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

ANGELA DA SILVEIRA MONTALVÃO

IMAGEAMENTO SÍSMICO DE REFLEXÕES PRIMÁRIAS UTILIZANDO AS PRINCIPAIS APROXIMAÇÕES DE TEMPO DE TRÂNSITO HIPERBÓLICAS E NÃO-HIPERBÓLICAS

Belém - Pará

2014

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

ANGELA DA SILVEIRA MONTALVÃO

IMAGEAMENTO SÍSMICO DE REFLEXÕES PRIMÁRIAS UTILIZANDO AS PRINCIPAIS APROXIMAÇÕES DE TEMPO DE TRÂNSITO HIPERBÓLICAS E NÃO-HIPERBÓLICAS

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 - Pará

2014

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

M474i Montalvão, Angela da Silveira, 1991-

Imageamento sísmico de reflexões primárias utilizando as principais aproximações de tempo de trânsito hiperbólicas e não-hiperbólicas / Angela da Silveira Montalvão – 2014

59 f. : il.: 30 cm.

Orientador: Pedro Andrés Chira Oliva

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

1. Prospecção – Métodos geofísicos. 2. Métodos de reflexão sísmica. 3. Ondas sísmicas - Velocidade. I. Título.

CDD 22. ed.: 622.159

ANGELA DA SILVEIRA MONTALVÃO

IMAGEAMENTO SÍSMICO DE REFLEXÕES PRIMÁRIAS UTILIZANDO AS PRINCIPAIS APROXIMAÇÕES DE TEMPO DE TRÂNSITO HIPERBÓLICAS E NÃO-HIPERBÓLICAS

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.

Data de Aprovação: 31 / 03 / 2014
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

Ao meu querido irmão Ícaro, por provar a todos da família que os planos de Deus são melhores que podemos imaginar.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, Pai de toda sabedoria e misericórdia, por nunca faltar-me, ser minha força, esperança e verdadeira felicidade.

Aos meus pais Edson e Helena, por todo amor, confiança, empenho e apoio em minha caminhada em busca de meus sonhos.

À minha família Montalvão, principalmente aos meus irmãos Ícaro e Jairo ao quais admiro imensamente.

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

Ao CNPq pelo financiamento.

Aos professores Alberto Mello, Cristiano Martins, Ellen Gomes, Geraldo das Virgens, Jessé Costa, José Gouveia, Lucia Costa e Silva pelos ensinamentos e oportunidades ao longo de minha graduação.

À Cássia Pantoja, Cybelli Gonçalves, Luciana Correa, Sarah Sales e Mayara Nogueira, amigas de longa data que mantiveram o carinho e a atenção até quando me ausentei.

Aos solícitos Érico Shimada e Higor Palheta, pela amizade e paciência, assim como os ensinamentos dados e aplicados neste trabalho.

Aos meus queridos amigos Isis Tourinho e Marcelo Mesquita pela ajuda, conselhos em meio a divertidos dias.

Aos meus amigos Diego Pereira, Erlane Santos, Glessiane Vasconcelos, Iverson Lima, Jeferson Santos, Jéssica Henriques, João Silva, Natiê Albano, Victor Ferreira, Vitor Alfaia e toda turma de 2010 por terem uma responsabilidade muito grande nessa longa estrada de universidade.

Ao meu grande amigo, companheiro Carlos Eduardo Amanajás, pelo carinho, diversão e por ser confidente de sentimentos, sonhos e planos durante o curso.

Aos amigos inesquecíveis que fiz durante esses quatro anos que tiveram importância notória em minha caminhada, em especial à Carol Sena e Jéssica Lia pelo cuidado de minhas emoções exageradas e serem os anjos que Deus colocou em meu caminho.

Aos meus amigos Diego Souza e Ingrid Rocha, por incentivarem meu ingresso no curso.

Muito daquilo que tive e guardei em minhas mãos, eu perdi e não as tenho mais. Mas tudo aquilo que guardei nas mãos de Deus, jamais perderei (Martin L. King).

RESUMO

O empilhamento sísmico tem o objetivo de simular um levantamento de afastamento nulo e é frequentemente aplicado no processamento de dados sísmicos de cobertura múltipla. Existem diversos métodos de imageamento sísmico que tem ganhado importância nos últimos anos para tratar de superar as limitações do conceito empilhamento convencional Common Midpoint, destacando entre eles, os métodos de empilhamento sísmico *Common-Reflection-Surface* (CRS), *Multifocusing* (MF) e o mais recente, Nonh*yperbolic CRS*. A simulação de uma seção sísmica zero offset (ZO), a partir de dados sísmicos de multi-cobertura, é um método padrão de imageamento utilizado no processamento sísmico para reduzir a quantidade de dados e aumenta a relação sinal/ruído. Neste trabalho, foram testados os desempenhos destas aproximações de tempos de trânsito, hiperbólicas e não-hiperbólicas, em dados sintéticos para simular seções sísmicas de afastamento-nulo (ZO) e verificar o comportamento das mesmas na recuperação da forma e amplitude dos traços ZO simulados.

Palavras-Chave: Empilhamento sísmico, CRS 2ª ordem, CRS 4ª ordem, Multifocusing, CRS não-hiperbólico, aproximações de tempo de trânsito hiperbólico, não-hiperbólico, seção ZO simulada.

ABSTRACT

The seismic stacking aims to simulate a survey of zero offset and is often applied in multiple coverage seismic data processing. There are several methods of seismic imaging that have gained importance recently in order to overcome limitations of conventional stacking Common Midpoint concept, emphasizing, the methods of seismic stacking Common-Reflection -Surface (CRS), Multifocusing (MF) and the recent Nonhyperbolic CRS. The simulation of a seismic section zero offset (ZO), based on multi coverage seismic data is a standard imaging method used in seismic processing to reduce the amount of data and to increases the signal/noise ratio. In this work, the performances of these approaches transit times, hyperbolic and non- hyperbolic, were tested on synthetic data to simulate seismic sections zero offset (ZO) and to verify their recovery shape behavior and the amplitude of ZO simulated traces.

Keywords: Seismic Stacking, CRS 2nd order, 4th order CRS, Multifocusing, Non-hyperbolic CRS, Approximations of hyperbolic transit time, Non-hyperbolic, Simulated ZO section.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 Exemplo de um sistema sísmico representado por um modelo 2-D constituído por duas camadas sobre um semi-espaço. Cada camada esta separada por interfaces suaves e curvas. A trajetória de uma reflexão primária é dada pelo raio SRG 17

Figura 2.2 Configuração CS, todos os raios começam no mesmo ponto 19

Figura 2.3 Configuração CO, cada par fonte-receptor tem o mesmo afastamento..... 20

Figura 2.4 Configuração ZO, a posição das fontes é coincidente..... 20

Figura 2.5 Configuração CMP, todos os pares fonte-receptor tem o mesmo ponto médio comum 21

Figura 2.6 Raios na configuração CMP no caso de um refletor com mergulho, a coordenada do CDP não é mais a mesma coordenada do CMP..... 22

Figura 2.7 Propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico..... 24

Figura 2.8 Propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico. (*a*) Transmissão e (*b*) Reflexão 25

Figura 2.9 Convenção de sinais das (a) curvaturas das frentes de onda e (b) interfaces..... 26

Figura 2.10 Experimento hipotético mostrando (a) onda PIN produzida por um ponto difrator *R* sobre o reflector (em azul) e (b) onda N gerada por um experimento de refletor explosivo. As frentes de onda (em laranja) correspondentes ao raio normal (em vermelho) em *R* propagam-se de forma ascendente até atingir o ponto de emergência em X_0 (MANN, 2001)..... 27

Figura 2.11 Modelo sísmico 2-D com n-camadas e interfaces curvas e a trajetória do raio normal SG e do raio paraxial S'G' (modificado de Cabral, 2002)..... 29

Figura 2.12 Eventos primários, aplicando as leis de propagação e transmissão (modificado de Cabral, 2002)..... 31

Figura 3.1 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 (superfície cor verde) e de quarta-ordem (superfície cor vermelha), respectivamente (Chira, 2003)..... 34

Figura 3.2 Observa-se um raio normal $X_0R_0X_0$ e o raio paraxial SRG, referido ao refletor objetivo Σ. Focaliza-se o raio SRG com o raio central no ponto P em profundidade. Também são apresentadas as frentes de ondas ΣS, ΣG e o ângulo de emergência do raio normal denotado, β_0 (adaptado de Tygel et al. 1999)..... 37

Figura 3.3 Construção geométrica do sobretempo Multifoco ΔT_S (adaptado de Tygel et al. 1999)..... 38

Figura 4.1 Cubo de dados sísmicos de cobertura múltipla e a superfície de empilhamento inserida. (adaptada de, Duveneck 2004)..... 42

Figura 4.2 Modelo 2-D constituído por duas camadas de velocidades iguais, sobre um meio-espaço com interface curva..... 44

Figura 4.3 Traços sísmicos ZO verdadeiros gerados com o software SEIS88..... 45

Figura 4.4 Seção ZO simulada com o empilhamento CMP..... 45

Figura 4.5 Seção ZO simulada com o empilhamento CRS de segunda-ordem..... 46

Figura 4.6 Seção ZO simulada com o empilhamento CRS de quarta-ordem..... 47

Figura 4.7 Seção ZO simulada com o empilhamento Multifoco..... 48

Figura 4.8 Seção ZO simulada com o empilhamento CRS Não-Hiperbólico..... 49

Figura 4.9 Comparação dos traços sísmicos empilhados, da seção de afastamento nulo (SZO), seção empilhada ZO original; CMP; CRS de segunda e quarta-ordem; Multifoco e CRS não hiperbólico, respectivamente..... 50

Figura 4.10 Comparação dos traços sísmicos empilhados, da seção de afastamento nulo (SZO), seção empilhada ZO original; CMP; CRS de segunda e quarta-ordem; Multifoco e CRS não hiperbólico, respectivamente..... 51

LISTA DE SIGLAS

ZO	Zero-offset
CMP	Common-midpoint
MF	Multifocusing
CRS	Common-reflection-surface
NIP	Normal-incidence-point
N	Normal
NMO	Normal-moveout
S	Source
G	Geofone
R	Ponto de Reflexão
CO	Common-offset
CS	Common-shot
CR	Common-receiver

1. INTRODUÇÃO

Os métodos sísmicos são largamente aplicados a problemas de exploração envolvendo a detecção e o mapeamento de interfaces, normalmente com uma geometria simples, em profundidade. Eles também identificam propriedades físicas importantes de cada unidade abaixo da superfície. Os métodos são particularmente apropriados para mapear sequências sedimentares acamadadas e são, portanto, amplamente usados na busca por óleo e gás (Kearey et al., 2009).

No processamento sísmico, o empilhamento de dados tem um papel fundamental, com o intuito de gerar seções sísmicas das regiões de interesse. Ao longo dos anos têm surgido vários métodos de empilhamento sísmico, com a finalidade de superar as restrições do empilhamento *Common-Midpoint* (CMP) que depende de um único parâmetro, denominado velocidade *Normal-Moveout* (*NMO*). Destacam-se os métodos não convencionais *Common-Reflection-Surface* (*CRS*), Multifoco (MF), *Common-Reflection-Surface não-hiperbólico(CRS-NH)*, entre outros métodos.

Estes métodos utilizam aproximações de tempos de trânsito que usam mais de um parâmetro atribuído no empilhamento, permitindo usar configurações sísmicas arbitrárias que geram como resultados seções sísmicas de afastamento-nulo (*ZO*) simuladas com uma melhor razão sinal-ruído. A seção *ZO* simulada pelos métodos dependente fundamentalmente da determinação de três parâmetros de empilhamento: o ângulo de emergência do raio normal (em relação à normal da superfície de medição) e as curvaturas de frentes de onda de duas ondas hipotéticas nomeadas *Normal-Incidence-Point* (NIP) e *Normal* (N), respectivamente, ondas hipotéticas conceituadas por Hubral (1983).

Uma grande importância destes métodos de empilhamento se dá por obter, também, seções com os atributos cinemáticos; como também a determinação do espalhamento geométrico, Zonas de Fresnel, atributos baseados na migração no tempo, regularização dos dados, topografia da onda NIP, entre outras aplicações.

Entre estas aproximações de tempo de trânsito, destaca-se a aproximação utilizada pelo método CRS que tem uma forma hiperbólica (Tygel et al., 1997). Esta aproximação define uma superfície de empilhamento para cada amostra particular na seção sísmica *Zero-Offset* (ZO) a ser simulada. Ela é chamada de aproximação de tempos de trânsito CRS de segunda-ordem.

O método de imageamento sísmico denominado Multifoco (MF) proposto por Gelchinsky et. al (1997) e Berkovitch et al. (1998), não depende de um macro-modelo de velocidades, apenas da velocidade próxima a superfície. Neste método, cada traço imageado é constituído pelo empilhamento de um numero arbitrário de traços sísmicos, com distribuição fonte-receptor arbitrária de acordo com a correção de sobretempo local, Multifoco. Estes traços sísmicos não necessitam pertencer à mesma família CMP, mas suas fontes e receptores devem estar vizinhos ao raio normal (Landa et al., 1999).

Segundo Landa et al. (1999), a fórmula MF não é apenas uma representação adequada dos tempos de trânsito para configurações fonte-receptor arbitrárias, mas de fato é mais exata para vários modelos da subsuperfície. A fórmula de tempo de trânsito MF depende dos mesmos conjuntos de parâmetros que as aproximações de tempo de trânsito hiperbólicas do empilhamento CRS.

Na busca de uma aproximação mais exata, Höcht et al. (1999) obtiveram a aproximação de tempos de transito CRS de quarta-ordem a partir da derivada em expansão de Taylor da aproximação de tempos de trânsito CRS de segunda-ordem. Esta nova formula é descrita em termo dos mesmos parâmetros da aproximação CRS de segunda-ordem.

Após revisar a aproximação de tempos de transito CRS de quarta-ordem, Chira-Oliva et al. (2003) discutiram as primeiras comparações para diferentes configurações sísmicas com a aproximação de tempos de trânsito CRS de segunda-ordem considerando modelos sintéticos. Foi sugerido que a aproximação de quarta-ordem pode fornecer uma aproximação melhor para os tempos de trânsito verdadeiros de eventos de reflexão ou difração que a aproximação de tempos de trânsito CRS convencional.

Chira et al. (2010) aplicaram as aproximações CRS de segunda e quarta-ordem em dados sintéticos e reais. Eles demonstraram que a aproximação CRS de quarta-ordem geralmente proporciona uma melhor aproximação em afastamentos maiores que 4 km.

Fomel e Stovas (2010) apresentaram uma forma funcional geral para aproximações não-hiperbólicas que podem ser aplicadas em meios sísmicos arbitrários. Para comparar a precisão da aproximação proposta com outras aproximações já conhecidas, usaram análise de traços e experimentos numéricos e avaliaram uma melhoria na precisão.

Fomel e Kazinnik (2012) propuseram uma aproximação de tempos de transito não-hiperbólico para simular seções ZO. Eles aplicaram essa aproximação em dados sintéticos e

mostraram que essa aproximação pode prolongar significativamente a precisão da aproximação de tempos de trânsito CRS de segunda-ordem, levando-se em consideração um mesmo conjunto de parâmetros. Esta aproximação é conhecida como aproximação de tempo de trânsito CRS Não-Hiperbólico.

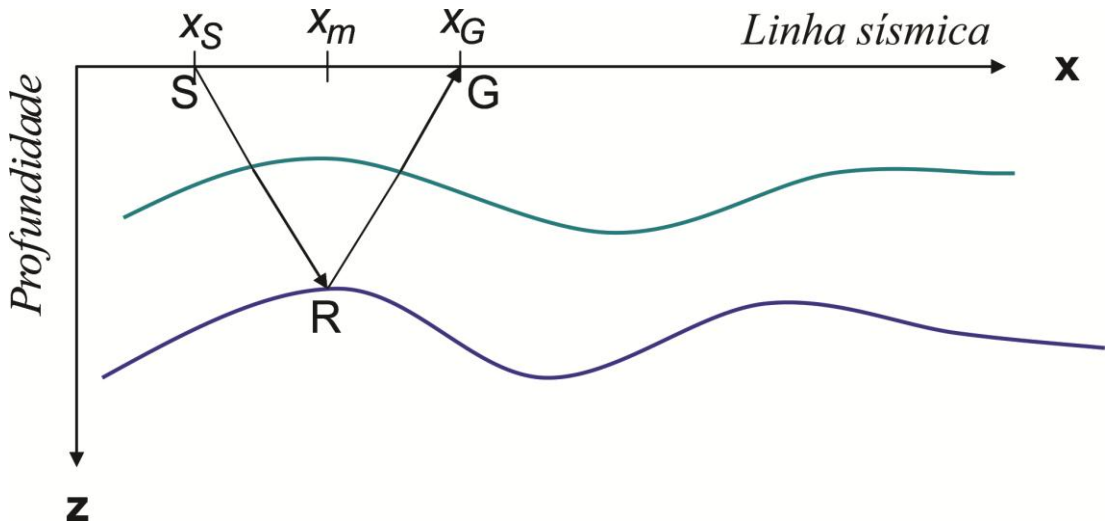
Neste trabalho serão testados os desempenhos das aproximações de tempos de trânsito hiperbólicas e não-hiperbólicas em dados sintéticos, para simular seções sísmicas de afastamento-nulo (ZO). Finalmente será verificado também qual dessas aproximações comporta-se melhor na recuperação da forma e amplitude dos traços ZO simuladas.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1.SISTEMA SÍSMICO

Um sistema sísmico é definido como o conjunto de camadas isotrópicas, homogêneas ou não homogêneas, de número arbitrário, separadas por interfaces suaves e curvadas (Bortfeld, 1989). Para a definição de um sistema sísmico é considerado um sistema de coordenadas cartesianas bidimensionais (*x, z*) e assume-se que a linha sísmica está na direção do eixo x e a profundidade na direção do eixo z, sendo positivo para abaixo.

Figura 2.1. Exemplo de um sistema sísmico representado por um modelo 2-D constituído por duas camadas sobre um semi-espaço. Cada camada esta separada por interfaces suaves e curvas. A trajetória de uma reflexão primária é dada pelo raio SRG.



Fonte: Modificado de Cardoso, 2008.

A trajetória do raio começa na fonte S (source), atinge o refletor Σ_R no ponto de reflexão *R* e retorna a superfície da terra no receptor G (geofone ou hidrofone segundo o meio). O raio descreve a trajetória SRG. Cada camada possui um campo de velocidade *v* = *v*(*x*, *z*). O par fonte-receptor é dado, respectivamente, por (*S*, *G*):

$$x_s = x_s(\xi), x_g = x_g(\xi) \tag{2.1}$$

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

2.2.LEVANTAMENTO E CONFIGURAÇÕES SÍSMICAS 2-D

O objetivo da sísmica de reflexão é fornecer uma imagem da subsuperfície a partir de dados sísmicos de multi-cobertura, tanto por aumento do sinal de reflexões desejadas, quanto pela atenuação da energia de sinais não desejados, ruído coerente e aleatório.

Em um levantamento sísmico, as ondas sísmicas são criadas por uma fonte controlada e se propagam em subsuperfície. Algumas ondas voltam à superfície após ter sofrido refração ou reflexão nas interfaces geológicas em profundidade (Kearey et al., 2009). Parte da energia refletida pelas interfaces em subsuperfície emerge nos receptores onde é gravada durante certo intervalo de tempo decorrido desde o começo da emissão da fonte. O tempo de registro de um sinal sísmico, denominado Tempo de Trânsito, é denotado pela variável, *t*. As descontinuidades representam anomalias nas propriedades elásticas das rochas em subsuperfície. Na presente situação 2-D, as interfaces sísmicas (refletores) são consideradas curvas bidimensionais no plano de propagação.

Em meios 2-D, fontes e receptores situam-se em uma única linha sísmica. Além disso, a propagação de ondas sísmicas é suposta restrita ao plano vertical diretamente abaixo da linha sísmica. A aquisição de dados sísmicos, na sísmica de reflexão, é realizada principalmente na configuração (ou família) do *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.

Um traço sísmico é o registro do campo sísmico para um dado receptor. Os registros sísmicos são mostrados em um gráfico da posição dos receptores versus o tempo chamado sismograma. O sismograma registrado contém traços que são ordenados com respeito ao afastamento *(2h)* ou meio-afastamento*(h)*. O meio-afastamento, h, representa a metade da distancia entre a posição da fonte e a posição do receptor para cada par fonte-receptor,

$$h = \frac{x_g - x_s}{2} \tag{2.2}$$

Relacionada a esta distância está a coordenada, x_m, que representa o ponto médio entre a posição da fonte e a posição do receptor,

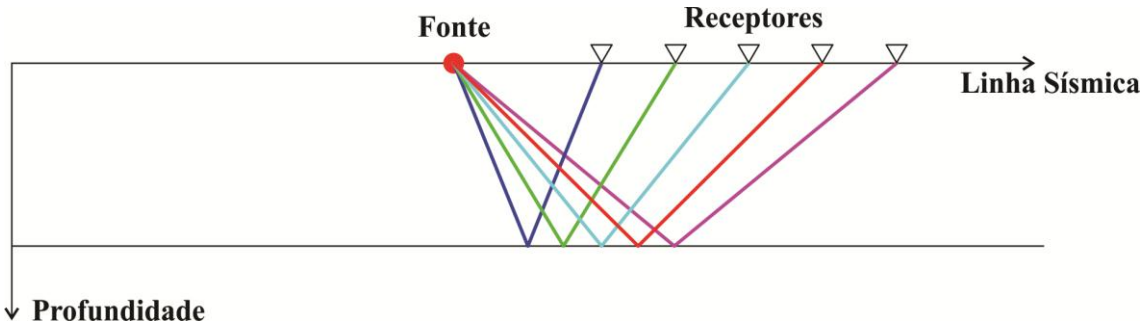
$$x_m = \frac{x_g + x_s}{2} \tag{2.3}$$

Diversas configurações podem ser consideradas durante um levantamento sísmico, destacando-se algumas configurações utilizadas nestes levantamentos:

- *Configuração Common-Shot ou Fonte Comum (CS):*

Nesta configuração, a fonte é fixa e os receptores ficam distribuídos ao longo da linha sísmica. As seções *CS* contêm reflexões dos mesmos refletores na região da subsuperfície, a qual é iluminada pelos sinais emitidos (Figura 2.2). 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.

Figura 2.2. Configuração CS, todos os raios começam no mesmo ponto.

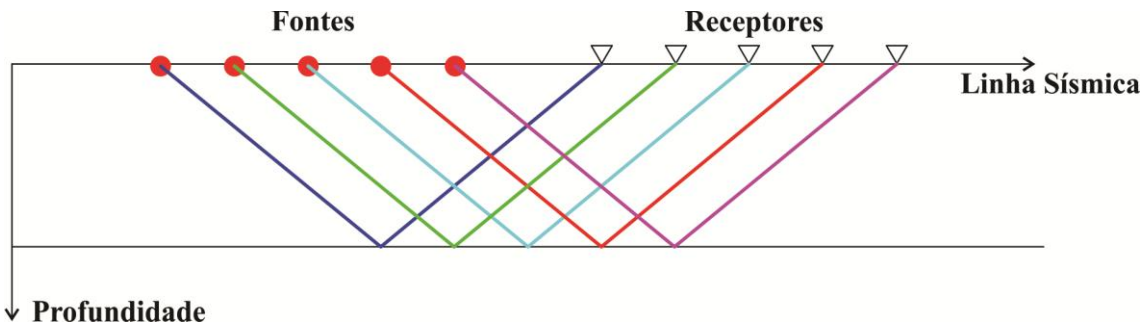


Fonte: Gamboa, 2007.

- *Configuração Common-Offset ou Afastamento Comum (CO)*:

Esta configuração pode ser pensada como uma coleção de traços que foram adquiridos deslocando um único par fonte-receptor com um afastamento constante ao longo da linha sísmica. As seções CO contém os traços com um dado afastamento constante que é ordenado por suas coordenadas de ponto médio (Figura 2.3). Esta configuração é dada para levantamentos em que os traços apresentam a mesma distância fonte-receptor. Uma configuração *CO* especial é a chamada configuração de *Afastamento-Nulo (ZO)*.

Figura 2.3. Configuração CO, cada par fonte-receptor tem o mesmo afastamento.

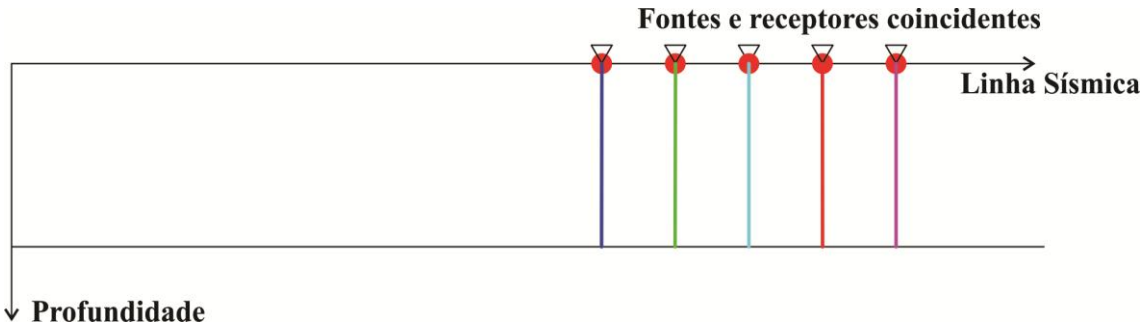


Fonte: Gamboa, 2007.

- *Configuração Zero-Offset ou Afastamento-Nulo(ZO):*

Esta configuração caracteriza-se por ter o afastamento fonte-receptor nulo, isto é, as coordenadas x_se x_g para um par fonte-receptor são coincidentes (Figura 2.4). Não obstante sua grande importância no processamento, a configuração de *ZO* não pode ser realizada nas aquisições sísmicas. Isto porque a fonte, quando detonada, destruiria o receptor coincidente. Conforme veremos adiante, 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 as outras configurações.

Figura 2.4. Configuração ZO, a posição das fontes é coincidente.

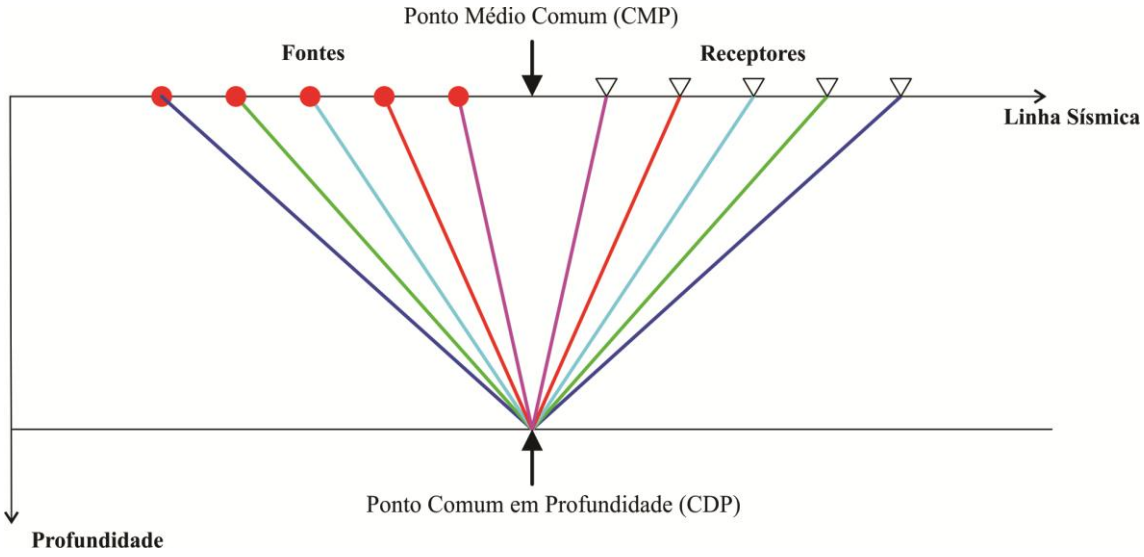


Fonte: Gamboa, 2007.

- *Configuração Common-Midpoint ou Ponto Médio Comum (CMP):*

Esta configuração combina todos os traços com o mesmo ponto médio e classificados com crescente afastamento. Na literatura mais antiga, a configuração *CMP* é chamada também de configuração de *Common-Depth-Point ou Ponto Comum em Profundidade*. Esta terminologia é, a rigor, somente correta no caso de modelos geológicos de multicamadas homogêneas, planas e horizontais. Neste caso, como ilustrado pela Figura 2.5, as coordenadas horizontais dos pontos *CMP* e *CDP* são coincidentes.

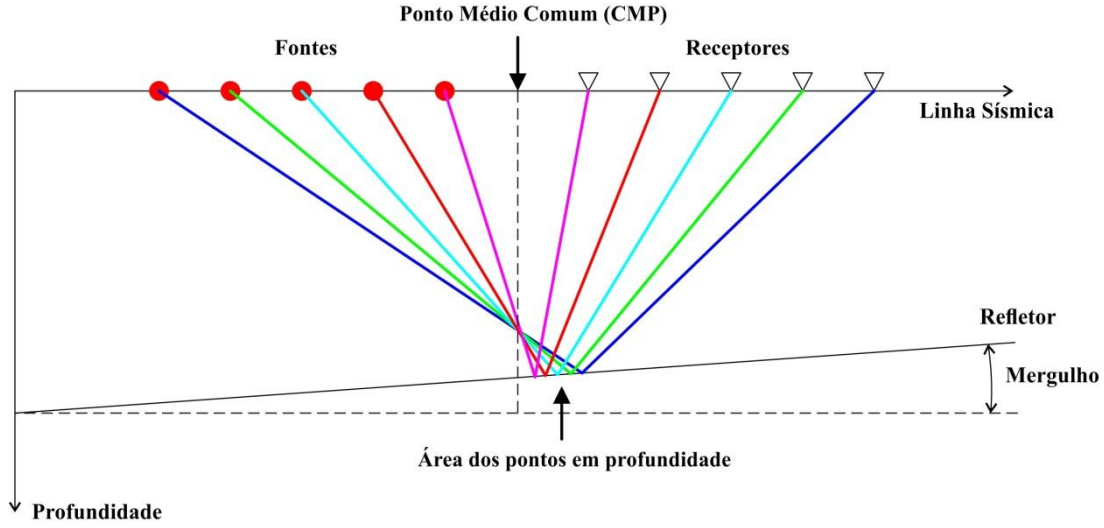
Figura 2.5. Configuração CMP, todos os pares fonte-receptor tem o mesmo ponto médio comum.



Fonte: Gamboa, 2007.

No entanto, quando estas condições não são satisfeitas, as coordenadas dos pontos *CMP* e *CDP* diferem, esta situação é ilustrada pela Figura 2.6.

Figura 2.6. Raios na configuração CMP no caso de um refletor com mergulho, a coordenada do CDP não é mais a mesma coordenada do CMP.



Fonte: Gamboa, 2007.

2.3.EMPILHAMENTO SÍSMICO

Dentre os diversos processos aplicados aos dados sísmicos de cobertura múltipla durante o processamento sísmico, destaca-se o chamado *Empilhamento Sísmico*. Empilhar significa somar todas as amplitudes em subconjuntos, ou seções, do volume de dados sísmicos. A soma é realizada 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 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 evento de reflexão registrado nos dados sísmicos, então as amplitudes coerentes são somadas construtivamente. O resultado é posicionado no correspondente ponto na seção *ZO* a ser simulada.

A seção simulada *ZO* 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 (ou migrada). 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.

O objetivo do empilhamento é aumentar a razão S/R, assim, melhorar a identificação dos eventos de reflexão. A relação S/R 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 S/R 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 S/R são desejadas na seções provenientes do processamento sísmico.

2.4.CURVATURAS E LEIS DAS FRENTES DE ONDA

As curvaturas da frente de onda são muito aplicadas para explicar inúmeros problemas na exploração sismológica, em particular, os problemas de inversão (Shah, 1973; Hubral e Krey, 1980). Curvaturas da frente de onda 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 para obter as curvaturas dos refletores em profundidade na realização da migração no tempo ou na profundidade.

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

2.4.1. **Leis de Curvatura das Frentes de Onda**

As curvaturas da frente de onda podem ser expressas analiticamente em termos dos parâmetros ao longo do raio normal (Hubral e Krey, 1980). O cálculo destas curvaturas em qualquer ponto de um raio arbitrário está intrinsecamente associado às leis de Transmissão e Reflexão, pois a curvatura da frente de onda que se propaga através de um sistema sísmico pode mudar devido à propagação na camada de velocidade constante (Figura 2.7) e devido a transmissões (Figura 2.8a) e reflexões (Figura 2.8b) nas interfaces.

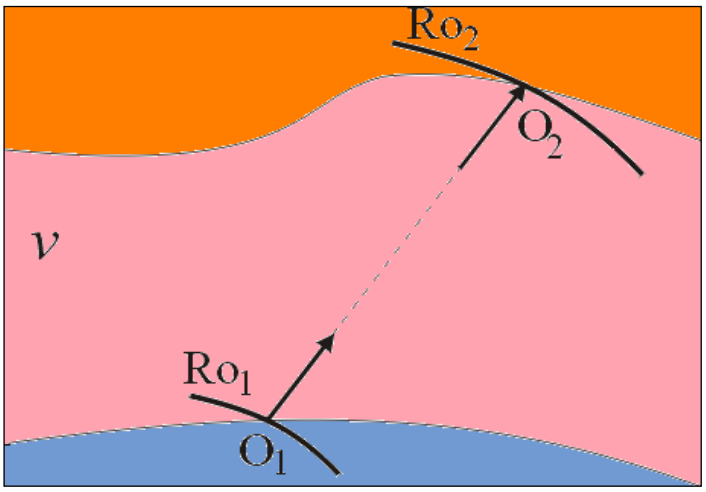
- **Lei de Propagação**

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

$$R_{O_2} = R_{O_1} + v\Delta T \tag{2.3}$$

em que, conforme a Figura 2.7 R_{O_1} e R_{O_2} são os raios de curvatura das frentes de onda nos pontos O_1 e O_2, respectivamente, v é a velocidade do meio e ΔT é o tempo de trânsito ao longo do raio (linha reta) que liga O_1 e O_2.

Figura 2.7. Propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico.



Fonte: Souza, 2005.

- **Lei de Transmissão**

A lei de transmissão refere-se à mudança do raio de curvatura da frente de onda devido a sua passagem de um meio para outro. Assim, temos que:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{v_T \cos^2 \varepsilon_I}{v_I \cos^2 \varepsilon_T} \frac{1}{R_I} + \frac{1}{\cos^2 \varepsilon_T} \left(\frac{v_T}{v_I} \cos \varepsilon_I - \cos \varepsilon_T \right) \frac{1}{R_F}, \tag{2.4}$$

em que R_T e R_I são, respectivamente, os raios de curvatura da frente de onda transmitida e incidente, v_T e v_I são as velocidades dos meios, R_F é o raio de curvatura da interface no ponto de transmissão, ε_I e ε_T são os ângulos de incidência e transmissão do raio (Figura 2.8). O primeiro termo da Equação 2.4 descreve a mudança da frente de onda que resultaria caso a interface fosse plana, já o segundo termo fornece a mudança na curvatura da frente de onda devido somente à curvatura da interface. Isto pode ser interpretado como a contribuição

à curvatura da frente de onda transmitida resultante quando uma onda plana incidente chega ao ponto de transmissão.

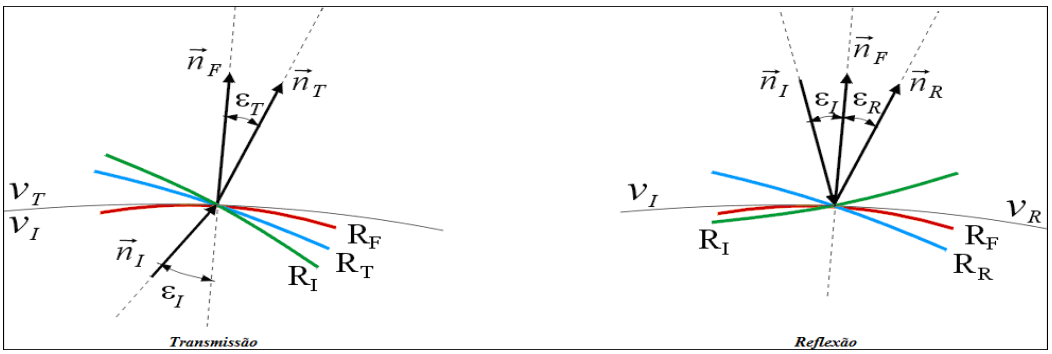
- **Lei de Reflexão**

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

$$\frac{1}{R_R} = \frac{v_R \cos^2 \varepsilon_I}{v_I \cos^2 \varepsilon_R R_I} + \frac{1}{\cos^2 \varepsilon_R}\left(\frac{v_R}{v_I}\cos \varepsilon_I - \cos \varepsilon_R\right)\frac{1}{R_F}, \tag{2.5}$$

em que o raio de curvatura da frente de onda refletida R_R pode ser expresso através da soma dos dois termos da lei de transmissão, substituindo v_T e ε_T por v_R e ε_R, respectivamente. O primeiro termo da Equação 2.5 descreve a mudança da frente de onda no caso da interface ser plana. Na hipótese de não haver conversão do tipo de onda (isto é, $v_R = v_I$ e conseqüentemente $\varepsilon_I = \varepsilon_R$), o primeiro termo resultaria na identidade e o segundo termo descreve somente a influência da curvatura da interface.

Figura 2.8. Propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico. (***a***) Transmissão e (***b***) Reflexão.



a ***b***

Fonte: Souza, 2005.

2.4.2. **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.

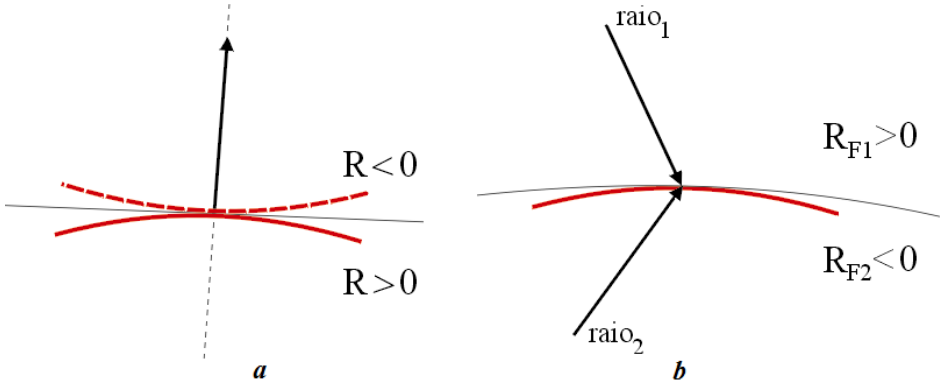
Segundo Hubral e Krey (1980) a escolha do sinal é uma questão de convenção e é definido da seguinte forma:

- quando uma frente de onda se apresenta atrás do seu plano tangencial, o raio da curvatura é positivo (frente de onda em linha vermelha contínua na Figura 2.9 a);
- se a frente de onda está à frente do plano tangencial o raio da curvatura é negativo (frente de onda em linha vermelha tracejada na Figura 2.9 a);
- o raio da curvatura da interface R_F é positivo se a interface aparecer convexa ao raio incidente, caso seja côncava, negativo.

Baseando-se em Hubral e Krey (1980) e analisando a Figura 2.9 b, observa-se que a curvatura da interface é positiva para o raio 1, porém para o raio 2 é negativa.

A demonstração das fórmulas de curvatura acima pode ser encontrada em Hubral e Krey (1980).

Figura 2.9. Convenção de sinais das (a) curvaturas das frentes de onda e (b) interfaces.



Fonte: Pantoja, 2012.

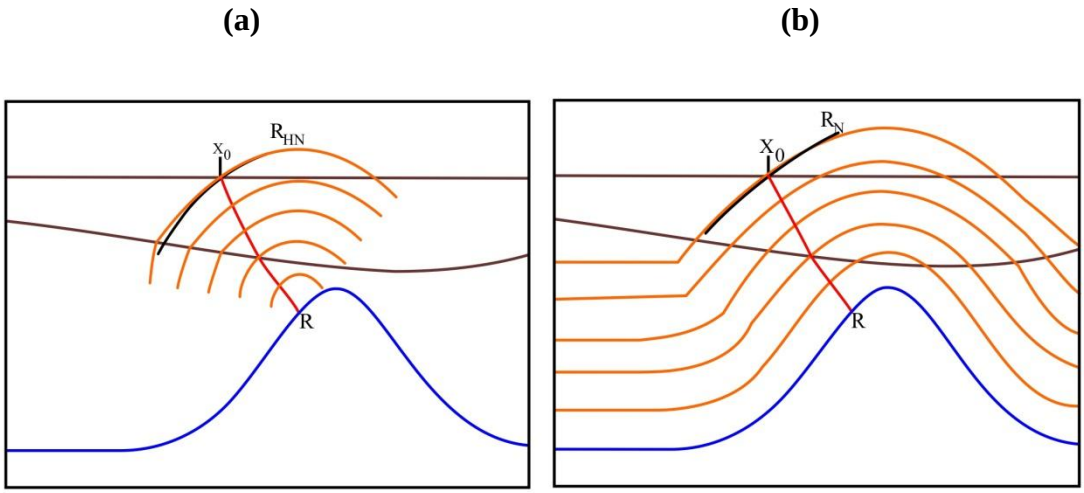
2.5.PARÂMETROS CINEMÁTICOS

Para a construção das curvas ou superfícies das aproximações de tempos de trânsito dos métodos de empilhamento sísmico que abordaremos neste trabalho, são necessários os parâmetros cinemáticos das *ondas hipotéticas*, conhecidas com onda NIP (*Normal-Incidence-Point*) e onda N (*Normal*), introduzidas por Hubral (1983).

Em adição à seção *Zero-Offset* (*ZO*) simulada, os métodos de empilhamento sísmicos (como exemplo, os métodos CRS, Multifoco e CRS Não-hiperbólico) fornecem três

parâmetros cinemáticos de campos de onda: o ângulo de emergência do raio de reflexão normal em relação à normal da linha de medição (β_o), a curvatura da onda hipotética NIP (K_{NIP}) 1/K_{NIP}) e a curvatura da onda hipotética N (K_N) (Figura 2.10), que podem ser aplicados, por exemplo, na determinação da velocidade intervalar, no cálculo do espalhamento geométrico, na estimativa da zona de Fresnel e também na simulação de eventos de difrações, entre outras aplicações. Estas ondas hipotéticas são produzidas considerando-se dois experimentos hipotéticos, para um modelo constituído por duas camadas homogêneas sobre um semi-espaço.

Figura 2.10. Experimento hipotético mostrando (a) onda PIN produzida por um ponto difrator *R* sobre o reflector (em azul) e (b) onda N gerada por um experimento de refletor explosivo. As frentes de onda (em laranja) correspondentes ao raio normal (em vermelho) em *R* propagam-se de forma ascendente até atingir o ponto de emergência em X_0.



Fonte: Modificada de Jäger et al.,2001.

É assumido que cada onda NIP coincide em um mesmo ponto NIP na profundidade na interface na qual esta focalizada (Figura 2.10 a) no tempo zero. Então, as ondas NIP retornam à superfície com idênticas frentes de onda (porém com as mesmas amplitudes) com que foram transmitidas em profundidade.

Da mesma maneira considera-se o mesmo modelo e condições anteriores e cria-se a denominada onda Normal (N) de amplitude unitária em relação a cada refletor. Uma onda

Normal (Figura 2.10 b) propaga-se, por definição, perpendicular a todos os raios normais ao refletor e tocam simultaneamente em todos os pontos no tempo zero. Então a onda N aparece na superfície com a mesma frente de onda com que foi transmitida no modelo. De fato a frente de onda de uma onda 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**

As três leis de curvaturas apresentadas anteriormente são suficientes para o cálculo da curvatura de frente de onda em qualquer ponto ao longo do raio traçado através de um determinado modelo 2-D estratificado. A partir de um ponto com curvatura de frente de onda conhecida podemos aplicar as três leis em cascata para encontrar uma expressão que represente a curvatura da frente de onda em algum outro ponto desejado no raio.

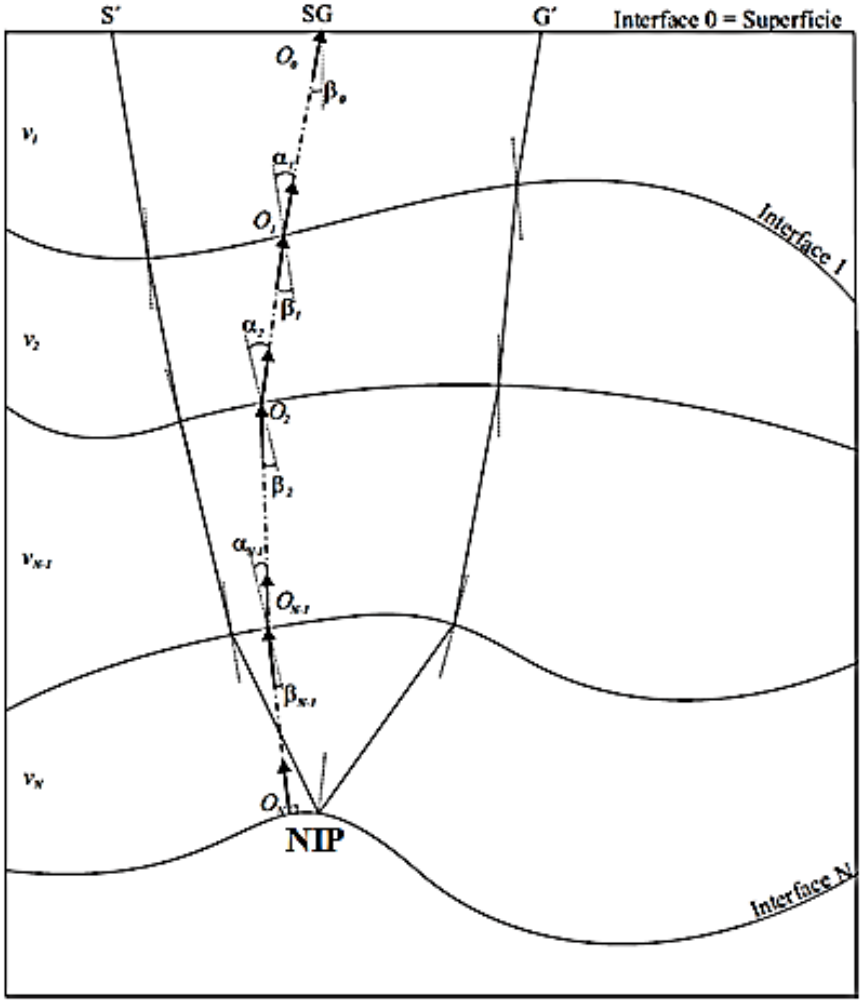
Segundo Hubral e Krey (1980) os raios de curvatura podem ser calculados através do procedimento recursivo mostrado na Equação (2.6), o qual foi obtido com base nas leis de propagação, transmissão e reflexão para o caso de $n=3$ camadas sobre um semi-espaço infinito e meio 2-D, conforme ilustrado na Figura 2.11.

$$\frac{1}{K_{NIP}} = \frac{1}{v_1}\left\{ s_1 v_1 + \left[\frac{\rho_1}{v_1 \cos^2 \alpha_1} \frac{1}{R_{F,1}} + \left(s_2 v_2 \frac{\cos^2 \alpha_1}{\cos^2 \beta_1} + \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. \left\{ \frac{\rho_2 \cos^2 \beta_1}{v_2 \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2} \frac{1}{R_{F,2}} + \left[s_3 v_3 \frac{\cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2}{\cos^2 \beta_1 \cos^2 \beta_2} \right]^{-1} \right\}^{-1} \right)^{-1} \right]^{-1} \right\} \tag{2.6}$$

Na equação (2.6), $\frac{1}{K_{NIP}}$ é o raio de curvatura da onda NIP (relativa à terceira interface) emergindo na superfície. Para cada camada, *i=1, 2, 3,* s_i é o comprimento do raio, v_i a velocidade do meio, α_i é o ângulo de reflexão ou transmissão, β_i é o ângulo de incidência, $R_{F,i}$ é o raio de curvatura da interface e $\rho_N = \frac{v_{R\,ou\,T}}{v_I}\cos\varepsilon_I - \cos\varepsilon_{R\,ou\,T}$ (Figura 2.11).

Figura 2.11. Modelo sísmico 2-D com n-camadas e interfaces curvas e a trajetória do raio normal SG e do raio paraxial S'G'.



Fonte: Modificado de Cabral, 2002.

2.5.2. **Reflexões Primárias P-P**

Segundo Hubral e Krey (1980), para calcular os raios de curvatura das ondas hipotéticas (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_0, localizado na *n*-ésima interface de um modelo composto por um sistema de camadas homogêneas, (Figura 2.11) 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 $(i = 1...n-1)$ e o ângulo de emergência β_0 no ponto O_0 na superfície.

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

$$R_{I_{n-1}} = R_{inicial} + v_{n-1}\Delta T_{On \to On-1}. \tag{2.7}$$

- Recursão: $(i = n-1...1)$

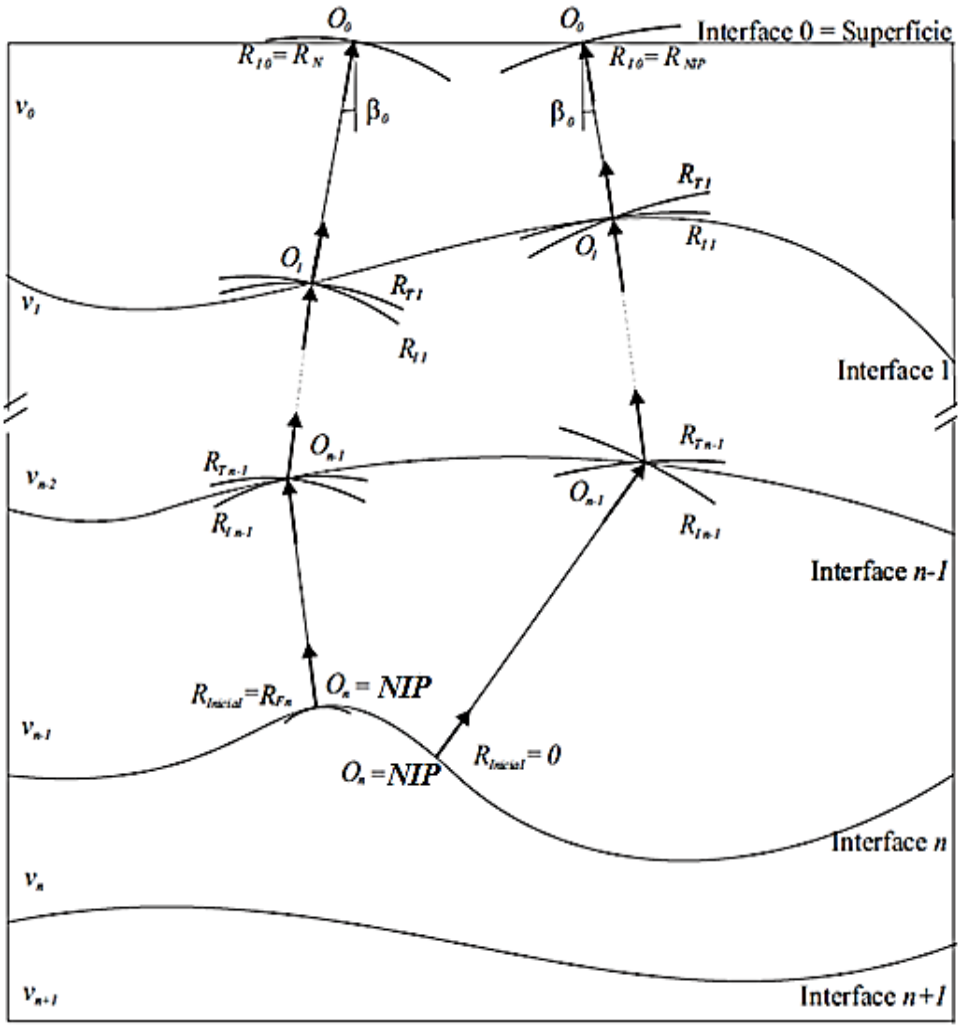
$$\frac{1}{R_{Ti}} = \frac{v_{i-1}\cos^2\beta_i}{v_i \cos^2\alpha_i R_{Ii}} + \frac{1}{\cos^2\alpha_i}\left(\frac{v_{i-1}}{v_i}\cos\beta_i - \cos\alpha_i\right)\frac{1}{R_{Fi}} \tag{2.8}$$

$$R_{I_{i-1}} = R_{T_i} + v_{i-1}\Delta T_{O_1 \to O_{i-1}} \tag{2.9}$$

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

Cada ponto localizado na interface em subsuperfície é conectado pela posição de emergência x_0 e o tempo de trânsito t_0 do raio *NIP* para um ponto $P_0(x_0 t_0)$ na seção AN conforme mostrado na Figura 2.12. Consequentemente, podemos atribuir os parâmetros R_{NIP}, R_N *e* β_0 correspondentes às ondas N e NIP para um ponto P_0. Ao aplicarmos este algoritmo para todos os pontos localizados nas interfaces em subsuperfície e atribuirmos os parâmetros resultantes para os pontos P_0 na seção AN teremos os parâmetros para todos os eventos de reflexões primárias associados aos pontos P_0.

Figura 2.12. Eventos primários, aplicando as leis de propagação e transmissão.



Fonte: Modificado de Cabral, 2002.

3. APROXIMAÇÕES DE TEMPO DE TRÂNSITO

Um dos problemas na sísmica é encontrar estimativas para os tempos de trânsito, que são o intervalo de tempo que um impulso leva para se propagar da fonte ao receptor após a reflexão. Com isso é possível tratar o problema do cálculo dos tempos de trânsitos como um problema de otimização, cuja solução leva, pelo menos teoricamente, a uma fórmula exata. Contudo, há poucos casos onde encontramos uma fórmula exata para os tempos de trânsito. Assim, é de muita importância desenvolver aproximações que sejam mais gerais possíveis, isto é, que sejam válidas para um grande número de modelos sísmicos.

3.1. APROXIMAÇÕES DE TEMPO DE TRÂNSITO HIPERBÓLICO

Neste item iremos abordar as aproximações de tempo de trânsito que apresentam forma hiperbólica, utilizadas pelos métodos de empilhamento sísmico, tais como o método convencional CMP e não convencional CRS.

3.1.1. **Tempo de Trânsito CMP**

Para dados sísmicos organizados em famílias de *Common-Shot* ou fonte-comum (*CS*), os eventos de reflexão para um refletor plano horizontal é uma curva hiperbólica (moveout hiperbólico). O método de empilhamento CMP foi introduzida por Mayne (1962) e consiste em uma técnica de empilhamento de dados sísmicos de reflexão organizados em famílias CDP, ainda muito utilizada nos dias de hoje pela indústria de exploração de hidrocarbonetos sob a nova denominação de empilhamento CMP. A configuração CMP consiste em um número igual de fontes e receptores, dispostos linearmente e de forma simétrica ao ponto conhecido como ponto médio fonte-receptor.

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

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{NMO}^2}, \tag{3.1}$$

também conhecida como 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.

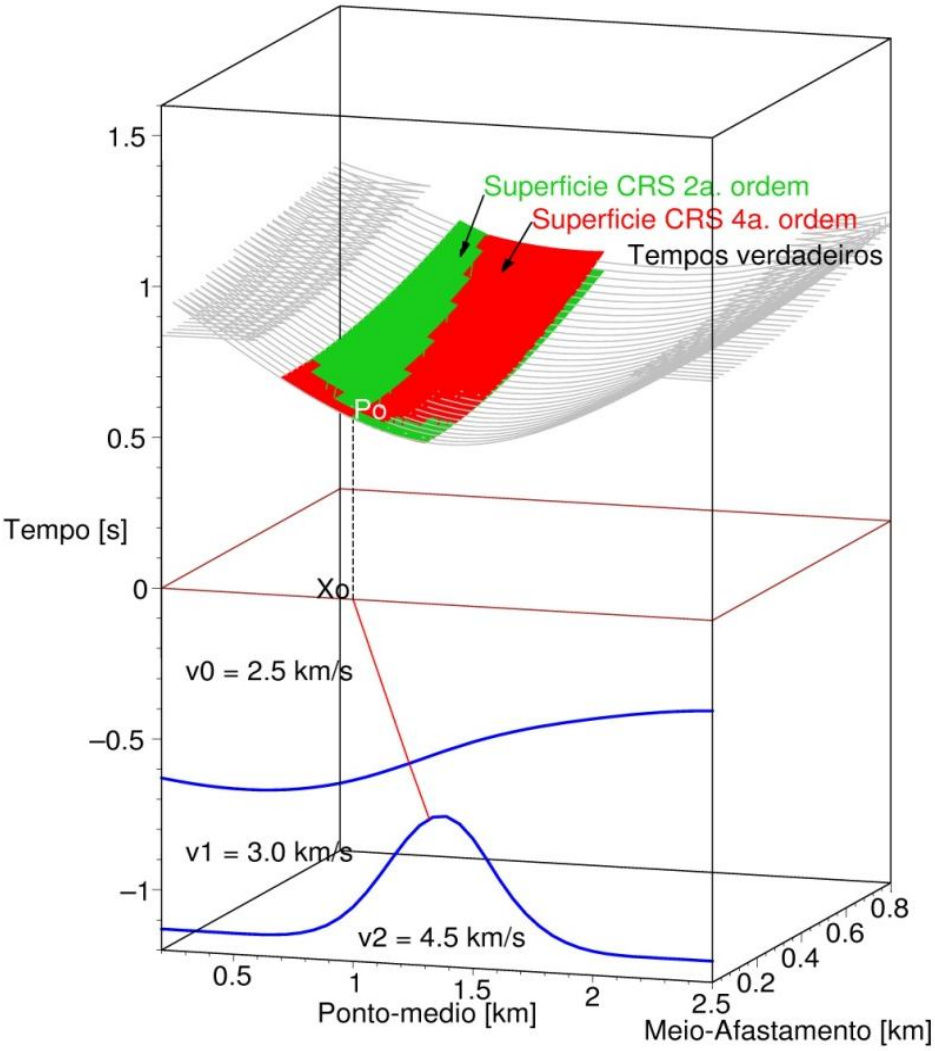
Este método utiliza como único parâmetro, a velocidade de empilhamento que é determinada pelo processo interativo de análise de velocidades realizada nos sismogramas de família CMP. Após serem aplicadas as correções dinâmicas NMO (*normal-moveout*) e DMO

(*dip-moveout*), os traços sísmicos dos sismogramas de família CMP são somados resultando num único traço por sismograma de família CMP considerado como o equivalente a um traço com fonte-receptor coincidente ou de afastamento nulo (ZO).

3.1.2. **Tempo de Trânsito CRS hiperbólico**

A aproximação do tempo de trânsito CRS (Tygel et al., 1997) é uma aproximação hiperbólica que 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).

Figura 3.1. 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).



Fonte: Chira, 2003.

3.1.2.1. Tempo de Trânsito CRS de segunda-ordem

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

$$t_{2,ref}^2(x_m,h)=\left[t_0+\frac{2sen\beta_0}{v_0}(x_m-x_0)\right]^2+\frac{2t_0\cos^2\beta_0}{v_0}\left[K_N(x_m-x_0)^2+K_{NIP}\,h^2\right], \quad (3.2)$$

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. As coordenadas horizontais do par fonte e receptor são x_s e x_g.

O único conhecimento a priori de velocidade para a aproximação do tempo de trânsito CRS é o da velocidade próxima á 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*. É também chamada de superfície *CRS.*

3.1.2.2. Tempo de Trânsito CRS de quarta-ordem

A expansão de Taylor da aproximação de tempos de trânsito CRS de segunda-ordem também conhecida como aproximação de tempos de trânsito CRS de quarta-ordem foi proposta por Höcht et al. (1999). A finalidade desta expansão era a busca de uma aproximação de tempo de trânsito mais exata.

Esta expansão esta 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 segunda-ordem. Esta onda propaga-se com velocidade constante v_0 próxima à superfície e é expressa por (Höcht et al., 1999):

$$t_{4,ref}^2(x_m,h)=t_{2,ref}^2(x_m,h)+\frac{\cos^2\beta_0}{v_0^2}\begin{bmatrix}A(x_m-x_0)h^2+B(x_m-x_0)^3+C(x_m-x_0)^4+\\ D(x_m-x_0)^2h^2+Eh^4\end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

Sendo:

$$A = 2K_{NIP} sen\beta_0 \left[2 - 2v_0 t_0 K_N - v_0 t_0 K_{NIP}\right],$$
$$B = 2K_N sen\beta_0 \left[2 - 2v_0 t_0 K_N\right],$$
$$C = K_N^2 \left[5\cos^2 \beta_0 - 4\right]\left[1 - v_0 t_0 K_N / 2\right],$$
$$D = K_{NIP} \left\{2v_0 t_0 \left[3 - 4\cos^2 \beta_0\right] K_N^2 + K_N \left[4 - 5\cos^2 \beta_0\right]\left[-2 + v_0 t_0 K_{NIP}\right] - 2K_{NIP} sen^2 \beta_0 \left[2 - v_0 t_0 K_{NIP}\right]\right\},$$
$$E = K_{NIP}^2 \left[2v_0 t_0 K_N sen^2 \beta_0 - (v_0 t_0 K_{NIP} \cos^2 \beta_0 / 2) + \cos^2 \beta_0\right].$$

3.2. APROXIMAÇÕES DE TEMPO DE TRÂNSITO NÃO-HIPERBÓLICAS

Neste item iremos abordar as aproximações de tempo de trânsito que apresentam forma não-hiperbólica, utilizadas pelos métodos de empilhamento sísmico, tais como o métodos Multifoco e CRS não-hiperbólico.

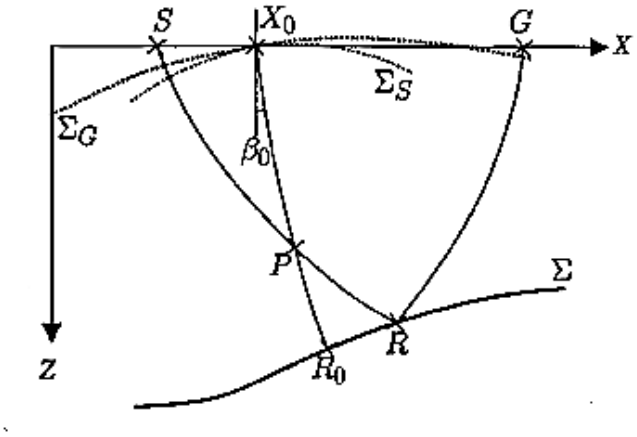
3.2.1. **Tempo de Trânsito Multifoco**

Tem sido demonstrado que a aproximação de tempo de trânsito Multifoco (MF) não só fornecer uma representação adequada dos tempos de chegada para as configurações de fonte-receptor arbitrárias exatamente como a correção NMO convencional faz com conjunto de CMP, mas é na verdade mais que o método convencional CMP. Em particular, eles são muito precisos para um refletor esférico sob um ambiente homogéneo, e para um refletor suavemente curvo (Tygel et al., 1999).

Uma interessante alternativa desta expansão de tempo de trânsito é o fato de usar também os três parâmetros cinemáticos do campo de onda ($\beta_0, K_N, e\ K_{NIP}$) (Gelchisnsky et al. 1997). Nesta nova representação, os raios paraxiais podem ser especificados como o foco de um certo ponto de afastamento-nulo ou em uma extensão deste raio. Em razão disto, a expressão de Gelchinsky et al. (1998) tem-se referido como o tempo de trânsito Multifoco.

Na Figura 3.2, consideramos um refletor objetivo fixo Σ na profundidade, assim como um ponto central fixo X_0 na linha sísmica, considerado ser a localização de um par fonte-receptor coincidente $S_0 = G_0 = X_0$. Também é mostrado na Figura 3.2 o raio normal ida e volta, $X_0 R_0 X_0$, de reflexão, com afastamento-nulo (*ZO*), denominado de raio central, sendo R_0 seu ponto de incidência normal (NIP) no refletor Σ.

Figura 3.2. Observa-se um raio normal $X_0R_0X_0$ e o raio paraxial SRG, referido ao refletor objetivo Σ. Focaliza-se o raio SRG com o raio central no ponto P em profundidade. Também são apresentadas as frentes de ondas ΣS, ΣG e o ângulo de emergência do raio normal denotado, β_0.



Fonte: Adaptado de Tygel et al. 1999.

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

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

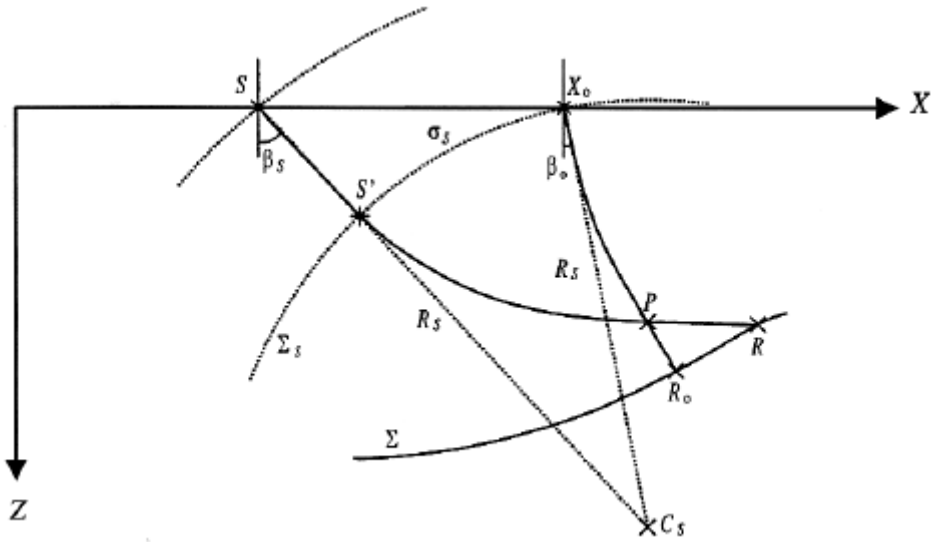
$$\Delta x_s = x_s - x_0 \; e \; \Delta x_G = x_G - x_0 \; , \tag{3.4}$$

Onde são chamados os afastamentos da fonte e receptor respectivamente.

3.2.1.1.Reparametrização do Tempo de Trânsito MF

Analisando a Figura 3.3, será realizada uma aproximação do tempo de trânsito do raio de reflexão SRG na vizinhança do raio central, de reflexão e afastamento nulo $X_0R_0X_0$. Supomos que o tempo de transito do raio $X_0R_0X_0$ é denotado por T_0, e a velocidade da onda sísmica no ponto central é denotado por v_0. Assumimos que os raios SRG e $X_0R_0X_0$ se encontram em um ponto desconhecido P, de acordo com a Figura 3.2.

Figura 3.3. Construção geométrica do sobretempo Multifoco ΔT_S.



Fonte: Adaptado de Tygel et al. 1999.

Sem perda de generalidade, assumimos que P esta no segmento de raio da fonte SR. A aproximação Multifoco faz uso da onda hipotética originadas no ponto P. Desta onda surge duas frentes de ondas ilustradas na Figura 3.2. Uma delas é denotada por Σ_S, propaga-se de P para fonte pontual S, contendo X_0 e a outra frente de onda denotada por Σ_G, propaga-se a partir do ponto P refletindo em R no refletor Σ em seguida vai para o receptor pontual G. As curvaturas dessas frentes de onda são denotadas por K_S *e* K_G, respectivamente. Nota-se que a verdadeira onda origina-se em S com uma curvatura inicial de -K_S, focaliza-se em P, e emerge em G com uma curvatura K_G. Esta onda é chamada de *onda de focalização* e é fictícia.

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

$$t_{MF}(\Delta x_s, \Delta x_g) = t_0 + \Delta t_s + \Delta t_g, \tag{3.5}$$

onde $\Delta T_S \, e \, \Delta T_G$ são as correções do sobretempo Multifoco para a fonte e receptor respectivamente. Admite-se que a velocidade na vizinhança do ponto central X_0 é constante e denotada por v_0. Aproximam-se as frentes de onda $\Sigma_S \, e \, \Sigma_G$ por círculos com raios $R_S = \frac{1}{K_S}$ e $R_G = \frac{1}{K_G}$ (Figura 3.3).

Gelchinsky et al. (1999) apresentam uma expressão para o tempo de trânsito, de acordo com o mesmo número de parâmetros do método convencional CRS, ou seja, os mesmos parâmetros cinemáticos α, R_{NIP} e R_N. Este operador descreve o tempo de percurso

de um evento de reflexão em termos de tempo de percurso de um raio central e correções aplicadas na fonte e receptor para um raio paraxial. Têm-se:

$$\Delta t_s = \frac{\sqrt{R_s^2 + 2R_s\Delta x_s \sin\alpha + \Delta x_s^2} - R_s}{v_0}, \tag{3.6a}$$

$$\Delta t_g = \frac{\sqrt{R_g^2 + 2R_g\Delta x_g \sin\alpha + \Delta x_g^2} - R_g}{v_0}, \tag{3.6b}$$

Sendo

$$R_s = \frac{1+\sigma}{\frac{1}{R_N} + \frac{\sigma}{R_{NIP}}}, \tag{3.7a}$$

$$R_g = \frac{1-\sigma}{\frac{1}{R_N} - \frac{\sigma}{R_{NIP}}}, \tag{3.7b}$$

são os raios de duas ondas hipotéticas com foco na intersecção do raio central e paraxial, $\Delta x_s = x_s - x_0$ e $\Delta x_g = x_g - x_0$ são as correções do sobretempo Multifoco para a fonte e receptor, respectivamente. Onde σ é chamado de *parâmetro de foco* e pode ser desenvolvido para melhorar os dados de pré-empilhamento (e.g. Landa et al . 2010). Para o caso de um refletor plano, temos:

$$\sigma(\Delta x_s, \Delta x_g) = \frac{\Delta x_s - \Delta x_g}{\Delta x_s + \Delta x_g + 2\frac{\Delta x_s \Delta x_g}{R_{NIP}}\sin\alpha}, \tag{3.8}$$

Uma vez que o *parâmetro de foco* depende dos deslocamentos da fonte e do receptor e, portanto, tem vários valores para várias combinações de fonte e do receptor, (3.5) é chamado tempo de trânsito Multifoco.

3.2.2. **Tempo de Trânsito CRS não-hiperbólico**

A aproximação de tempos de trânsito CRS não-hiperbólica proposta por Fomel e Kazinnik (2012) segue a forma a partir de uma equação analítica para reflexão de um tempo de trânsito de um refletor hiperbólico.

Considerando $P(t, m\ h)$ como os dados sísmicos pré-empilhados, em função do tempo *t*, ponto médio *m* e afastamento *h*, o empilhamento convencional pode ser descrito como:

$$S(t_0, m_0) = \int P(\theta(h; t_0), m_0, h) dh, \tag{3.9}$$

onde $S(t_0, m_0)$ é a seção empilhada, h é o meio afastamento do par fonte-receptor e t é a aproximação hiperbólica. Sendo v um parâmetro efetivo de velocidade ou, alternativamente, uma forma funcional não-hiperbólica mais elaborada que envolve outros parâmetros (Fomel e Stovas, 2010). Tem-se:

$$\theta(h;\ t_0) = \sqrt{t_0^2 + \frac{4h^2}{v^2}}, \tag{3.10}$$

O empilhamento CRS possui uma forma diferente:

$$\hat{s}(t_0, m_0) = \iint P\big(\hat{\theta}(m - m_0, h;\ t_0), m, h\big)\, dm\, dh\,, \tag{3.11}$$

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

A aproximação CRS é expressa de maneira simplificada (JÄGER, et al., 2001), por:

$$\hat{\theta}_{CRS}(d, h;\ t_0) = \sqrt{F(d) + b_2 h^2}, \tag{3.12}$$

onde $F(d) = (t_0 + a_1 d)^2 + a_2 d^2)$ e os três parâmetros $\{a_1, a_2, b_2\}$ estão relacionados com a os parâmetros como se segue:

$$a_1 = \frac{2 \sin\beta}{V_0}, \tag{3.13}$$

$$a_2 = \frac{2 \cos^2\beta\ K_N t_0}{V_0}, \tag{3.14}$$

$$b_2 = \frac{2 \cos^2\beta\ K_{NIP} t_0}{V_0}, \tag{3.15}$$

Segundo Fomel e Kazinnik (2012), a aproximação expressa na Equação 3.12 pode seguir com as modificações:

$$\hat{\theta}(d, h;\ t_0) = \sqrt{\frac{F(d) + ch^2 + \sqrt{F(d-h)F(d+h)}}{2}}, \tag{3.16}$$

em que $c = 2b_2 + a_1^2 - a_2$. A Equação 3.16 é a chamada aproximação de tempo de trânsito CRS não-hiperbólica. Nesta Equação 3.16, a expansão de Taylor de segunda-ordem, considera-se $d = 0\ e\ h\ = 0$ que equivale à Equação 3.12.

Existem dois casos especiais importantes:

1. Se $a_2 = 0$ ou $K_N = 0$, a Equação 3.16 passa a ser equivalente à Equação 3.12, com $F\,(d)\ =\ (t_0\ +\ a_1\,d)^2$. Em um meio de velocidade constante, neste caso, corresponde à reflexão a partir de um refletor plano.
2. Se $a_2\ =\ b_2$ ou $K_{NIP} = 0$ a Equação 3.16, em um meio de velocidade constante, neste caso, corresponde a um ponto difrator. Torna-se o equivalente a:

$$\hat{\theta}(d, h;\ t_0) = \frac{\sqrt{F(d-h)} + \sqrt{F(d+h)}}{2}, \tag{3.17}$$

Em termos do trio paramétrico (β_0, R_N, R_{NIP}), temos a aproximação de tempos de trânsito não-hiperbólica proposta por Fomel e Kazinnik (2012) para o método CRS que pode ser expressa por:

$$t^2_{CRS,NH}(x_m,h) = \frac{1}{2}\left[t_0 + \frac{2sen\beta_0}{v_0}x_m\right]^2 + \frac{t_0\cos^2\beta_0}{v_0 R_N}x_m^2 + \left[\frac{2t_0\cos^2\beta_0}{v_0 R_{NIP}} + \frac{2sen^2\beta_0}{v_0^2} - \frac{t_0\cos^2\beta_0}{v_0 R_N}\right]h^2 + \frac{\sqrt{F*G}}{2} \tag{3.18}$$

sendo:

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

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

O interessante desta aproximação é que considera o mesmo número de parâmetros que as anteriores aproximações de tempos de trânsito (CRS e MF).

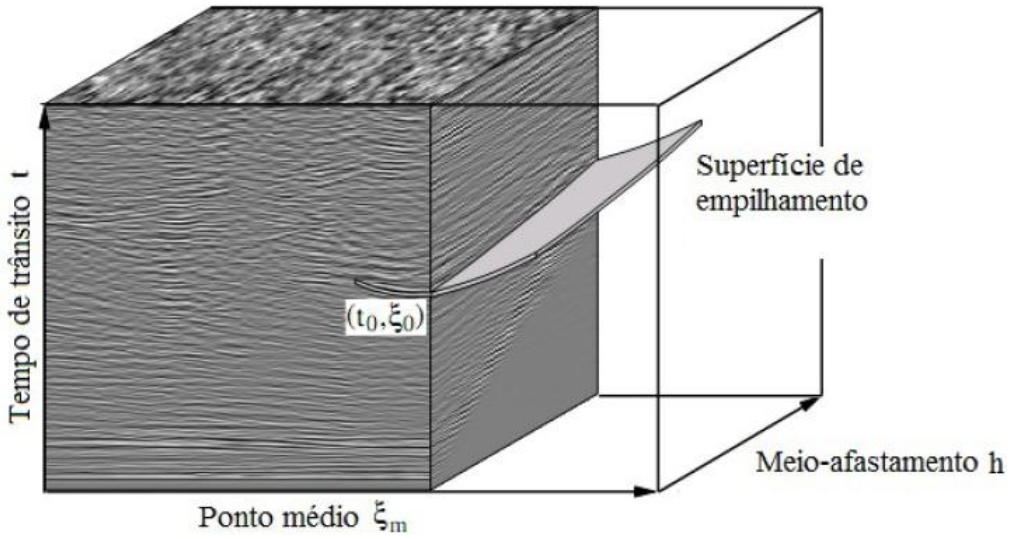
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em seguida, apresentam-se os resultados gerados a partir da realização da etapa do empilhamento sísmico considerando as diversas aproximações de tempos de trânsito destacados neste trabalho. Os testes realizados visaram demonstrar a eficiência destes métodos de empilhamento para simular seções ZO em dados sintéticos.

4.1. GERAÇÃO DE DADOS SINTÉTICOS

Os dados sintéticos testados para verificar a eficiência das aproximações de tempos de trânsitos deste trabalho foram gerados pelo programa de modelamento sísmico baseado na Teoria do Raio chamado SEIS88 (Cerveny e Psencik, 1988). O programa permite desenvolver um cubo de dados sísmicos para gerar modelos geológicos sintéticos, com traçamento de raio e elaboração de um sismograma sintético. Os dados foram gerados considerando a configuração common-shot (CS) ou de tiro comum.

Figura 4.1. Modelo de um cubo de dados sísmicos de cobertura múltipla e a superfície de empilhamento inserida.



Fonte: Adaptada de, Duveneck 2004.

4.2. ETAPAS DO EMPILHAMENTO SÍSMICO

Este processo compreende as seguintes etapas:

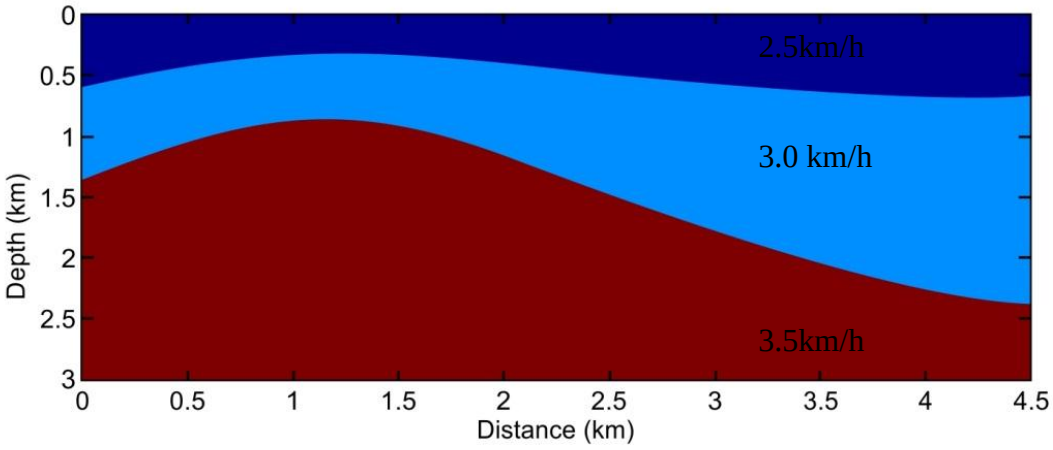
- Cálculo direto dos parâmetros das ondas hipotéticas correspondentes aos raios centrais: β_0, R_{NIP}, R_N, t_0, segundo as leis de curvatura da onda e o algoritmo recursivo proposto por Hubral e Krey (1980).
- Implementação computacional das diversas aproximações de tempo de trânsito para a realização da etapa do empilhamento sísmico.
- Realização de empilhamento sísmico com os diversos métodos considerados neste trabalho. - Esta etapa consiste no somatório das amplitudes dos traços que formam parte de cada superfície de empilhamento sísmico para cada traço sísmico ZO a ser simulado, feito para cada ponto de amostragem deste traço. Os traços envolvidos no empilhamento encontram-se discretizados, desta forma a amplitude correspondente a um determinado tempo e é obtida por interpolação linear.

4.3. TESTES COM DADOS SINTÉTICOS

4.3.1. **Modelo Suavemente Curvado**

O modelo 2-D considerado neste trabalho caracteriza-se por ter 4 km como máximo afastamento, não contém eventos de reflexões múltiplas. Está constituído por duas camadas com velocidades constantes de 2.5 km/s, 3.0 km/h, respectivamente, um semi-espaço com velocidade constante de 3.5 km/s, separados por interfaces curvas e suaves (Figura 4.1). A aquisição foi realizada sobre uma linha sísmica horizontal. Os dados gerados não apresentam ruído e foram criados segundo a configuração de fonte-comum (CS). O sinal utilizado foi a função Gabor com uma frequência dominante de 40 Hz e um intervalo de amostragem de tempo a cada 25 ms.

Figura 4.2. Modelo 2-D constituído por duas camadas de velocidades iguais, sobre um meio-espaço com interface curva.

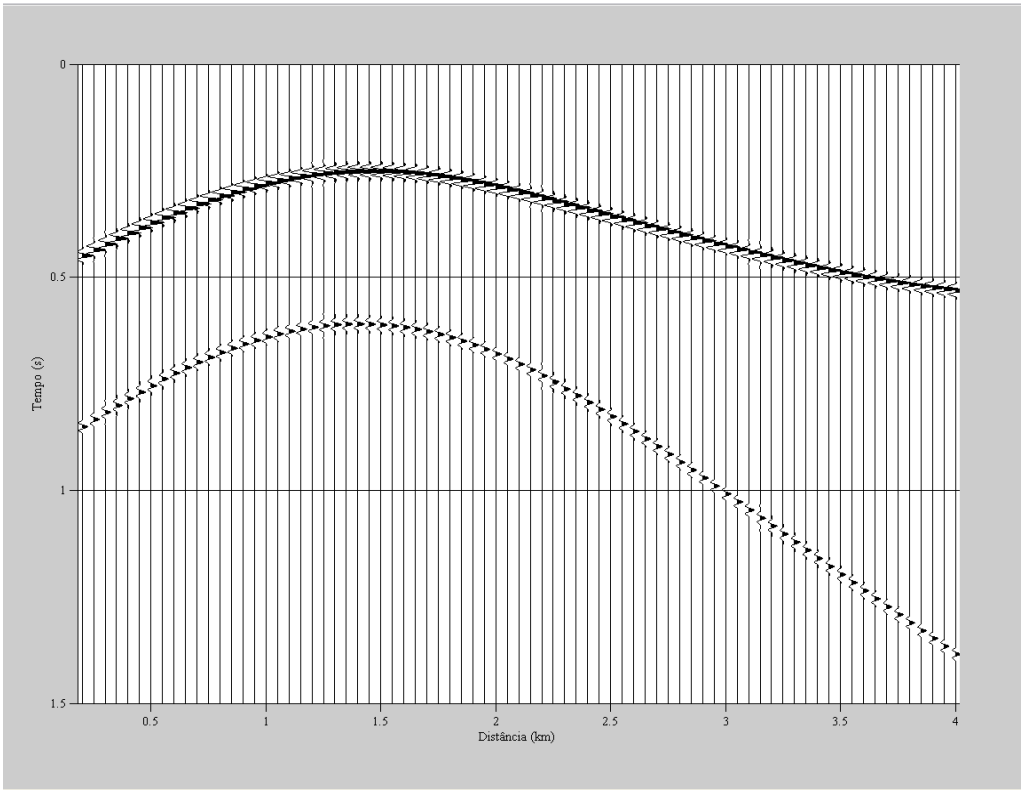


Fonte: Montalvão, 2014.

Na Figura 4.3 é apresentada a seção *ZO* original gerados pelo software SEIS88. Nas figuras em continuação, são apresentados os resultados das seções *ZO* simuladas obtidas pelos métodos hiperbólicos: *CMP* (Figura 4.4); *CRS* de segunda-ordem (Figura 4.5) e CRS de quarta-ordem (Figura 4.6). Os resultados pelos métodos de empilhamento não hiperbólicos: como o Multifoco (MF) (Figura 4.7) e o *CRS* não-hiperbólico (Figura 4.8).

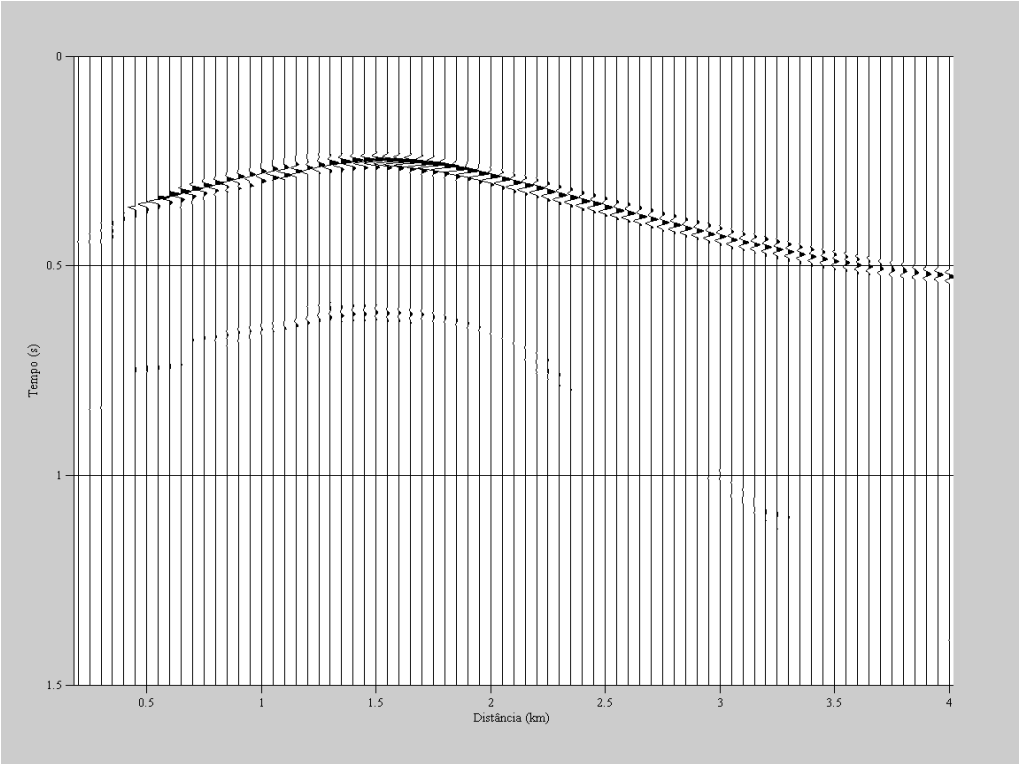
Em seguida, são apresentados os traços obtidos a partir do empilhamento das seções ZO original e as técnicas hiperbólicas e não-hiperbólicas na Figura 4.9 e Figura 4.10.

Figura 4.3. Traços sísmicos ZO verdadeiros gerados com o software SEIS88.



Fonte: Montalvão, 2014.

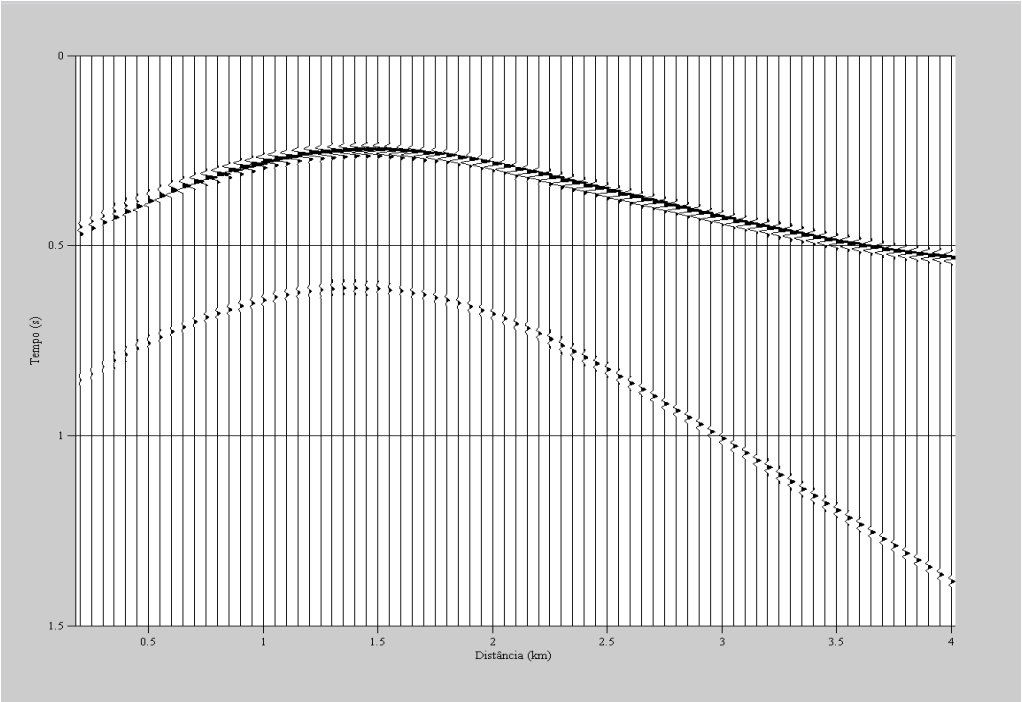
Figura 4.4. Seção ZO simulada com o empilhamento CMP.



Fonte: Montalvão, 2014.

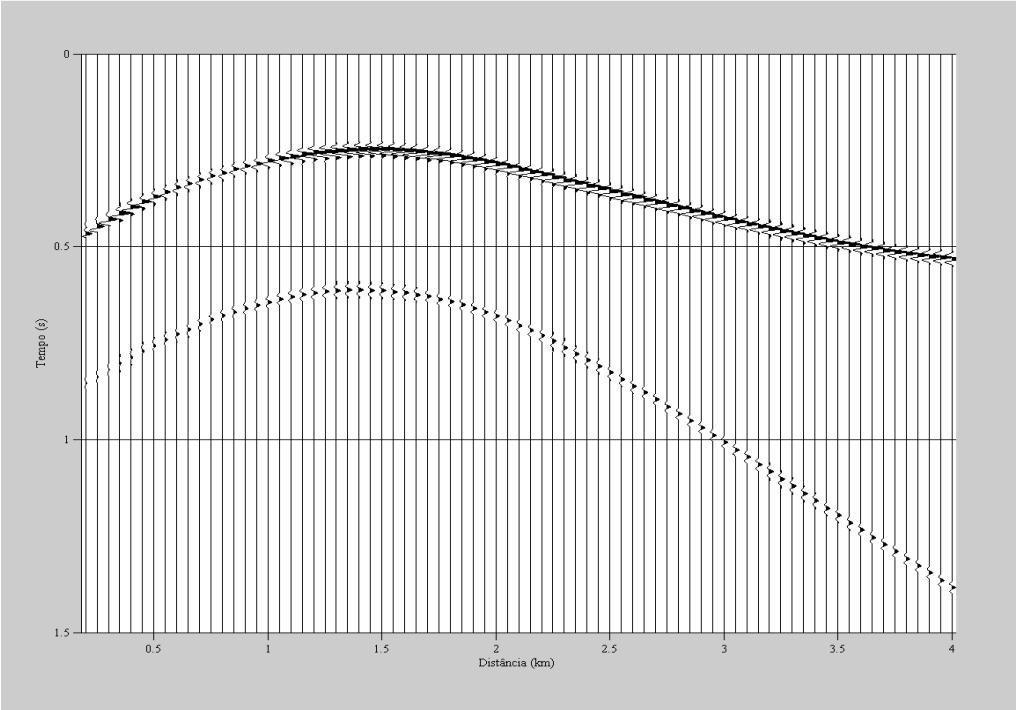
O resultado da simulação da seção *ZO* usando o empilhamento convencional *CMP* (Figura 4.4) mostrou pouca visibilidade dos refletores quando comparados à seção *ZO* original (Figura 4.3). A seção simulada pelo método *CMP* é de baixa qualidade, com poucos traços recuperados, sendo os valores de amplitudes menores que da seção *ZO* original.

Figura 4.5. Seção ZO simulada com o empilhamento CRS de segunda-ordem.



Fonte: Montalvão, 2014.

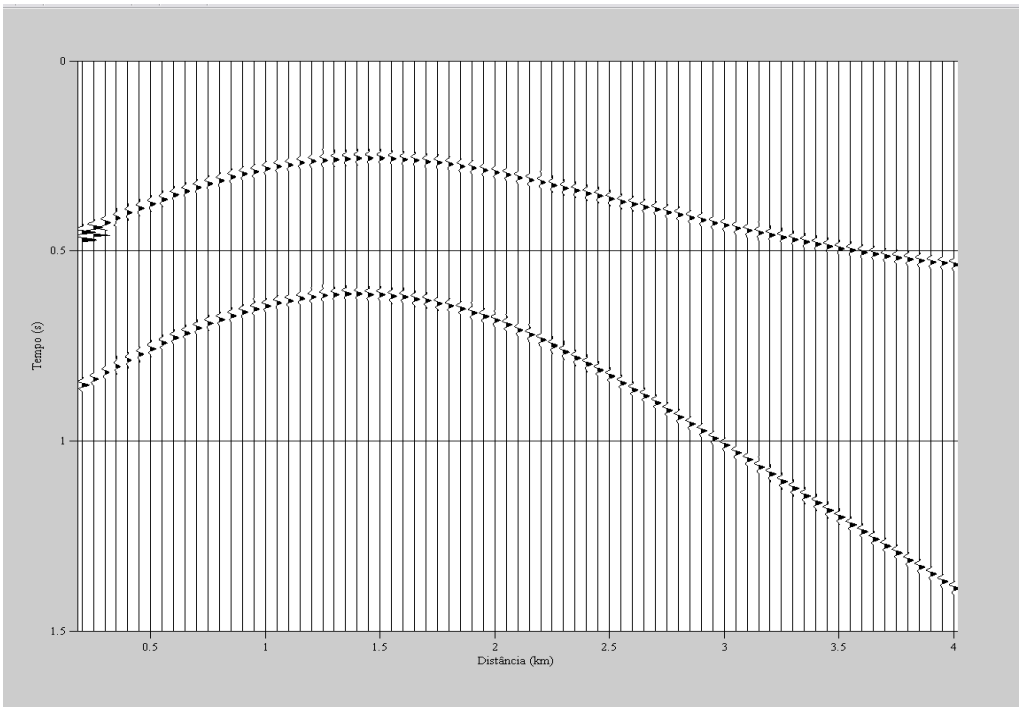
Figura 4.6. Seção ZO simulada com o empilhamento CRS de quarta-ordem.



Fonte: Montalvão, 2014.

As técnicas de empilhamento CRS convencional de segunda e CRS de quarta-ordem, apresentam bons resultados na simulação ZO. Apesar de não recuperarem de forma eficiente nos primeiros traços, como na simulação CRS de segunda-ordem (Figura 4.5), de x=0 km à x=0.5 km para o primeiro refletor, esta técnica ainda é bastante eficiente. Para o resultado do empilhamento CRS de quarta-ordem (Figura 4.6), os traços são melhores imageados quando comparados ao CRS de segunda-ordem. Os experimentos realizados confirmam o trabalho realizado por Chira et al. (2004) onde, para esta comparação, se mostra uma melhora significativa, em exatidão e no intervalo de abertura, em favor do operador CRS de 4ª ordem.

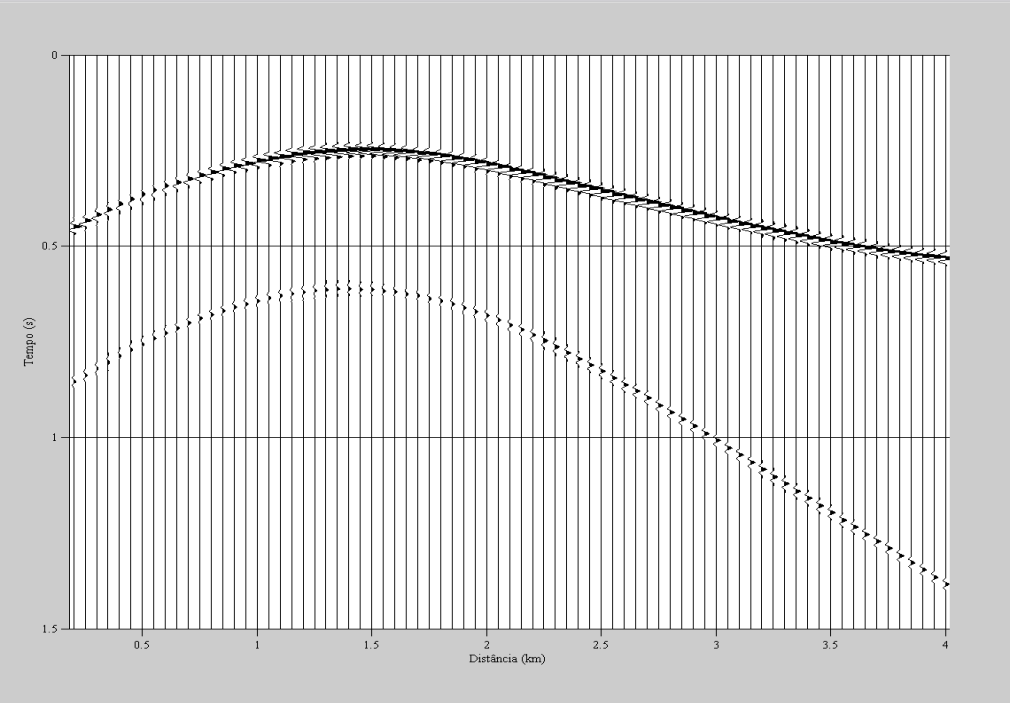
Figura 4.7. Seção ZO simulada com o empilhamento Multifoco.



Fonte: Montalvão, 2014.

Comparando a seção de afastamento nulo (ZO) na Figura 4.3 à seção empilhada Multifoco (Figura 4.7), observa-se uma boa simulação na segunda interface do Modelo 1. No entanto, para o inicio do primeiro refletor não apresenta uma boa recuperação. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato do método ser mais preciso em refletores circulares e mais íngremes (Landa et al., 1999).

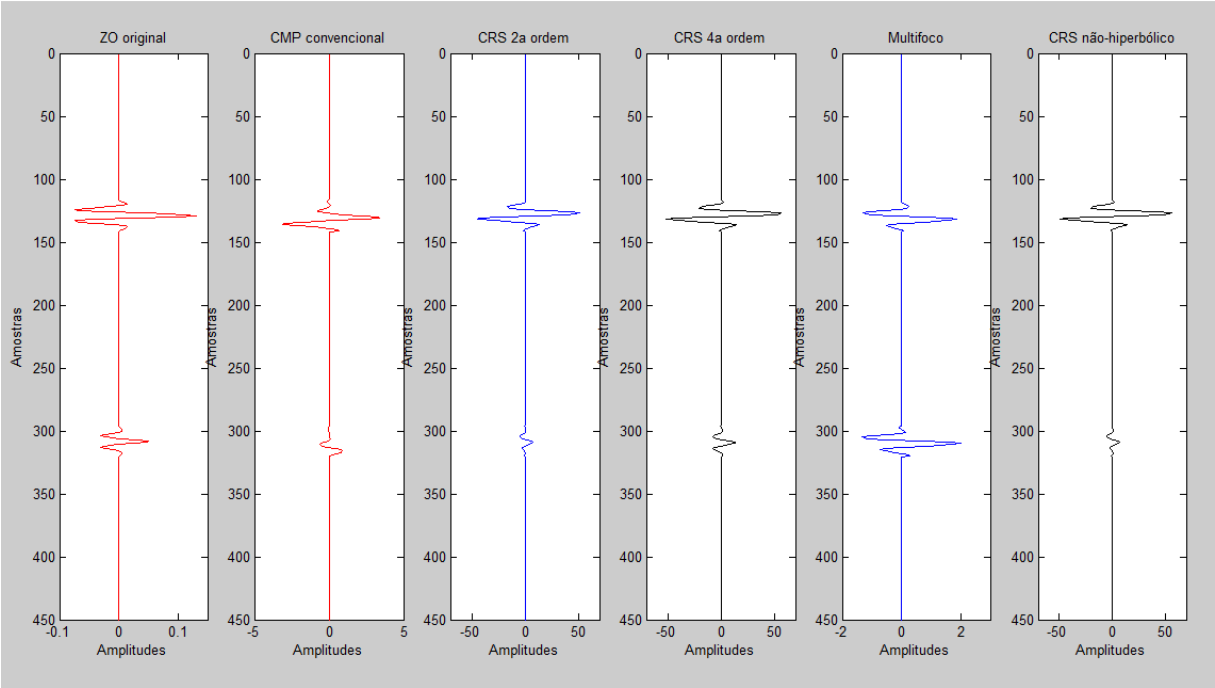
Figura 4.8. Seção ZO simulada com o empilhamento CRS não-hiperbólico.



Fonte: Montalvão, 2014.

O método de empilhamento CRS Não-Hiperbólico simulado para uma seção ZO apresentado na Figura 4.8, possui diferenças sutis em relação aos resultados apresentados do CRS convencional de segunda (Figura 4.5) e quarta-ordem (Figura 4.6). A técnica não-hiperbólica também se mostrou eficiente na simulação da seção ZO, apesar de apresentar os primeiros traços com pouca recuperação na amplitude.

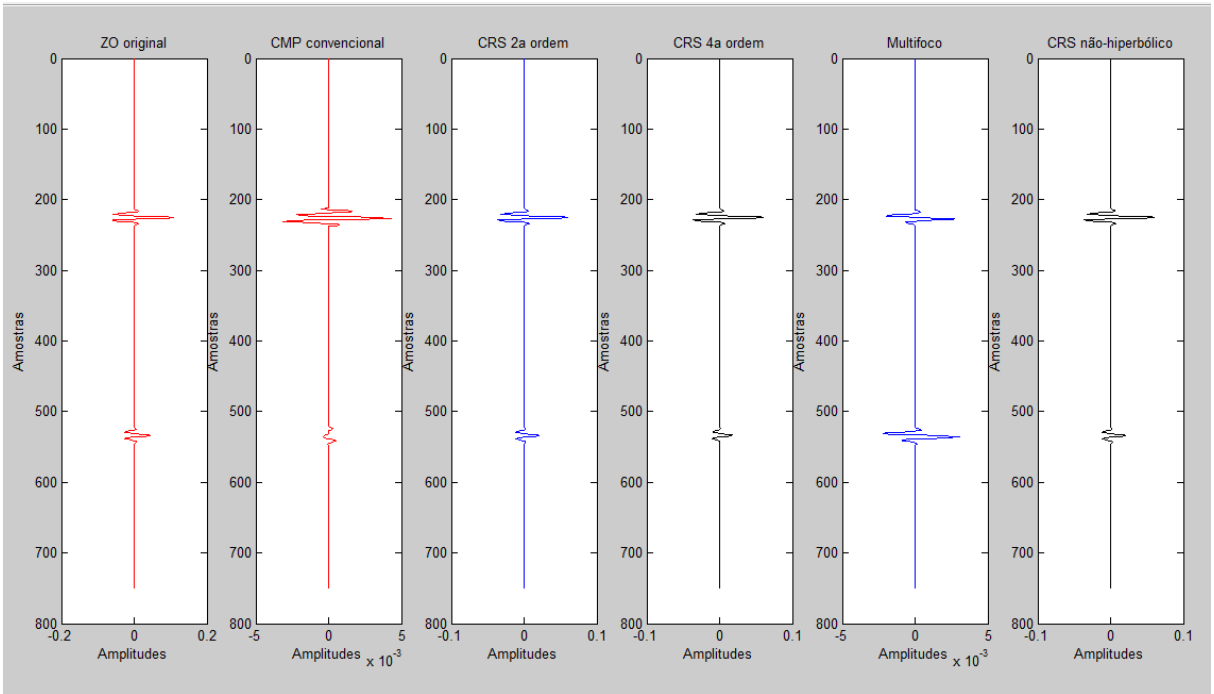
Figura 4.9. Comparação dos traços sísmicos empilhados, da seção de afastamento nulo (SZO), seção empilhada ZO original; CMP; CRS de segunda e quarta-ordem; Multifoco e CRS não hiperbólico, respectivamente.



Fonte: Montalvão, 2014.

Na Figura 4.9 apresenta-se uma comparação entre o traço ZO original, correspondente à coordenada $x = 1.05km$, e os traços sísmicos recuperados com os resultados do empilhamento CMP; CRS de segunda e quarta-ordem; Multifoco e CRS não-hiperbólico, respectivamente. O tiro escolhido foi o 35º de 81 tiros, ao qual é possível observar que a forma do traço sísmico empilhado com as aproximações de tempo de trânsito CRS convencional possuem pequenas diferenças entre si e conservam bem a forma original ZO. No entanto, destaca-se o traço do método Multifoco que melhor recuperou a forma do traço original ZO no segundo refletor (o que os outros métodos analisados não apresentaram), apesar de apresentar uma ligeira mudança de fase no primeiro refletor. Esta pequena mudança de fase, pode justificar a falta de destaque do primeiro refletor na seção ZO simulada com o empilhamento Multifoco na Figura 4.7.

Figura 4.10. Comparação dos traços sísmicos empilhados, da seção de afastamento nulo (SZO), seção empilhada ZO original; CMP; CRS de segunda e quarta-ordem; Multifoco e CRS não hiperbólico, respectivamente.



Fonte: Montalvão, 2014.

No caso, da Figura 4.10, compara-se também, o traço sísmico da seção de afastamento nulo e os traços sísmicos empilhados com os métodos hiperbólicos e não-hiperbólicos, normalizados por 751 amostras em cada traço. O traço escolhido foi de tiro 60 de 81 tiros, apresentam-se os traços com maior energia e com as mesmas características da Figura 4.9. O destaque está no traço do método CMP que apresenta no primeiro refletor uma recuperação deformada.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta os resultados de imageamento dos métodos *Common MidPoint* (CMP), *Common-Reflection-Surface* (*CRS*), *MultiFocusing* (MF) e *Common-Reflection-Surface* não-hiperbólico *(CRS NH)* em simulações de seções sísmicas *ZO* considerando reflexões primárias nos dados sintéticos. Estes métodos, abordados considerando aproximações de tempo de trânsito hiperbólicas e não-hiperbólicas, foram analisados afim de testar seus desempenhos nestas simulações de seção *ZO*.

A aproximação de tempo de trânsito CRS de 4ª ordem fornece, em geral, melhores resultados, isto pode ser verificado no ajuste das aberturas de cada aproximação em relação ao tempo de trânsito verdadeiro. As diferenças entre os resultados CRS de segunda-ordem e a aproximação CRS não-hiperbólica são mínimas, estas diferenças destacam para o caso de determinadas configurações sísmicas que pode ajudar na melhor recuperação dos parâmetros.

Desta maneira, apresenta-se o operador CRS de 4ª ordem como uma alternativa de empilhamento para simular seções ZO. Um fator atrativo desta fórmula é que depende dos mesmos parâmetros que o operador CRS de 2ª ordem.

Segundo os resultados obtidos com a aproximação dos métodos Multifoco, esta aproximação mostrou-se mais eficiente para o refletor mais curvado e mais profundo. Este comportamento é justificado por Tygel et al. (1997), que atesta que a fórmula de tempo de trânsito Multifoco é uma boa aproximação para refletores esféricos e em meios de velocidade constantes; e justificado por Landa et al. (1999), ao qual mostra que fórmula Multifoco não é apenas uma representação adequada dos tempos de trânsito para configurações fonte-receptor arbitrárias, mas de fato é mais exata para vários modelos da Terra.

A análise feita através dos resultados do empilhamento CRS não-hiperbólico mostrou um bom posicionamento dos tempos de trânsito e uma boa visualização dos referidos eventos de reflexão e com diferenças sutis em relação aos empilhamentos CRS de segunda e quarta-ordem, respectivamente. Uma propriedade especial deste método, segundo Fomel e Kazinnik (2012), é que ela recupera bem os traços com uma escolha especial de parâmetros, evidenciando refletores planos e pontos difratores. Para maior clareza, todas as derivações restrito ao 2-D caso, mas note que eles podem ser facilmente estendido para 3-D.

Os métodos Multifoco, CRS e CRS não-hiperbólico apresentam-se como uma importante alternativa para simular seções ZO (Zero-Offset) para diversos afastamentos em

ambientes de estruturas geológicas complexas, onde a qualidade de imageamento na sísmica de reflexão pode ser comprometida.

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

- Aplicar este estudo em dados sintéticos com ruído, dados reais, etc.
- 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).
- Considerar modelos que apresentem velocidades com decrescimento em relação às outras camadas em profundidade.

REFERÊNCIAS

BERKOVITCH, A., KEYDAR, S., LANDA, E., TRACHTMAN, P.,1998. *Kinematic Multifocusing in Practice.* In: ANNUAL INT. MTG., 68. Expanded abstracts. Soc.Exp. Geophys.

BORTFELD, R. 1989. *Geometrical Ray Theory: Rays and traveltimes in seismic systems (second order approximation of the traveltimes*). Geophysics, 54: 342-349.

ČERVENÝ, V. & RAVINDRA, R., 1971. Theory of Seismic Head Waves, University of Toroto Press, Toronto.

ČERVENÝ, V., PSENCIK, I., 1988. *SEIS88, Ray Tracing Program Package.*

CABRAL, R. C. M., 2002. *Simulação de reflexões múltiplas usando o método de empilhamento sísmico Superfície de Reflexão Comum*. Tese De Mestrado. Universidade Federal do Pará.

CARDOSO, M. 2008. *Imageamento de refletores sísmicos usando o operador de Empilhamento Superfície de Reflexão Comum (CRS) ZO 2-D de 4ª ordem. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).* Universidade Federal do Pará.

CHIRA, P., 2000. *Imageamento Multifocos de Refletores Sísmicos*. Belém, UFPa, CPGF (Tese de Mestrado).

CHIRA-OLIVA, P., TYGEL, M., HUBRAL, P., SCHLEICHER, J., 2003. *A fourth-order CRS moveout for reflection or diffraction events: numerical examples.* Journal of Seismic Exploration, 12:197–219.

CHIRA-OLIVA, P., CRUZ, J. C. R., CARDOSO, M. 2008. *Fourth order CRS stack: synthetic examples.* WIT report 2008, WIT Consortium, Germany.

CHIRA-OLIVA, P., GARABITO, G., CRUZ, J. C. R., 2010. *Fourth Order CRS Stacking Method: Examples.* 72nd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE Europec, Barcelona, Spain.

FOMEL, S., KAZINNIK, R. 2012. *Non-hyperbolic common reflection surface.*GeophysicalProspecting, 61, 21–27.

FOMEL, S., STOVAS, A. 2010. *Generalized nonhyperbolic moveout approximation.* Geophysics, 75, no. 2, U9-U18.

GAMBOA, F., 2007, *Aplicações do método de Superfície Comum de Reflexão (CRS) ao processamento sísmico*, Universidade Estadual de Campinas (Tese de Doutorado).

GARABITO, G., 2001, *Empilhamento Sísmico por Superfície de Reflexão Comum: Um novo Algoritmo Usando Otimização Global e Local*, Universidade Federal do Pará. (Disssertação de Doutorado).

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

GELCHISNKY, B., BERKOVITCH, A., KEYDAR, S., 1999a. *Multifocusing homeomorphic imaging: Part 1. Basic concepts and formulae.* Journal of Applied Geophyscis, v. 42, p. 229-242.

GELCHISNKY, B., BERKOVITCH, A., KEYDAR, S., 1999b. *Multifocusing homeomorphic imaging: Part 2. Multifold data set and multifocusing.* Journal of Applied Geophyscis, v. 42, p. 243-260.

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

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

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

HUBRAL., P., 1983. Computing true amplitudes reflections in a laterally inhomogeneous earth. Geophysics, 48, 1051-1062.

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

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

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I., 2009. Geofísica de Exploração. Tradução: Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina do Texto, 54p.

LANDA, E., KEYDAR, S., and RESHEF, M., 1998. *How far is the seismic image correct*?: The Leading Edge, 17, no. 07, 919–922.

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

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

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

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

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

SHAH, P. M., 1973. *Use of curvature to relate seismic data with subsurface parameters.* Geophysics, 38(5): 812-825.

SILVA, O. P., CHIRA. P, CRUZ, J. C. R., 2012. *Simulação de reflexões primárias e múltiplas usando aproximação paraxial de tempos de trânsito CRS de 4ª ordem.* V Simpósio Brasileiro de Geofísica.

TANER, M. T. & KOEHLER, F. 1969. *Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity functions.*Geophysics.

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

TYGEL, M.; MUELLER, T.; HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J. 1997. *Eigenwave based multiparametertraveltime expansions.* In: ANNUAL MEETING OF SEG, 67.,Expansed abstracts, 1770-1773.

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