



Simulação de reflexões sísmicas primárias e múltiplas simétricas usando a aproximação de tempos de trânsito CRS não-hiperbólico

Diego Pereira, FAGEOF/UFPA, Angela Montalvão, FAGEOF/UFPA e Pedro Chira-Oliva, IECOS/UFPA

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

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 travelttime approximation was proposed to simulate ZO sections. In this paper, we tested the performance of this approximation, so-called the non-hyperbolic CRS stacking operator, to simulate ZO seismic sections. This formula depends on the same three parameters as the conventional CRS operator. Synthetic examples have shown a good performance of this operator to simulate symmetric multiple and primary reflections compared to the original ZO seismic traces.

Introdução

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.

Na sequência do processamento sísmico o empilhamento de dados tem uma grande e fundamental importância, com intuito de gerar seções sísmicas das regiões de interesse.

Na atualidade têm surgido vários métodos de empilhamento sísmico, com a finalidade de superar restrições do empilhamento common-midpoint (CMP). Estes métodos são referidos na literatura geofísica como métodos independentes do macro-modelo de velocidades (Hubral, 1999). Entre estes métodos destacam o empilhamento Common-Reflection-Surface (CRS) (Müller, 1999; Jäger et al, 2001, Garabito (2001), o empilhamento Multifoco (Gelchinsky et al, 1997; Berkovitch et al, 1998; Landa et al., 1999, Chira, 2000) entre outros métodos.

O método CRS tem sido aplicado em dados sintéticos e reais com resultados bem sucedidos, mostrando ser mais eficiente que os métodos convencionais, como os métodos CMP ou NMO/DMO (Normal-Moveout/Dip-Moveout).

O método CRS precisa estimar três parâmetros: 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.

Na busca de uma aproximação de tempo de trânsito, mas que melhore a aproximação CRS de 2ª ordem, Höcht et al. (1999) consideraram a reflexão de uma interface como um conjunto contínuo de elementos de reflexão circular que osculam o refletor original. Eles derivaram uma expansão de Taylor da aproximação CRS de 2ª ordem denominado como a aproximação CRS de 4ª ordem. Esta aproximação é descrita com o mesmo número de parâmetros da aproximação anterior ou aproximação CRS convencional.

Cabral (2002) realizou a simulação de reflexões múltiplas de primeira ordem intracamada, utilizando a aproximação de tempos de trânsito CRS de 2ª ordem. Os resultados mostraram um bom desempenho desta aproximação para gerar seções ZO demonstrando simulações de uma seção AN observando-se um posicionamento correto dos eventos e a preservação da forma do pulso da fonte. Desta maneira o método CRS realça as reflexões múltiplas contidas nos dados sísmicos, além de identificar esses eventos.

Cardoso (2008) testou a aproximação de tempo de trânsito CRS de 4ª ordem em dados sintéticos sem ruído para simular seções ZO. Ele obteve bons resultados a partir desta nova aproximação quando comparada com a aproximação CRS convencional.

Chira et al. (2008) testaram a aproximação CRS de 4ª ordem em modelos com dados sintéticos para simular seções ZO. Eles consideraram dados com grandes afastamentos (por exemplo, 4 km) e obtiveram bons resultados a partir desta nova aproximação quando comparada com a aproximação CRS convencional.

Chira et al. (2010) testaram a aproximação CRS de 4ª ordem para simular seções sísmicas ZO. Eles utilizaram dados reais da Bacia do Tacutu (Brasil) e mostraram uma boa performance da expressão proposta comparada à aproximação CRS convencional

Silva et al. (2012) testaram a eficiência na simulação de seções sísmicas ZO da aproximação de tempos de trânsito CRS de 4ª ordem em dados sintéticos. Esta aproximação CRS de 4ª ordem tem mostrado um bom desempenho na simulação de seções sísmicas de

afastamento-nulo para o imageamento sísmico de reflexões múltiplas.

Fomel e Kazinnik (2012) propuseram uma aproximação de tempos de trânsito não-hiperbólico para simular seções ZO. Eles aplicaram essa aproximação em dados sintéticos e mostraram que essa aproximação pode prolongar significativamente a faixa de precisão da aproximação CRS de 2ª. ordem, enquanto usando essencialmente o mesmo conjunto de parâmetros.

Neste trabalho, testaremos o desempenho da aproximação de tempos de trânsito CRS não-hiperbólica para simular eventos de reflexão primária e múltipla do tipo simétrica cujo afastamento seja nulo (ZO). Da mesma maneira compararemos estes resultados com os resultados que sejam gerados com as aproximações de tempos de trânsito CRS hiperbólicas (2ª. e 4ª. ordem).

Metodologia

O método de empilhamento sísmico utilizado neste trabalho será o CRS. Este método permite simular seções sísmicas ZO a partir de dados sísmicos de cobertura múltipla, independente do macro-modelo de velocidades. A primeira aproximação de tempos de trânsito utilizada por este método foi a aproximação hiperbólica (Tygel et al, 1997; Schleicher et al., 1993) também conhecida como aproximação CRS de 2ª ordem ou aproximação CRS convencional expressa por:

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

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 (β_0), a curvatura da onda hipotética NIP ($K_{NIP} = 1/R_{NIP}$) e a curvatura da onda hipotética N ($K_N = 1/R_N$).

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

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

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

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

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

$$E = K_{NIP}^2 \left[\begin{aligned} & 2v_0 t_0 K_N sen^2 \beta_0 - (v_0 t_0 K_{NIP} \cos^2 \beta_0 / 2) \\ & + \cos^2 \beta_0 \end{aligned} \right].$$

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

$$t_{CRS.NH}^2(x_m, h) = \frac{1}{2} \left[t_0 + \frac{2sen\beta_0}{v_0} x_m \right]^2 + \frac{t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} x_m^2 + \left[\frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{NIP}} + \frac{2sen^2 \beta_0}{v_0^2} - \frac{t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} \right] h^2 + \frac{\sqrt{F * G}}{2} \quad (3)$$

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 (Equações 1 e 2). Esta aproximação é chamada de aproximação CRS não hiperbólica.

Com a finalidade de testar o desempenho desta última equação que será aplicada a aproximação de tempos de trânsito CRS 2-D na forma hiperbólica proposta por Fomel e Kazinnik (2012) para simular seções zero-offset (ZO).

Reflexões múltiplas

Neste trabalho consideramos além dos eventos de reflexões primárias, os eventos de reflexões múltiplas simétricas intracamada (Figura 1).

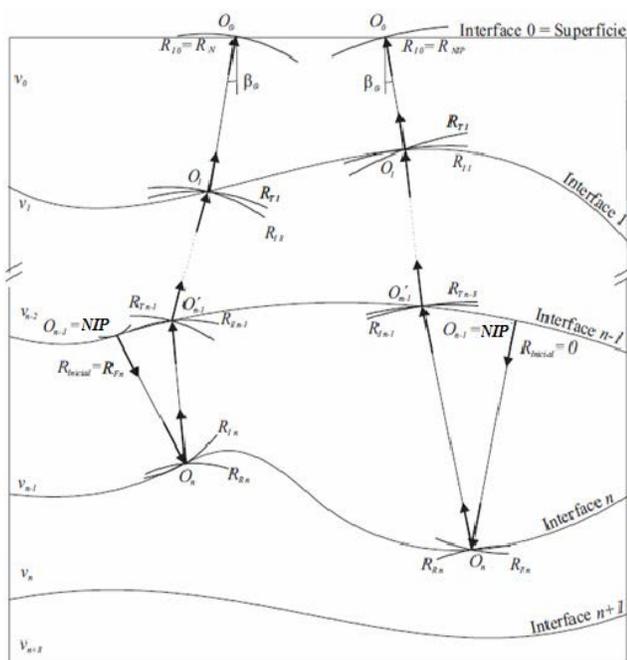


Figura 1. Eventos de reflexões múltiplas aplicando as leis de propagação, reflexão e transmissão (modificado de Cabral, 2002).

Para calcular o trio de parâmetros CRS referentes aos eventos de reflexões múltiplas intracamadas é aplicado um princípio recursivo, incrementado de uma parcela referente à reflexão na interface n . Conseqüentemente o cálculo da primeira transmissão deverá ser efetuado em relação à interface $n - 1$ (Equação 4). Deve-se então, antes de iniciar o cálculo das demais transmissões, inserir a equação 5 referente ao evento de reflexão, conforme o algoritmo a seguir:

- Considera-se o raio de incidência normal com origem em $O_{n-1} = \text{NIP}$. 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.
- Ajustamos $R_{inicial} = 0$ para determinar o RNIP ou $R_{inicial} = R_{Fn}$ para determinar R_N .
- Primeira transmissão (neste caso incidindo na interface n)

$$R_{I_n} = R_{inicial} + V_{n-1} \Delta T_{0_{n-1} \rightarrow 0_n} \quad (4)$$

- Reflexão na interface n

$$\frac{1}{R_{R_n}} = \frac{1}{R_{I_n}} + \frac{2}{\cos^2 \alpha_n} \frac{1}{R_{Fn}} \quad (5)$$

Dessa forma, ao aplicarmos este algoritmo agora considerando as reflexões múltiplas simétricas, obtemos os parâmetros R_{NIP} , R_N e β_0 correspondentes às ondas N e NIP para cada ponto P_0 na seção AN 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 CRS que produzem o melhor ajuste para um determinado evento de reflexão a ser simulado. Isto é feito através da análise de coerência (semblance, Taner e Koehler, 1969) ao longo da aproximação de tempos de trânsito CRS (Equação 3) nos dados de cobertura múltipla.

Após a determinação do trio paramétrico do CRS procederemos à aplicação do empilhamento CRS não-hiperbólico. O empilhamento 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 não-hiperbólico (Equação 3), que melhor se ajusta aos dados. O resultado é assinalado a pontos de uma malha pré-definida na seção ZO. Como resultado tem-se a simulação de uma seção sísmica ZO. Isto significa que para cada ponto da seção ZO deve-se estimar o trio de parâmetros ótimos que produz a máxima coerência entre os eventos de reflexão sísmica.

Resultados

Foram considerados dois modelos para testar o desempenho do método de empilhamento sísmico CRS não-hiperbólico.

Modelo I

O primeiro modelo 2-D considerado neste trabalho foi gerado a partir de um conjunto de dados sintéticos de reflexão de cobertura múltipla utilizando o algoritmo de traçamento de raio do software Seis88 (Cerveny e Psensik, 1988). Este modelo caracteriza-se por não conter eventos de reflexões múltiplas e não conter ruído. O modelo 2-D está constituído por duas camadas sob um semi-espaco e separadas por interfaces curvas e suaves (Figura 2). A aquisição foi realizada sobre uma linha sísmica horizontal. Os dados gerados não apresentam ruído e foram criados segundo a configuração de afastamento-comum (CS). O máximo afastamento foi de 4 km. 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.

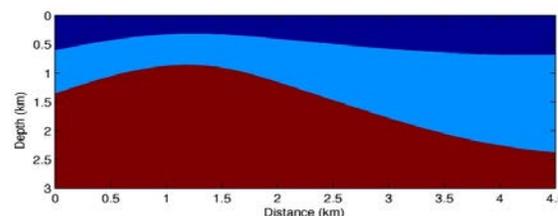


Figura 2. Modelo 2-D constituído por duas camadas de velocidades iguais, sobre um meio-espaco com interface curva. Suas velocidades intervalares são de 2,5 km/s, 3,0 km/s e 3,5 km/s, respectivamente.

Da mesma maneira são apresentados os traços sísmicos ZO originais (Figura 3). Consequentemente estes traços sísmicos são simulados com a aplicação da aproximação de tempos de trânsito CRS não-hiperbólico (Figura 4).

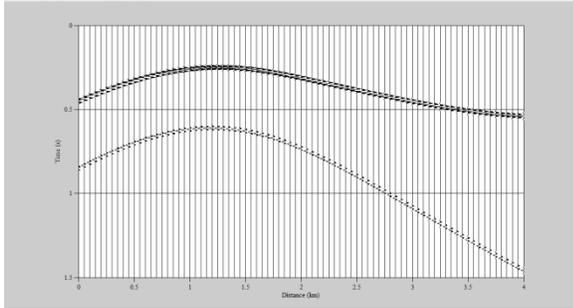


Figura 3. Traços sísmicos ZO verdadeiros gerados com o software SEIS88.

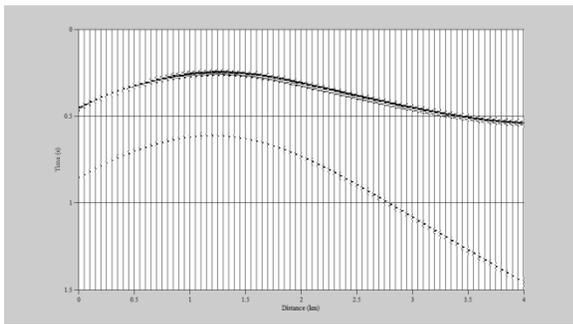


Figura 4. Empilhamento CRS não hiperbólico.

Modelo II

O segundo modelo 2-D está constituído por duas camadas homogêneas sob um semi-espço e separadas por interfaces curvas e suaves (Figura 5). As velocidades para cada camada, desde o topo até a base, são: 2,5 km/s, 3,5km/se 5,5km/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.

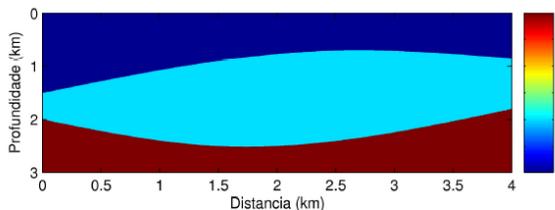


Figura 5. Modelo 2-D constituído por duas camadas separadas com interfaces curvas e suaves sob um semi-espço.

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 considerado 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 e consta de 81 traços com intervalos de 0,025 km.

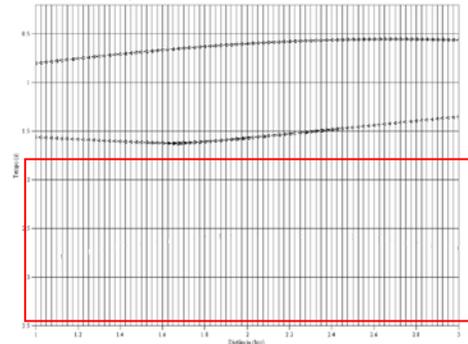


Figura 6. Seção zero-offset (ZO) obtida através do traçamento de raios com o software SEIS88 (Modelo 2). Reflexões múltiplas destacadas pelo retângulo vermelho.

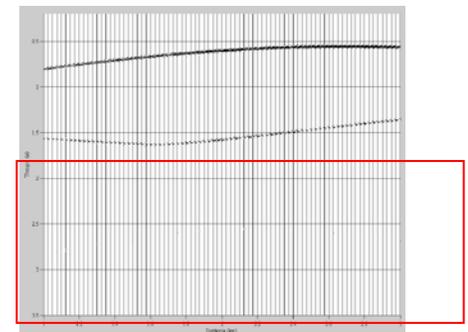


Figura 7. Seção zero-offset (ZO) simulada com o empilhamento CRS não hiperbólico (Modelo 2) com destaque para as reflexões múltiplas (retângulo vermelho).

Nas figuras a seguir (Figuras 8 e 9), com a finalidade de destacar melhor as múltiplas simuladas nas seções ZO (original e empilhadas) são apresentadas estas reflexões através de um zoom ampliado.

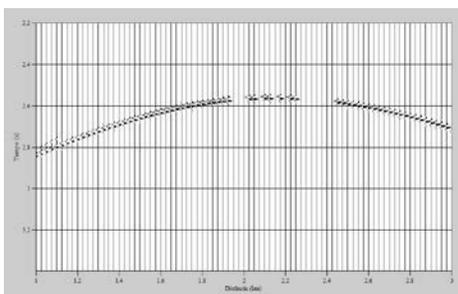


Figura 8 – Trecho destacado em vermelho da Figura 5 destacando as reflexões múltiplas obtidas pelo traçamento de raios com o software SEIS88.

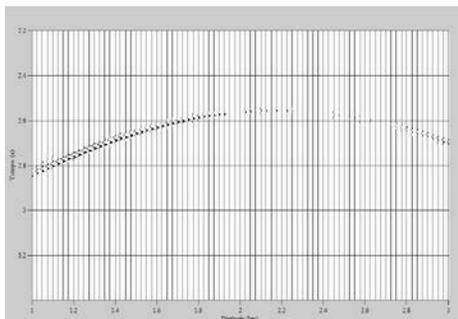


Figura 9 – Trecho destacado em vermelho da Figura 6 destacando as reflexões múltiplas simuladas com a aproximação CRS não hiperbólica.

Conclusões

Como consequência deste trabalho pode-se conduir o seguinte:

- A aproximação de tempos de trânsito CRS não hiperbólico tem um bom desempenho na simulação de seções sísmicas com afastamento-nulo levando em consideração reflexões primárias e múltiplas.
- Segundo os resultados obtidos podemos observar um bom posicionamento dos tempos de trânsito e uma boa visualização dos referidos eventos quando comparados com os traços afastamento-nulo originais;
- O método CRS não hiperbólico apresenta-se como uma importante alternativa para simular seções ZO (Zero-Offset) contendo reflexões múltiplas e primárias para diversos afastamentos.

Referências Bibliográficas

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*. Geophysical Prospecting, 61, 21–27.

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. (Dissertação 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 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.

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*. Revista 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. 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.

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

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.

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 spectral-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 multiparameter traveltime expansions*. In: ANNUAL MEETING OF SEG, 67., Expanded abstracts, 1770-1773.

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