



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA

DHEYMISON ALVES MOREIRA

EMPILHAMENTO i-CRS: UMA NOVA ALTERNATIVA PARA O
IMAGEAMENTO SÍSMICO

BELÉM
2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA

DHEYMISON ALVES MOREIRA

EMPILHAMENTO i-CRS: UMA NOVA ALTERNATIVA PARA O
IMAGEAMENTO SÍSMICO

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

Orientador: Prof. Dr. Pedro Andrés Chira
Oliva

BELÉM
2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA

EMPILHAMENTO i-CRS: UMA NOVA ALTERNATIVA PARA O
IMAGEAMENTO SÍSMICO

TCC APRESENTADO POR
DHEYMISON ALVES MOREIRA

COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE BACHAREL EM
GEOFÍSICA

Data da aprovação: 31/ 03/2014

Conceito: _____

BANCA EXAMINADORA:

UFPA – Prof. Dr. Pedro Andrés Chira Oliva (Orientador)

UFPA – Prof. Dr. João Carlos Ribeiro Cruz

UFPA – Prof. Dr. Manuel de Jesus dos Santos Costa

*Aos meus fabulosos Pais Dionizio Sebastião
Moreira e Gleudi Alves Moreira*

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me proporcionado essa benção e sempre ter me ajudado a alcançar meus objetivos.

Àos meus queridos e valorosos pais Dionízio Sebastião Moreira e Gleudi Alves Moreira por sempre estarem ao meu lado e pelos valiosos ensinamentos de vida.

Àos meus grandiosos irmãos o Geofísico Gelbson Alves Moreira e ao Sociólogo Geidson Alves Moreira pelo constante apoio e incentivo ao sucesso da minha vida acadêmica.

A Minha Namorada e companheira Paula Cardoso Ribeiro por toda cumplicidade, incentivo e ajuda nos momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. Pedro Chira pela orientação, atenção e disposição para compartilhar seus conhecimentos neste trabalho, além da simplicidade, profissionalismo, amizade e conselhos que serviram para minha profissional e pessoal.

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica pelo suporte financeiro enquanto bolsista.

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

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

À Prof. Dr. Vitor Tocantins pela amizade e por todo incentivo, apoio e conhecimento quando solicitado.

À Professora Dra. Ellen Gomes por todo apoio e ajuda nos momentos que precisei.

Ao Msc. Wesley Sena pelas suas preciosas sugestões e ajuda nas resoluções dos cálculos matemáticos, as quais foram muito bem vindas.

À Benildes, por todo amor, carinho e amizade durante esses quatro anos.

À Coordenação do Curso de Graduação em Geofísica

À melhor turma do curso de graduação em Geofísica, a turma 2010: Vitor Alfaia, Michael Alves, Hugo Souza, Diego Pereira, Leonardo Reis, Carol Sena, David Ribeiro, Jeferson Afonso, Alípio, Rodolfo Neves, Victor Ferreira, Jessica Pena, João Alves, Carlos Eduardo, Ângela Montalvão, Erlane Santos, Natiê Almeida, Iverson Angelim, Glessiane Vasconcelos, Anderson Sousa e Caio Toledo.

A todos que contribuíram diretamente ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

*Quem observa o vento nunca semeará, e o
que olha para as nuvens nunca segará.
(Eclesiastes 11.4)*

RESUMO

O conhecimento dos tempos de trânsito e as amplitudes das ondas elásticas que se propagam na subsuperfície como consequência de um levantamento sísmico são de fundamental importância em qualquer etapa do processamento sísmico. Uma das etapas do processamento sísmico que utiliza as aproximações de tempo de trânsito é o empilhamento sísmico. A qualidade desta imagem e sua respectiva estimativa de seus parâmetros dependem da exatidão da aproximação de tempo de trânsito utilizado pelo respectivos métodos de empilhamento sísmico. Nos últimos anos, surgiram métodos de empilhamento com a finalidade de melhorar as limitações do método normal-moveout (NMO) que considera como único parâmetro de empilhamento, (a velocidade NMO) e usa uma curva de empilhamento que leva em consideração a configuração fonte-receptor do tipo common-midpoint (CMP). Estes métodos caracterizam-se por considerar superfícies no empilhamento sísmico a partir de aproximações de tempo de trânsito hiperbólico ou não hiperbólico considerando mais de um parâmetro. Recentemente foi introduzida na literatura geofísica uma nova aproximação de tempo de trânsito não hiperbólico conhecida como Common-Reflection-Surface (CRS) implícita com o objetivo de fazer ela aplicável em um sentido mais geral para meios com heterogeneidade e anisotropia e para a descrição de eventos de reflexão e difração. Neste trabalho, nós aplicamos esta nova aproximação de tempo de trânsito do CRS-implícita em dados sintéticos para testar a eficiência da mesma na simulação de seções ZO e ver o desempenho deste método na recuperação das amplitudes dos traços sísmicos simulados ao ser comparada com o método de empilhamento CRS convencional.

Palavras-chave: CRS implícito. Empilhamento multiparamétrico. Eventos de reflexão. Seção sísmica AN simulada.

ABSTRACT

Knowledge of transit times and amplitudes of elastic waves that propagate in the subsurface as a result of a seismic survey is important to all the stages of seismic processing. One of these stages of seismic processing that utilizes the approaches of transit time is called: seismic stacking. The image's quality and its corresponding estimated parameters depend on the accuracy of approximation of transit time used by the respective methods of seismic stacking. these past years, methods have emerged stacking in order to improve the limitations of the method normally moveout (NMO) as a single parameter that considers stacking (the NMO velocity) and use a curve stacking that takes into account the source-configuration receptor type common-midpoint (CMP). These methods are characterized by considering the seismic stacking surfaces from time approximations of hyperbolic route or not considering more than one parameter. Recently HAS been introduced in the geophysical literature a new approach of time not hyperbolic transit known as Common-Reflection-Surface (CRS) with the implicit goal of making it applicable in a more general sense for media with heterogeneity and anisotropy and the description of events: reflection and diffraction. In this paper, we apply this new approach to transit time CRS-implicit synthetic to test the efficiency of the same simulation ZO sections and see the performance of this method in the recovery of the amplitude of the simulated to be compared with the method seismic data traces CRS conventional stacking.

Keywords: Implicit CRS. Multiparameter stacking. Reflection events. Simulated seismic section AN.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 –	Exemplo de um sistema sísmico representado por um modelo 2-D constituído por duas camadas sobre um semi-espaco. Cada camada esta separada por interfaces suaves e curvas. A trajetória de uma reflexão primária é dada pelo raio SRG. A trajetória de um raio normal é dada pelo raio $xORxo$	4
Figura 2.2 -	Configuração CO (common-offset) caracterizada pelo afastamento fonte-receptor constante.	6
Figura 2.3 -	Configuração ZO(zero-offset) caracterizada pelo afastamento fonte-receptor igual à zero.	6
Figura 2.4 -	Configuração CMP (Common-midpoint) caracterizada pelo ponto médio que é comum a todos os pares fonte-receptor deste levantamento. As fontes estão à esquerda do ponto médio e seus correspondentes receptores à direita.....	7
Figura 2.5 -	Configuração CMP para um modelo planar horizontal.....	7
Figura 2.6 -	Configuração CMP para um modelo de superfície inclinada.	8
Figura 2.7 -	Configuração CS caracterizada por manter a fonte (S) fixa e dispor de vários receptores Gi ($i= 1,...,n$).	8
Figura 2.8 -	Configuração CR caracterizada por manter o receptor fixo G.	9
Figura 3.1 –	Propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico.....	11
Figura 3.2 –	Transmissão do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico.....	12
Figura 3.3 –	Reflexão do raio de curvatura da frente de onda através de uma interface. Os ângulos de incidência e reflexão são representados por αI e αR . vI e vR são as velocidades da frente de onda incidentes e refletidas, KI e KR são as curvaturas das frentes de ondas incidentes e refletidas, respectivamente e Kr é a curvatura do refletor. Os vetores normais às curvaturas KI, KR e KF , são representados por nI, nR e nF , respectivamente.....	13
Figura 3.4 –	Convenção de sinais das (a) curvaturas das frentes de onda e (b) interfaces.....	14

Figura 4.1 (a) - Modelo composto por camadas com interfaces curvas e superfície de aquisição plano horizontal com desenho dos atributos da frente de onda. (a) Onda-NIP com origem num ponto NIP de raio de curvatura $RNIP$ e curvatura $KNIP$	15
Figura 4.1 (b) - Onda-N com origem num seguimento do refletor de raio de curvatura RN e curvatura KN . i e $vi\Delta t_i$ é o seguimento reto que une os dois pontos.	16
Figura 4.2 – Eventos primários, aplicando as leis de propagação e transmissão	18
Figura 5.1 (a) - Geometria do refletor e b) aquisição para um refletor esférico. O ponto de reflexão é definido pelo ângulo θ . Os ângulos ϑ_i são os ângulos de raio e de grupo, respectivamente	19
Figura 6.1 - Modelo não homogêneo: duas interfaces entre duas camadas homogêneas sob um semi-espaço. Os raios ZO dos refletores curvados (Figura inferior) e seus respectivos tempos de trânsito (Figura superior) são mostrados.	23
Figura 6.2 - Modelo 2-D constituído por duas camadas separadas com interfaces curvas sob um semi-espaço. a) Traços sísmicos ZO verdadeiros gerados com o software Seis88 a partir de dados sintéticos. b) Seção AN simulada utilizando a aproximação CRS de 2ª ordem. c) Seção AN simulada utilizando a aproximação CRS de 4ª ordem. d) Seção AN simulada utilizando a aproximação i-CRS.	25
Figura 6.3 – Comparação dos traços sísmicos empilhados (modelo da figura 6.1) corresponde à posição do raio normal (central), da seção de afastamento nulo, seção CRS de 2ª ordem, CRS de 4ª ordem e seção empilhada i-CRS.	26
Figura 6.4 - Parte inferior: modelo tipo domo constituído por uma camada de velocidade constante de 2.5 km/s e um semi-espaço infinito com uma velocidade de 3.0 km/s respectivamente e seus correspondentes raios de afastamento nulo (ZO) apresentando caústica. Parte superior: os correspondentes tempos de trânsito são mostrados.	27
Figura 6.5 – Seções correspondentes ao modelo tipo domo da Figura 6.3. a) Seção sísmica sintética para ZO. Foi utilizada função Gabor com frequência dominante de 50 Hz como pulso da fonte e os traços	

possuem intervalo de amostragem dominante de 25ms. b)Seção empilhada CRS de 2ª ordem. c)Seção empilhada CRS de 4ª ordem. d) Seção empilhada i-CRS, sendo utilizado o tempo de trânsito não hiperbólico no operador de empilhamento.28

Figura 6.6 (a) – Comparação dos traços sísmicos empilhados (modelo da Figura 6.4), correspondente à coordenada ponto médio $x_0 = 0,51$ km, da seção de afastamento nulo, seção CRS de 2ª ordem, seção CRS de 4ª ordem e da seção i-CRS.29

Figura 6.6 (b) – Comparação dos traços sísmicos empilhados (modelo da Figura 6.4), correspondente à posição $x_0 = 1,65$ km, da seção de afastamento nulo, seção CRS de 2ª ordem, seção CRS de 4ª ordem e da seção i-CRS.....30

Figura 6.6 (c) – Comparação dos traços sísmicos empilhados (modelo da Figura 6.4), correspondente à posição $x_0 = 2,17$, da seção de afastamento nulo, seção CRS de 2ª ordem, seção CRS de 4ª ordem e da seção i-CRS.....30

LISTA DE SIGLAS DE TERMOS EM INGLÊS

<i>ZO</i>	Zero-offset
<i>CMP</i>	Common-midpoint
<i>CRS</i>	Common-reflection-surface
<i>i-CRS</i>	Common-reflection-surface implicit
<i>NIP</i>	Normal-incidence-point
<i>N</i>	Normal
<i>NMO</i>	Normal-moveout
<i>DMO</i>	Dip-moveout
<i>AVO</i>	Amplitude-versus-offset
<i>AVA</i>	Amplitude-versus-ângulo
<i>S</i>	Source
<i>G</i>	Geophone
<i>CO</i>	Common-offset
<i>CS</i>	Common-shot
<i>CR</i>	Common-receiver
<i>CDS</i>	Common-difraction-surface

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTOS TEÓRICO	4
2.1	Modelo Sísmico	4
2.2	Configurações Sísmicas.....	5
3	LEIS DE CURVATURA DAS FRENTES DE ONDAS.....	10
3.1	Curvaturas das Frentes de Onda.....	10
3.2	Leis de Curvatura das Frentes de Onda.....	10
3.2.1	Lei de Propagação	10
3.2.2	Lei de Transmissão.....	11
3.2.3	Lei de Reflexão	12
3.2.4	Convenção de Sinais	13
4	ATRIBUTOS DA FRENTE DE ONDA	15
4.1	Reflexões primárias.....	17
5	APROXIMAÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO CRS- IMPLÍCITO (I- CRS) ..	19
5.1	Derivação da fórmula do método i-CRS.....	19
5.2	Aplicação de aproximação de tempo de trânsito para ondas monotípicas em meios isotrópicos	21
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
6.1	Modelos	23
7	CONCLUSÕES.....	28
8	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	31
	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

Os tempos de trânsito das ondas elásticas são o ingrediente chave em qualquer etapa do processamento de dados sísmicos. Primeiramente, as expressões analíticas são usadas durante o empilhamento para obter a primeira imagem. No final da cadeia de processamento, após a construção do modelo de velocidade ser carregado neste processamento, os tempos de trânsitos são gerados numericamente para o modelo ser usado na migração final pré-empilhada para a imagem final. O principal objetivo do método sísmico é obter uma imagem da subsuperfície a partir do levantamento de dados sísmicos, sejam sintéticos ou reais.

Devido ao fato de que em um experimento sísmico as fontes e receptores podem somente serem distribuídas na subsuperfície da terra ou próximo dela, tem que depender ou contar com a energia refletida, difratada ou criticamente refratada para fornecer esta imagem. A qualidade desta imagem pode ser comprometida, por exemplo, com a presença de rochas intrudidas (e.g. diques e soleiras de diabásio), como é o caso da região Amazônica no Brasil (IMAGAM, 2002). Estas rochas deterioram a qualidade das seções sísmicas porque causam perda do sinal, formação de reflexões múltiplas e divergência esférica, e podem prejudicar a interpretação dos dados devido à formação de falsas estruturas (pull-down e pull-up).

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

Após um levantamento sísmico dispomos de uma grande quantidade de dados que muita das vezes é redundante. Um caminho conveniente para reduzir eficientemente esta redundância é empilhar todos os traços que carregam mais ou menos a mesma informação. Todos os traços resultantes são alinhados de acordo com a sua localização de ponto médio e então formarão a conhecida seção empilhada.

O processo de empilhamento simula uma seção ZO e fornece pela primeira vez uma imagem da subsuperfície com uma razão sinal/ruído superior. Um dos métodos mais frequentemente aplicados é o clássico empilhamento common-midpoint (MAYNE, 1962). Durante este empilhamento, a energia coerente de todos os traços dentro de uma

configuração fonte-receptor CMP é somada, resultando em um traço empilhado. Este método apresenta limitações no empilhamento, pois o mesmo é realizado ao longo de uma única curva de tempo de trânsito e depende de um único parâmetro, a velocidade Normal-moveout (NMO).

O empilhamento sísmico multiparamétrico tem-se tornado, portanto, uma ferramenta muito importante para o processamento de dados de reflexão sísmica. Ao longo dos últimos anos, diversas aproximações de tempos de trânsito multiparamétricos foram apresentadas como uma extensão da técnica de empilhamento sísmico convencional conhecido como Common-midpoint (CMP). Entre os principais exemplos destas aproximações destacam a aproximação da hipérbole recortada (de Bazelaire, 1988), Common-Reflection-Surface (CRS, MULLER, 1999), Multifoco (MF, LANDA ET AL., 1999, LANDA ET AL., 2010) entre outras aproximações.

As aproximações de tempos de trânsito mencionados no parágrafo anterior descrevem a superfície de tempos de trânsito para um evento refletido no intervalo de um afastamento fonte-receptor curto. A exatidão destes métodos difere e depende não somente do afastamento fonte-receptor considerado, sendo também da curvatura do refletor.

A qualidade dos resultados do empilhamento depende fundamentalmente da exatidão da aproximação de tempos de trânsito utilizado no empilhamento. As aproximações de tempo de trânsito hiperbólica com função de afastamento é só exata para o caso de um refletor plano com mergulho na subsuperfície. Qualquer desvio desta suposição resulta em uma aproximação de tempo de trânsito não hiperbólico. As principais causas para isto podem ser a heterogeneidade vertical e/ou lateral da subsuperfície em um meio anisotrópico não elíptico ou a forma de refletor mesmo, ou seja, sua curvatura (FOMEL e GRECHKA, 2001).

Geralmente, aproximação baseadas nas expressões contendo duplas raízes quadradas, como multifoco. São melhor adequadas para a descrição dos tempos de trânsito de difração que as formulas hiperbólicas. Apesar de que, a fórmula multifoco é mais adequada que a fórmula CRS para a descrição das difrações, nenhuma delas considera a anisotropia sísmica.

Com a finalidade de tentar suprir as limitações do CRS em relação às difrações e anisotropia, Vanelle et al (2010) introduziram uma aproximação de tempos de trânsito

para ondas monotípicas. Esta aproximação foi obtida a partir da Lei de Snell para uma interface esférica que nos leva a uma expressão implícita para a superfície de tempos de trânsito. Pode ser considerada como uma representação baseado no modelo da teoria do método CRS. Como consequência disto e de sua natureza implícita é referida como a aproximação i-CRS. Eles demonstraram o potencial de ajuste desta aproximação para o caso da velocidade constante. Esta fórmula CRS implícita foi introduzida como uma alternativa de aproximação de tempos de transito não-hiperbólico que intrinsecamente explique melhor a curvatura do refletor, não somente no ponto médio, mas também na direção do afastamento.

Vanelle et al. (2012) aplicaram a anterior aproximação em meios isotrópicos e anisotrópicos. Os resultados têm demonstrado uma exatidão superior quando comparados com o método CRS convencional para uma grande variedade de formas de refletores desde refletores planos até formas mais complexas com características de gerar eventos de difrações.

Em virtude das vantagens do método CRS implícita, é que será aplicado este método em dados sintéticos com a finalidade de testar sua eficácia na simulação de seções sísmicas de afastamento-nulo considerando eventos de reflexão e comparar a mesma com o método CRS convencional até a quarta-ordem.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Modelo Sísmico

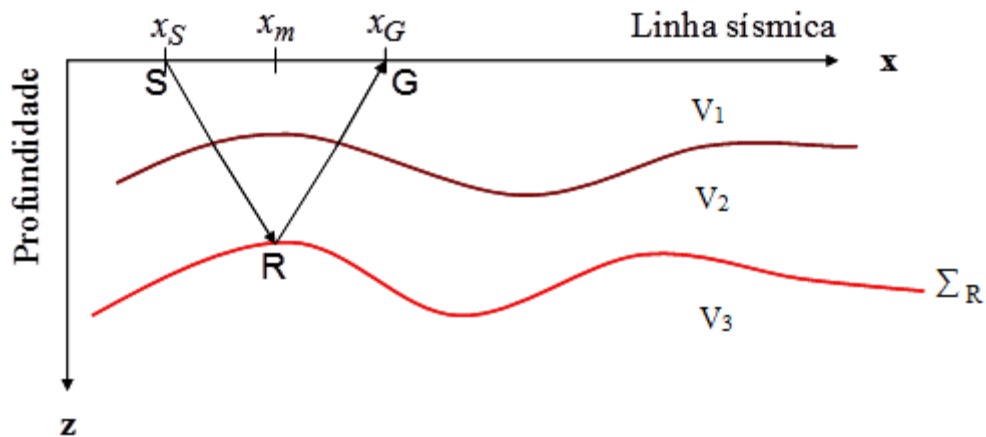
O modelo sísmico tem a finalidade de fornecer uma imagem da subsuperfície a partir de dados de cobertura múltipla. A partir do levantamento pode se construir uma representação física ou matemática do evento estudado (estrutura, sistema, etc). Para o entendimento deste tópico é usado o Sistema de Coordenadas Cartesiano. O vetor posição $\vec{X} = (x, z)$ é usado para definir a direção da linha sísmica x na superfície terrestre, que é considerada plana. A profundidade é dada por z . Cada camada possui um campo de velocidade $v = v(x, z)$. Os pares fonte-receptor são dados respectivamente por (S, G) :

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

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

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 de acordo com a Figura 2.1

Figura 2.1 – Exemplo de um sistema sísmico representado por um modelo 2-D constituído por duas camadas sobre um semi-espço. Cada camada esta separada por interfaces suaves e curvas. A trajetória de uma reflexão primária é dada pelo raio SRG. A trajetória de um raio normal é dada pelo raio $x_0 R x_0$



Fonte: (SILVA, 2012).

2.2 Configurações Sísmicas

O levantamento sísmico 2-D tem como base as fontes que ficam na superfície de medição ao longo de uma linha sísmica gerando ondas que se propagam em profundidade até chegarem a uma interface, neste momento as ondas são refletidas e retornam a superfície. Ao retornarem a superfície, as ondas são captadas por vários receptores que estão dispostos também na mesma linha sísmica. Os receptores terrestres são os chamados geofones e marítimos são os hidrofones.

Os registros nos receptores constituem os traços sísmicos, cuja coleção é denominada de sismograma. A coleção 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 ponto médio, h é o meio afastamento e t o tempo de trânsito. As coordenadas x_m e h são dadas por

$$x_m = \frac{x_S + x_G}{2}, \quad h = \frac{x_G - x_S}{2} \quad (2.3)$$

Segundo a equação abaixo, a posição de um par fonte-receptor é especificada por um único parâmetro, nesse caso (ξ) . Para qualquer configuração de medida especificada (Schleicher et al, 1993), em duas dimensões (2-D), tem-se:

$$x_S = x_{(S_0)} + \Gamma_S(\xi - \xi_0), \quad x_G = x_{(G_0)} + \Gamma_G(\xi - \xi_0) \quad (2.4)$$

sendo $x_{(S_0)}$ e $x_{(G_0)}$ as coordenadas de um par fonte-receptor fixo definido por $(\xi - \xi_0)$.

Γ_S e Γ_G são constantes que dependem somente da configuração de medida.

As principais configurações são:

- **Common-Offset (CO) ou afastamento-comum:** configuração dada para levantamentos em que os traços apresentam a mesma distância fonte-receptor (Figura 2.2). Ela é descrita pela equação 2.4, se $\Gamma_S = 1$ e $\Gamma_G = 1$. Se $x_{(S_0)} = x_{(G_0)}$, tem-se a configuração Zero-Offset (ZO) ou *afastamento nulo* (Figura 2.3).

Figura 2.2 - Configuração CO (common-offset) caracterizada pelo afastamento fonte-receptor constante.

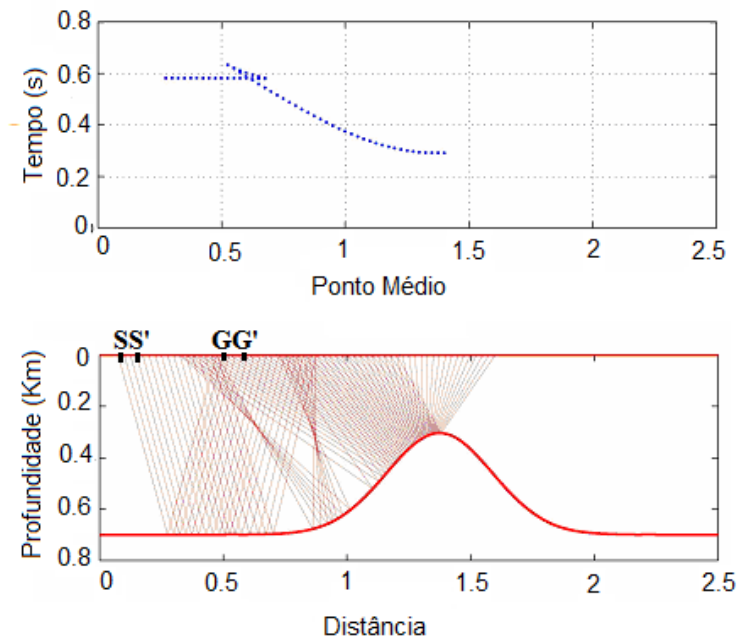
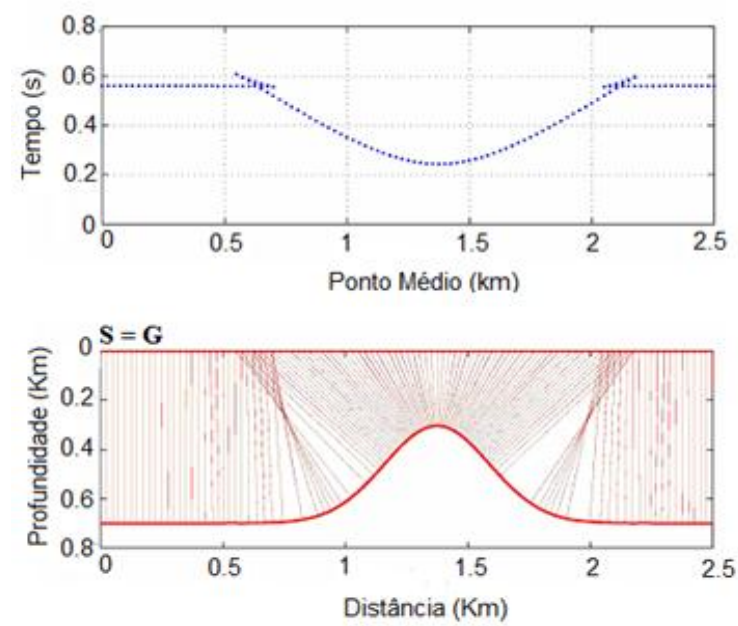


Figura 2.3 - Configuração ZO(zero-offset) caracterizada pelo afastamento fonte-receptor igual à zero.



- **Common-midpoint (CMP) ou Ponto médio comum:** Configuração dada para os levantamentos onde o ponto médio entre a fonte e o receptor é fixo. Este nome foi uma adaptação do modelo Common-Depth-Point (CDP, ou ponto comum em profundidade), devido a algumas restrições do mesmo, e.g. variação das velocidades do meio. A Configuração CMP é descrito pela equação 2.4, onde $\Gamma_s = 1$ e $\Gamma_G = -1$ (Figura 2.4 à 2.6).

Figura 2.4 - Configuração CMP (Common-midpoint) caracterizada pelo ponto médio que é comum a todos os pares fonte-receptor deste levantamento. As fontes estão à esquerda do ponto médio e seus correspondentes receptores à direita.

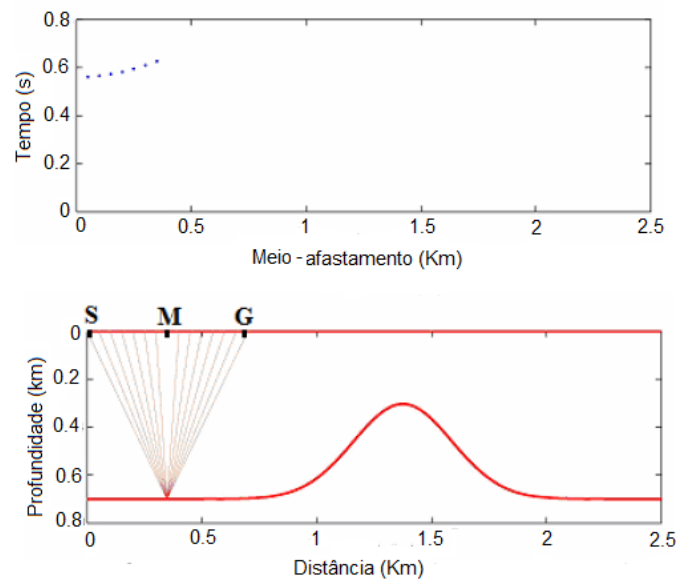


Figura 2.5 - Configuração CMP para um modelo planar horizontal.

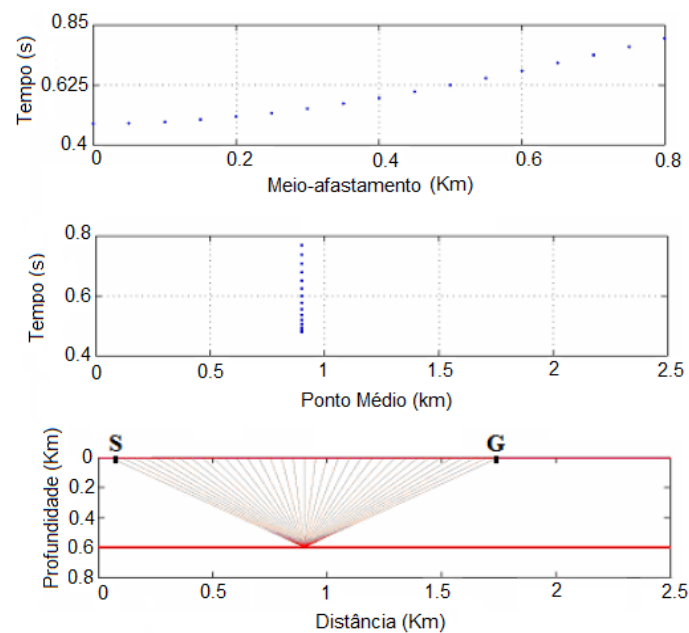
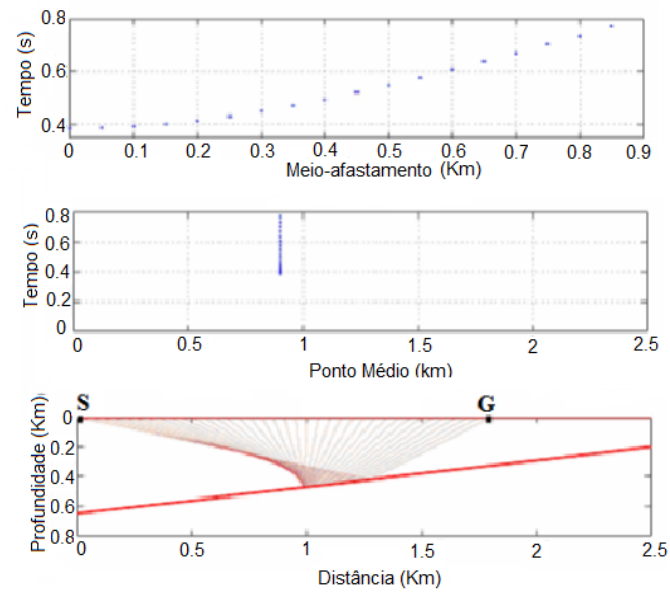
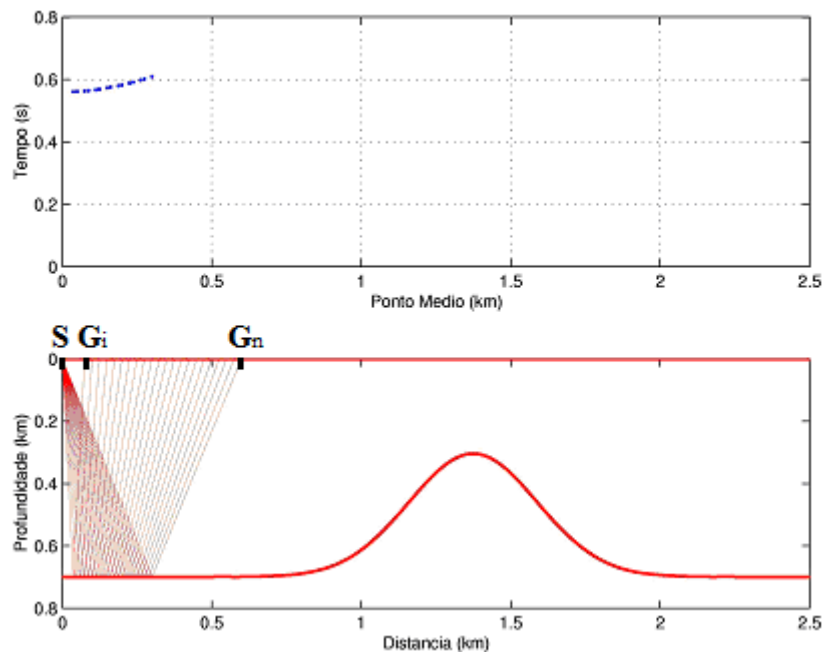


Figura 2.6 - Configuração CMP para um modelo de superfície inclinada.



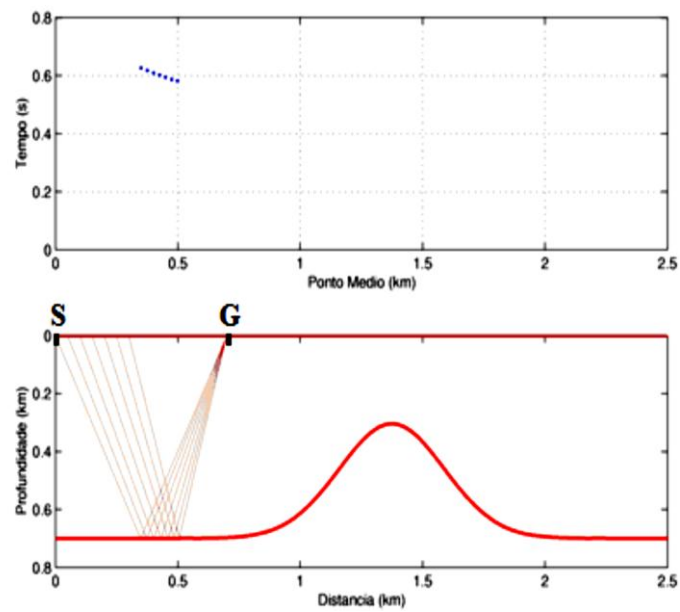
- **Common-shot ou fonte-comum (CS):** configuração dada com fonte fixa. O receptor é deslocado ao longo da linha sísmica. Ela é descrita pela equação 2.4, quando $\Gamma_s = 0$ e $\Gamma_G = 1$, (Figura 2.7)

Figura 2.7 - Configuração CS caracterizada por manter a fonte (S) fixa e dispor de vários receptores G_i ($i=1,...,n$).



- **Common-receiver (CR) ou receptor-comum:** nesta configuração é mantido o receptor fixo e a fonte é deslocada ao longo da linha sísmica. Essa configuração é descrita pela equação 3, quando $\Gamma_S = 1$ e $\Gamma_G = 0$, (Figura 2.8).

Figura 2.8 - Configuração CR caracterizada por manter o receptor fixo G.



3 LEIS DE CURVATURA DAS FRENTES DE ONDAS

3.1 Curvaturas das Frentes de Onda

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

3.2 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 3.1) e devido a transmissões (Figura 3.2) e reflexões (Figura 3.3) nas interfaces.

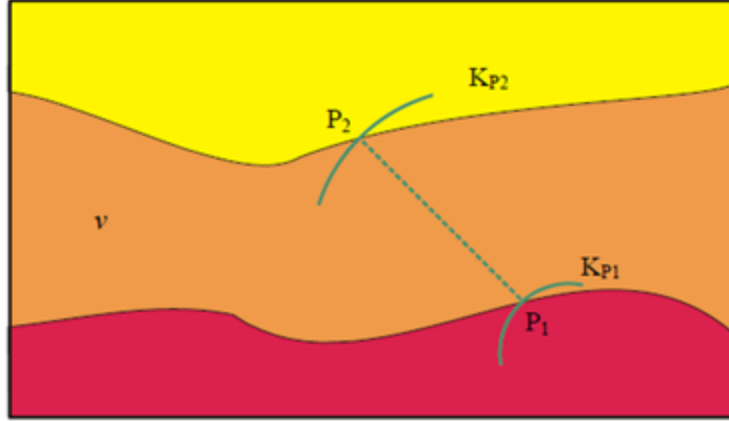
3.2.1 Lei de Propagação

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

$$R_{P2} = R_{P1} + v\Delta T \quad (3.1)$$

em que, segundo a Figura 4.1 os raios de curvatura das frentes de onda nos pontos P_1 e P_2 , são dados por $R_{p1} = 1/K_{p1}$ e $R_{p2} = 1/K_{p2}$, respectivamente, v é a velocidade do meio e ΔT é o tempo de trânsito ao longo do raio (linha reta) que liga P_1 e P_2 .

Figura 3.1 – Propagação do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico



Fonte: (SOUZA, 2005).

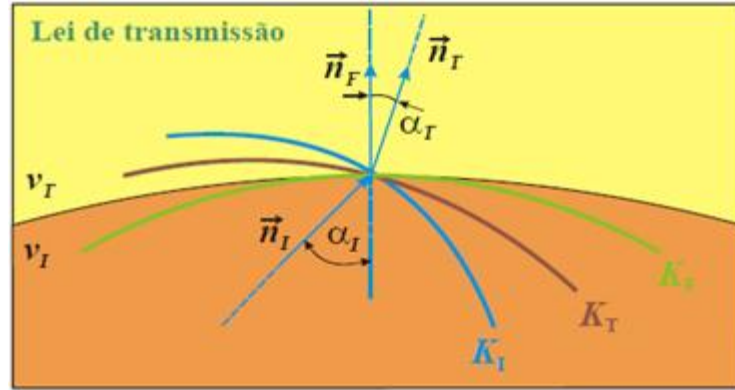
3.2.2 Lei de Transmissão

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

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

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, α_I e α_T são os ângulos de incidência e transmissão do raio (Figura 3.2). O primeiro termo da Equação 3.2 descreve a mudança da frente de onda que resultaria caso a interface fosse plana, já o segundo termo fornece a mudança na curvatura da frente de onda devido somente à curvatura da interface. Isto pode ser interpretado como a contribuição à curvatura da frente de onda transmitida resultante quando uma onda plana incidente chega ao ponto de transmissão.

Figura 3.2 – Transmissão do raio de curvatura da frente de onda através do sistema sísmico



Fonte: (SOUZA, 2005).

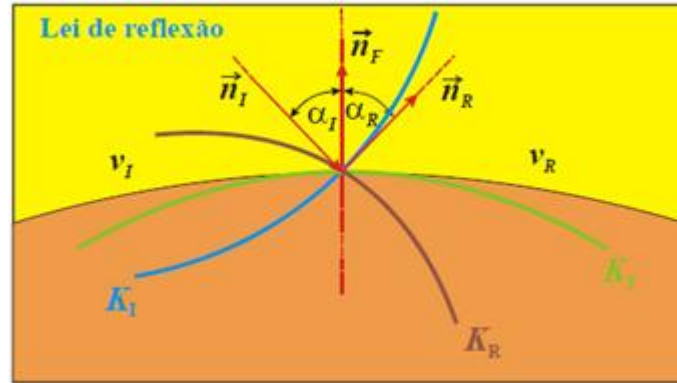
3.2.3 Lei de Reflexão

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

$$\frac{1}{R_R} = \frac{v_R \cos^2 \alpha_I}{v_I \cos^2 \alpha_R R_I} + \frac{1}{\cos^2 \alpha_R} \left(\frac{v_R}{v_I} \cos \alpha_I - \cos \alpha_R \right) \frac{1}{R_F}, \quad (3.3)$$

Onde R_R é o raio de curvatura da frente de onda refletida e v_I e α_I representam a velocidade e o ângulo de chegada da onda incidente e, v_R e α_R a velocidade e o ângulo de saída da onda refletida. Os ângulos são medidos em relação à normal da superfície. (Figura 3.3). 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 α_T por v_R e α_R , respectivamente. O primeiro termo da equação 3.3 descreve a mudança da frente de onda no caso da interface ser plana. Na hipótese de não haver conversão do tipo de onda (isto é, $v_R = v_I$ e consequentemente $\alpha_I = \alpha_R$), o primeiro termo resultaria na identidade e o segundo termo descreve somente a influência da curvatura da interface.

Figura 3.3 – Reflexão do raio de curvatura da frente de onda através de uma interface. Os ângulos de incidência e reflexão são representados por α_I e α_R . v_I e v_R são as velocidades da frente de onda incidentes e refletidas, K_I e K_R são as curvaturas das frentes de ondas incidentes e refletidas, respectivamente e K_F é a curvatura do refletor. Os vetores normais às curvaturas K_I , K_R e K_F , são representados por n_I , n_R e n_F , respectivamente



Fonte: (SOUZA, 2005).

3.2.4 Convenção de Sinais

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

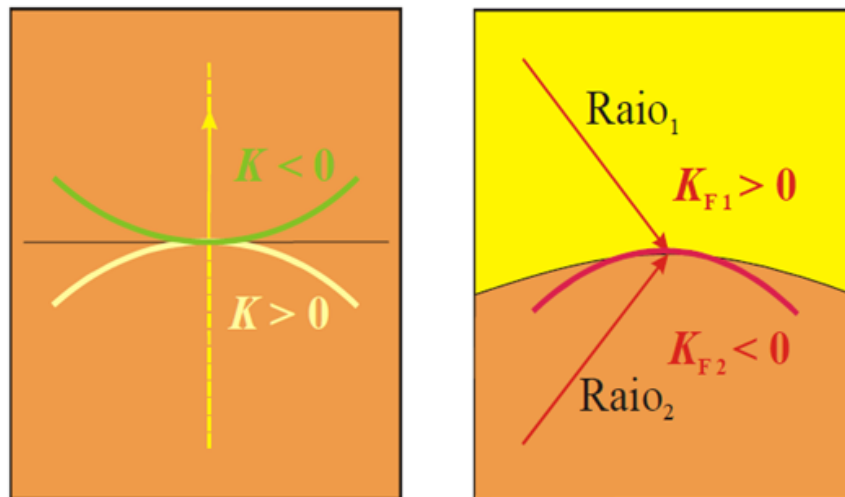
Segundo Hubral e Krey (1980) a escolha do sinal é uma questão de convenção e é definido da seguinte forma:

- Quando uma frente de onda se apresenta atrás de seu plano tangencial (Figura 3.4(a)), então a curvatura da frente de onda é positiva, caso contrário, a curvatura é negativa.
- A curvatura da interface, K_F , é positiva ($K_{F1} > 0$) se a interface aparece convexa ao raio incidente e negativa ($K_{F2} < 0$) se for côncava.

Baseando-se em Hubral e Krey (1980) e analisando a Figura 3.4(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 3.4 – Convenção de sinais das (a) curvaturas das frentes de onda e (b) interfaces



Fonte: (SOUZA, 2005).

4 ATRIBUTOS DA FRENTE DE ONDA

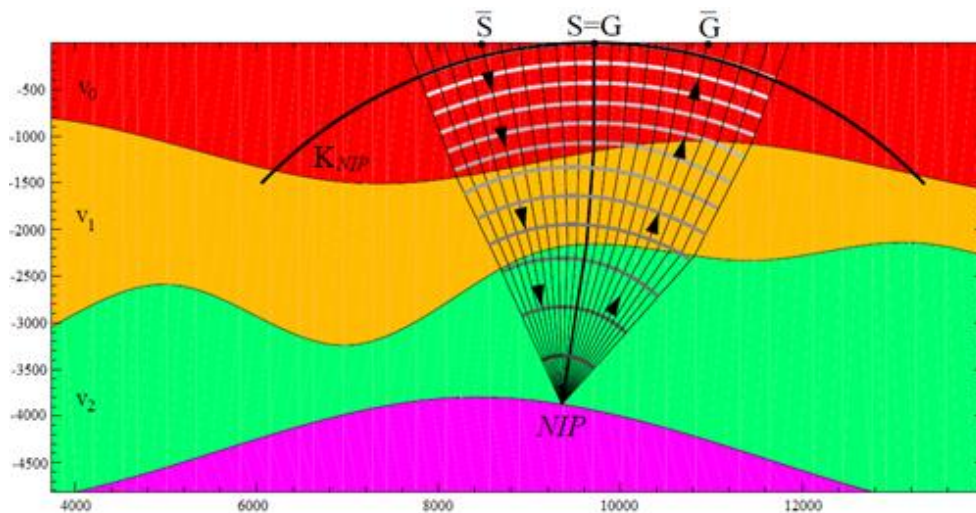
É obtido com base na teoria paraxial do raio, onde se faz uso do conceito das ondas hipotéticas NIP e N que se propagam ascendentemente a partir do refletor. A superfície de observação é considerada plana, que é uma boa aproximação para dados adquiridos em mar. A onda-NIP se propaga a partir de um ponto localizado no refletor e a onda-N a partir da explosão de um seguimento da superfície do refletor ao redor do ponto NIP e com curvatura inicial igual a curvatura local do refletor. Estas ondas são representadas em relação ao raio central, que simula o experimento AN, no seu ponto de emergência $P_0(x_0t_0)$ e elas são associadas a 3 atributos cinemáticos que descrevem o operador de empilhamento, que são: (1) o ângulo de emergência β_0 ; (2) o raio de curvatura R_N relacionado a onda-N; e (3) o raio de curvatura R_{NIP} relacionado a onda-NIP. As curvaturas correspondentes são: $K_N = 1/R_N$ para a onda-N; e $K_{NIP} = 1/R_{NIP}$ para a onda-NIP (ver Figura 4.1 a e b).

Na modelagem, os atributos da frente de onda podem ser propagados através das leis da refração e reflexão obedecendo a lei de Snellius. O raio de curvatura é propagado segundo a lei:

$$R_{i+1} = R_i + v_i \Delta t_i ; \quad 4.1$$

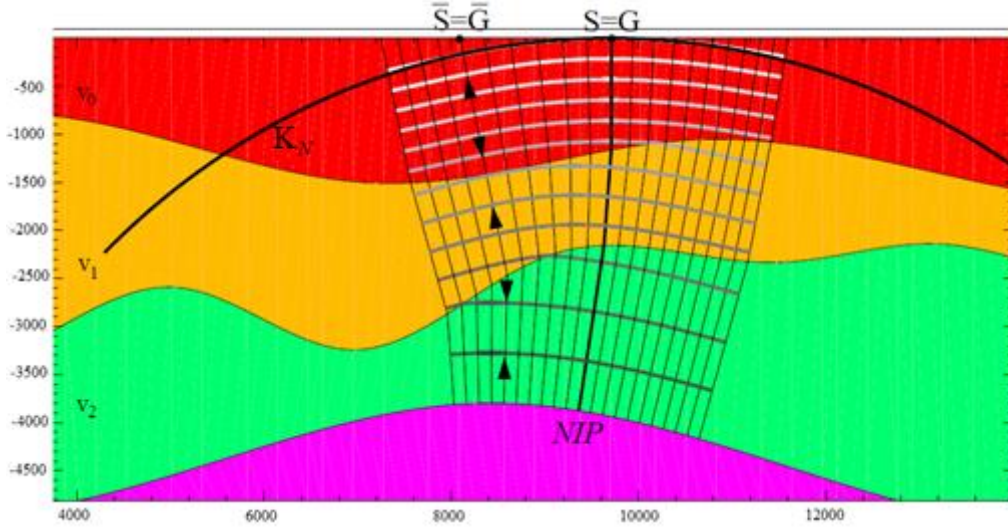
onde R_{i+1} é o raio de curvatura na camada $i + 1$, R_i é o raio de curvatura na camada anterior

Figura 4.1 (a) - Modelo composto por camadas com interfaces curvas e superfície de aquisição plano horizontal com desenho dos atributos da frente de onda. (a) Onda-NIP com origem num ponto NIP de raio de curvatura R_{NIP} e curvatura K_{NIP}



Fonte: (JÄGER, 1999).

Figura 4.1 (b) - Onda-N com origem num seguimento do refletor de raio de curvatura R_N e curvatura K_N . i e $v_i \Delta t_i$ é o seguimento reto que une os dois pontos.



Fonte: (JÄGER, 1999).

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

$$\frac{1}{R_{i+1}} = \frac{v_{i+1}}{v_i} \frac{\cos^2 \alpha_i}{\cos^2 \beta_i} \frac{1}{R_i} + \frac{1}{\cos^2 \beta_i} \left(\frac{v_{i+1}}{v_i} \cos \alpha_i - \cos \beta_i \right) \frac{1}{R_{i+F}} \quad (4.2)$$

E para ondas refletidas a lei é dada por:

$$\frac{1}{R_{i+1}} = \frac{1}{R_i} + \frac{2}{\cos^2 \beta_i} \frac{1}{R_{i,F}}; \quad (4.3)$$

onde α_i é o ângulo de incidência do raio na camada i , β_i o ângulo de transmissão do raio para a camada $i + 1$ e $R_{i,F}$ é o raio de curvatura relacionado da interface i . Com as equações 4.2 e 4.3 se pode calcular os raios de curvatura das ondas NIP e N, sabendo que a partir de uma posição inicial sobre um ponto do refletor se tem:

$$\begin{aligned} R_i^{NIP} &= 0; \\ R_i^N &= R_{i,F}; \end{aligned} \quad (4.4)$$

onde o raio de curvatura R_{NIP} é nulo e o raio R_N é igual ao raio de curvatura ao redor do ponto onde estas ondas são originadas. Esta condição é imediata da definição das ondas hipotéticas N e NIP (ver Figura 4.1 (a) e (b), respectivamente).

4.1 Reflexões primárias

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

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

$$R_{I_{n-1}} = R_{inicial} + v_{n-1} \Delta T_{On \rightarrow On-1}. \quad (4.5)$$

- Recursão: ($i = n-1 \dots 1$)

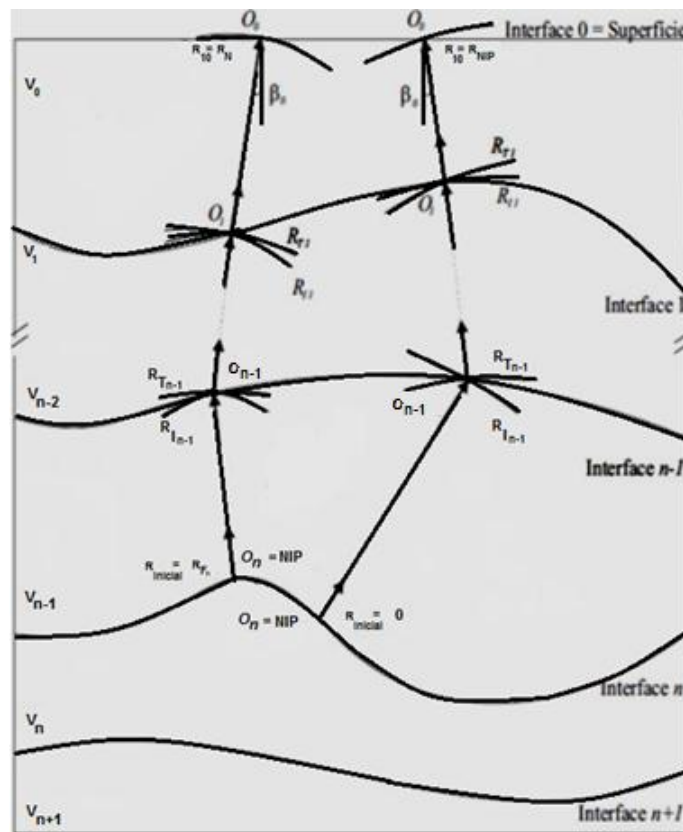
$$\frac{1}{R_{Ti}} = \frac{v_{i-1} \cos^2 \beta_i}{v_i \cos^2 \alpha_i R_{Fi}} + \frac{1}{\cos^2 \alpha_i} \left(\frac{v_{i-1}}{v_i} \cos \beta_i - \cos \alpha_i \right) \frac{1}{R_{Fi}} \quad (4.6)$$

$$R_{I_{i-1}} = R_{Ti} + v_{i-1} \Delta T_{O_i \rightarrow O_{i-1}} \quad (4.7)$$

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

Cada ponto localizado na interface em subsuperfície é conectado pela posição de emergência x_0 e o tempo de trânsito t_0 do raio NIP para um ponto $P_0(x_0, t_0)$ na seção AN conforme mostrado na Figura 4.2. Consequentemente podemos atribuir os parâmetros R_{NIP}, R_N e β_0 correspondentes às ondas N e NIP para um ponto P_0 . Ao aplicarmos este algoritmo para todos os pontos localizados nas interfaces em subsuperfície e atribuírmos os parâmetros resultantes para os pontos P_0 na seção AN teremos os parâmetros para todos os eventos de reflexões primárias associados aos pontos P_0 .

Figura 4.2 – Eventos primários, aplicando as leis de propagação e transmissão



Fonte: modificado de (CABRAL, 2002).

5 APROXIMAÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO CRS- IMPLÍCITO (I- CRS)

Neste capítulo introduziremos os fundamentos teóricos para a obtenção da nova aproximação de tempo de trânsito não hiperbólica considerado pelo método de empilhamento sísmico CRS implícita.

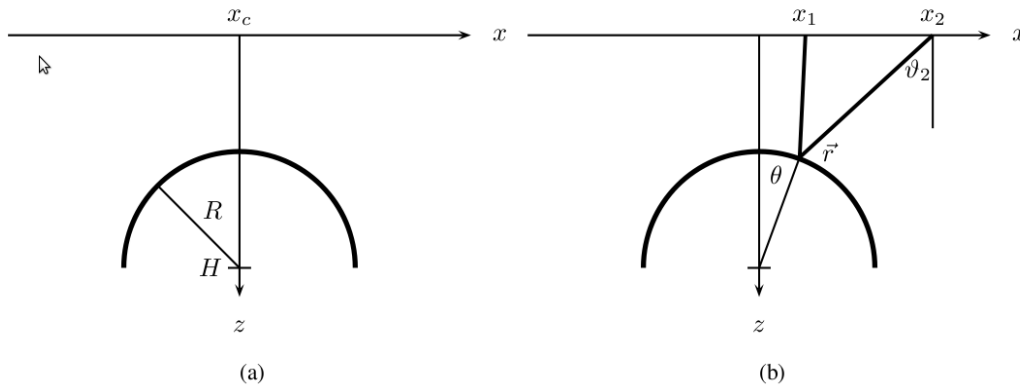
5.1 Derivação da fórmula do método i-CRS

Vanelle et al, (2010) Introduziram uma nova aproximação de tempos de trânsito de empilhamento para ondas monotípicas em meio isotrópicos referindo-se como a aproximação common-reflection-surface ou superfície de reflexão comum implícita (i-CRS).

Tanto vanelle et al. (2010) e Schwarz (2011) introduziram com esta aproximação i-CRS uma aproximação muito razoável para explicar melhor a curvatura do refletor assumindo um refletor circular esta derivação está baseada na idéia de Boris Kashtan (Comunicação Pessoal) repassada para estes autores ao levar em consideração uma nova aproximação implícita para avaliar o ponto de reflexão sobre um círculo fazendo uso do princípio de fermat.

Vanelle et al, (2011) consideraram um refletor esférico em um meio homogêneo. O raio do reflector é R , com o seu centro no local $(x_c, 0, H)$, como mostrado na figura 5.1. x_1 e x_2 são coordenadas de uma fonte e de um receptor, respectivamente, ambos na profundidade $z = 0$ e $y = 0$. O ângulo θ define o ponto de reflexão em $\vec{r} = (R \sin \theta, 0, R \cos \theta)$ As velocidades dos raios dos dois seguimentos do raio de ida e volta são $v_i(\vartheta_i)$, sendo ϑ_i o ângulo de grupo

Figura 5.1 (a) - Geometria do refletor e b) aquisição para um refletor esférico. O ponto de reflexão é definido pelo ângulo θ . Os ângulos ϑ_i são os ângulos de raio e de grupo, respectivamente



Fonte: (VANELLE ET AL., 2012).

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

$$t_i^2 = \frac{(x_i - x_c - R \sin \theta)^2 + (H - R \cos \theta)^2}{v_i^2(\vartheta_i)} \quad (5.1)$$

ou, em função das coordenadas do ponto médio e half-offset (x_m, h) expresso por.

$$t_1^2 = \frac{(x_m - h - x_c - R \sin \theta)^2 + (H - R \cos \theta)^2}{v_1^2(\vartheta_1)} \quad (5.2)$$

$$t_2^2 = \frac{(x_m + h - x_c - R \sin \theta)^2 + (H - R \cos \theta)^2}{v_2^2(\vartheta_2)} \quad (5.3)$$

$$t_i = t_1 + t_2$$

A soma de t_1 e t_2 deve satisfazer a lei de snell, ou seja, $\partial(t_1 + t_2)/\partial\theta = 0$. As derivadas de t_1 e t_2 com relação a θ são

$$\frac{\partial t_i}{\partial \theta} = \frac{1}{2t_i} \frac{\partial t_i^2}{\partial \theta} = \frac{R}{v_i^2 t_i} [H \sin \theta - (x_i - x_c) \cos \theta] - \frac{t_i}{v_i} \frac{\partial v_i}{\partial \theta} \quad (5.4)$$

Onde

$$\frac{\partial v_i}{\partial \theta} = \frac{\partial v_i}{\partial \vartheta_i} \frac{\partial \vartheta_i}{\partial \theta} \quad (5.5)$$

A partir da geometria das trajetórias do raio mostrado na (figura 5.1 (b)), temos que

$$\tan \vartheta_i = \frac{x_i - x_c - R \sin \theta}{H - R \cos \theta} \quad (5.6)$$

Que nos leva para

$$\frac{\partial \vartheta_i}{\partial \theta} = \frac{R}{v_i^2 t_i^2} [R - H \cos \theta - (x_i - x_c) \sin \theta] \quad (5.7)$$

e finalmente para

$$\begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \theta} = & \underbrace{\left(\frac{H}{v_1^2 t_1} + \frac{H}{v_2^2 t_2} + \frac{x_1 - x_c}{v_1^3 t_1} \frac{\partial v_1}{\partial \vartheta_1} + \frac{x_2 - x_c}{v_2^3 t_2} \frac{\partial v_2}{\partial \vartheta_2} \right)}_A R \sin \theta \\ & + \underbrace{\left(\frac{H}{v_1^3 t_1} \frac{\partial v_1}{\partial \vartheta_1} + \frac{H}{v_2^3 t_2} \frac{\partial v_2}{\partial \vartheta_2} - \frac{x_1 - x_c}{v_1^2 t_1} - \frac{x_2 - x_c}{v_2^2 t_2} \right)}_B R \cos \theta \end{aligned}$$

$$+ \underbrace{\left(-\frac{R}{v_1^3 t_1} \frac{\partial v_1}{\partial \vartheta_1} - \frac{R}{v_2^3 t_2} \frac{\partial v_2}{\partial \vartheta_2} \right)}_C R \quad (5.8)$$

Introduzindo as abreviações A, B e C como mostrado nas equações acima a condição seguinte de princípio de Fermat pode ser escrito:

$$A \sin \theta + B \cos \theta + C = 0 \quad (5.9)$$

A solução da equação (5.9) é dado por

$$\sin \theta = -\frac{AC}{A^2+B^2} (\pm) \frac{B}{A^2+B^2} \sqrt{A^2 + B^2 - C^2} \quad (5.10)$$

Neste caso, o sinal negativo deve ser escolhido por causa de considerações simples seguinte a partir da solução para o caso isotrópico.

Por favor, note que o isotrópico i-CRS é um caso especial da derivação dada acima. para meios isotrópicos homogêneos a velocidade de grupo é constante e as derivadas com o relação aos ângulos do grupo desaparecem

5.2 Aplicação de aproximação de tempo de trânsito para ondas monotípicas em meios isotrópicos

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

Com a finalidade de cumprir os objetivos específicos será utilizada esta aproximação de tempos de trânsito CRS (Ver equação (5.1)).

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

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

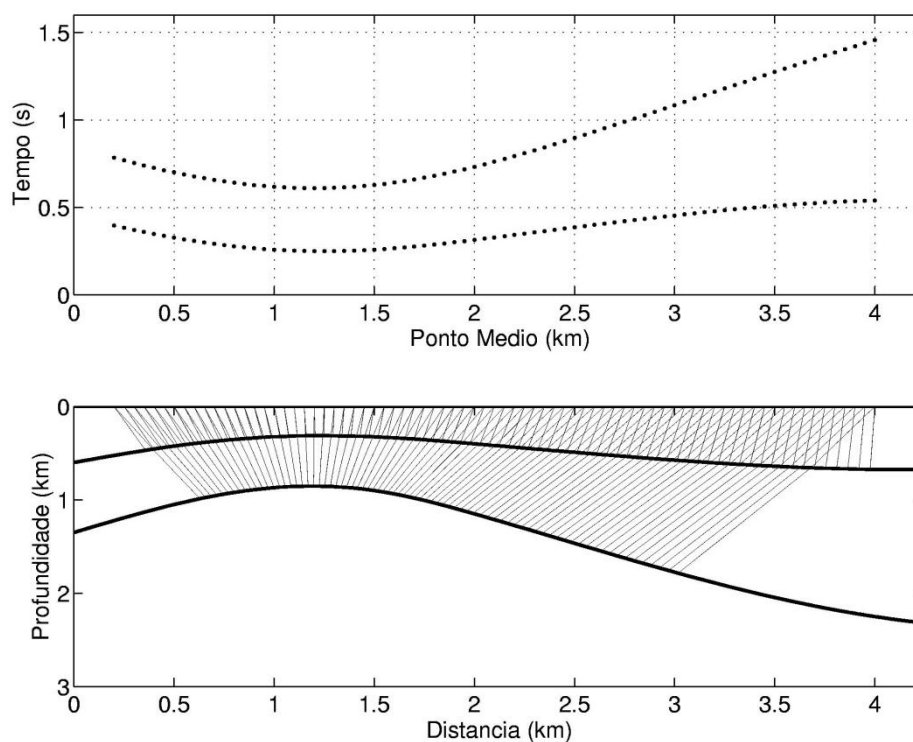
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a finalidade de testar a aproximação de empilhamento i-CRS em relação ao seu potencial para simular eventos de reflexões primária, foi considerado dois modelos sintéticos.

6.1 Modelos

O modelo 2-D considerado neste estudo está constituído por duas camadas com velocidades constantes de 2,5 e 3,0 km/s, respectivamente, sob um semi-espaço infinito de 3,5 km/s, separadas por interfaces curvas e suaves, que chamaremos de modelo1(Figura 6.1).

Figura 6.1 - Modelo não homogêneo: duas interfaces entre duas camadas homogêneas sob um semi-espaço. Os raios ZO dos refletores curvados (Figura inferior) e seus respectivos tempos de trânsito (Figura superior) são mostrados.



Baseado neste modelo foi gerado o conjunto de dados sintéticos de reflexão de cobertura múltipla utilizando o algoritmo de traçamento de raio, SEIS88 (CERVENY E PSENSIK, 1988). Os dados não contêm ruído e foram gerados utilizando a

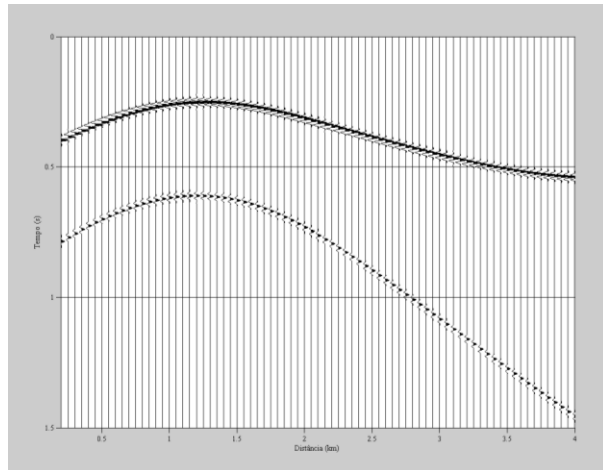
configuração common-shot (CS) ou de tiro comum. O mínimo e máximo afastamento foram 0,6 km e 2,9 km respectivamente.

Foi considerada uma fonte tipo Gabor com uma frequência dominante de 50 Hz e um intervalo de amostragem de tempo de 0,002 s. A primeira fonte foi posicionada em $X_S = 0,5$ km e o primeiro geofone em $X_G = 1,1$ km, sendo distribuídos 48 geofones com espaçamentos de 0,025 km entre eles. Consideramos 70 tiros com intervalos de 0,05 km cada. As seções sísmicas de afastamento nulo a serem simuladas são mostradas na (Figura 6.2) e consta de 81 traços com intervalos de 0,025 km.

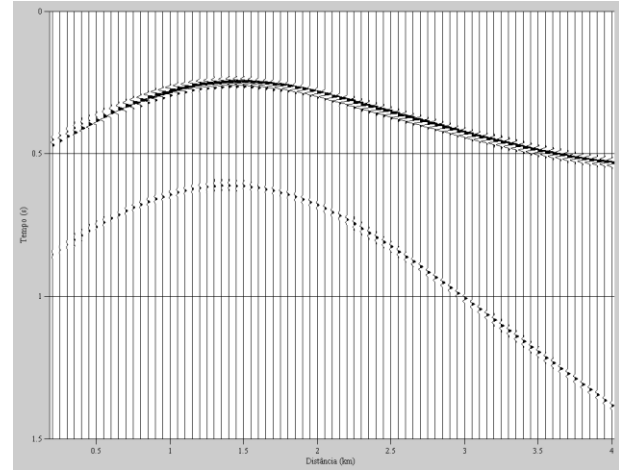
Ao aplicarmos os empilhamentos CRS de 2ª e 4ª ordem e o empilhamento i-CRS foram obtidas as seções simuladas (Figura 6.2(b), Figura 6.2(c) e Figura 6.2(d)). Podemos observar a presença das reflexões primárias. Todas as seções apresentam um resultado satisfatório na simulação de eventos de reflexões primárias.

Comparando a seção AN original com as seções CRS 2ª e 4ª ordem e i-CRS (Figura 6.2(a) até Figura 6.2(d)), observamos em geral um bom desempenho do i-CRS quanto do CRS convencional até a 4ª. ordem. Desta forma, nota-se uma boa definição dos refletores e uma boa aproximação da seção original.

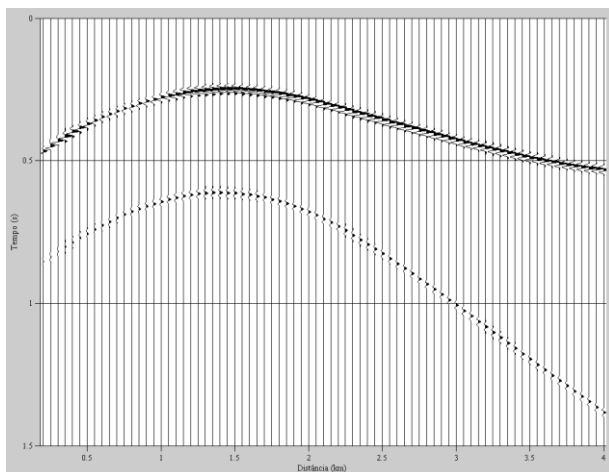
Figura 6.2 - Modelo 2-D constituído por duas camadas separadas com interfaces curvas sob um semi-espaco. a) Traços sísmicos ZO verdadeiros gerados com o software Seis88 a partir de dados sintéticos. b) Seção AN simulada utilizando a aproximação CRS de 2ª ordem. c) Seção AN simulada utilizando a aproximação CRS de 4ª ordem. d) Seção AN simulada utilizando a aproximação i-CRS.



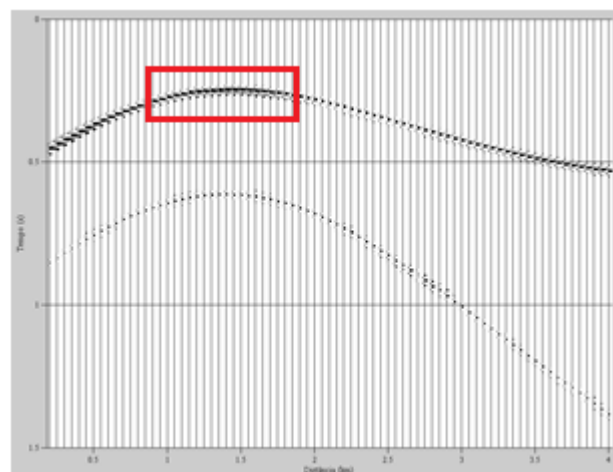
a)



b)



c)

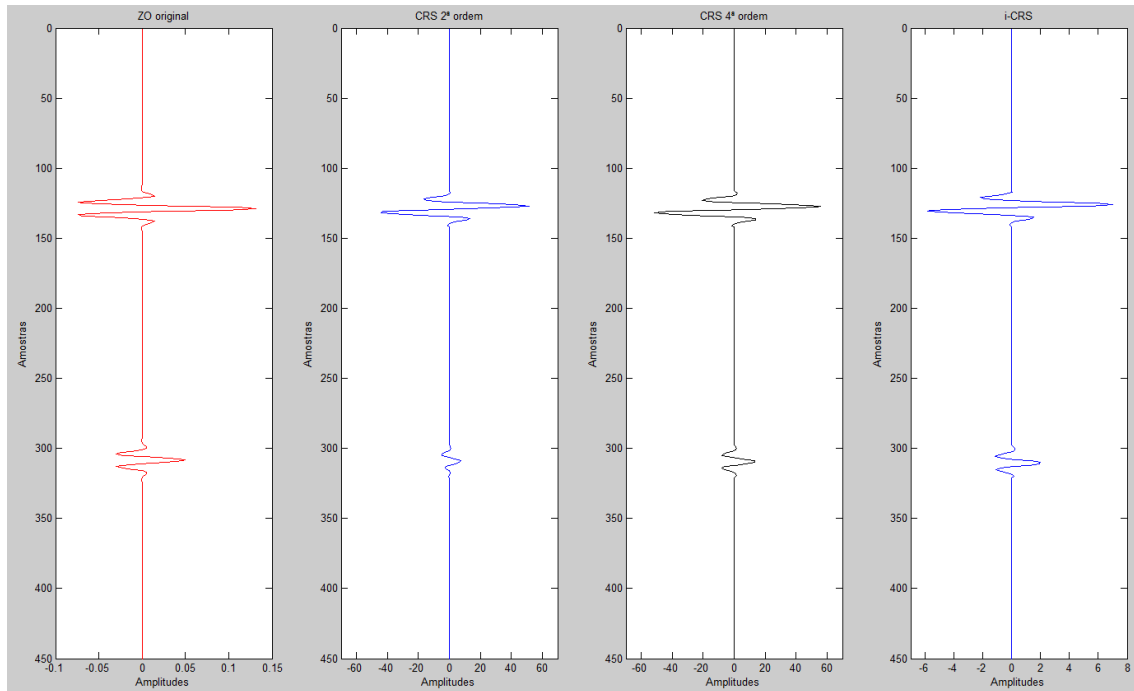


d)

Para este modelo, Comparamos as 3 seções com a seção original, podemos visualizar que quando se trata de forte curvaturas o método i-CRS leva vantagem com relação aos empilhamentos de 2ª e 4ª ordem(ver figura 6.2(d) com retângulo vermelho destacando) e quando se trata de curvaturas suaves o i-CRS imageou, tão bem quanto, os demais métodos de empilhamento.

Na Figura 6.3 apresenta-se uma comparação entre o traço ZO original correspondente à coordenada ponto médio $x_0 = 1,15$ km, e os traços AN obtidos a partir do empilhamento CRS de 2ª ordem, CRS de 4ª ordem e i-CRS. O método i-CRS apresentou resultados satisfatórios na simulação da forma do traço ZO quando comparados com o CRS convencional e de 4ª ordem.

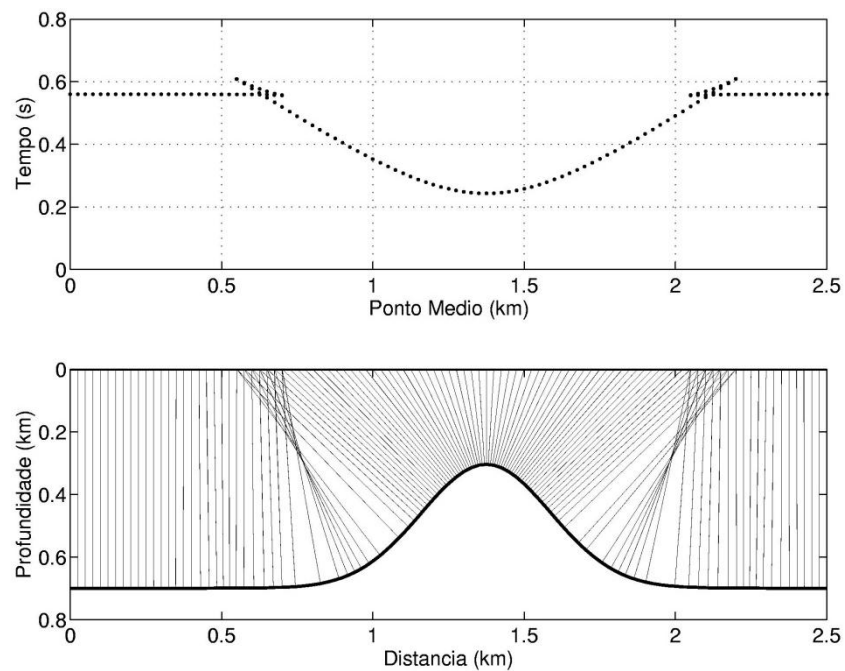
Figura 6.3 – Comparação dos traços sísmicos empilhados (modelo da figura 6.1) corresponde à posição do raio normal (central), da seção de afastamento nulo, seção CRS de 2ª ordem, CRS de 4ª ordem e seção empilhada i-CRS.



Comparando a forma dos pulsos sísmicos da seção zero off-set original com os pulsos sísmicos das demais seções, percebemos que há sutis diferenças com relação a forma do pulso, sendo que o pulso do método i-CRS aproximou-se muito bem da forma do pulso da seção zero off-set original.

Para o próximo modelo 2-D neste estudo, foi considerado um domo com peculiaridade altamente curvado, que chamaremos de modelo 2. Assim como no modelo 1 (Figura 6.1) são apresentados os tempos de trânsito para o modelo 2 (Figura 6.4) cujos traços ZO serão simulados com esta nova aproximação de tempos de trânsito i- CRS.

Figura 6.4 - Parte inferior: modelo tipo domo constituído por uma camada de velocidade constante de 2.5 km/s e um semi-espaço infinito com uma velocidade de 3.0 km/s respectivamente e seus correspondentes raios de afastamento nulo (ZO) apresentando caústica. Parte superior: os correspondentes tempos de trânsito são mostrados.

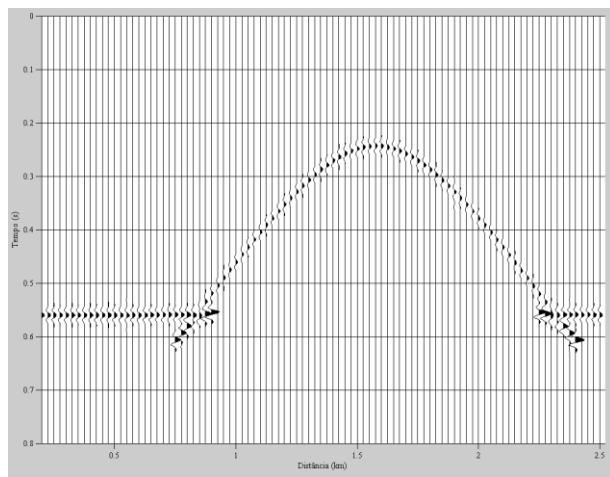


Os dados não contêm ruído e foram gerados utilizando a configuração common-shot (CS) ou de tiro comum. O mínimo e máximo afastamento foram 0,6 km e 2,9 km respectivamente.

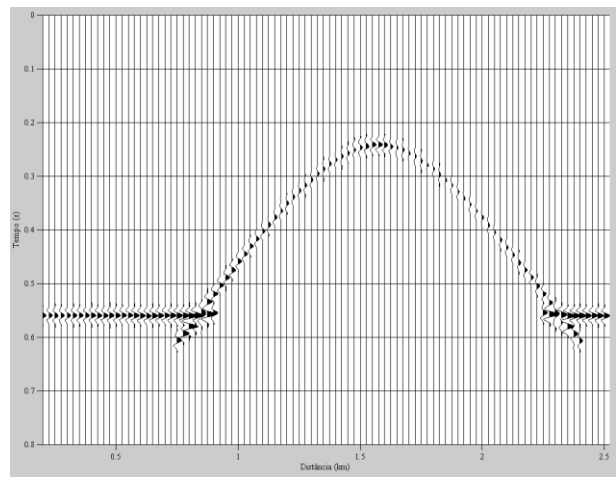
Foi considerada uma fonte tipo Gabor com uma frequência dominante de 50 Hz e uma intervalo de amostragem de tempo de 0,002 s. A primeira fonte foi posicionada em $X_S = 0,5$ km e o primeiro geofone em $X_G = 1,1$ km, sendo distribuídos 48 geofones com espaçamentos de 0,025 km entre eles. Consideramos 70 tiros com intervalos de 0,05 km cada. A seção sísmica de afastamento nulo a ser simulada é mostrada na Figura 6.4 e consta de 81 traços com intervalos de 0,025 km.

Mais uma vez para demonstrar o melhor desempenho do novo método em flancos íngremes, foram simuladas seções ZO a partir dos métodos de empilhamento CRS convencional de 2ª e 4ª ordem (Figura 6.5 (b) e (c)) e o método i-CRS (Figura 6.5(d)). Ao serem comparadas com a seção ZO original (Figura 6.5) percebe-se um melhor desempenho na simulação dos traços ZO por parte do empilhamento CRS não hiperbólico quando comparado com o empilhamento CRS convencional.

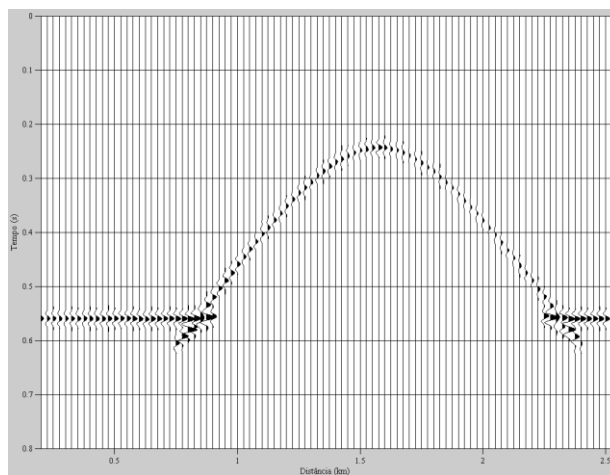
Figura 6.5 – Seções correspondentes ao modelo tipo domo da Figura 6.3. a) Seção sísmica sintética para ZO. Foi utilizada função Gabor com frequência dominante de 50 Hz como pulso da fonte e os traços possuem intervalo de amostragem dominante de 25ms. b) Seção empilhada CRS de 2ª ordem. c) Seção empilhada CRS de 4ª ordem. d) Seção empilhada i-CRS, sendo utilizado o tempo de trânsito não hiperbólico no operador de empilhamento.



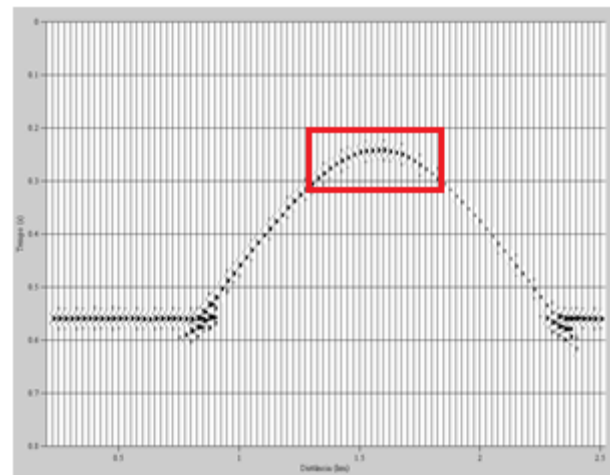
a)



b)



c)



d)

Comparando os métodos de empilhamento com a seção original gerada pelo pacote seis88, vemos que as técnicas de empilhamento CRS de 2ª e 4ª ordem e o i-CRS

imagearam muito bem o domo, mas destacando que o método i-CRS tem um melhor desempenho nas fortes curvaturas (ver retângulo vermelho destacado na figura) e quando se trata de curvaturas suaves o método i-CRS mostra ter um bom desempenho também.

Na (Figura 6.6 (a), (b) e (c)) apresenta-se uma comparação entre o traço ZO original, e os traços sísmicos recuperados como produto do empilhamento i-CRS, CRS de 2ª e 4ª ordem.

Figura 6.6 (a)– Comparação dos traços sísmicos empilhados (modelo da Figura 6.4), correspondente à coordenada ponto médio $x_0 = 0,51$ km, da seção de afastamento nulo, seção CRS de 2ª ordem, seção CRS de 4ª ordem e da seção i-CRS.

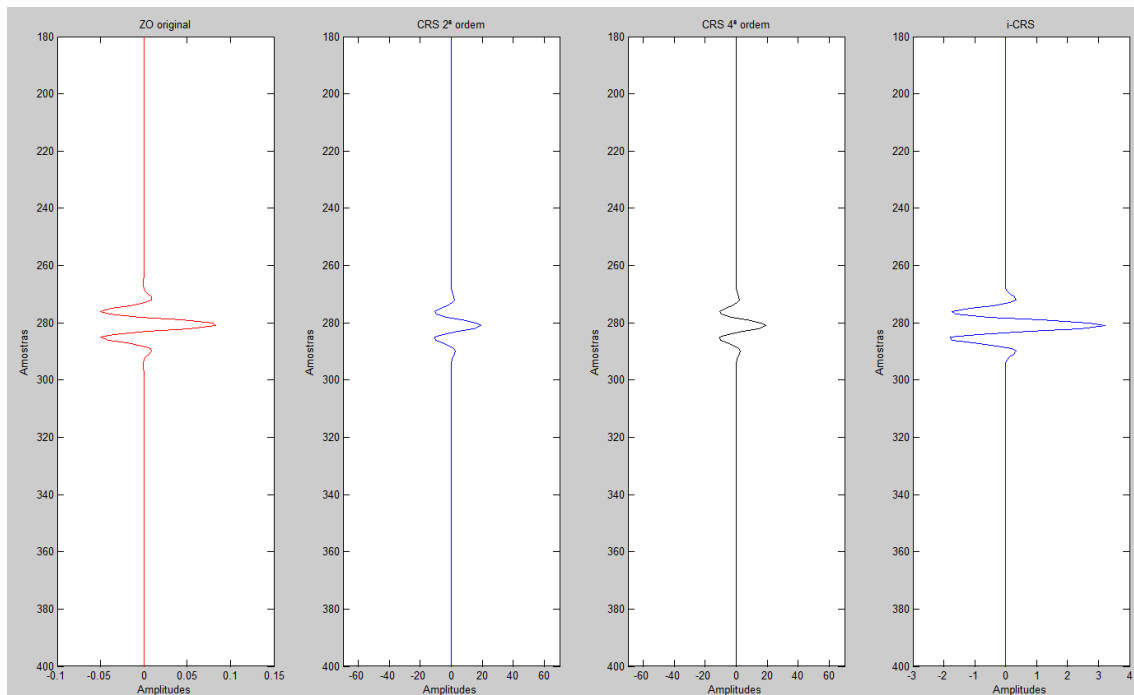


Figura 6.6 (b)– Comparação dos traços sísmicos empilhados (modelo da Figura 6.4), correspondente à posição $x_0 = 1,65$ km, da seção de afastamento nulo, seção CRS de 2ª ordem, seção CRS de 4ª ordem e da seção i-CRS.

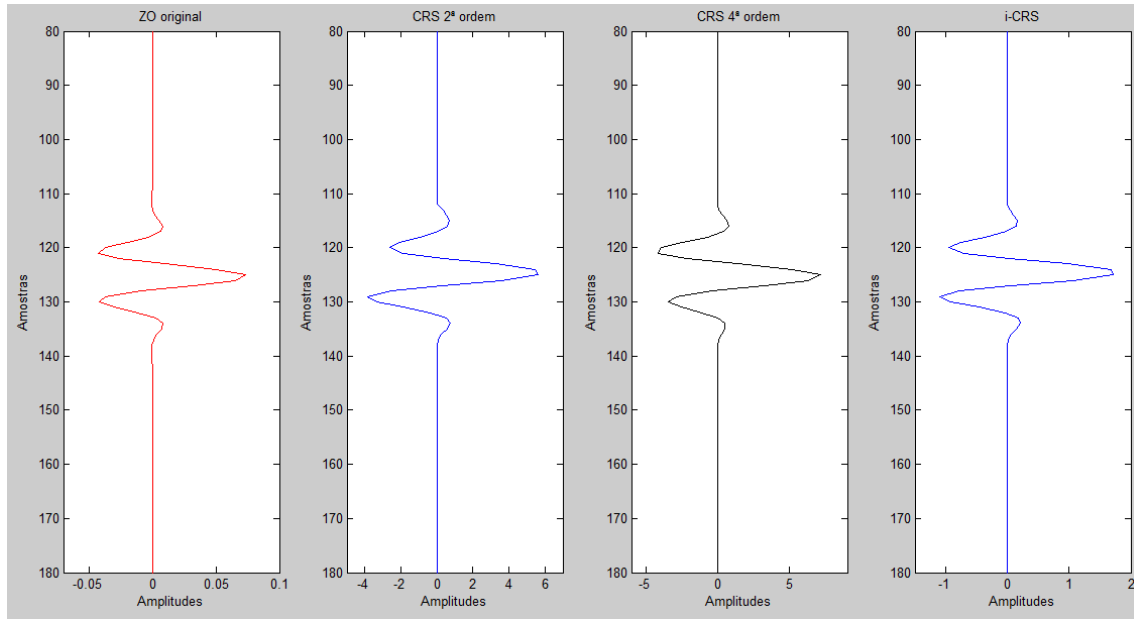
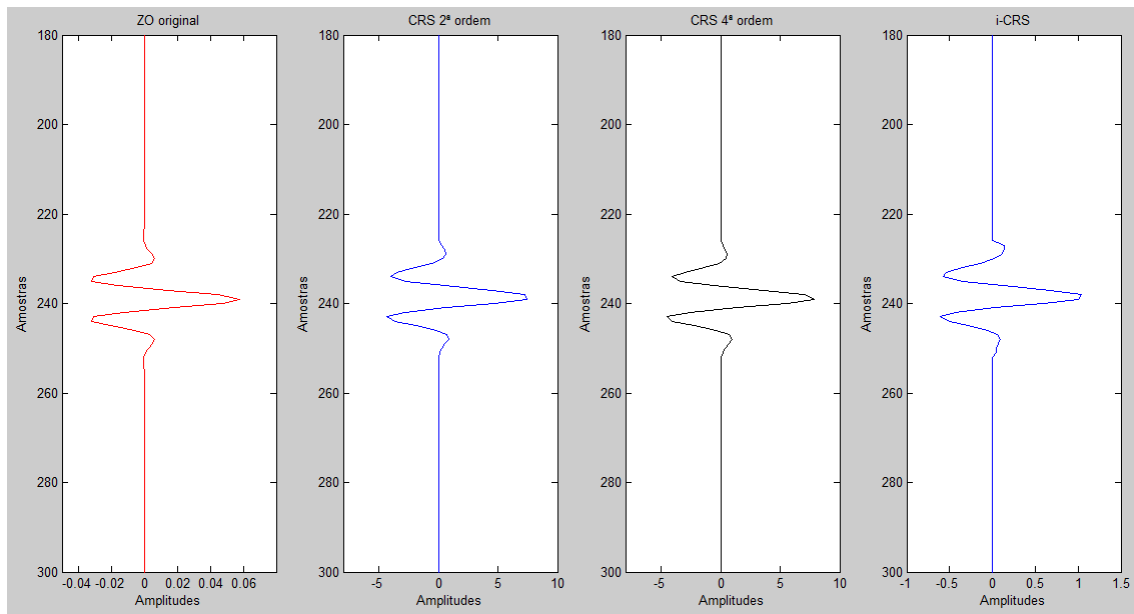


Figura 6.6 (c)– Comparação dos traços sísmicos empilhados (modelo da Figura 6.4), correspondente à posição $x_0 = 2,17$, da seção de afastamento nulo, seção CRS de 2ª ordem, seção CRS de 4ª ordem e da seção i-CRS.



Comparando os pulsos sísmicos da seção zero off-set original com os demais pulsos das outras seções, percebemos que as diferenças entre eles são bem sutis. Destacando o pulso sísmico do novo método que se assemelha perfeitamente com o pulso da seção zero off-set original.

7 CONCLUSÕES

Como consequência deste trabalho e analisando os resultados satisfatórios, conclui-se:

- A aproximação de tempos de trânsito i-CRS simula satisfatoriamente e coerentemente as seções com afastamento fonte-receptor nulo (ZO). Segundo os resultados obtidos podemos observar um bom posicionamento dos tempos de trânsito e uma boa visualização dos referidos eventos.
- Também podemos notar que o método i-CRS tem um bom desempenho para refletores bem curvos.
- O método i-CRS apresenta-se como uma importante alternativa para simular seções ZO contendo reflexões primárias no caso de estruturas com flancos íngremes.
- No que se refere à amplitude e forma do pulso sísmico ZO simulado podemos concluir preliminarmente que o i-CRS é mais próximo da forma do pulso ZO original que as aproximações CRS hiperbólicas.
- Existem diferenças nos valores das amplitudes recuperadas na simulação ZO por ambos métodos: CRS hiperbólico e o i-CRS.

8 PERSPECTIVAS FUTURAS

- Aplicar o novo método i-CRS em dados com ruído.
- Testar a aproximação de tempo de trânsito i-CRS com outros modelos reais mais complexos incluindo diversos tipos de estruturas geológicas (ex. falhas, fraturas, domos, dique, soleiras de diabásio, etc).
- Aplicar o método em levantamentos com longo afastamento fonte-receptor.
- Aplicar o método CRS implícito em meios com presença de energia difratada.
- Estender a aplicação do método i-CRS para meios heterogêneos e anisotrópicos.

REFERÊNCIAS

- CABRAL, R. **Simulação de reflexões múltiplas usando o método de empilhamento sísmico Superfície de Reflexão Comum**. 2002. 44 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.
- DE BAZELAIRE, E. Normal moveout revisited – inhomogeneous media and curved interfaces. **Geophysics**, v. 52, p. 143–157, 1988.
- FOMEL, S.; GRECHKA, V. **Nonhyperbolic reflection moveout of P waves. An overview and comparison of reasons**: Technical Report CWP-372, Colorado School of Mines. 2001.
- HÖCHT, G., DE BAZELAIRE, E., MAJER, P. HUBRAL, P. Seismic and optics: hyperbolae and curvatures. **Revista científica Journal of Seismic Exploration**, v. 12, p. 261-282. 1999.
- HUBRAL, P.; KREY, T. **Interval Velocities from Seismic Reflection Time Measurements**. Houston, Texas: Soc. Of Exploration Geophysicists. Western Geophysical Company, 1980.
- IMAGAM. **Imageamento sísmico em Bacias Paleozóicas com soleiras de diabásio na Região Amazônica**: Report - CTPETRO-FINEP/PETROBRAS/FADESP/UFGA, Brazil. 2002.
- JÄGER, R. **The common reflection surface stack**: Theory and application. Germany: Karlsruhe University (Master's thesis). 1999.
- LANDA, E.; KEYDAR, S., MOSER, T. J. Multifocusing revisited – inhomogeneous media and curved interfaces. **Geophysical Prospecting**, p. 925-938. 2010.
- LANDA, E., B. GUREVICH, KEYDAR, S., TRACHTMAN, P. Application of multifocusing method for subsurface imaging. **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, p. 283–300, 1999.
- MAYNE, W.H. Common reflection point horizontal data stacking techniques. **Geophysics**, v. 27, n. 6, p. 927-938, 1962.
- MÜLLER, T. **The common reflection surface stack method**: Seismic imaging without explicit knowledge of velocity model. 1999. (Ph. D thesis) - Germany, Karlsruhe University. 1999.
- SCHLEICHER, J., TYGEL, M., HUBRAL, P. Parabolic and hyperbolic paraxial two points traveltimes in 3D media. **Geophysical Prospecting**, v. 41, p. 495-513. 1993.
- SCHWARZ, B., VANELLE, C., KASHTA, B., GAJEWKSI, D. **i-CRS**: application of a new multi-parameter stacking approach to complex media. 2012.
- SHAH, P. M., Use of curvature to relate seismic data with subsurface parameters. **Geophysics**, v. 38, n. 5, p. 812-825. 1973.

SILVA, O.P. **Imageamento sísmico de reflexões primárias e/ou múltiplas usando a aproximação de tempos de trânsito CRS de 4ª ordem**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) –Instituto de Geociências, UFPA, Belém, 2012.

SOUZA, F. J. M. **Identificação de reflexões múltiplas, utilizando os parâmetros das frentes de onda pin e normal**. 2005. Dissertação (Mestrado) – CPGF, Instituto de Geociências, UFPA, Belém, 2005.

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

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

VANELLE, C., BOBSIN, M., SCHEMMERT, P., KASHTAN, B., GAJEWSKI, D., RSO - A new Multiparameter Stacking Operator for An/Isotropic media. In: EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 74 ., 2012. Copenhagen, Denmark. 2012.

VANELLE, C., KASHTAN, B., DELL, S., GAJEWSKI, D. A new stacking operator for curved subsurface structures (SPNA 3.2). In: ANN. INT. MTG. SOC. EXPL. GEOPH., 80., 2010. **Expanded Abstracts**. 2010.