



## Tomografia ultrasônica em testemunhos: simulação de inclusões e interlaminações

Michelli Silva de Oliveira<sup>1,2</sup>, José Agnelo Soares<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bolsista do CNPq <sup>2</sup> Departamento de Geologia da UFRJ.

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility 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

This work presents a simulation study for ultrasonic tomography in cores. More specifically, the capacity of this technique to image inclusions and interlaminated units is investigated. Tomograms representing internal P wave velocities of virtual cores are obtained. These virtual cores are defined in terms of initial velocity models that have zones of high or low wave velocity. The ultrasonic tomography technique is based on ray tracing through an arbitrary grid of cells with constant velocities. Tomograms are obtained as a result of a data inversion algorithm that, in this work, uses alternatively, the algebraic reconstruction technique (ART) or the piecewise polynomial truncated singular values decomposition (PP-TSVD) one. Five different initial models, representing reasonable geological cores, were tested. All results were considered acceptable, but for strong contrasts of velocity the inversion algorithms do not work so perfectly, what is believed due to the using of straight ray paths.

### Introdução

As técnicas de exploração geológica, com o objetivo de avaliar a ocorrência e a viabilidade de exploração de reservatórios de petróleo e gás são, em grande parte, suportadas pela aplicação dos métodos sísmicos. As velocidades de propagação das ondas elásticas são controladas por diversas variáveis petrofísicas e ambientais. A tomografia ultrasônica em testemunhos pode ser usada para identificar características petrofísicas, como composição mineral da rocha, presença de heterogeneidades, descontinuidades ou distribuição interna de tensões, conforme Scott Jr *et al.* (1994) e Watanabe *et al.* (1996).

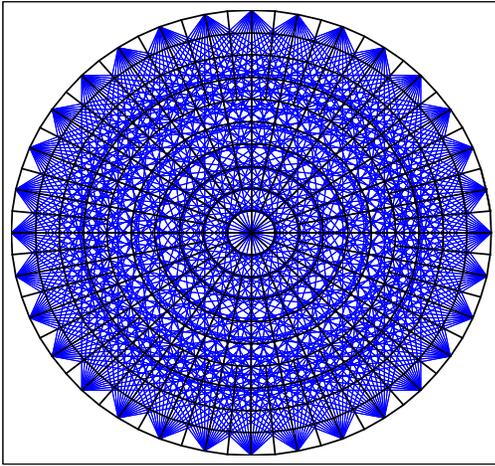
Este trabalho apresenta o resultado da simulação da técnica de tomografia ultrasônica em testemunhos, para cinco modelos distintos os quais representam situações geológicas reais. O primeiro modelo é uma representação de uma seção reta de testemunho onde se observam duas zonas elípticas concêntricas com velocidades distintas entre si e do meio no qual elas se encontram inseridas. Este modelo pode representar, por exemplo, uma inclusão mineral qualquer com forma elíptica apresentando zonas de intercrescimento. O segundo e terceiro modelos representam inclusões circulares e concêntricas, de modo similar ao primeiro

modelo. Eles se diferenciam entre si pelo fato do segundo modelo ter a inclusão posicionada no seu centro, enquanto que o terceiro modelo tem a mesma inclusão fortemente deslocada do seu centro. A idéia é testar, pela comparação dos tomogramas obtidos para o segundo e terceiro modelos, a eficiência da inversão em reproduzir situações com diferentes níveis de simetria. O quarto e quinto modelos representam rochas interlaminações as quais foram testemunhadas na direção paralela ao plano de estratificação. Nestes modelos considera-se uma rocha interlaminação com apenas dois tipos litológicos que se alternam continuamente. O quarto modelo simula a condição no qual os estratos de ambas as litologias possuem mesma espessura, enquanto que o quinto modelo representa uma rocha onde um dos litotipos se apresenta em camadas muito delgadas em relação ao outro litotipo. Em cada modelo, testa-se ainda o efeito do contraste de velocidade sobre a qualidade dos tomogramas obtidos.

### Tomografia ultrasônica em testemunhos

O método tomográfico é utilizado para gerar imagens internas de objetos fechados. Para gerar os tomogramas é preciso definir uma malha de discretização a qual divide a seção imageada em pequenas células com velocidades constantes. Na aplicação do método tomográfico em testemunhos, de acordo com Soares *et al.* (2004), recomenda-se um arranjo com 32 transdutores regularmente espaçados. Considera-se ainda que cada fonte irradia apenas para os receptores dispostos no hemisfério oposto à fonte ativa e que a propagação das ondas se dá na forma de raios retos. A Figura 1 apresenta a seção reta do testemunho com a malha de discretização utilizada e o traçamento dos raios retos.

O esquema de aquisição resultou em 544 raios e a malha de discretização radial, mostrada na Figura 1, contém 408 células. Cada um dos raios registrados fornece um valor de tempo de trânsito total de percurso entre um determinado par fonte-receptor, o que fornece, no final do processo de aquisição, um vetor de tempos com 544 elementos (tempos totais de trânsito). Para gerar um tomograma é preciso transformar essa informação de tempos totais entre pares fonte-receptor em tempos de trânsito dentro de cada uma das células atravessadas por cada um dos raios. O tempo de trânsito total somente pode fornecer diretamente a velocidade média de percurso, desde que se conheça a distância fonte-receptor, mas não é essa a informação desejada. O que se almeja conhecer é como varia a velocidade ao longo de cada percurso do raio, ou seja, qual a velocidade em cada uma das células da malha de discretização. Para alcançar essa informação é preciso recorrer ao processo matemático de inversão dos dados.



**Figura 1** – Seção reta do testemunho com a malha de discretização (em preto) e os raios (em azul).

Como estamos interessados em conhecer a velocidade da onda em cada uma das células, é preciso conhecer antes os comprimentos dos segmentos dos raios dentro de cada uma das células. A matriz, com número de linhas dado pelo número de raios e número de colunas igual ao número de células, e cujos elementos são os comprimentos dos segmentos de raios, é a chamada matriz jacobiana.

Em um processo qualquer de inversão, os dados são organizados da seguinte forma:

$$\begin{array}{c} \text{Número da célula} \rightarrow \\ \begin{array}{c} \text{Número do raio} \downarrow \\ \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \end{array} \end{array} \cdot \begin{bmatrix} 1/v_1 \\ 1/v_2 \\ \vdots \\ 1/v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde o primeiro elemento é a matriz jacobiana e os dois outros são os vetores de vagarosidade e de tempos. A vagarosidade corresponde ao inverso da velocidade, e o vetor de vagarosidades (um elemento para cada uma das células) é o resultado da inversão dos dados.

Neste trabalho apresentaremos resultados da simulação de uma aquisição de tomografia ultrasônica em testemunhos, para os quais foram utilizados dois algoritmos alternativos de inversão: um que utiliza a técnica de decomposição em valores singulares (PP-TSVD), e outro que usa a técnica de reconstrução algébrica (ART).

### Simulações tomográficas em testemunhos

Para simular a aquisição tomográfica em testemunhos, é preciso adotar um modelo inicial de velocidades e, para o modelo adotado, calcular o vetor de tempos de trânsito correspondente. Uma vez que a geometria da seção reta dos testemunhos é assumida como imutável, a malha de discretização e o esquema de aquisição adotados também são os mesmos para todos os modelos, basta então calcular a matriz jacobiana uma única vez e utilizá-la em todas as simulações.

### Modelo elíptico deslocado

O modelo elíptico deslocado representa uma seção reta de testemunho onde se observam duas zonas elípticas concêntricas e deslocadas do centro do modelo. Este modelo é apresentado na Figura 2.

As Figuras 3 a 5 mostram os resultados obtidos utilizando-se o programa de inversão ART, considerando o modelo inicial de velocidades apresentado na Figura 2. Os tomogramas obtidos reproduzem razoavelmente o modelo inicial de velocidades, com uma pequena perda de qualidade na Figura 4, onde ocorre um maior contraste de velocidade (de  $V_2$  para  $v_3$ ).

### Modelo circular centralizado

O modelo circular centralizado representa uma inclusão circular e concêntrica no centro do modelo, constituindo três zonas com velocidades distintas. Este modelo é apresentado na Figura 6.

As Figuras 7 a 10 mostram os tomogramas, obtidos pelo programa de inversão PP-TSVD, para o modelo da Figura 6. Esses tomogramas também reproduzem, razoavelmente, o modelo inicial da Figura 6.

### Modelo circular deslocado

Neste modelo a inclusão está fortemente deslocada do centro do modelo, o qual é apresentado na Figura 11.

As Figuras 12 a 15 mostram os resultados obtidos através do programa de inversão PP-TSVD, para o modelo da Figura 11. Apesar da assimetria desse modelo, os tomogramas o reproduzem, demonstrando a robustez da tomografia ultrasônica.

### Modelo interestratificado com estratos de mesma espessura

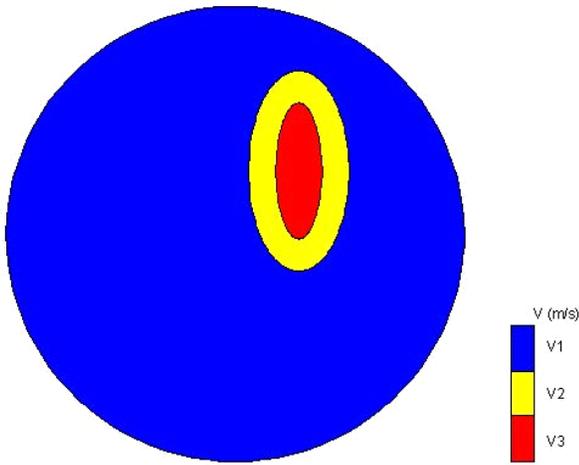
Neste modelo considera-se uma rocha interestratificada e testemunhada na direção paralela ao plano de estratificação, com apenas dois tipos litológicos de mesma espessura e que se alternam continuamente. Este modelo é apresentado na Figura 16.

As Figuras 17 a 19 mostram os resultados, obtidos por inversão ART, para o modelo inicial de velocidades apresentado na Figura 16. O modelo inicial é recuperado, mas com uma diminuição da acurácia no caso da Figura 19, a qual apresenta um maior contraste de velocidades.

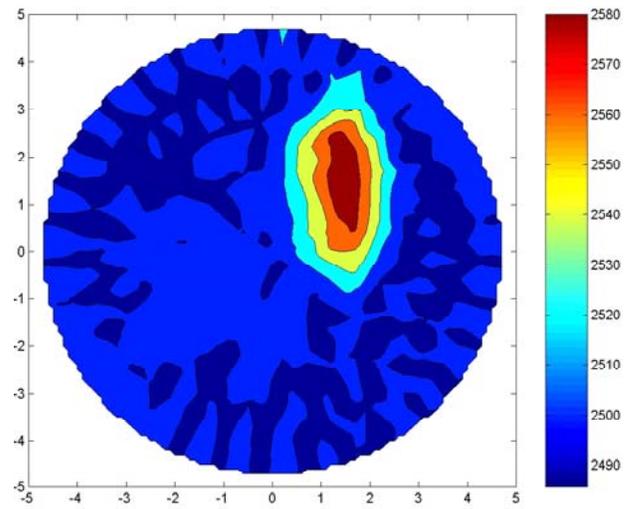
### Modelo interestratificado com estratos de espessuras diferentes

Neste modelo, com dois litotipos, considera-se que um deles apresenta camadas muito delgadas em relação ao outro litotipo. Este modelo é apresentado na Figura 20.

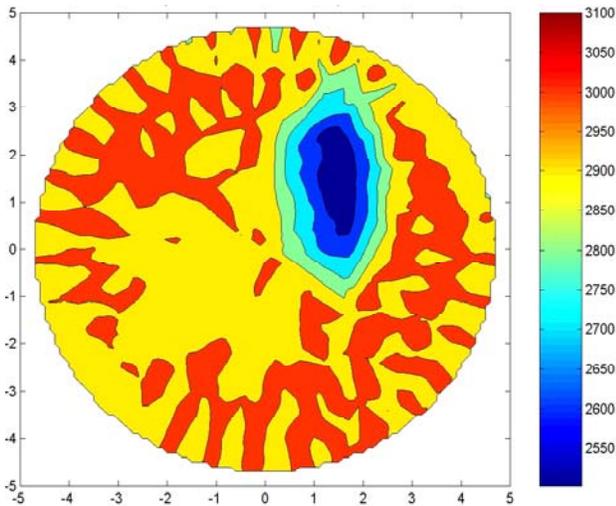
As Figuras 21 a 23 mostram os resultados obtidos pela inversão ART para o modelo apresentado na Figura 20. Apesar da diminuição da espessura das camadas, ainda foi possível recuperar razoavelmente o modelo inicial, embora com uma menor acurácia na determinação da espessura das camadas finas, o que indica o limite de resolução do método. Observa-se ainda uma perda de qualidade na Figura 23 causada pelo aumento do contraste de velocidades.



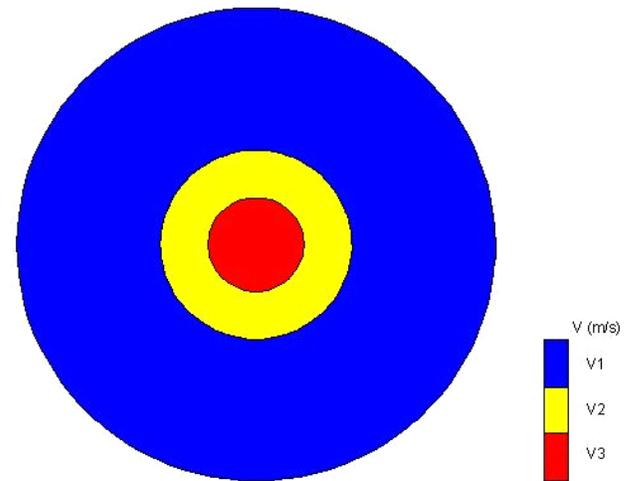
**Figura 2** – Distribuição inicial de velocidades para o modelo elíptico deslocado.



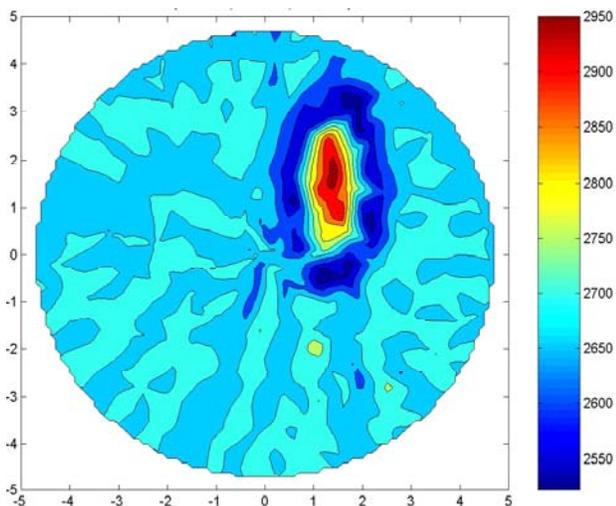
**Figura 5** - Tomograma para o modelo da Figura 2, com  $V1 = 2500$  m/s,  $V2 = 2550$  m/s e  $V3 = 2600$  m/s.



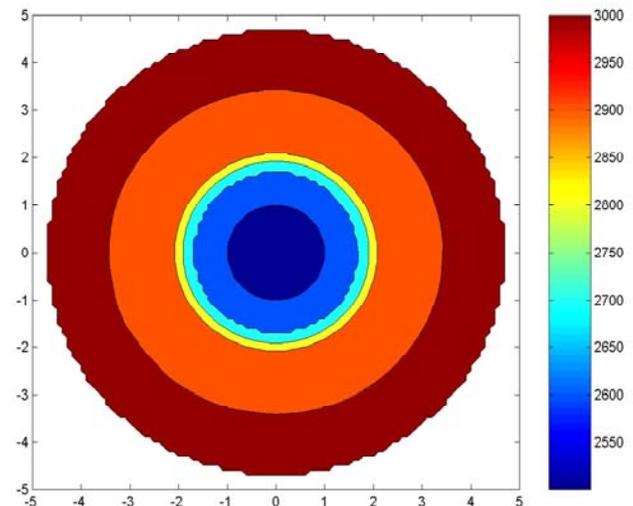
**Figura 3** - Tomograma para o modelo da Figura 2, com  $V1 = 3000$  m/s,  $V2 = 2700$  m/s e  $V3 = 2500$  m/s.



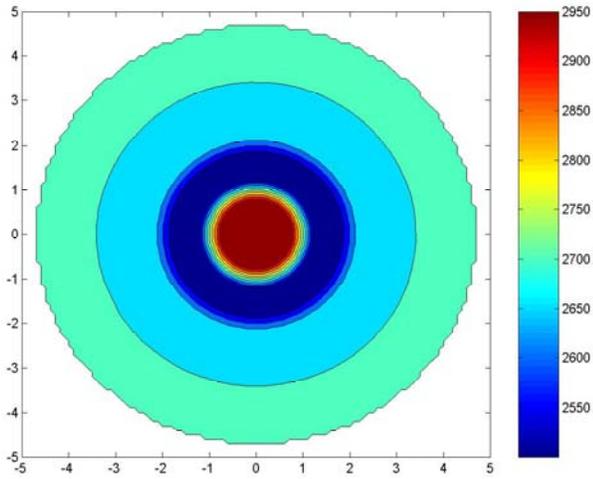
**Figura 6** – Distribuição inicial de velocidades para o modelo circular centralizado.



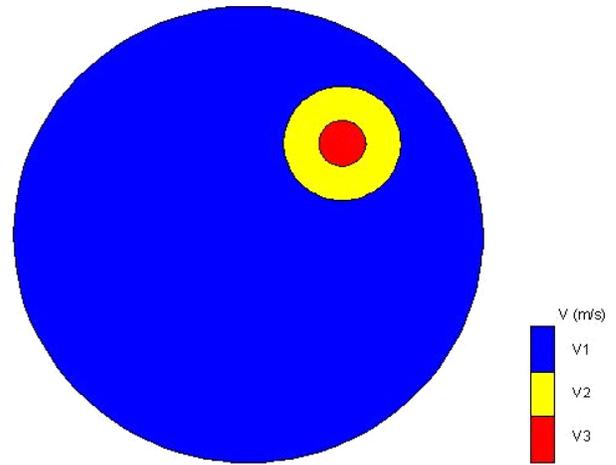
**Figura 4** - Tomograma para o modelo da Figura 2, com  $V1 = 2700$  m/s,  $V2 = 2500$  m/s e  $V3 = 3000$  m/s.



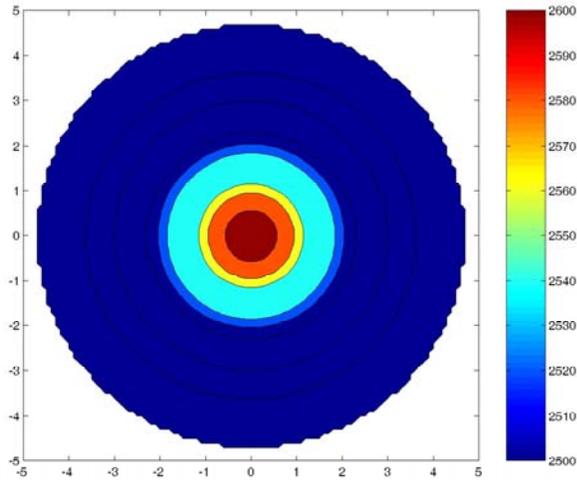
**Figura 7** - Tomograma para o modelo da Figura 6, com  $V1 = 3000$  m/s,  $V2 = 2700$  m/s e  $V3 = 2500$  m/s.



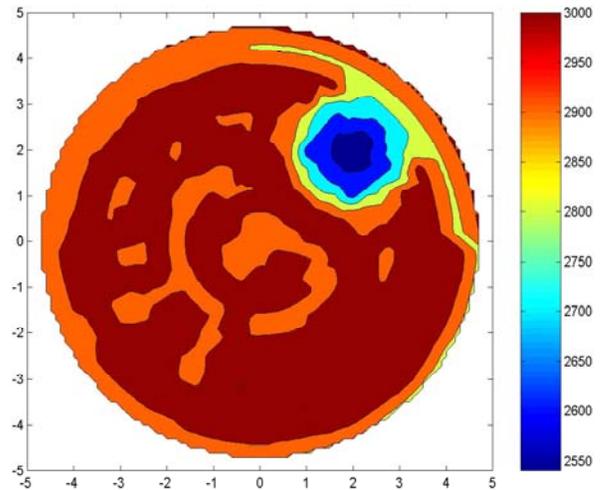
**Figura 8** - Tomograma para o modelo da Figura 6, com  $V1 = 2700$  m/s,  $V2 = 2500$  m/s e  $V3 = 3000$  m/s.



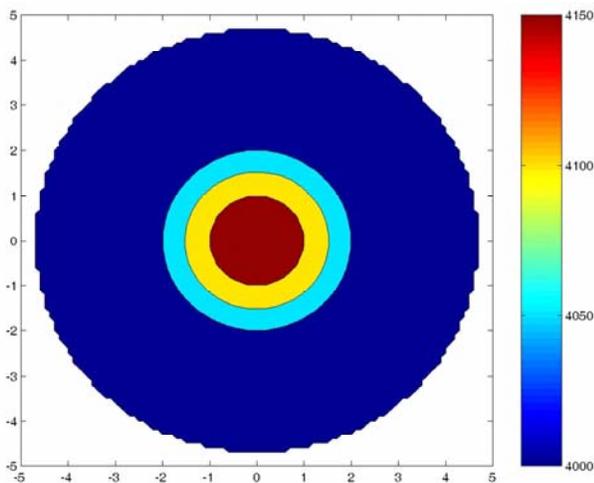
**Figura 11** - Distribuição inicial de velocidades para o modelo circular deslocado.



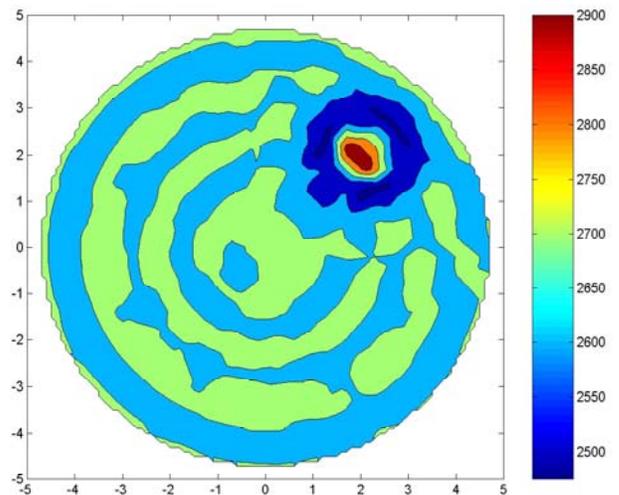
**Figura 9** - Tomograma para o modelo da Figura 6, com  $V1 = 2500$  m/s,  $V2 = 2550$  m/s e  $V3 = 2600$  m/s.



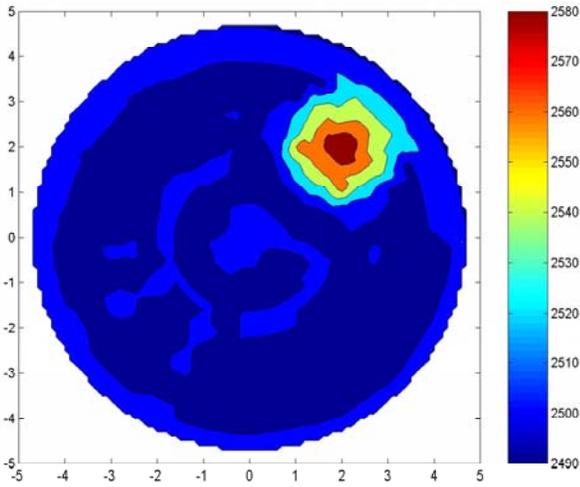
**Figura 12** - Tomograma para o modelo da Figura 11, com  $V1 = 3000$  m/s,  $V2 = 2700$  m/s e  $V3 = 2500$  m/s.



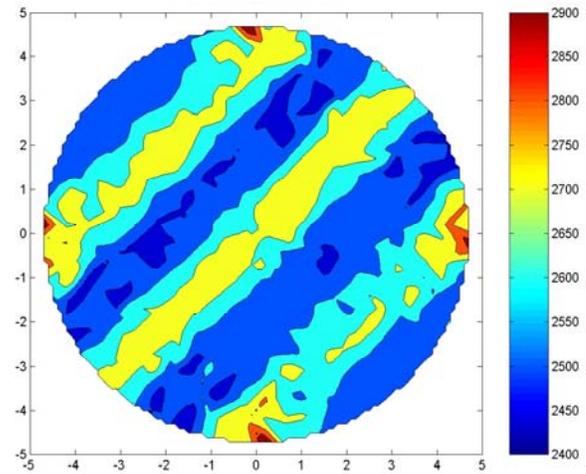
**Figura 10** - Tomograma para o modelo da Figura 6, com  $V1 = 4000$  m/s,  $V2 = 4100$  m/s e  $V3 = 4200$  m/s.



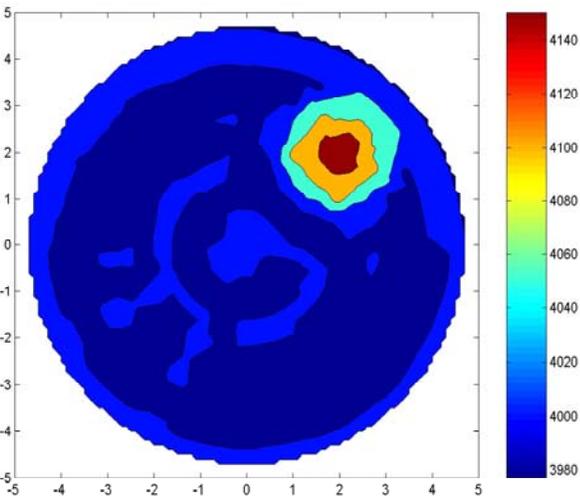
**Figura 13** - Tomograma para o modelo da Figura 11, com  $V1 = 2700$  m/s,  $V2 = 2500$  m/s e  $V3 = 3000$  m/s.



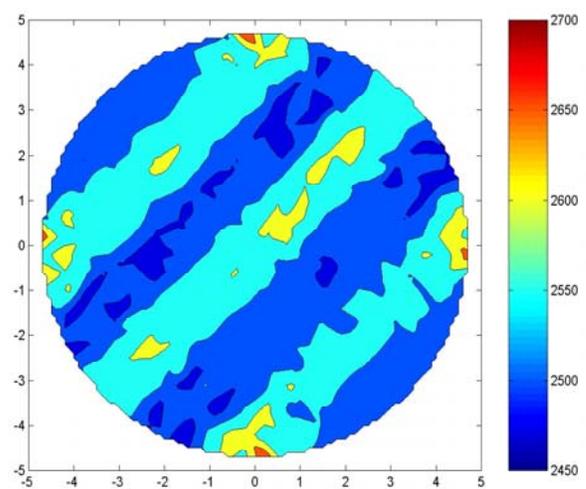
**Figura 14** - Tomograma para o modelo da Figura 11, com  $V_1 = 2500$  m/s,  $V_2 = 2550$  m/s e  $V_3 = 2600$  m/s.



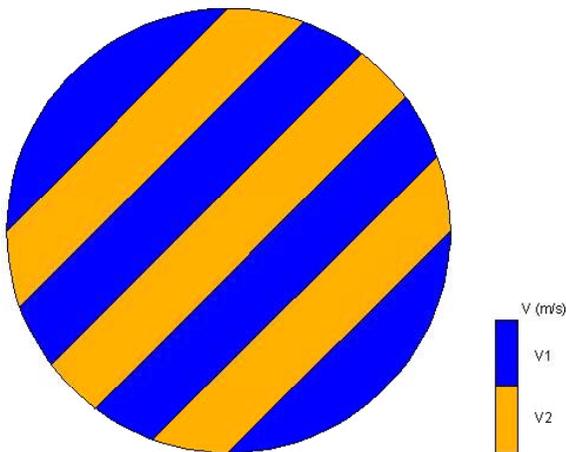
**Figura 17** - Tomograma para o modelo da Figura 16, com  $V_1 = 2500$  m/s e  $V_2 = 2750$  m/s.



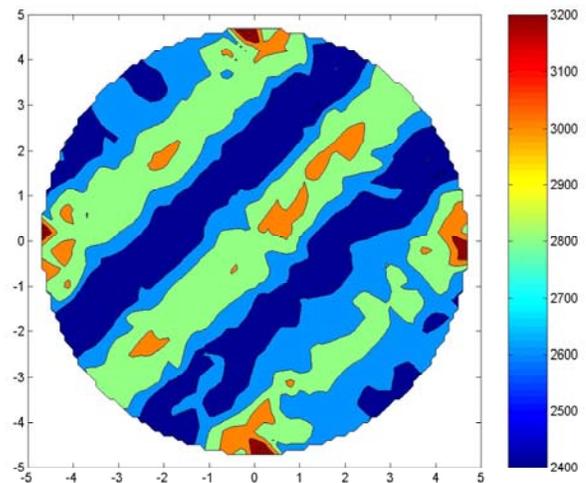
**Figura 15** - Tomograma para o modelo da Figura 11, com  $V_1 = 4000$  m/s,  $V_2 = 4100$  m/s e  $V_3 = 4200$  m/s.



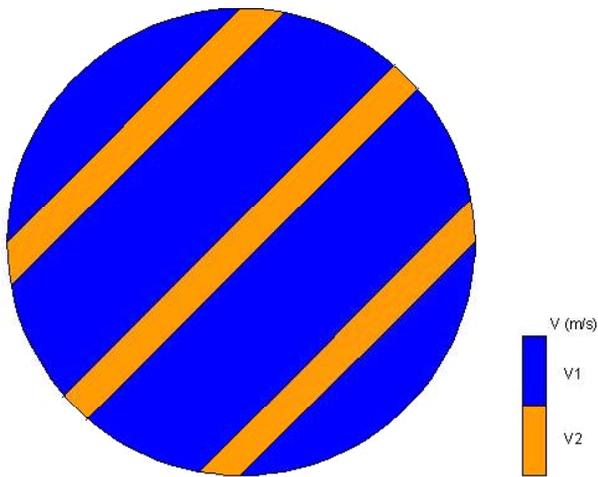
**Figura 18** - Tomograma para o modelo da Figura 16, com  $V_1 = 2500$  m/s e  $V_2 = 2600$  m/s.



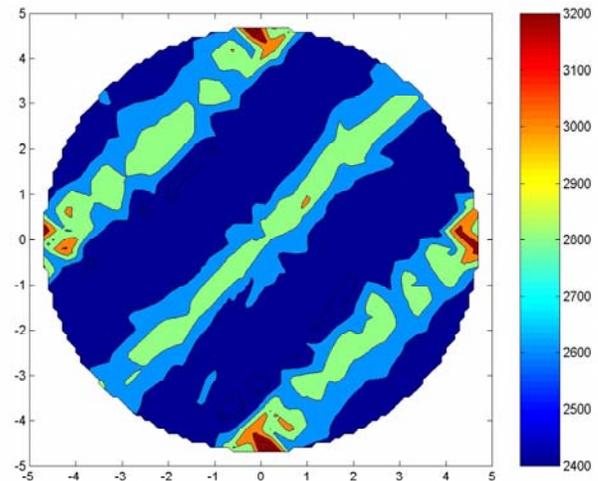
**Figura 16** - Distribuição inicial de velocidades para o modelo interestratificado com estratos de mesma espessura.



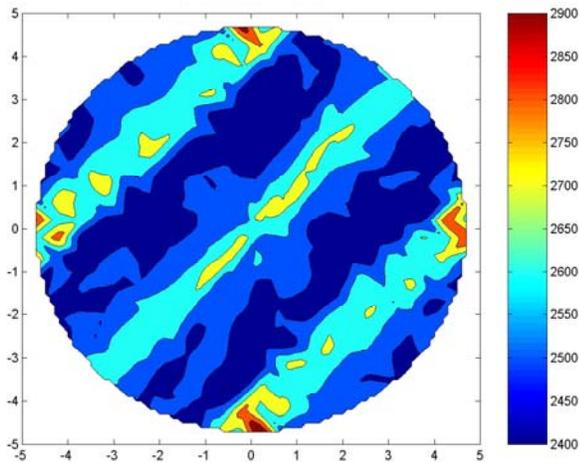
**Figura 19** - Tomograma para o modelo da Figura 16, com  $V_1 = 2500$  m/s e  $V_2 = 3000$  m/s.



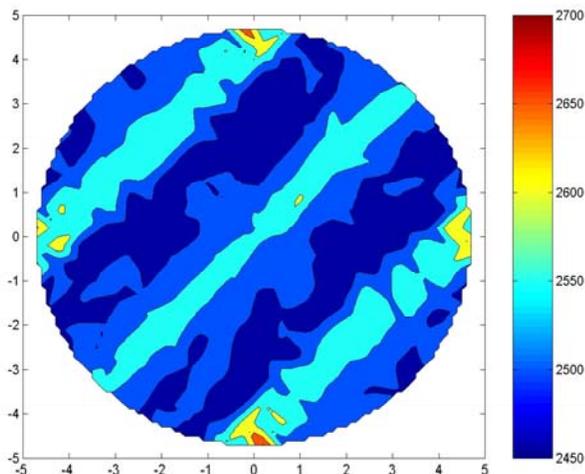
**Figura 20** – Distribuição inicial de velocidades para o modelo interestratificado com estratos de espessuras diferentes.



**Figura 23** - Tomograma para o modelo da Figura 20, com  $V1 = 2500$  m/s e  $V2 = 3000$  m/s.



**Figura 21** - Tomograma para o modelo da Figura 20, com  $V1 = 2500$  m/s e  $V2 = 2750$  m/s.



**Figura 22** - Tomograma para o modelo da Figura 20, com  $V1 = 2500$  m/s e  $V2 = 2600$  m/s.

### Conclusões

Os tomogramas obtidos reproduziram de forma aceitável, em geral, os modelos iniciais de velocidade. As formas das inclusões e das estruturas geológicas interlaminaadas foram bem recuperadas pelo processo de inversão, com uma perda de qualidade na presença de altos contrastes de velocidades. Os algoritmos de inversão utilizados apresentaram uma performance similar, o que os recomenda para a inversão de dados de tomografia ultrassônica de testemunhos. As simulações dos modelos interlaminaados mostram que a resolução do método tomográfico é limitada, ou seja, para camadas muito finas, embora estas sejam detectadas, a sua espessura não é corretamente mapeada.

### Agradecimentos

A autora Michelli Silva de Oliveira agradece ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado e aos professores Jadir da Conceição da Silva e Jorge Leonardo Martins pelo suporte de fundamental importância no trabalho de inversão dos dados e pelas valiosas discussões no desenvolvimento deste trabalho.

### Referências

- Soares, J.A., Silva, J.C., Martins, J.L., Bloch, M., Oliveira, M.S. (2004).** Ultrasonic tomography in cores. Abstracts of the 66<sup>th</sup> EAGE Conference. Paris, France. Paper G007.
- Scott T.E., Jr., Ma Q., Reches Z., Roegiers J.-C. (1994)** Acoustic tomographic difference imaging of dynamic stress fields, Proceeding EUROCK94, Amsterdam, September, 1994.
- Watanabe, T., Hirai, T., Sassa, K. (1996)** Seismic travelttime tomography in anisotropic heterogeneous media. *Journal of Applied Geophysics*, 35, 133-143.