 \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2} \frac{1}{R_{F,2}} + \left[ s_3 v_3 \frac{\cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2}{\cos^2 \beta_1 \cos^2 \beta_2} \right]^{-1} \right\}^{-1} \right)^{-1} \right]^{-1} \right\}^{-1} \quad (8)$$

Esta equação foi obtida com base nas leis de propagação, reflexão e transmissão para o caso de  $n=3$  camadas sobre um semi-espaco infinito e meio 2-D (Figura 10).

Figura 10 - Modelo sísmico 2-D com  $n$ -camadas e interfaces curvas suaves - trajetórias do raio normal SG e do raio paraxial S'G'.



Fonte: Modificado de Cabral (2002).

Na equação 8,  $R_{NIP}$  é o raio de curvatura da onda NIP (relativo a terceira interface) emergindo na superfície. Para cada camada,  $i=1,2,3$ ,  $s_i$  é o comprimento do raio,  $v_i$  a

velocidade do meio,  $\alpha_i$  é o ângulo de reflexão ou transmissão,  $\beta_i$  é o ângulo de incidência,  $R_{F,i}$  é o raio de curvatura da interface e  $\rho_N = \frac{v_{R\text{ ou }T}}{v_I} \cos \varepsilon_I - \cos \varepsilon_{R\text{ ou }T}$ .

### 2.5.1.1 Considerando Reflexões Primárias P-P

O cálculo dos raios de curvatura  $R_{NIP}$ ,  $R_N$  e do ângulo de emergência comum  $\beta_0$ , associados às duas frentes de ondas hipotéticas sobre um ponto  $O_n$ , localizado na  $n$ -ésima interface de um modelo composto por um sistema de camadas homogêneas, pode ser realizado utilizando-se 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  $\beta_0$  no ponto  $O_0$  na superfície.
- Depois, ajustamos  $R_{inicial} = 0$  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

$$R_{I_{n-1}} = R_{inicial} + v_{n-1} \Delta T_{O_n \rightarrow O_{n-1}}. \quad (9)$$

- Recursão ( $i=1\dots n-1\dots 1$ )

$$\frac{1}{R_{T_i}} = \frac{v_{i-1} \cos^2 \beta_i}{v_i \cos^2 \alpha_i} \frac{1}{R_{I_i}} + \frac{1}{\cos^2 \alpha_i} \left( \frac{v_{i-1}}{v_i} \cos \beta_i - \cos \alpha_i \right) \frac{1}{R_{F_i}}. \quad (10)$$

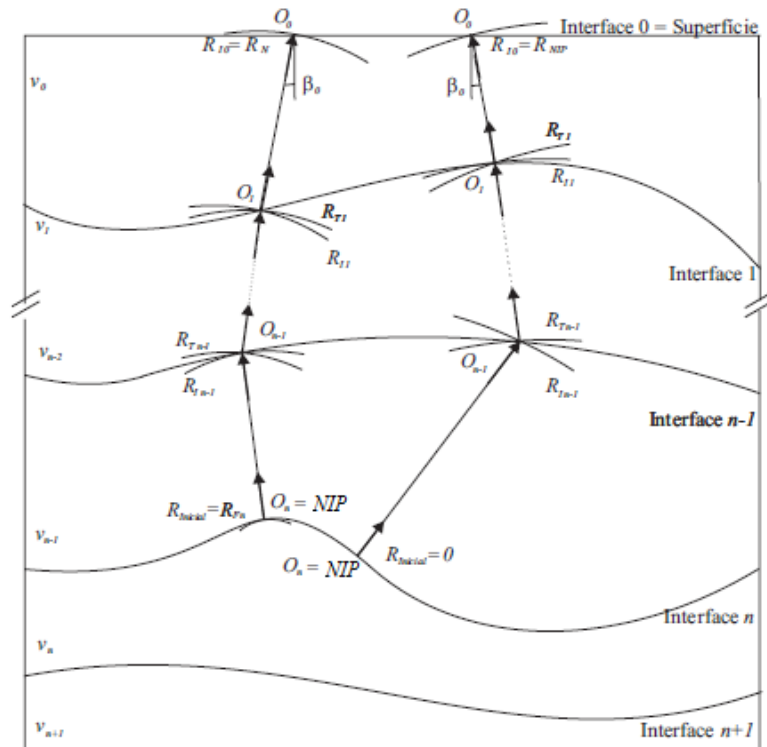
$$R_{I_{i-1}} = R_{T_i} + v_{i-1} \Delta T_{O_i \rightarrow O_{i-1}}. \quad (11)$$

- E por final, 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 conforme mostrado na Figura 11. Conseqüentemente podemos atribuir os parâmetros  $R_{NIP}$ ,  $R_N$  e  $\beta_0$  correspondentes às ondas N e NIP para o ponto  $P_0$ .

Ao aplicarmos o algoritmo à cima para todos os pontos localizados nas interfaces em subsuperfície e atribuímos os parâmetros resultantes para os pontos  $P_0$  na seção ZO, teremos então os parâmetros para todos os eventos de reflexões primárias referidos aos pontos  $P_0$ .

Figura 11 - Trajetória do raio considerado no processo recursivo para obter  $R_N$  e  $R_{NIP}$ , considerando eventos primários, aplicando as leis de propagação e transmissão.



Fonte: Modificado de Cabral (2002).

### 2.5.1.2 Caso das Reflexões Múltiplas

As considerações para as reflexões múltiplas, é similar as adotadas para as reflexões primárias. A exemplo, podemos colocar uma fonte hipotética no ponto NIP do raio normal múltiplo produzindo assim à frente de onda múltipla associado ao ponto NIP, levando em consideração, porém, apenas às ondas de reflexões múltiplas simétricas, caso contrário, as leis de curvatura não poderiam ser aplicadas (HUBRAL; KREY, 1980).

Como neste trabalho são levados em consideração, tanto eventos de reflexões primárias como eventos de reflexões múltiplas simétricas intracamada, então torna-se necessárias algumas alterações, mostradas a seguir, no algoritmo acima apresentado para o cálculo dos parâmetros da frente de onda N e NIP, conforme a Figura 12.

O Cálculo do trio paramétrico para os eventos de reflexões múltiplas intracamada também utiliza o mesmo princípio recursivo descrito no algoritmo anterior, para eventos de reflexões primárias, incrementado, porém de uma parcela referente à reflexão na interface  $n$ . Assim, o cálculo da primeira transmissão deverá ser efetuado em relação à interface  $n-1$  (Equação 5.4). Então, antes de se iniciar o cálculo das demais transmissões (Equação 10),

deve-se inserir a equação (5.5) referente ao evento de reflexão, de acordo com algoritmo a seguir:

- A princípio 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  $\beta_0$  no ponto  $O_0$  na superfície.
- Em seguida, ajusta-se  $R_{inicial} = 0$  para determinar o  $R_{NIP}$  ou  $R_{inicial} = R_{Fn}$  para determinar  $R_N$ .
- Primeira transmissão (neste caso incidindo na interface  $n$ )

$$R_{In} = R_{inicial} + v_{n-1} \Delta T_{O_{n-1} \rightarrow O_n}. \quad (12)$$

- Reflexão na interface  $n$

$$\frac{1}{R_{Rn}} = \frac{1}{R_{In}} + \frac{2}{\cos^2 \alpha_n} \frac{1}{R_{Fn}}. \quad (13)$$

Assim, ao aplicarmos este algoritmo considerando uma reflexão múltipla, obteremos de forma similar ao caso anterior, os parâmetros  $R_{NIP}$ ,  $R_N$  e  $\beta_0$ , correspondente às ondas normal N e NIP para o ponto  $P_0$ . Consequentemente, para se obter os parâmetros de todos os eventos de reflexões múltiplas referentes aos pontos  $P_0$ , basta aplicarmos este algoritmo para todos os pontos localizados nas interfaces em subsuperfície e atribuímos os parâmetros resultantes para os pontos  $P_0$  na seção ZO.



### 3 APROXIMAÇÕES DE TEMPO DE TRÂNSITO

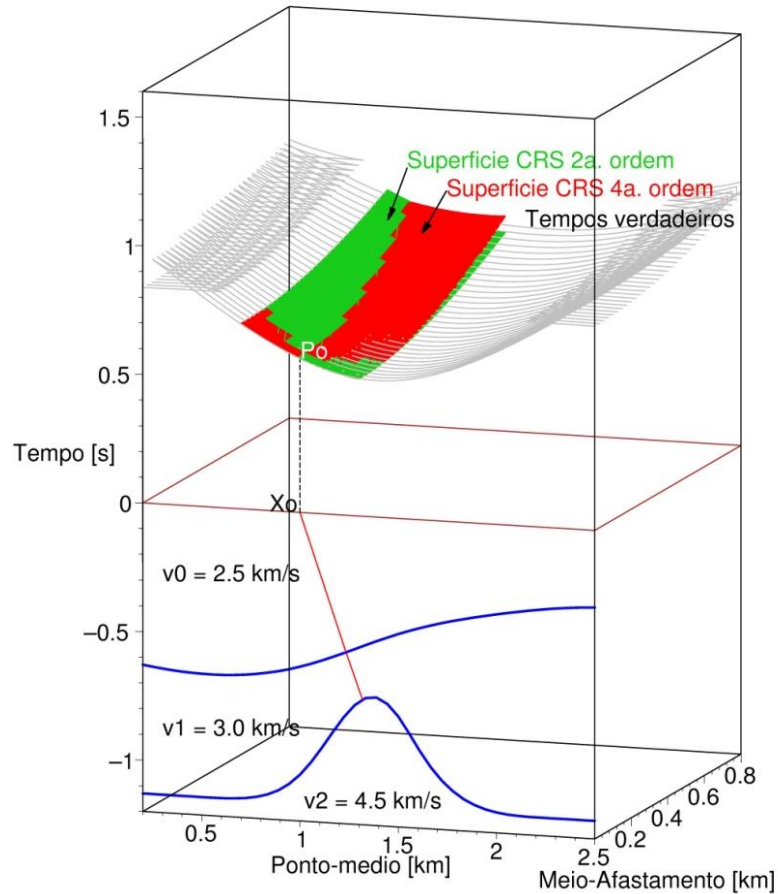
O cálculo da aproximação do tempo de trânsito na sísmica, consiste na estimativa do intervalo de tempo que um impulso leva para se propagar de uma fonte à um receptor, após a reflexão em uma interface em profundidade. Dessa maneira, é possível tratar o problema do cálculo dos tempos de trânsito, como um problema de otimização, cuja solução levará, pelo menos teoricamente, a uma fórmula exata. Porém, como há poucos casos em que é encontrada uma fórmula exata para os tempos de trânsito, é importante desenvolver aproximações que sejam mais gerais possíveis, para assim, serem válidas para um grande número de modelos sísmicos.

As aproximações de tempo de trânsito levadas em consideração neste trabalho, são as aproximações de tempo de trânsito CRS hiperbólico e não-hiperbólico. Onde será testada a eficiência destes métodos de empilhamento, para simular seções ZO utilizando dados sintéticos.

#### 3.1 Aproximações de Tempo de Trânsito CRS Hiperbólico

A aproximação de tempo de trânsito CRS hiperbólico, consiste em uma das aproximações de tempo trânsito utilizado no método de empilhamento sísmico CRS (TYGEL et al., 1997). Esta aproximação permite simular seções ZO a partir de dados de cobertura múltipla, independente do macro-modelo de velocidade. A mesma descreve o tempo de trânsito de raios paraxiais arbitrários na vizinhança de um raio central ou raio ZO, demonstrada pela Teoria Paraxial do raio ou pela aproximação geométrica (SCHLEICHER et al., HÖCHT et al., 1999). Esta expressão de tempos de trânsito pode ser apresentada matematicamente de duas formas: como a aproximação CRS de 2ª ordem e também com uma expansão de Taylor da anterior aproximação denominada CRS de 4ª ordem (Figura 13).

Figura 13 – Parte inferior (frontal): Modelo 2-D constituído por duas camadas sob um semi-espço, cuja interface é similar a um domo. Parte superior: curvas de tempos de trânsito ZO dos dados pré-empilhados (linhas cor cinza) e as superfícies CRS de segunda-ordem (em verde) e de quarta-ordem (em vermelho).



Fonte: Chira (2003).

### 3.1.1 Aproximação de Tempo de Trânsito CRS de 2ª ordem

A aproximação de tempo de trânsito CRS de 2ª ordem é uma aproximação hiperbólica, também conhecida como aproximação CRS convencional, e pode ser expressa pela equação a seguir, em função do trio paramétrico  $\beta_0$ ,  $R_{NIP}$  e  $R_N$  (TYGEL et al, 1997; SCHLEICHER et al., 1993):

$$t_{2,ref}^2(x_m, h) = \left[ t_0 + \frac{2\text{sen}\beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2t_0\text{cos}^2\beta_0}{v_0} [K_N(x_m - x_0)^2 + K_{NIP}h^2], \quad (13)$$

sendo  $x_m$  e  $h$  as coordenadas ponto-méio e o meio afastamento, respectivamente;  $v_0$  a velocidade próxima a superfície de medição;  $x_0$  a coordenada do ponto de emergência do raio de reflexão normal e,  $t_0$  o tempo de trânsito duplo ao longo da trajetória do raio normal.

Os parâmetros CRS da equação 13 são dados pelo trio paramétrico: o ângulo de emergência do raio de reflexão normal da linha de medição ( $\beta_0$ ), a curvatura da onda hipotética NIP ( $K_{NIP} = 1/R_{NIP}$ ) e a curvatura da onda hipotética N ( $K_N = 1/R_N$ ).

A partir da aproximação de tempo de trânsito CRS, pode-se definir uma superfície ou curvatura de empilhamento CRS. Para isso, é necessário levar-se em consideração algumas condições tais como: o conhecimento a priori da velocidade próxima a linha de aquisição  $v_0$ ; obter as coordenadas  $x_m$  e  $h$  bem definidas, e o trio paramétrico cinemáticos ( $\beta_0$ ,  $R_{NIP}$ ,  $R_N$ ) bem determinados para um ponto de amostragem  $P_0(x_0, t_0)$ . Esta superfície de empilhamento é também chamada de superfície CRS.

### 3.1.2 Aproximação de Tempo de Trânsito CRS de 4ª ordem

A aproximação de tempo de trânsito de 4ª ordem, proposta por Höcht et al. (1999), é uma expansão de Taylor da aproximação CRS convencional ou aproximação de tempo de trânsito de 2ª ordem. E é expressa da seguinte maneira (HÖCHT et al., 1999):

$$t_{4,ref}^2(x_m, h) = t_{2,ref}^2(x_m, h) + \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0} \left[ A(x_m - x_0)h^2 + B(x_m - x_0)^3 + C(x_m - x_0)^4 + D(x_m - x_0)^2 h^2 + E h^4 \right], \quad (14)$$

sendo,

$$A = 2K_{NIP} \text{sen} \beta_0 [2 - 2v_0 t_0 K_N - v_0 t_0 K_{NIP}],$$

$$B = 2K_N \text{sen} \beta_0 [2 - 2v_0 t_0 K_N],$$

$$C = K_N^2 [5 \cos^2 \beta_0 - 4] [1 - v_0 t_0 K_N / 2],$$

$$D = K_{NIP} \left\{ \begin{array}{l} 2v_0 t_0 [3 - 4 \cos^2 \beta_0] K_N^2 + K_N [4 - 5 \cos^2 \beta_0] [-2 + v_0 t_0 K_{NIP}] \\ - 2K_{NIP} \text{sen}^2 \beta_0 [2 - v_0 t_0 K_{NIP}] \end{array} \right\},$$

$$E = K_{NIP}^2 [2v_0 t_0 K_N \text{sen}^2 \beta_0 - (v_0 t_0 K_{NIP} \cos^2 \beta_0 / 2) + \cos^2 \beta_0].$$

A finalidade desta expansão era a busca de uma aproximação de tempo de trânsito mais exata. Esta expansão está baseada na construção do tempo de trânsito exato para um meio não homogêneo onde eles consideraram uma onda emergente cuja frente de onda é circular e definida pelos mesmos parâmetros da aproximação CRS de 2ª ordem. Esta onda propaga-se com velocidade constante  $v_0$  próxima à superfície (equação 14).

### 3.2 Aproximação de Tempo de Trânsito CRS Não-hiperbólico

Esta aproximação de tempo de trânsito CRS, foi proposta por Fomel e Kazinnik (2012). A forma desta aproximação segue de uma equação analítica para o tempo de trânsito de reflexão segundo um refletor de forma hiperbólica. Os autores demonstraram que esta nova aproximação pode, significativamente, estender o intervalo de exatidão do método CRS.

O empilhamento convencional pode ser descrito segundo a equação a seguir (equação 15):

$$S(t_0, m_0) = \int P(\theta(h; t_0), m_0, h) dh, \quad (15)$$

onde  $S(t_0, m_0)$  é a seção empilhada,  $P(t, m, h)$  representa os dados sísmicos pré-empilhados como uma função do tempo  $t$ , ponto-médio  $m$  e meio-afastamento  $h$  do par fonte-receptor.  $\theta(h; t_0)$  é a aproximação do moveout, que podem assumir a forma de uma hipérbole

$$\theta(h; t_0) = \sqrt{t_0^2 + \frac{4h^2}{v^2}} \quad (16)$$

com  $v$  como um parâmetro efetivo de velocidade ou, alternativamente, uma forma funcional não-hiperbólica mais elaborada que envolve outros parâmetros (FOMEL; STOVAS, 2010).

O empilhamento CRS assume uma forma diferente:

$$\hat{S}(t_0, m_0) = \iint P(\hat{\theta}(m - m_0, h; t_0), m, h) dm dh, \quad (17)$$

onde a integral sobre o ponto médio  $m$  normalmente é realizada somente sobre uma área limitada de  $m_0$ .

A aproximação CRS (Jäger et al., 2001) segue a equação a seguir:

$$\hat{\theta}_{\text{CRS}}(d, h; t_0) = \sqrt{F(d) + b_2 h^2}, \quad (18)$$

em que  $F(d) = (t_0 + a_1 d)^2 + a_2 d^2$ , sendo os três parâmetros  $\{a_1, a_2, b_2\}$  apresentados a seguir:

$$a_1 = \frac{2 \sin \beta}{v_0}, a_2 = \frac{2 \cos^2 \beta K_N t_0}{v_0}, b_2 = \frac{2 \cos^2 \beta K_{NIP} t_0}{v_0} \quad (19)$$

Na aproximação CRS anterior (equação 15), ainda pode ser feito algumas modificações:

$$\hat{\theta}(d, h; t_0) = \sqrt{\frac{F(d) + ch^2 + \sqrt{F(d-h)F(d+h)}}{2}}, \quad (20)$$

onde  $c = 2b_2 + a_1^2 - a_2$ . Esta equação 20, é a chamada aproximação de tempo de trânsito CRS não-hiperbólica. Nela, a expansão de Taylor de segunda-ordem, considera-se  $d=0$  e  $h=0$  que equivale à equação 6.5.

Dois casos especiais devem ser levados em consideração:

1. Se  $a_2 = 0$  ou  $K_N = 0$ , a equação 20 passa a ser equivalente a equação 18, sendo  $F(d) = (t_0 + a_1 d)^2$ . Em um meio com velocidade constante, neste caso, corresponde à reflexão a partir de um refletor plano.
2. Se  $a_2 = b_2$  ou  $K_{NIP} = 0$ , neste caso, a equação 20, em um meio com velocidade constante, corresponde a um ponto difrator. Torna-se o equivalente a:

$$\hat{\theta}(d, h; t_0) = \frac{\sqrt{F(d-h)} + \sqrt{F(d+h)}}{2}, \quad (21)$$

Em termos do trio paramétrico: ângulo de emergência ( $\beta_0$ ), curvatura da frente de onda N ( $K_N$ ) e a curvatura da frente de onda NIP ( $K_{NIP}$ ), temos a aproximação de tempo de trânsito não-hiperbólico proposta por Fomel e Kazinnik (2012) para o método CRS. Esta, é descrita com o mesmo número de parâmetros da aproximação de tempo de trânsito CRS de 2ª ordem ou aproximação CRS convencional e pode ser expressa pela equação a seguir:

$$t_{CRS,NH}^2(x_m, h) = \frac{1}{2} \left[ t_0 + \frac{2\text{sen}\beta_0}{v_0} x_m \right]^2 + \frac{t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} x_m^2 + \left[ \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{NIP}} + \frac{2\text{sen}^2 \beta_0}{v_0^2} - \frac{t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} \right] h^2 + \frac{\sqrt{F * G}}{2} \quad (22)$$

sendo:

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

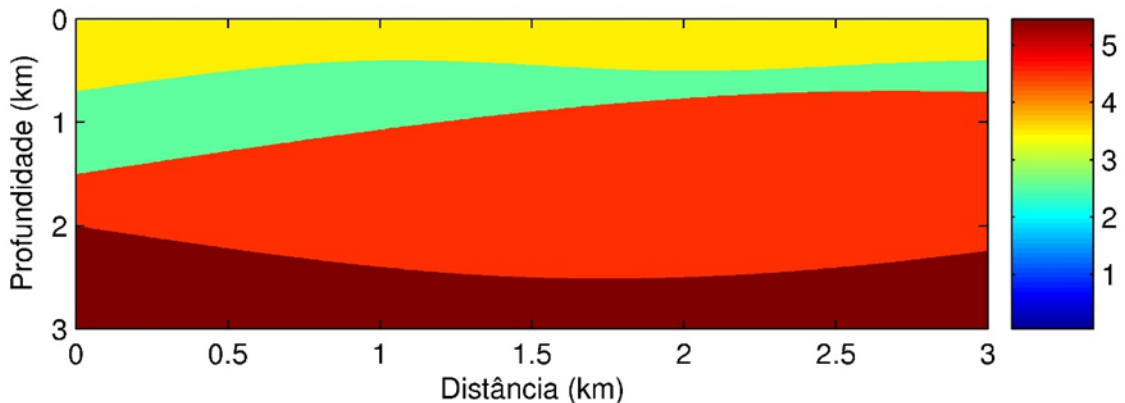
$$G = \left[ \left( t_0 + \frac{2\text{sen}\beta_0}{v_0} (x_m + h) \right)^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} (x_m + h)^2 \right].$$

## 4 RESULTADOS

Neste t3pico, ser3 apresentado os resultados gerados a partir da realiza33o da etapa de empilhamento s3smico considerando as aproxima33es de tempo de tr3nsito CRS hiperb3lico e n3o-hiperb3lico, destacadas neste trabalho. Os testes realizados visaram demonstrar a efici3ncia destes m3todos de empilhamento para simular se33es ZO com presen3a de reflex3es m3ltiplas do tipo sim3trica.

O modelo 2-D considerado neste estudo est3 constitu3do por tr3s camadas homog4neas sob um semi-esp3o e separadas por interfaces curvas e suaves (Figura 14). As velocidades para cada camada, desde o topo at3 a base, s3o: 3,5 km/s, 2,5km/s, 4,5km/s e 5,5 km/s. As dimens3es do modelo s3o: 3,0 km de comprimento por 3,0 km de profundidade. A simula33o de aquisi33o foi realizada considerando uma linha horizontal. As reflex3es m3ltipla-sim3tricas geradas correspondem a terceira camada.

Figura 14 - Modelo 2-D constitu3do por tr3s camadas separadas com interfaces curvas e suaves sob um semi-esp3o.



Baseado neste modelo foi gerado o conjunto de dados sint3ticos de reflex3o de cobertura m3ltipla utilizando o algoritmo de tra3amento de raio, SEIS88 (Cerveny e Psensik, 1988). Os dados n3o cont3m ru3do e foram gerados utilizando a configura33o common-shot (CS) ou de tiro comum. O m3nimo e m3ximo afastamento foram 0,6 km e 2,9 km, respectivamente.

Foi considerada uma fonte tipo Ricker com uma frequ3ncia 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 distribu3dos 48 geofones com espa3amentos de 0,025 km entre eles. A posi33o do 3ltimo geofone 3  $x_G = 2,3$  km. Consideramos 70 tiros com intervalos de 0,05 km cada. A se33o s3smica ZO a ser simulada 3 mostrada na Figura 15 e consta de 81 tra3os com intervalos de 0,025 km.

A Figura 15 representa uma seção ZO obtida através do traçamento de raios com o software SEIS88 apresentando as reflexões primárias e as múltiplas simétricas que se encontra destacado pelo retângulo vermelho. Com a finalidade de destacar melhor as múltiplas imageadas na Figura 15, são destacadas estas reflexões através de um respectivo ganho (Figuras 16).

Figura 15 - Seção ZO obtida através do traçamento de raios com o software SEIS88 apresentando as reflexões primárias e/ou múltiplas (destacados no retângulo em vermelho).

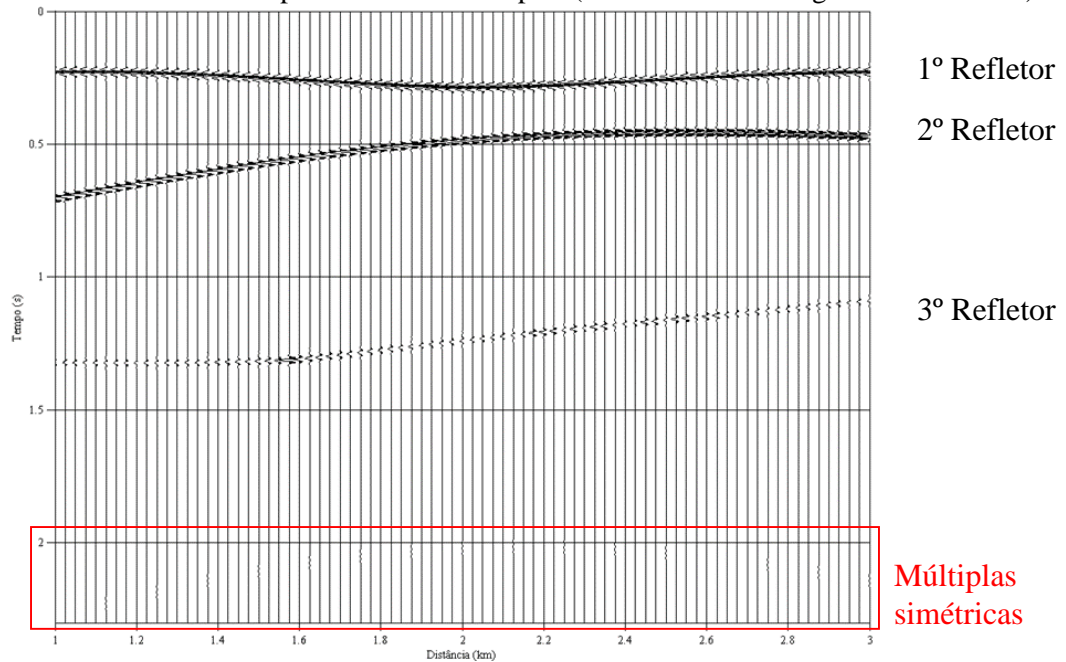
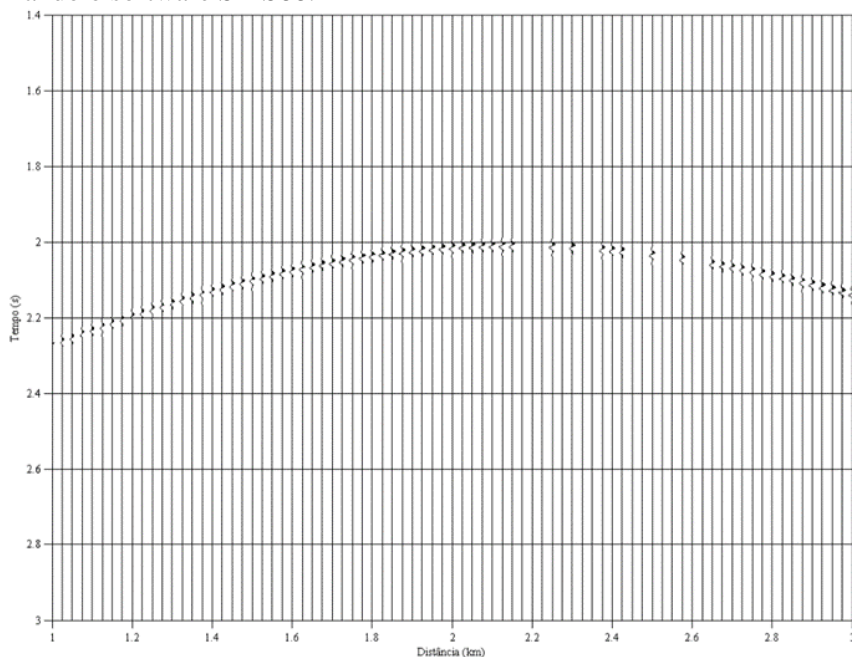


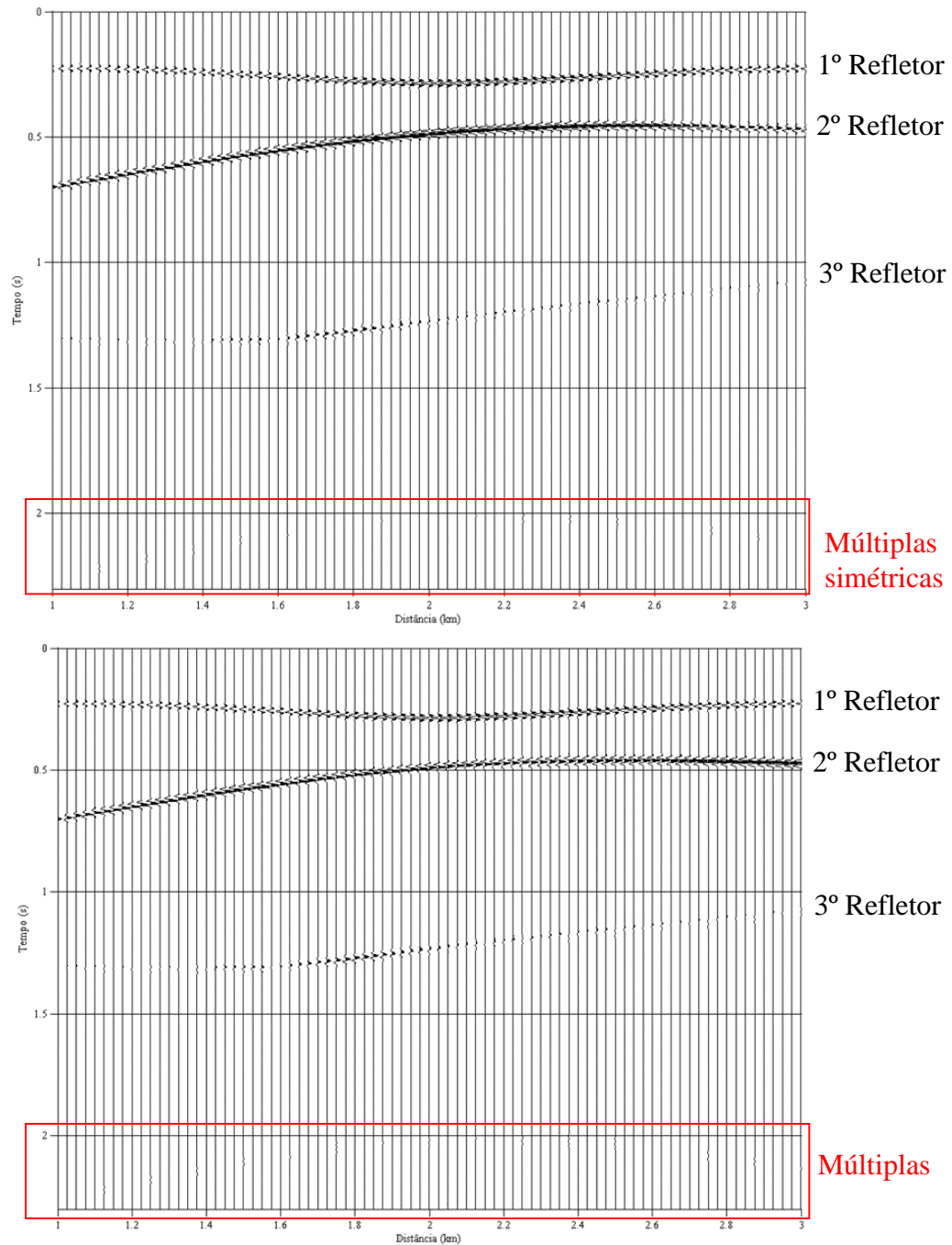
Figura 16 - Reflexões múltiplas-simétricas ZO simuladas com o traçamento de raios utilizando o software SEIS88.



Ao aplicar as aproximações CRS hiperbólicas (2ª e 4ª ordem), foram obtidas as seções ZO simuladas (Figura 17). Podemos observar a presença das reflexões primárias e das reflexões múltiplas geradas na terceira camada. Ambas as aproximações CRS hiperbólicas apresentam um desempenho aceitável na simulação de eventos de reflexões primárias e múltipla-simétricas.

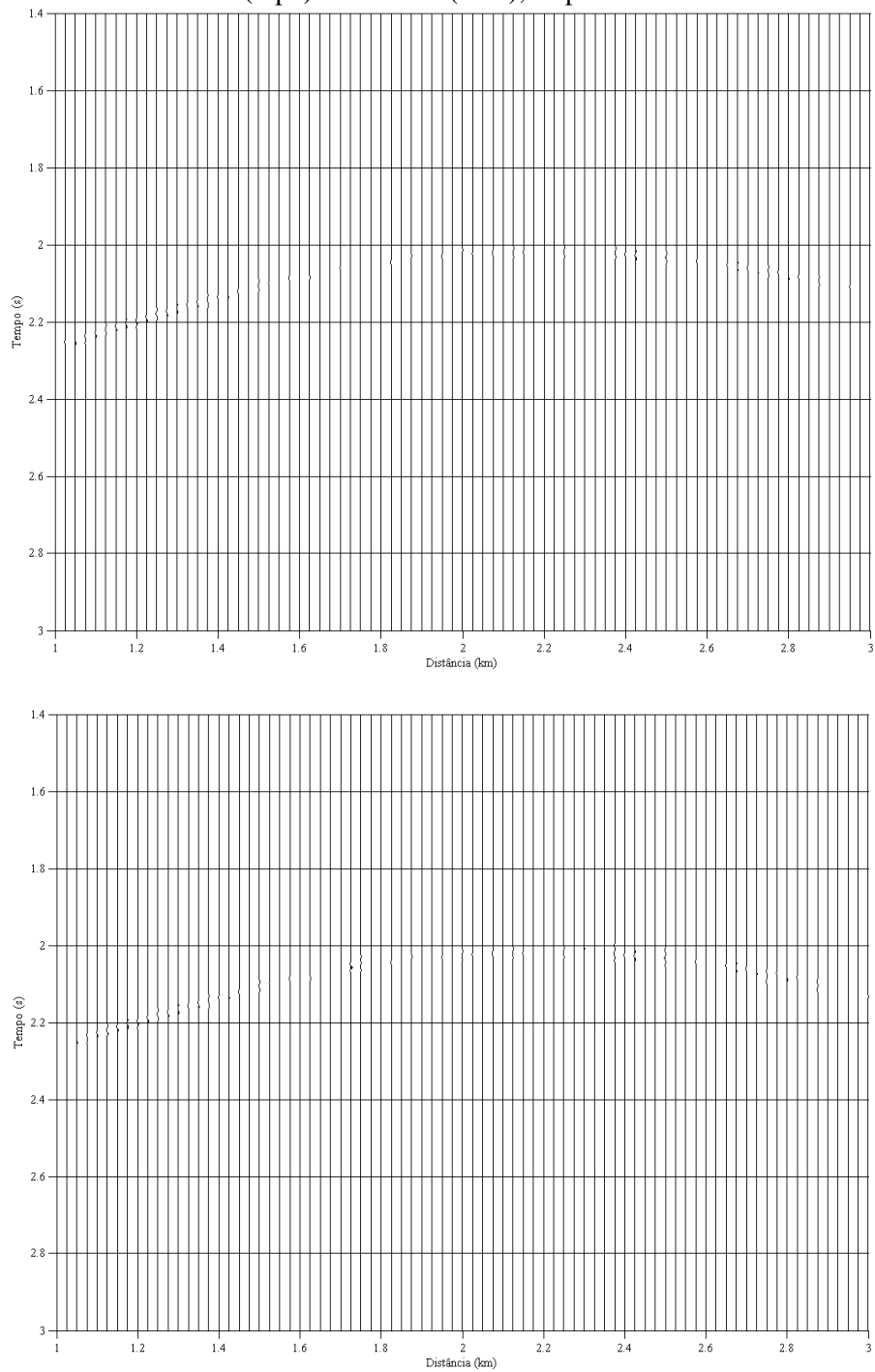
Comparando a seção ZO original (Figura 15), com as obtidas pelas aproximações CRS de 2ª e 4ª ordem (Figura 17), observa-se uma boa definição dos refletores e uma boa aproximação da seção original.

Figura 17 - Topo: Seção ZO simulada utilizando a aproximação CRS hiperbólica de 2ª ordem. Base: Seção ZO simulada utilizando a aproximação CRS hiperbólica de 4ª ordem. As reflexões múltiplas (ver retângulo vermelho) apresentam-se com uma amplitude muito baixa devido a perda do sinal com a profundidade.



Posteriormente com a finalidade de realçar as reflexões múltiplas simétricas simuladas com o método CRS (Figuras 17) foi aplicado um ganho que é visualizado através de um zoom ampliado (Figuras 18).

Figura 18 - Reflexões múltiplas-simétricas ZO simuladas com as aproximações CRS hiperbólicas de 2ª ordem (topo) e 4ª ordem (base), respectivamente



Finalmente foi aplicado a aproximação de tempos CRS não-hiperbólico ao modelo da Figura 14. A seção ZO simulada com esta aproximação de tempos de trânsito é apresentada na Figura 19. Podemos observar a presença das reflexões primárias e das reflexões múltiplas geradas na terceira camada. Assim como nos resultados anteriores, também foi aplicado um

ganho nas reflexões múltiplas-simétricas para dar realce a estes eventos de reflexão (Figura 20).

Figura 19 - Seção ZO simulada utilizando a aproximação CRS não-hiperbólica.

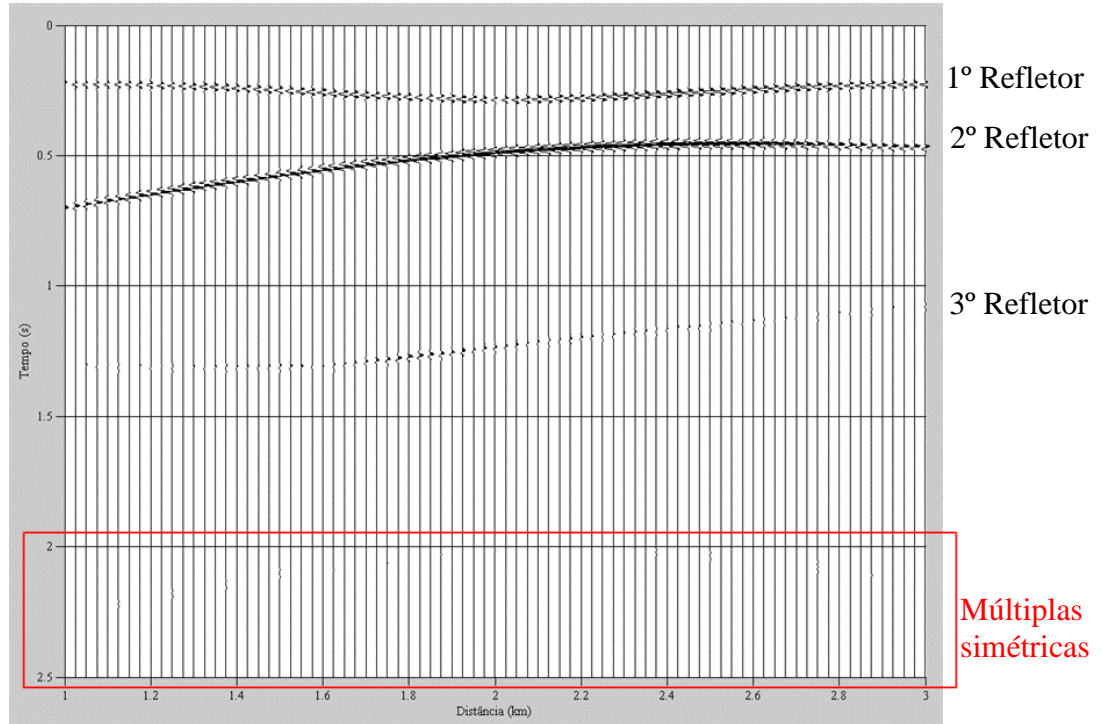
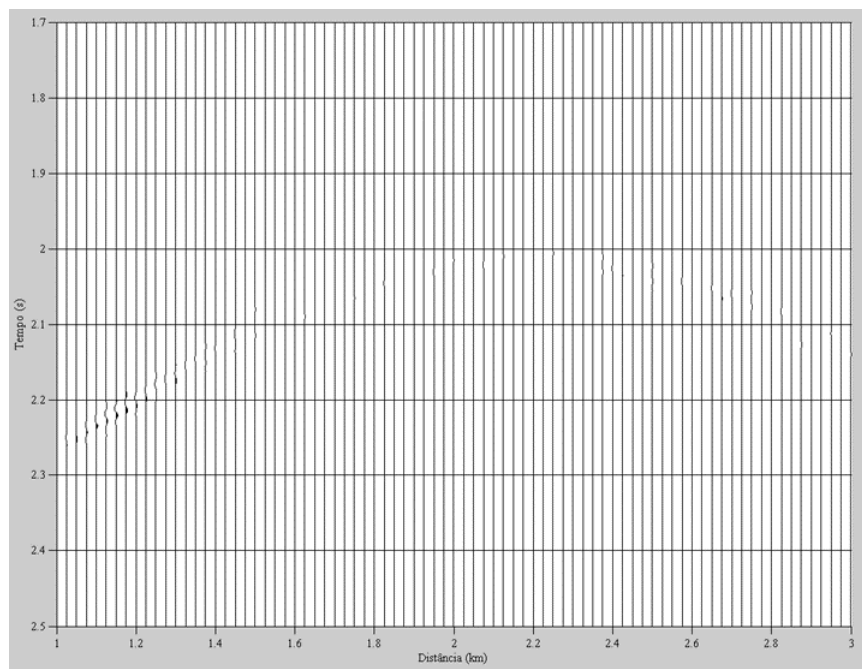


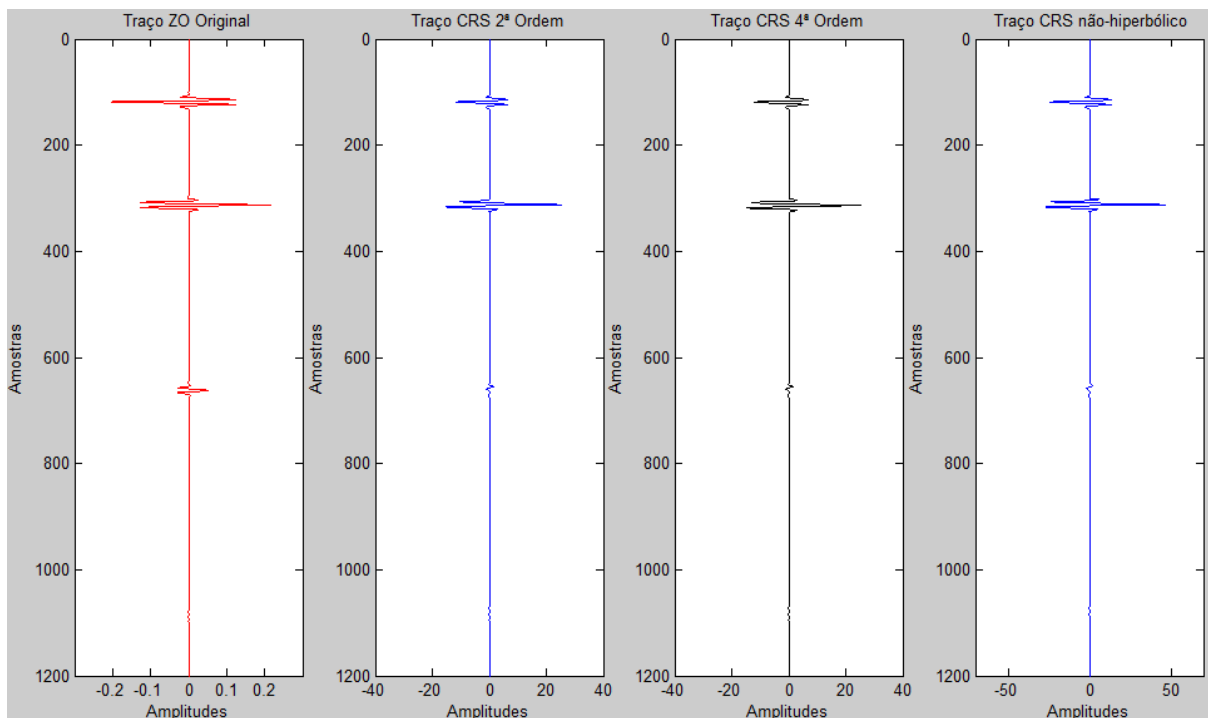
Figura 20 - Reflexões múltiplas-simétricas ZO simuladas com as aproximações CRS não-hiperbólica.



A continuação apresentaremos uma comparação entre o traço sísmico ZO original, e os demais traços sísmicos recuperados com os resultados do empilhamento CRS hiperbólico, assim como, com o empilhamento CRS não-hiperbólico. Esta comparação será feita tanto no flanco esquerdo, quanto no meio e flanco direito, respectivamente, para assim ter-se uma interpretação mais detalhada dos traços recuperados em relação ao original.

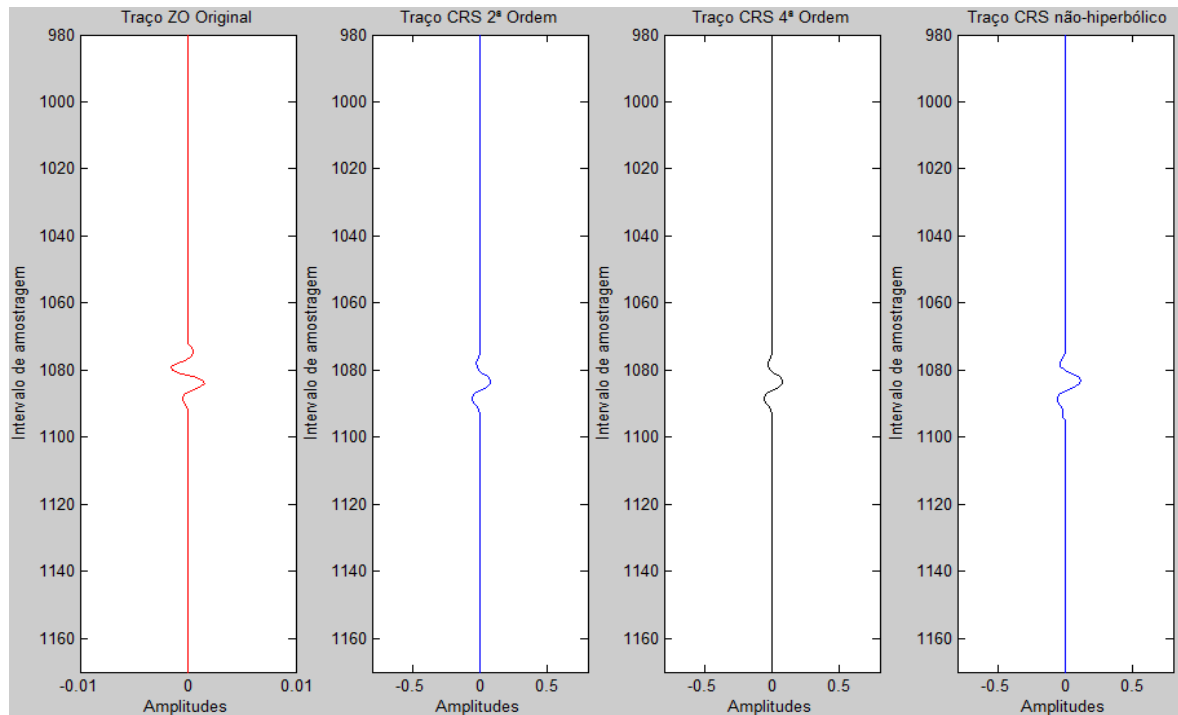
Na Figura 21, a comparação entre o traço ZO original e os traços recuperados com os resultados do empilhamento CRS hiperbólico e com o empilhamento CRS não-hiperbólico, respectivamente, é feita no flanco esquerdo do modelo da Figura 14, sendo o pulso selecionado localizado na posição  $x_0 = 1,4$  km. Neste caso, observa-se que tanto as aproximações CRS hiperbólicas (segunda e quarta-ordem) quanto a CRS não-hiperbólico recuperaram bem a forma do traço ZO original, para as reflexões primárias. No caso do terceiro refletor (Figura 22), os traços recuperados (CRS de segunda e quarta-ordem e CRS não-hiperbólico) apresentaram uma diminuição na amplitude do traço.

Figura 21 – Comparação dos traços sísmicos empilhados na posição  $x_0 = 1,4$  km, da seção zero-offset (SZO): traço empilhada ZO original; traços de segunda, quarta-ordem e CRS não-hiperbólico, respectivamente.



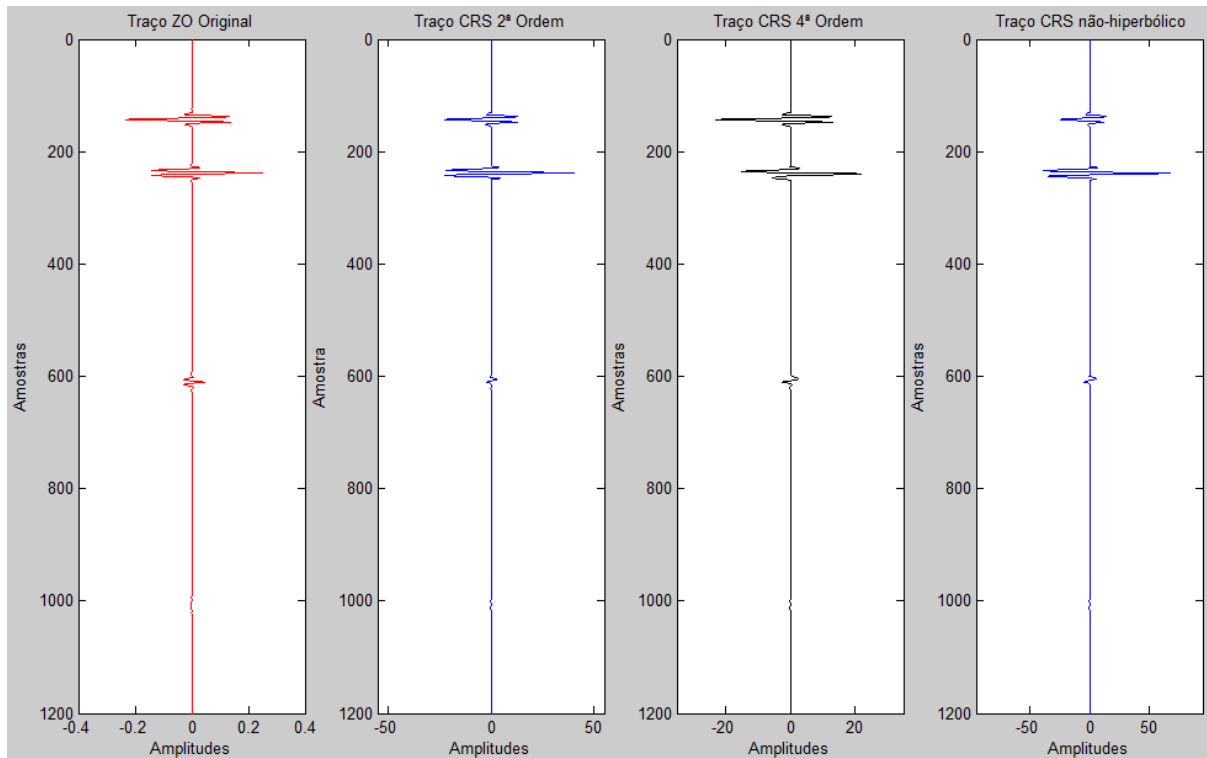
E, com relação as reflexões múltiplas, que perdem energia com a profundidade, as mesmas foram destacadas na Figura 22. Analisando esta Figura observa-se que os traços simulados recuperaram bem a forma e aumentam ligeiramente a amplitude do traço ZO original.

Figura 22 – Múltiplas decorrente do traço da seção zero-offset (SZO), localizada na posição  $x_0 = 1,4$  km.



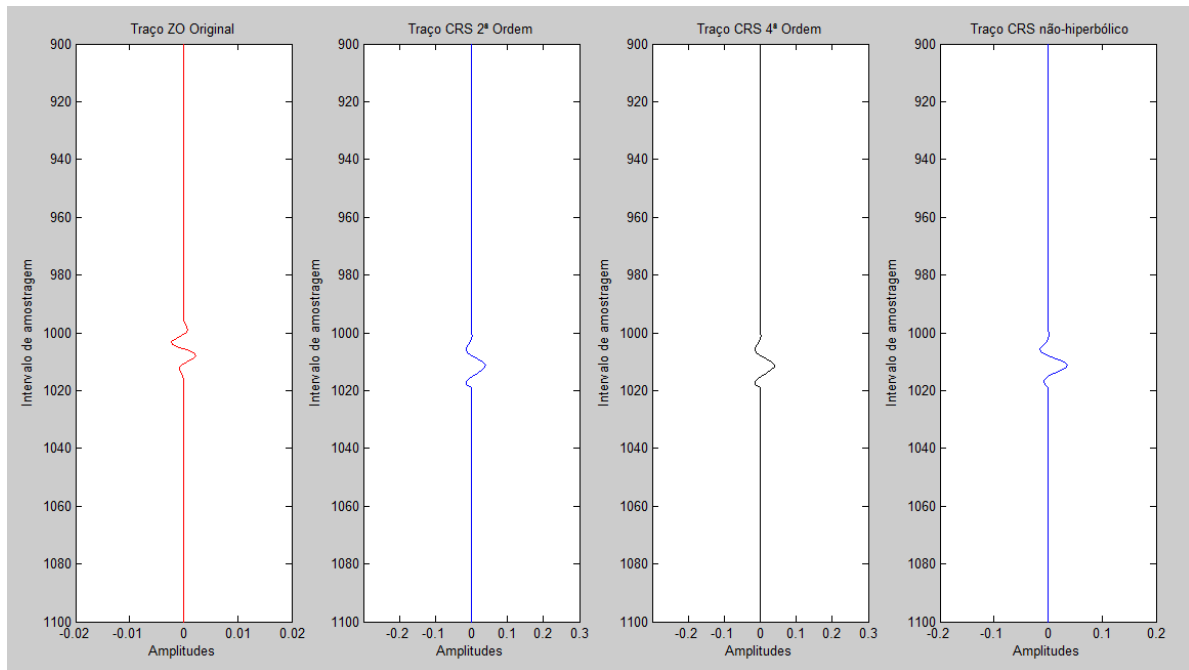
Na parte central do modelo da Figura 14 (Figura 23), o pulso selecionado foi o referente a posição  $x_0 = 2,2$  km . Neste caso, verifica-se que, assim como na Figura 21, tanto os métodos de empilhamento CRS hiperbólico (2ª e 4ª ordem) como o CRS não-hiperbólico, recuperaram bem o traço ZO original, contudo, o CRS de 4ª ordem que apresentou uma recuperação um pouco deformada no segundo refletor. No terceiro refletor também houve um decréscimo na amplitude do traço simulado para este refletor.

Figura 23 – Comparação dos traços sísmicos empilhados localizado na posição  $x_0 = 2,2\text{km}$ , da seção zero-offset (SZO) do modelo da figura 14: traço empilhada ZO original; traço CRS de segunda, quarta-ordem e CRS não-hiperbólico, respectivamente.



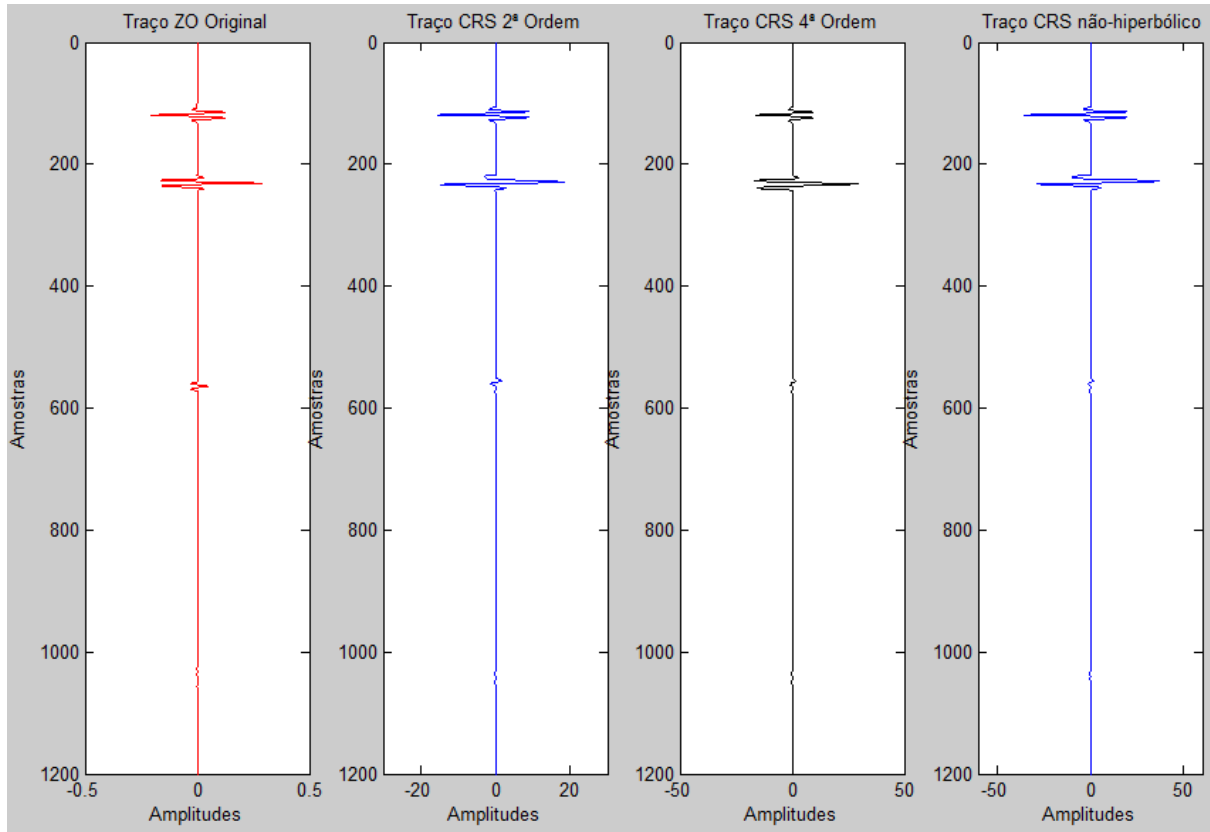
As múltiplas, neste caso, devido apresentarem baixa amplitude em relação aos primeiros refletores, foram destacadas com um zoom ampliado na Figura 24. Podemos observar que recuperasse bem a forma e a amplitude apresentasse aumentada em relação ao traço original ZO, para ambos os métodos (CRS hiperbólico e CRS não-hiperbólico).

Figura 24 – Múltiplas decorrente do traço da seção zero-offset (SZO), localizada na posição  $x_0 = 2,2$  km.



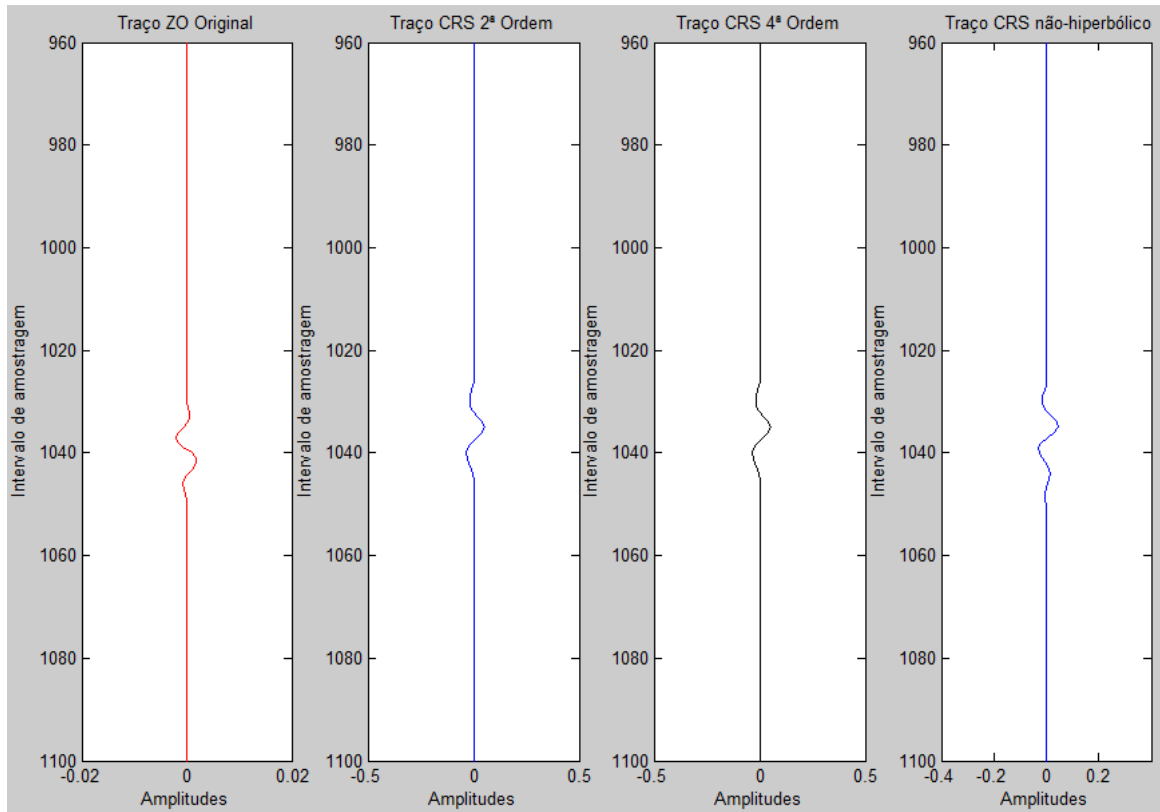
No flanco direito do modelo da Figura 14, o pulso selecionado é o correspondente à posição  $x_0 = 2,8$  km (Figura 25). Neste caso verificou-se que todos os métodos de empilhamento aplicados, recuperaram bem a forma do traço ZO original, mas o CRS de 2ª ordem e o CRS não-hiperbólico não recuperam bem parte da forma do pulso do 2º refletor. Há uma diminuição na amplitude do traço simulado do terceiro refletor.

Figura 25 – Comparação do traço sísmico empilhado localizado na posição  $x_0 = 2,8$  km, da seção zero-offset (SZO): traço empilhado ZO original, traços CRS de segunda, quarta-ordem e CRS não-hiperbólico, respectivamente.



Em relação a múltipla, assim como nos exemplos anteriores, também foi destacada através de um zoom ampliado, devido à baixa amplitude (Figura 26). Os traços simulados recuperaram bem a forma e amplitude do traço ZO original. O CRS não-hiperbólico teve uma recuperação ligeiramente deformada no pulso da múltipla.

Figura 26 – Múltipla decorrente do traço da seção zero-offset (SZO), localizado na posição  $x_0 = 2,8$  km.



## 5 CONCLUSÃO

A aproximações de tempos de trânsito CRS hiperbólicas (2ª e 4ª ordem) e não-hiperbólica simulam satisfatoriamente as seções zero-offset (ZO). Segundo os resultados obtidos, podemos observar um bom posicionamento dos tempos de trânsito e uma boa visualização dos referidos eventos, principalmente nos refletores mais próximos a superfície por possuírem maior energia.

Podemos notar ainda, que não há grande diferença de imageamento entre as aproximações CRS hiperbólicas e não-hiperbólica quando o máximo afastamento fonte-receptor é de 3 km para o referido modelo 2-D em questão.

Contudo, na simulação de reflexões múltiplas-simétricas ZO a aproximação de tempos de trânsito CRS não-hiperbólica é ligeiramente um pouco melhor no flanco esquerdo do modelo testado quando comparado com as aproximações de tempos de trânsito CRS hiperbólicas.

Na análise dos traços simulados para as posições selecionadas para o modelo deste trabalho, os métodos de empilhamento CRS hiperbólico e CRS não-hiperbólico, mostrou em geral uma boa recuperação da forma e um aumento na amplitude do traço ZO original. Observou-se também uma diminuição na amplitude do 3º refletor nos traços analisados, devido à perda de energia com a profundidade.

As reflexões múltiplas decorrentes da seção zero-offset (SZO), para os métodos de empilhamento CRS hiperbólico e não-hiperbólico, para o modelo testado, no geral recuperaram bem a forma e com um aumento da amplitude do traço original ZO.

## 6. PERSPECTIVAS FUTURAS

- Considerar modelos 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) para o caso de reflexões múltiplas do tipo simétrica.
- Comparar os resultado anteriores com a aproximação de tempos de transito não-hiperbólica geral proposta por Fomes e Stovas (2010) para avaliar o desempenho desta última.
- Considerar modelos que apresentem velocidades com decrescimento em relação às outras camadas em profundidade.

## REFERÊNCIAS

- CABRAL, R. *Simulação de reflexões múltiplas usando o método de empilhamento sísmico superfície de reflexão comum*. 2002. vii, 44f. Tese (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.
- ČERVENÝ, V.; PSENCIK, I. *SEIS88, ray tracing program package*. 1988.
- 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*, v. 12, p.197–219, 2003.
- DE BAZELAIRE, E. *Normal moveout revisited – inhomogeneous media and curved interfaces*. *Geophysics*, v. 53, n.2, p. 143–157, Feb. 1988.
- FERNANDES, A. *Interpolação de traços sísmicos em dados pré-empilhamento usando aproximação de tempo de trânsito SRC-AF*. 2014. 73f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.
- FOMEL, S.; STOVAS, A. Generalized nonhyperbolic moveout approximation. *Geophysics*, v. 75, n. 2, U8-U18, 2010.
- FOMEL, S.; KAZINNIK, R. Non-hyperbolic common reflection surface. *Geophysical Prospecting*, 61, n.1, p. 21–27, 2012.
- HÖCHT, G.; DE BAZELAIRE, E.; MAJER, P.; HUBRAL, P. Seismic and optics: hyperbolae and curvatures. *Journal Applied Geophysics*, v. 42, n. 3-4, p. 261-282, Dec. 1999.
- HUBRAL, P. Computing true reflexions in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, v. 48, n.8, p. 1051-1062, Ago. 1983.
- JÄGER, R.; MANN, J.; HÖCHT, G.; HUBRAL, P. Common reflection surface: image and attributes. *Geophysics*, v. 66, n.1, p. 97-109, 2001.
- 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. (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.
- TANER, M. T.; KOEHLER, F. *Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity functions*. *Geophysics*, v. 34, n. 6, p. 859-881, 1969.
- 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 multiparametertraveltime expansions. In: ANNUAL MEETING OF SEG, 67., [S.l.] *Expanded abstracts*, [S.l.], 1997. p. 1770-1773.

YILMAZ, O. *Seismic data analysis*. Tulsa, OK: Soc. of Expl. Geophys., 2000.