



# Imageamento sísmico de reflexões primárias e múltiplas simétricas utilizando as principais aproximações de tempo de trânsito hiperbólicas e não-hiperbólicas

Angela da Silveira Montalvão<sup>1</sup>; Diego Pereira<sup>1</sup>, Michael Alves<sup>1</sup>, e Pedro Chira-Oliva<sup>2\*</sup>.

<sup>1</sup>FAGEOF / Faculdade de Geofísica – Universidade Federal do Pará.

<sup>2</sup>IECOS / Instituto de Estudos Costeiros – Universidade Federal do Pará, \*e-mail: [chira@ufpa.br](mailto:chira@ufpa.br)

Copyright 2014, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, Porto Alegre, 14 a 16 de outubro de 2014. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VI SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

## Abstract

The simulation of a zero-offset (ZO) seismic section from multi-coverage seismic data is a standard imaging method widely used in seismic processing to reduce the amount of data and increases the signal-to-noise ratio. In the last years, have appeared diverse stacking methods as an extension of the conventional imaging method, the Common-midpoint (CMP) stacking, to simulate ZO sections. Examples of such methods are the well-known Common-Reflection-Surface (CRS) stack, and Multifocusing method. Recently a non-hyperbolic traveltimes approximation was proposed to simulate ZO sections. In this paper, we tested the performance of these approximations to simulate ZO seismic sections. These formulas depend on the same three parameters as the conventional CRS method. Finally we verified which of these approximations also behaves better in recovering the simulated ZO traces.

## Introdução

Os métodos sísmicos são muito aplicados a problemas de exploração de hidrocarbonetos 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).

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

## Metodologia

### Aproximações de tempos de trânsito

Os métodos de empilhamento sísmico utilizados neste trabalho serão o CRS, Multifoco e CRS Não-hiperbólico. Estes métodos permitem simular seções sísmicas ZO a partir de dados sísmicos de cobertura múltipla, independente do macro-modelo de velocidades.

### Aproximação CRS de segunda-ordem

Tygel et al (1997) e Schleicher et al (1993) propuseram uma aproximação hiperbólica de tempos de trânsito conhecida como aproximação CRS de 2ª ordem ou aproximação CRS convencional expressa por:

$$t_{2,ref}^2(x_m, h) = \left[ t_0 + \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} \left[ K_N (x_m - x_0)^2 + K_{NIP} h^2 \right], \quad (1)$$

Sendo  $x_m$  e  $h$  a coordenadas ponto-médio e o meio-afastamento, respectivamente. A velocidade próxima à superfície de medição é dada por  $v_0$ . A coordenada do ponto de emergência do raio de reflexão normal é dada por  $x_0$ . O tempo de trânsito duplo ao longo da trajetória do raio normal é representado por  $t_0$ . Os parâmetros CRS são dados por: a) o ângulo de emergência do raio de reflexão normal em relação à normal da linha de medição ( $\beta_0$ ), a curvatura da onda hipotética NIP

( $K_{NIP} = 1/R_{NIP}$ ) e a curvatura da onda hipotética N ( $K_N = 1/R_N$ ), respectivamente (Figura 1)

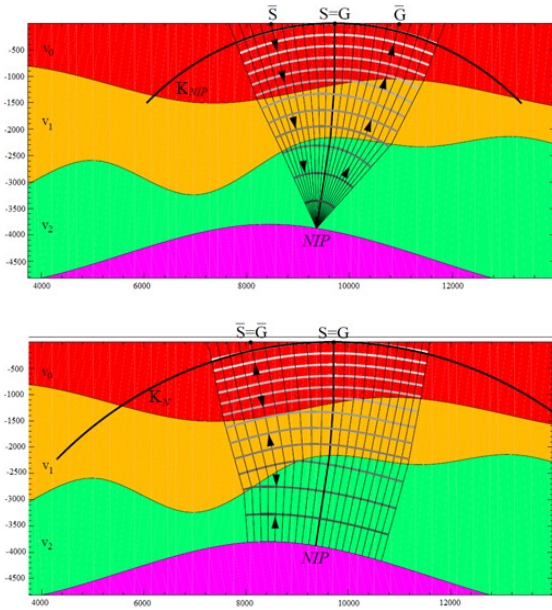


Figura 1 – Superior: Modelo composto por camadas com interfaces curvas e superfície de aquisição plano horizontal com desenho dos atributos da frente de onda. Onda-NIP com origem num ponto NIP de raio de curvatura  $R_{NIP}$  e curvatura  $K_{NIP}$ . Inferior: Onda-N com origem num seguimento do refletor de raio de curvatura  $R_N$  e curvatura  $K_N$ .

**Aproximação CRS de quarta-ordem**

A expansão de Taylor da aproximação CRS convencional (Equação 1), conhecida também como aproximação CRS de 4ª ordem (Höcht et al, 1999) é expressa por:

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

sendo

$$\begin{aligned} A &= 2K_{NIP} \text{sen} \beta_0 [2 - 2v_0 t_0 K_N - v_0 t_0 K_{NIP}], \\ B &= 2K_N \text{sen} \beta_0 [2 - 2v_0 t_0 K_N], \\ C &= K_N^2 [5 \cos^2 \beta_0 - 4] [1 - v_0 t_0 K_N / 2], \\ D &= K_{NIP} \{ 2v_0 t_0 [3 - 4 \cos^2 \beta_0] K_N^2 \\ &\quad - [K_N (4 - 5 \cos^2 \beta_0) + 2K_{NIP} \text{sen}^2 \beta_0] [2 - v_0 t_0 K_{NIP}] \}, \\ E &= K_{NIP}^2 [2v_0 t_0 K_N \text{sen}^2 \beta_0 - v_0 t_0 K_{NIP} \cos^2 \beta_0 / 2 + \cos^2 \beta_0] \end{aligned}$$

**Aproximação Multifoco**

Gelchinsky et al. (1999a,b) apresentaram uma expressão para o tempo de trânsito, de acordo com o mesmo número de parâmetros do método CRS convencional.

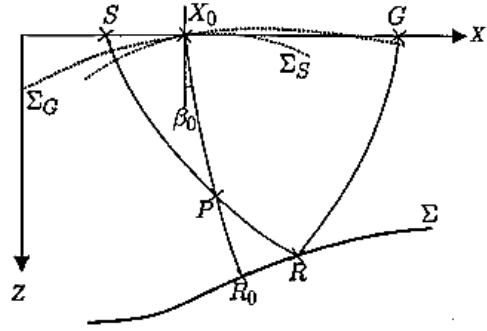


Figura 2. Observa-se um raio normal  $X_0R_0X_0$  e o raio paraxial  $SRG$ , referido ao refletor objetivo  $\Sigma$ . Focaliza-se o raio  $SRG$  com o raio central no ponto  $P$  em profundidade. Também são apresentadas as frentes de ondas  $\Sigma_S$ ,  $\Sigma_G$  e o ângulo de emergência do raio normal denotado,  $\beta_0$  (adaptado de Tygel et al, 1999).

O tempo de trânsito da onda focalizada desde a frente de onda  $\Sigma_S$  até  $\Sigma_G$ , é dado pelo tempo de trânsito Multifoco  $T$  para o raio  $SRG$  (Figura 2),

$$t_{MF}(\Delta x_s, \Delta x_g) = t_0 + \Delta t_s + \Delta t_g, \quad (3)$$

onde:

$\Delta t_s$  e  $\Delta t_g$  são as correções do sobretempo Multifoco para a fonte e receptor respectivamente. Aproximam-se as frentes de onda  $\Sigma_S$  e  $\Sigma_G$  por círculos com raios  $R_S = 1/K_S$  e  $R_G = 1/K_G$ .

As correções do sobretempo Multifoco para a fonte e receptor respectivamente são dadas por:

$$\begin{aligned} \Delta t_s &= \frac{\sqrt{R_s^2 + 2R_s \Delta x_s \text{sen} \alpha + \Delta x_s^2} - R_s}{v_0}, \\ \Delta t_g &= \frac{\sqrt{R_g^2 + 2R_g \Delta x_g \text{sen} \alpha + \Delta x_g^2} - R_g}{v_0}, \end{aligned}$$

sendo:

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{1 + \sigma}{\frac{1}{R_N} + \frac{\sigma}{R_{NIP}}}, \\ R_g &= \frac{1 - \sigma}{\frac{1}{R_N} - \frac{\sigma}{R_{NIP}}}, \end{aligned}$$

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 os deslocamentos da fonte e receptor em relação a coordenada  $x$  do ponto central, respectivamente. Onde  $\sigma$  é chamado de *parâmetro de foco* (e.g. Landa et al . 2010).

Para o caso de um refletor plano, temos:

$$\sigma = \frac{\Delta x_s - \Delta x_g}{\Delta x_s + \Delta x_g + 2 \frac{\Delta x_s \Delta x_g}{R_{NIP}} \sin \alpha}, \quad (4)$$

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 Multifoco.

**Aproximação CRS Não-Hiperbólico**

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

$$t_{CRS,NH}^2(x_m, h) = \frac{1}{2} \left[ t_0 + \frac{2 \text{sen} \beta_0}{v_0} x_m \right]^2 + \frac{t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} x_m^2 + \left[ \frac{2 t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{NIP}} + \frac{2 \text{sen}^2 \beta_0}{v_0^2} - \frac{t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} \right] h^2 + \frac{\sqrt{F * G}}{2} \quad (5)$$

sendo:

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

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

O interessante desta aproximação é que considera o mesmo número de parâmetros que as anteriores aproximações de tempos de trânsito CRS (Equações 1 e 2). Esta aproximação é chamada de aproximação CRS não hiperbólica.

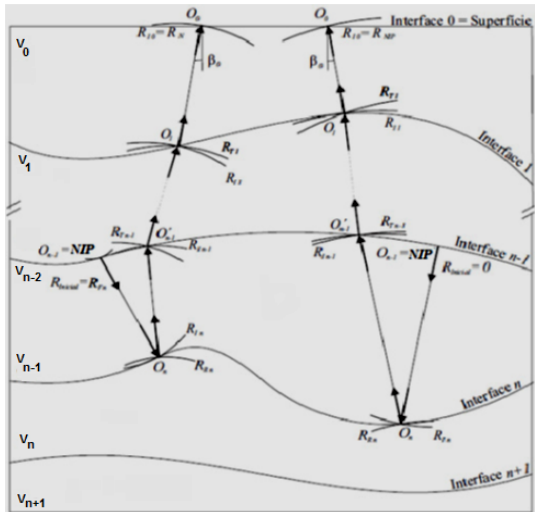


Figura 3 - Eventos de reflexões múltiplas aplicando as leis de propagação, reflexão e transmissão (adaptado de Cabral, 2012).

**Reflexões múltiplas**

Neste trabalho consideramos além dos eventos de reflexões primárias, os eventos de reflexões múltiplas simétricas intracamada. Para calcular o trio de parâmetros ( $\beta_0, R_{NIP}, R_N$ ) referentes aos eventos de reflexões múltiplas intracamadas é aplicado um princípio recursivo (Hubral e Krey, 1980), incrementado de uma parcela referente à reflexão na interface n (Figura 3).

Consequentemente o cálculo da primeira transmissão deverá ser efetuado em relação à interface n - 1 (Equação 5). Deve-se então, antes de iniciar o cálculo das demais transmissões, inserir a equação 7 referente ao evento de reflexão, conforme o algoritmo a seguir:

- Considera-se o raio de incidência normal com origem em  $O_{n-1} = NIP$ . Isto fornecerá todos os ângulos de incidência e de transmissão para todas as interfaces ( $i=1...n-1$ ) e o ângulo de emergência  $\beta_0$  no ponto  $O_0$  na superfície.
- Ajustamos  $R_{inicial} = 0$  para determinar o  $R_{NIP}$  ou  $R_{inicial} = R_{Fn}$  para determinar  $R_N$ .
- Primeira transmissão (neste caso incidindo na interface n)

$$R_{I_{n-1}} = R_{inicial} + v_{n-1} \Delta T_{O_{n-1} \rightarrow O_{n-1}} \quad (6)$$

- Reflexão na interface n

$$\frac{1}{R_{Rn}} = \frac{1}{R_{In}} + \frac{2}{\cos^2 \alpha_n} \frac{1}{R_{Fn}} \quad (7)$$

Dessa forma, ao aplicarmos este algoritmo agora considerando as reflexões múltiplas simétricas, obtemos os parâmetros  $R_{NIP}$ ,  $R_N$  e  $\beta_0$  correspondentes às ondas NIP e N para cada ponto  $P_0$  na seção ZO a ser simulada.

Para cada amostra  $(x_0, t_0)$  na seção empilhada, i.e. a seção ZO a ser simulada, temos que determinar os três parâmetros de empilhamento que produzem o melhor ajuste para um determinado evento de reflexão a ser simulado. Isto é feito através da análise de coerência (semblance, Taner e Koehler, 1969) ao longo da aproximação de tempos de trânsito CRS (Equação 4) nos dados de cobertura múltipla.

Após a determinação do trio paramétrico ( $R_{NIP}, R_N, \beta_0$ ) procederemos à aplicação do empilhamento. O empilhamento consiste na soma das amplitudes dos traços sísmicos em dados de cobertura múltipla, ao longo da superfície definida pela aproximação de tempos de trânsito hiperbólicos e não hiperbólicos, que melhor se ajustam aos dados. O resultado é assinalado a pontos de uma malha pré-definida na seção ZO. Como resultado tem-se a simulação de uma seção sísmica ZO. Isto significa que para cada ponto da seção ZO deve-se estimar o trio de parâmetros ótimos que produz a máxima coerência entre os eventos de reflexão sísmica.

## Resultados

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.

### Modelo 1

O modelo 2-D considerado neste estudo está constituído por duas camadas homogêneas sob um semi-espaço e separadas por interfaces curvas e suaves (Figura 4). As velocidades para cada camada, desde o topo até a base, são: 2,5 km/s, 3,5 km/s e 5,5 km/s. As dimensões do modelo são: 4 km de comprimento por 3,0 km de profundidade. A simulação de aquisição foi realizada considerando uma linha horizontal. Considerou-se uma fonte tipo Gabor com uma frequência dominante de 50 Hz e um intervalo de amostragem de tempo de 0,002 s.

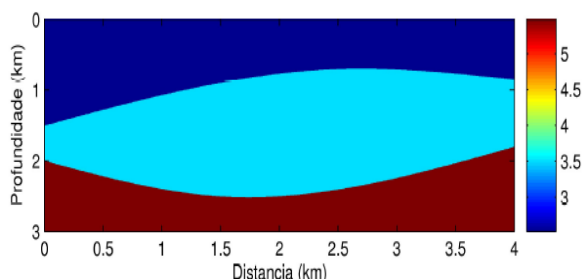


Figura 4 - Modelo 2-D constituído por duas camadas separadas com interfaces curvas e suaves sob um semi-espaço.

Os resultados da aplicação dos empilhamentos sísmicos considerando as aproximações de tempos de trânsito hiperbólicos e não-hiperbólicos são apresentados a continuação (Figuras 5 a 10).

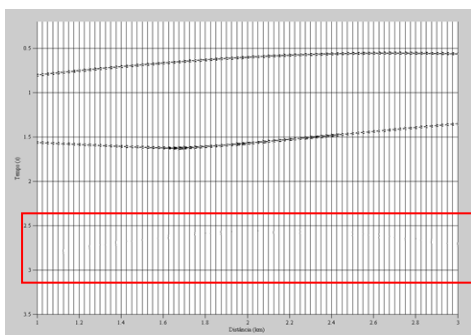


Figura 5 - Seção afastamento-nulo (ZO) obtida através do traçamento de raio com o software SEIS88. As reflexões múltiplas estão destacadas no retângulo vermelho.

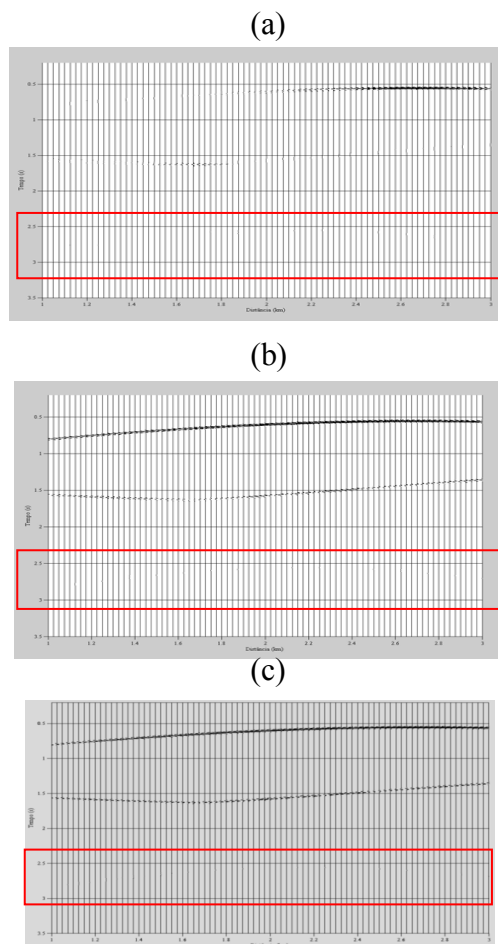


Figura 6 - (a) Seção ZO simulada utilizando a aproximação CMP. (b) Seção ZO simulada utilizando a aproximação Multifoco. (c) Seção ZO simulada com empilhamento CRS não hiperbólico. Os retângulos em vermelho destacam as reflexões múltiplas.

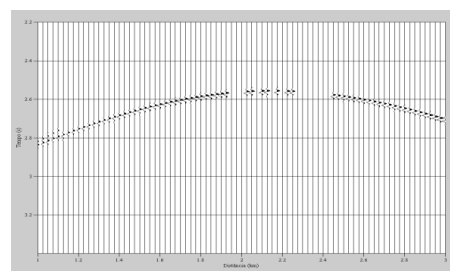


Figura 7 - Trecho destacado em vermelho da Figura 4 mostrando as reflexões múltiplas obtidas pelo traçamento de raios com o software SEIS88.

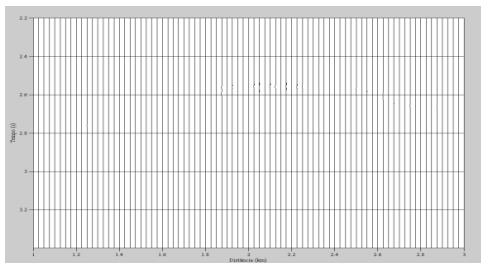


Figura 8 - Trecho destacado em vermelho da Figura 5a mostrando as reflexões múltiplas simuladas com a aproximação CMP.

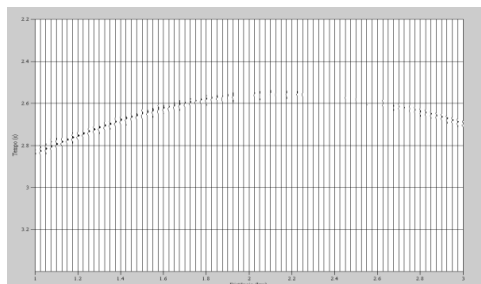


Figura 9 - Trecho destacado em vermelho da Figura 5b mostrando as reflexões múltiplas simuladas com a aproximação Multifoco.

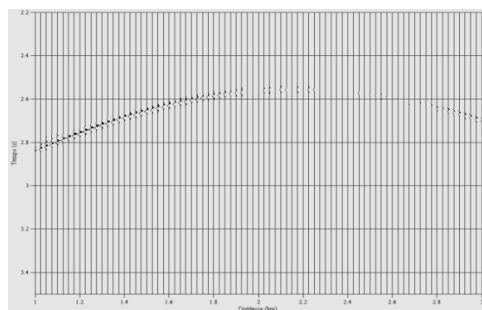


Figura 10 - Trecho destacado em vermelho da Figura 5c mostrando as reflexões múltiplas simuladas com a aproximação CRS não hiperbólica.

### Modelo 2

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 sobre um semi-espaço de forma de um domo com uma velocidade de 3.5 km/s, respectivamente, separados por interfaces curvas e suaves (Figura 11). A aquisição foi realizada sobre uma linha sísmica horizontal.

Os dados obtidos não apresentam ruído e foram gerados segundo a configuração fonte-receptor tipo common-shot (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.

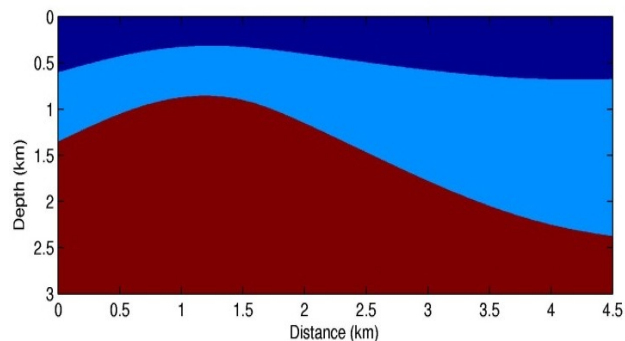
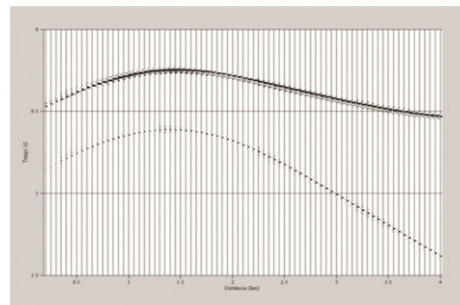
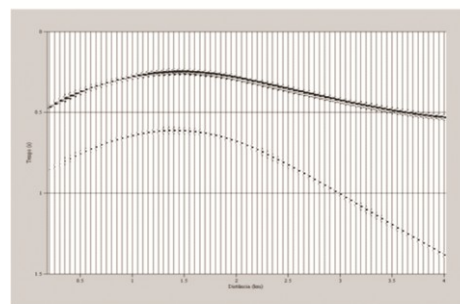


Figura 11 - Modelo 2-D constituído por duas camadas de velocidades iguais, sobre um meio-espaço com interface curva. Suas velocidades intervalares são de 2,5 km/s, 3,0 km/s e 3,5 km/s, respectivamente.

Nas Figuras 12 e 13 são apresentadas as seções obtidas a partir do empilhamento sísmico utilizando as eqs. 1 a 4, respectivamente.

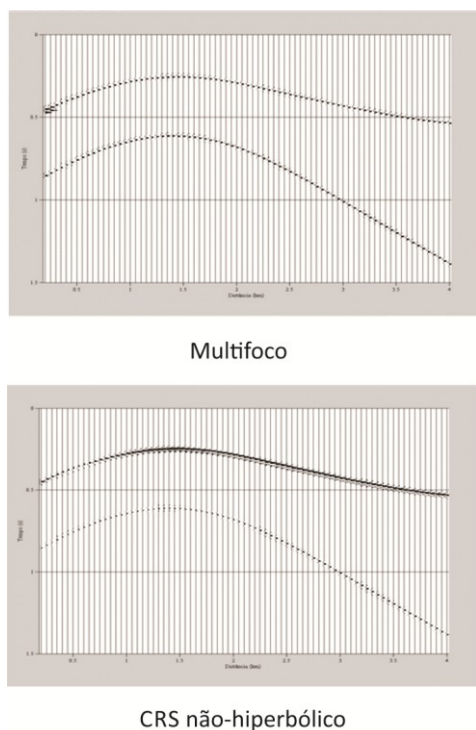


CRS de segunda-ordem



CRS de quarta-ordem

Figura 12. Seções ZO original e empilhadas: ZO original; CMP; CRS de segunda e quarta-ordem, respectivamente.



**Figura 13.** Seções empilhadas: Multifoco e CRS não hiperbólico, respectivamente.

### Discussão e Conclusões

Os métodos CRS de 2ª. ordem e de quarta-ordem, Multifoco e CRS não hiperbólico destacam-se melhor, em relação ao método convencional CMP, na recuperação dos traços ZO simulados.

Segundo os resultados obtidos com a aproximação do método 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.

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.

### Referências

CABRAL, R., 2002. Simulação de reflexões múltiplas usando o método de empilhamento sísmico Superfície de Reflexão Comum. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará.

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

GELCHISNKY, B., BERKOVITCH, A., KEYDAR, S., 1999a. *Multifocusing homeomorphic imaging: Part 1. Basic concepts and formulae*. *Journal of Applied Geophysics*, 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 Geophysics*, v. 42, p. 243-260.

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

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

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

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., B. GUREVICH, S. KEYDAR, 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*.

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

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

TYGEL, M., MÜLLER, T., HUBRAL, P., SCHLEICHER, J. 1997. *Eigenwave based multiparameter traveltime expansions*. In: ANNUAL MEETING OF SEG, 67., Expanded abstracts, 1770-1773.

TYGEL, M., SANTOS, L. T., SCHLEICHER, J., 1999. Multifocus moveout revisited: derivations and alternative expressions. *Journal of Applied Geophysics*, 42, 319-331.