



Estudo comparativo entre Estereotomografia e Tomografia da onda NIP: Aplicação a dados sintéticos.

José Ribamar Praxedes Filho, João Carlos Ribeiro Cruz (IG-UFPA)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th 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 determination of an accurate macro velocity model is a fundamental requirement for the seismic imaging. The pre-stack stereotomography and post-stack NIP wave tomography are powerful and very suggestive tools for this task. The former uses locally coherent events interpreted as primary reflections, which are associated to ray segments linked through the same reflection point in depth. In the latter, the seismic reflection event corresponds to a hypothetical NIP wave that is associated to a reflection point in depth. We determine the NIP wave attributes are by Common Reflection Surface (CRS) procedure. In this paper, we make a comparison between these methods, giving a brief review of the theoretical foundations, highlighting the main differences and applying these approaches to synthetic data. In order to evaluate the velocity models determined by these two approximations, we compare the Common Image Gathers (CIG) generated by applying the pre-stack Kirchhoff migration algorithm to the seismic data. The results show that both tomographic methods provide representative velocity models. In pre-stack data of laterally varying media, with a high signal-to-noise ratio, the stereotomography yields better estimates of the velocity model.

Introdução

Na sísmica de reflexão aplicada à exploração de petróleo e gás, os métodos de imageamento sísmico precisam *a priori* de uma boa estimativa do modelo de velocidade para a obtenção de uma imagem representativa da subsuperfície. Portanto, a determinação de um macro modelo velocidades é uma operação fundamental e anterior ao imageamento sísmico. A tomografia sísmica é um dos métodos tradicionalmente utilizados para a obtenção e/ou atualização do modelo de velocidades da subsuperfície, e dentro desta categoria de métodos nos últimos anos foram introduzidos o método Estereotomografia (BILLETTE; LAMBARÉ, 1998) e a Tomografia da onda NIP (DUVENECK; HUBRAL 2002). Estes métodos, que são alvo de estudo neste trabalho, são robustos e eficientes para a determinação do modelo de velocidades, porém ainda pouco conhecidos na comunidade sísmica. Logo, aplicá-los em dados

sintéticos, e conseqüentemente compará-los, constitui uma boa forma de difundir e testar a eficiência destes métodos.

A Estereotomografia pré-empilhamento, proposta por Billette e Lambaré (1998), é um método tomográfico robusto que utiliza como parâmetros de entrada a componente horizontal do vetor vagarosidade em adição ao tempo de trânsito, já utilizado na tomografia de reflexão convencional. Neste método, os eventos localmente coerentes são caracterizados no volume de dados pré-empilhado através do parâmetro da vagarosidade horizontal. Estes eventos são interpretados individualmente através de pares de segmentos de raios a fim de obter informação do modelo de velocidades.

A Tomografia da onda NIP usa, além do tempo de transito, os atributos cinemáticos da onda hipotética do ponto de incidência normal (*Normal Incidence Point Wave – NIP Wave*). O uso desses atributos e a parametrização do modelo em termos dos pontos de incidência normal isolados (NIPs) levam a um número de vantagens, se comparados aos métodos de estimativas de velocidades baseados na tomografia convencional ou na migração, especialmente no caso de dados sísmicos com baixa razão sinal/ruído (DUVENECK, 2004).

O principal objetivo deste trabalho é fazer um estudo comparativo dos métodos de inversão por Estereotomografia e Tomografia da onda NIP. Este estudo compreenderá tanto a revisão do formalismo teórico, como também os detalhes na aplicação a dados sintéticos. Destacando-se neste estudo as similaridades e diferenças no formalismo teórico e a precisão de cada um dos métodos na aplicação a um dado sintético com variações laterais de velocidades. Com base nos resultados, serão destacadas as vantagens e desvantagens de ambos os métodos.

Estereotomografia pré-empilhamento

A Estereotomografia pré-empilhamento proposta por Billette e Lambaré (1998), é um novo método tomográfico que utiliza a componente horizontal do vetor vagarosidade, chamada vagarosidades horizontal, além do tempo de trânsito, para estimar modelos de velocidades, essenciais para o imageamento sísmico. Esta ideia foi inicialmente estudada por Riabinkin (1957) e posteriormente aplicada por Sword (1987), pelo método chamado de Recepção Direcional Comum (*Common Directional Reception - CDR*). As componentes horizontais dos vetores vagarosidades correspondem às tangentes aos eventos sísmicos localmente coerentes selecionados em famílias de traços de tiro comum e receptor comum, simultaneamente. Neste caso, a

marcação é realizada nos painéis empilhados através do empilhamento oblíquo (*slant stack*) local, com uma maior razão sinal/ruído.

O modelo é descrito pela função de velocidades 2-D, $v = v(x, z)$, através do qual são traçados pares de segmentos de raios, para cada par fonte-receptor, originados em pontos de difração no modelo (BILLETTE; LAMBARÉ, 1998). Para cada segmento de raio calculam-se os valores das vagarosidades horizontais, em pontos da superfície da terra.

Através da Estereotomografia os parâmetros de cada evento sísmico na superfície (posições de fonte e receptor, vagarosidade horizontal e tempo de trânsito) são estimados por uma função ajuste do erro. No processo de busca dos parâmetros ótimos em superfície, o ponto de cruzamento de segmentos de raios em profundidade é fixado (Fig.1).

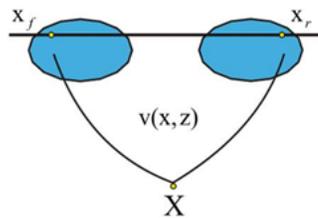


Fig.1. Condições de contorno para descrição de um par de segmentos de raio. O ponto de cruzamento é fixado. Os dois raios não são ajustados aos dados na superfície.

Usando-se o volume de dados sísmicos com multi-fontes e multi-receptores distribuídos na superfície de aquisição, determinam-se as quantidades a serem usadas no processo de ajuste do modelo de velocidades ao conjunto dos dados sísmicos, a saber: as posições das fontes e dos receptores, x_f e x_r ; os tempos de trânsito de cada evento sísmico interpretado, T_f ; as vagarosidades horizontais nas posições de tiro e receptor, p_f e p_r , selecionadas em eventos localmente coerentes. Por sua vez, o modelo de velocidades é representado por valores discretos da função velocidade $v = v(x, z)$ através de uma malha de pontos de coordenadas cartesianas 2-D, onde são selecionados pontos $X(x, z)$ a serem testados no processo de estimativa como possíveis pontos de cruzamento de segmentos de raios. Os segmentos de raios são traçados a partir do ponto selecionado em profundidade, X , tendo como parâmetros iniciais os ângulos de partida, Θ_f e Θ_r , os quais correspondem às posições de fonte e receptor. Os tempos de trânsito, T_f e T_r , são calculados para cada traçado de segmento de raio.

O problema inverso é formulado como a determinação da melhor função velocidade $v = v(x, z)$ que minimiza a distância entre o espaço dos dados observados, $d_{obs} = (x_f, x_r, p_f, p_r, T_f)$, e o espaço dos dados calculados através do traçamento de raios, $d_{cal} = (x_f, x_r, p_f, p_r, T_r)$, usando-se o modelo de

velocidades e os parâmetros de cada segmento de raio, $m = [v(x, \Theta_f, \Theta_r, T_f, T_r)]$, (Fig.2). Na Estereotomografia pré-empilhamento a função velocidade é considerada suave, sendo representada por coeficientes *B-splines*. O algoritmo de otimização usado na solução do problema inverso corresponde ao método gradiente conjugado (*Sparse Equations and Least Squares - LSQR*) (PAIGE; SAUNDERS, 1982).

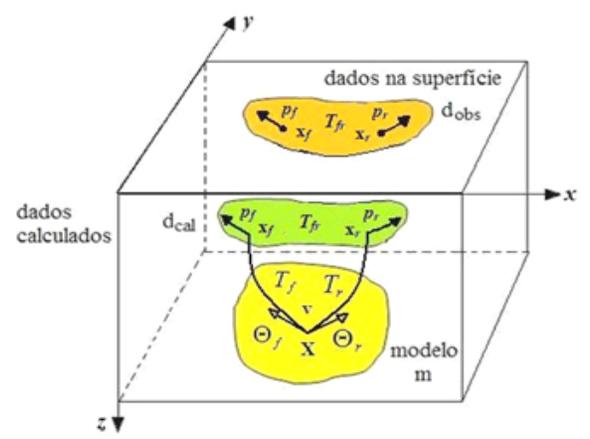


Fig.2. Dados e modelo em estereotomografia. O conjunto de dados consiste de um conjunto de posições dos tiros e receptores, x_f e x_r , tempos de trânsito, T_f , e vagarosidades em ambas as localizações, de tiro e recepção, p_f e p_r , selecionadas em eventos localmente coerentes. O modelo é composto de uma coleção discreta do campo de velocidades v , um conjunto de pontos de difração X , dois ângulos de espalhamento Θ_f e Θ_r , e dois tempos T_f e T_r , associados a cada evento selecionado.

Tomografia da onda NIP

A Tomografia da onda NIP é um novo método de inversão tomográfica que utiliza o tempo de trânsito e os atributos cinemáticos da onda hipotética NIP (DUVENECK; HUBRAL 2002). A onda hipotética do ponto de incidência normal (NIP), assim como a onda normal (N), foram descritas por Hubral (1983). A onda hipotética NIP origina-se em profundidade no ponto de incidência de um raio de reflexão normal, e propaga-se ao longo do raio normal até a superfície da terra. Os parâmetros geométricos da onda NIP são calculados no ponto de emergência do respectivo raio normal, a saber: o ângulo de emergência na superfície e o raio de curvatura. Estes parâmetros e mais o tempo de trânsito do respectivo raio de reflexão normal permitem obter informações sobre a distribuição de velocidade na subsuperfície e são as bases para as aproximações tomográficas para a obtenção de um modelo de velocidades. Esse conceito foi aplicado recentemente por Duvneck (2004).

Na Tomografia da onda NIP um evento sísmico da seção afastamento-nulo corresponde a uma onda NIP originada no ponto de reflexão normal, podendo ser calculada pelo

traçamento dinâmico de raios usando um modelo de velocidades. Através do método Empilhamento por Superfície de Reflexão Comum (empilhamento CRS), os parâmetros geométricos da onda NIP são determinados pela busca automática a partir do volume de dados sísmicos de múltipla cobertura, usando painéis de análise de coerência (*semblance*), obtendo-se também a simulação da seção afastamento-nulo (GARABITO, 2001).

Os parâmetros geométricos da onda NIP, chamados no método CRS de atributos cinemáticos, servem de condições iniciais para o método tomográfico. As ondas hipotéticas NIP nos pontos de emergências na superfície da terra são descritas através dos atributos cinemáticos do campo de ondas estimados pelo empilhamento CRS. Através da NIP tomografia o modelo de velocidades é determinado utilizando-se a condição onde as ondas NIP colapsam no tempo de trânsito nulo. Isto significa que um modelo ajusta-se aos dados se todas as ondas NIP incidirem no ponto de incidência normal, após a sua retro propagação (Fig.3).

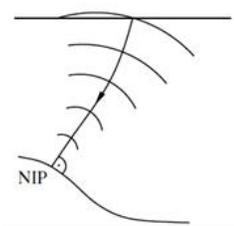


Fig.3. Em um modelo de velocidade coerente, ondas NIP incidem no ponto de incidência normal com tempo nulo, quando a propagação volta para a subsuperfície.

Usando-se o volume de dados sísmicos de múltipla cobertura, determinam-se as quantidades a serem usadas no processo de ajuste do modelo de velocidades ao conjunto de eventos sísmicos interpretados na seção afastamento-nulo, a saber: a posição do ponto de emergência do raio normal, X_0 ; o tempo de trânsito, τ_0 ; a primeira-derivada espacial (ou vagarosidade horizontal), p ; e a segunda-derivada espacial do tempo de trânsito, M_{NIP} . Do mesmo modo como na Estereotomografia, o modelo de velocidades é representado por valores discretos da função velocidade $v = \psi(x, z)$ através de uma malha de pontos de coordenadas cartesianas 2-D. As interfaces refletoras são representadas pela coleção de pontos de incidência normal (NIP) de coordenadas (x, z) . No traçamento de raios usam-se como condições iniciais os ângulos de partida θ_{NIP} , representando a direção inicial do raio normal provável, em cada ponto NIP selecionado no modelo.

O problema inverso no método NIP tomografia é formulado como a determinação da melhor função velocidade $v = \psi(x, z)$ que minimiza da distância entre o espaço dos dados observados, $d_{obs} = (X_0, \tau_0, p, M_{NIP})$, e o espaço dos dados calculados através do traçamento dinâmico de raios, $d_{cal} = (X_0, \tau_0, p, M_{NIP})$, para o modelo

de velocidades e os parâmetros relacionados a cada NIP, $m = [\psi(x, z, \theta_{NIP})]$, (Fig.4). Na NIP tomografia pós-empilhamento a função velocidade é considerada suave, sendo representada por coeficientes B-splines. O algoritmo de otimização usado na solução do problema inverso corresponde ao método gradiente conjugado (LSQR) (PAIGE; SAUNDERS, 1982).

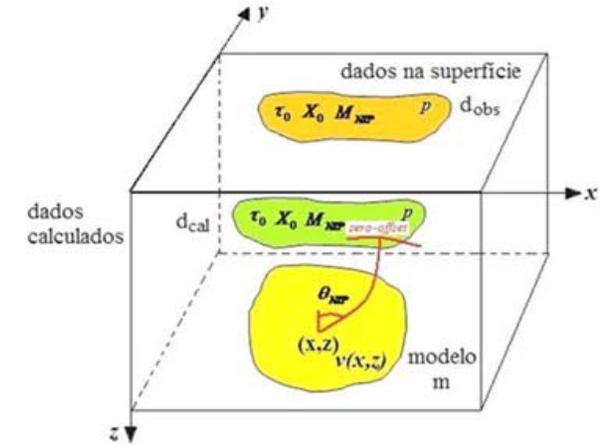


Fig.4. Dado e modelo na tomografia da onda NIP. O conjunto de dados consiste de um conjunto de posições de emergência X_0 e tempos de trânsito τ_0 de raio normal da onda NIP emergindo, sua derivada do tempo de trânsito espacial de primeira ordem p e sua derivada do tempo de trânsito espacial de segunda ordem M_{NIP} . O modelo é composto por uma coleção de coordenadas do NIP, X e Z , por ângulos de mergulho local θ_{NIP} associado à direção normal do raio no respectivo NIP, e uma coleção discreta do campo de velocidade v .

Diferenças e Princípios comuns

Na Estereotomografia pré-empilhamento, os dados sísmicos utilizados são de múltipla cobertura, enquanto na NIP tomografia os dados sísmicos correspondem a uma seção afastamento nulo; na Estereotomografia utilizam-se sempre dois segmentos de raios correspondentes às posições de fontes e receptores, na NIP tomografia é usada apenas a trajetória de um raio normal; na Estereotomografia usam-se duas medidas de vagarosidades horizontais em dados nas duas configurações fonte comum e receptor comum; na NIP tomografia são usadas as medidas de segundas derivadas de tempo de trânsito. Na Estereotomografia, os parâmetros observados são associados a eventos coerentes coletados através da marcação em dados de múltipla cobertura, em geral com baixa razão sinal-ruído; enquanto na NIP tomografia, os parâmetros observados são obtidos de forma automática pelo método de empilhamento CRS (primeiras e segundas derivadas do tempo de trânsito), e pela interpretação semiautomática de eventos coerentes na seção afastamento nulo produzida pelo método CRS com alta razão sinal-ruído. Na NIP tomografia, o uso da aproximação de segunda ordem do tempo de trânsito na forma de atributos relacionados às ondas NIP emergindo através do método

CRS, limita a aplicabilidade para distribuições de velocidades de variações laterais moderadas, ao mesmo tempo em que possibilita uma maior abrangência espacial; enquanto na Estereotomografia pré-empilhamento é usado apenas uma aproximação de primeira ordem através do cálculo das vagarosidades horizontais.

Quanto à regularização da variação do modelo de velocidades, na Estereotomografia pré-empilhamento, necessita apenas as derivadas espaciais de segunda ordem contínuas, sendo descrita por B-splines cúbicos; na Tomografia da onda NIP, são exigidas as derivadas espaciais de terceira ordem contínuas com a função velocidade representada B-splines de grau quatro. Isto significa que no caso de um espaçamento de nós idênticos, o modelo de velocidades encontrado na Estereotomografia pré-empilhamento tem maior resolução local, uma vez que em todas as direções tem um nó B-spline a menos para calcular. Adicionalmente, a fim de regularizar as variações de velocidade na Estereotomografia pré-empilhamento, a velocidade precisa ter um limite na sua norma pelo método de Tikhonov, enquanto que na Tomografia da onda NIP um vínculo de curvatura mínima é usado, sugerindo segunda derivada mínima do campo de velocidades.

Modelo Sintético

Na Fig.5, o modelo sintético usado representa um meio geológico composto por camadas homogêneas com dobramentos (tipo sinclinal e anticlinal), incluindo variações de velocidades nas direções vertical e horizontal. O modelo sugerido é bastante sugestivo para a localização de hidrocarbonetos, portanto uma boa opção para aplicar e testar a eficiência de ambos os métodos.

O referido modelo sintético apresenta oito camadas separadas por interfaces curvas e suaves com velocidades constantes iguais a $v_1 = 1400$, $v_2 = 1800$, $v_3 = 2200$, $v_4 = 2600$, $v_5 = 3000$, $v_6 = 3400$, $v_7 = 3800$ e $v_8 = 4600 \text{ m/s}$; com 10 km de largura e 2,7 km de profundidade.

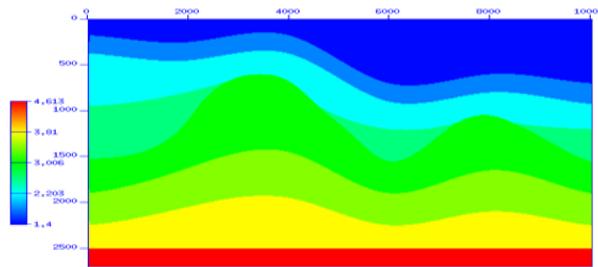


Fig.5. Representação do campo de velocidades do modelo sintético.

Foram consideradas na seção geológica oito camadas no total, sendo que a última corresponde ao embasamento e apresenta alto contraste de impedância acústica. Os dados sísmicos sintéticos com múltipla cobertura foram

gerados usando o pacote de software Seismic Unix. A primeira e a última fonte foram colocadas nas coordenadas 0 e 9950 metros, respectivamente. A distância entre fontes consecutivas é de 50 metros. Foi utilizado um arranjo do tipo simétrico (*split-spread*) para cada experimento de fonte comum, composto por 121 receptores, com intervalo de 25 metros entre receptores consecutivos, tendo um afastamento máximo entre a fonte e o último receptor de 1500 metros. O tempo total de registro é de 3 segundos com um intervalo entre as amostras de 4 ms.

Inversão Estereotomográfica

Após o pré-processamento do dado sintético, com aplicação de *mute*, ganho e adição de ruído, foram determinados os limites de valores de medidas de coerência que serão utilizados para a marcação automática (BILLETTE et al., 2003). Como medida de coerência foi usada a função *semblance*, sendo aceitos apenas eventos com *semblance* igual ou superior a 0,6. Foram considerados também 10 traços em cada família de fonte e receptor comum, para encontrar os eventos localmente coerentes. Devido aos espaçamentos entre os receptores ser de 25 m e das fontes 50 m, as larguras das janelas utilizadas no cálculo do empilhamento oblíquo local apresentam nas famílias de fonte comum e receptor comum uma extensão total de 250 e 500 m.

Em seguida foi feito um controle de qualidade, que consistiu em um processo de seleção interativa de eventos baseado na energia e coerência máximas, e também na análise estatística dos parâmetros, p.ex. vagarosidades, tempos de trânsito, entre outros. Como resultado dos processos acima citados, obtivemos os dados de entrada incorporados ao esquema de inversão estereotomográfica, realizado da seguinte maneira:

- (1) **O modelo inicial:** Dada uma informação *a priori* ou hipótese, utiliza-se modelos simples, isto é, modelos de velocidades homogêneos ou com gradiente. Neste caso, um modelo de velocidades inicial foi criado, por um interpolador B-Splines, com uma malha cujo espaçamento entre os nós na horizontal é de 1000 m e na vertical 300 m, considerando-se uma função velocidade variando com a profundidade representada por $v(z) = 1400 \text{ m/s} + 1,0s^{-1}z$.
- (2) **A localização inicial dos segmentos de raios:** Somente os pares dos segmentos de raios são otimizados fixando o modelo de velocidades ao seu valor inicial. Este passo permite diminuir significativamente a função custo a fim de estabilizar o processo de inversão e neste caso foram consideradas 10 iterações.
- (3) **A inversão conjunta:** Os pares dos segmentos de raios e o modelo de velocidades são otimizados conjuntamente até a função custo alcançar o seu valor mínimo, com a determinação de uma margem de erro previamente definida, sendo 5 m para as posições de fonte e receptor, 4 ms para o tempo de trânsito e 0,01 ms/m para as vagarosidades.

O modelo final é mostrado junto com os verdadeiros limites do modelo na Fig.6, com a imagem migrada em profundidade e as famílias de imagem comum (CIG) mostradas nas Fig.7 e 8, respectivamente.

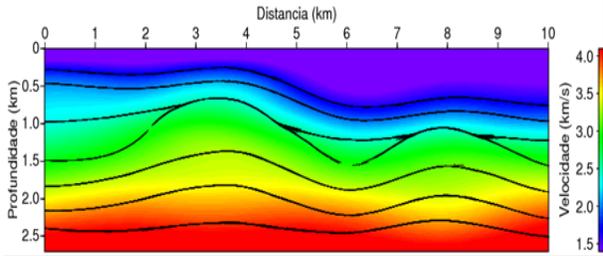


Fig.6. Modelo de velocidades do modelo sintético obtido como resultado da inversão estereotomográfica pré-empilhamento.

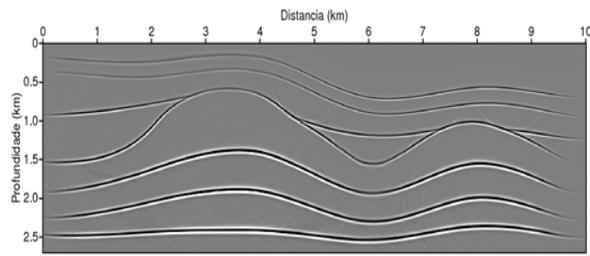


Fig.7. Resultado da migração pré-empilhamento em profundidade do tipo Kirchhoff do modelo sintético obtido através da inversão estereotomográfica.

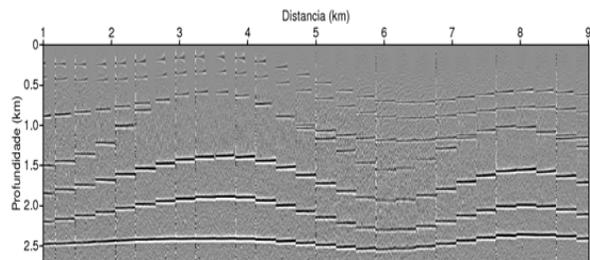


Fig.8. Famílias de imagem comum (CIG) da migração pré-empilhamento em profundidade do tipo Kirchhoff do modelo sintético obtido através da estereotomografia.

Inversão Tomográfica da onda NIP

Aos mesmos dados sintéticos, para o mesmo modelo da seção anterior, é feita a aplicação da NIP tomografia. Os eventos coerentes são determinados na seção afastamento nulo produzida pelo método de empilhamento CRS, através do programa NIP-picking (GADELHA et al., 2008) que usa um valor mínimo da semblance igual a 0,2. Para aplicação da marcação, os parâmetros obtidos pelo método CRS de cada evento coerente são suavizados (HERTWECK, 2005).

Para a inversão tomográfica da onda NIP, foi usado um modelo inicial com uma distribuição de nós B-Splines

diferente da usada na Estereotomografia pré-empilhamento, pois essas aproximações usam B-splines de ordem diferente. Neste caso, utilizou-se uma malha cujo espaçamento entre os nós na horizontal foi de 500 m e na vertical 300 m, e uma função de velocidade variando com a profundidade igual a $v(z) = 1400m/s + 1,0s^{-1}z$. Após a definição do modelo de velocidades inicial, a inversão conjunta foi iniciada sobre a hipótese de que todos os parâmetros iniciais foram determinados com o mesmo erro. Depois de 10 iterações a inversão foi parada, em virtude da função custo não diminuir de forma significativa. O modelo de velocidades está apresentado na Fig.9. A correspondente imagem migrada em profundidade e as famílias de imagem comum (CIG) são mostradas nas Fig.10 e 11, respectivamente.

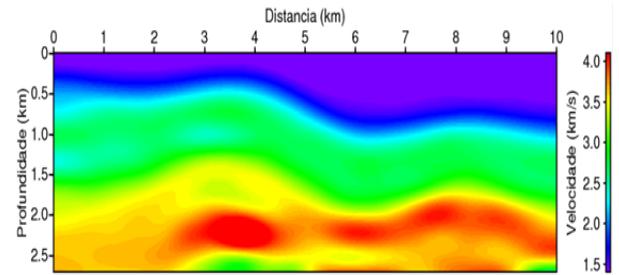


Fig.9. Modelo de velocidades do dado sintético obtido como resultado da inversão tomográfica da onda NIP.

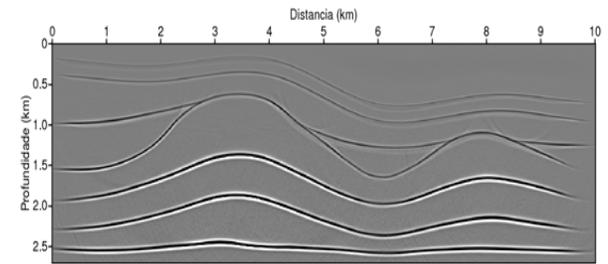


Fig.10. Resultado da migração pré-empilhamento em profundidade tipo Kirchhoff do dado sintético usando o modelo de velocidades obtido através da tomografia da onda NIP.

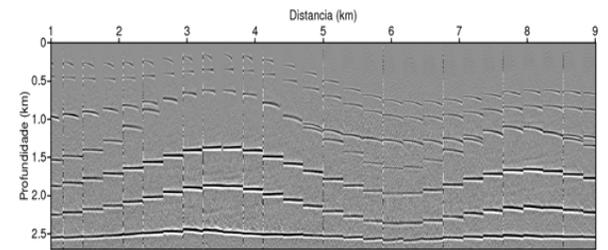


Fig.11. Famílias de imagem comum (CIG) da migração pré-empilhamento em profundidade tipo Kirchhoff usando o modelo de velocidades obtido através da tomografia da onda NIP.

Análise dos Resultados

Podemos observar que em relação ao modelo exato (Fig.5) a estimação dos modelos de velocidades (Fig.6 e 9) de ambas as aproximações tomográficas, foram consistentes e satisfatórias, com fortes semelhanças na profundidade abaixo de 1 km. Para níveis mais rasos, vimos que o modelo obtido pela Estereotomografia apresentou camadas com velocidades mais próximas às do modelo exato e com uma distribuição de valores mais uniforme. Enquanto que o modelo obtido pela Tomografia da onda NIP, apresentou uma distribuição de velocidades pouco uniforme e, em determinadas regiões, diferentes do modelo exato. Como é o caso na região entre as posições 2 e 4 km e entre as profundidades 2 e 2,5 km, que além de apresentar velocidade acima do exato, não se distribui por todo modelo, ou seja, apresenta feições esféricas ao invés de acompanhar a geologia. Abaixo da profundidade 2,5 km, além da distribuição não uniforme, foram obtidas velocidades mais baixa que o exato, como é o caso entre as posições 3 e 5 km e 9 e 10 km. Em contrapartida, é possível notar a boa continuidade da interface que se inicia aproximadamente na profundidade 2 km, representada pela velocidade de 3,4 km/s, em amarelo.

A imagem migrada do modelo estereotomográfico (Fig.7), acompanhou melhor as sinuosidades das interfaces, comparada com a obtida a partir do resultado da Tomografia da onda NIP (Fig.10). Através da imagem migrada do modelo estereotomográfico vimos que as interfaces acompanham melhor as do modelo exato (Fig.5), principalmente do início do modelo até 5 km, e entre 5 e 10 km acima da profundidade 1,5 km. No restante do modelo, as duas interfaces mostram sinuosidades mais acentuadas do que as do modelo exato. A última interface não permaneceu perfeitamente horizontal. Na imagem migrada do modelo tomográfico da onda NIP, com exceção das duas primeiras interfaces que acompanham muito bem as do modelo exato, o restante das interfaces mostram sinuosidades bem mais acentuadas do que as do modelo exato. A última interface, correspondente ao embasamento, perdeu um pouco a horizontalidade entre as posições 2 e 7 km. As CIG ficaram horizontalizadas em todo modelo estereotomográfico (Fig.8), já o modelo tomográfico da onda NIP (Fig.11), observamos eventos parcialmente horizontalizados acima da profundidade 1,5 km e horizontalizados abaixo desta.

Conclusões

O exemplo do dado sintético consistiu de um modelo com variação suave e crescente de velocidade na profundidade, bem como, variações laterais de velocidades. Ambos os métodos tomográficos forneceram resultados representativos e as diferenças encontradas foram sutis. Porém, a Estereotomografia revelou um modelo mais condizente com o modelo exato, principalmente nas partes onde há dobras e variações de velocidades laterais. Logo este é mais preciso por trabalhar com parâmetros associados à coerência local (*slopes*), enquanto que a Tomografia da onda NIP usa uma aproximação hiperbólica para determinar os

parâmetros da inversão, implicando que nesses trechos onde há variação lateral de velocidades, as reflexões não têm comportamento hiperbólico.

Conclui-se neste trabalho que ambos os métodos tomográficos são robustos e fornecem modelos de velocidades representativos que podem ser utilizados como modelos iniciais para outros métodos de análise de velocidades. No entanto, salienta-se que devido às particularidades atribuídas ao desenvolvimento teórico de cada método, estes sofrem influência direta no que diz respeito ao seu desempenho, visto que cada um está sujeito à especificidade do dado (ex: geometria, razão sinal/ruído) e conseqüentemente da geologia (ex: variação de velocidade lateral).

Referências

- BILLETTE, F.; LAMBARÉ, G. Velocity macro-model estimation from seismic reflection data by stereotomography. *Geophys. J. Int.*, v. 135, p. 671-690, 1998.
- BILLETTE, F.; LE BÉCAT, S.; PODVIN, P.; LAMBARÉ, G. Practical aspects and applications of 2d stereotomography. *Geophysics*, v. 68, n. 3, p. 1008-1021, 2003.
- DUVENECK, E. Tomographic determination of seismic velocity models with kinematic wavefield attributes. 2004. 181. Dissertation (Máster) - University of Karlsruhe, Germany, 2004.
- DUVENECK, E.; HUBRAL, P. Tomographic velocity model inversion using kinematic wavefield attributes. *Expanded Abstracts: 72nd Annual Meeting SEG*, pp. 862-865, 2002.
- HERTWECK, T.; MANN, J.; KLUVER, T. Event-consistent smoothing in the context of the CRS stack method. *Journal of Seismic Exploration*, 14:197-215, 2005.
- HUBRAL, P. H. W. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogenous earth. *Geophysics*, V.48, p.1051-1062, 1983.
- GARABITO CALLAPINO, G. Empilhamento sísmico por superfície de reflexão comum: um novo algoritmo usando otimização global e local. 2001. 65f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2001.
- PAIGE, C. C.; SAUNDERS, M. A. Algorithm 583 - LSQR: Sparse linear equations and least squares problems. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 8:195-209, 1982a.
- RIABINKIN, L. A. Fundamentals of resolving power controlled directional reception (CDR) of seismic waves, in *Slant stack Processing*, Geophysics Reprint Series, 1991 Soc. Expl. Geophy., Vol. 14 Translated and paraphrased from *Prikladnaya*, v. 16, n. 3-36, 1957.
- SWORD, C. H. Tomographic determination of interval velocities from reflection seismic data: the method of controlled directional reception, *PhD thesis*, Stanford University, 1987.