

## Projeto e construção de um tomógrafo ultrassônico para testemunhos

José Agnelo Soares. Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro ([agnelo@geologia.ufri.br](mailto:agnelo@geologia.ufri.br))

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 paper presents the development of a novel petrophysical equipment, the ultrasonic tomograph for well cores, which may be used for several petrophysical analysis, as inhomogeneous composition, patch saturation or internal distribution of stress in rock samples. Initially, a brief introduction to seismic transmission tomography is done in order to drive the understanding of this imaging technique as a whole. Some particularities about well core tomography are discussed, as the number of piezoelectric transducers to be distributed around the core section, the grid of cells used for velocity determination, the algorithm used for data inversion, and the simplification of considering straight ray tracing. Details about the project of this equipment, which at the moment of writing of this paper was yet under construction, are presented. Finally, the effect of stresses on rock velocities is investigated and the results indicate the ultrasonic tomography of orientated cores as a very promising technique for determination of direction and magnitude of *in situ* stress.

### Introdução

A tomografia é um método amplamente usado para registrar imagens internas de objetos fechados, entre os quais podemos incluir a Terra. No caso do imageamento da subsuperfície terrestre, a principal técnica utilizada, para alvos relativamente profundos, é o imageamento sísmico, o qual pode ser de superfície ou entre poços. No caso da sísmica interpoços, são usados algoritmos de inversão matemática a fim de se obter imagens que mostram a variação das velocidades elásticas (no plano vertical definido pelos poços), os chamados tomogramas. A Figura 1, por exemplo, representa um esquema de aquisição sísmica interpoços para fins de inversão tomográfica, enquanto que a Figura 2 apresenta o tomograma resultante da inversão dos dados registrados. Na extremidade esquerda da Figura 1 está representado um poço dentro do qual há uma série de fontes sísmicas regularmente espaçadas, enquanto que na extremidade direita há um outro poço com uma série de receptores (hidrofonos) também regularmente espaçados. Para fins de ilustração, na Figura 1 são ainda apresentados, nas cores rosa e azul, os raios oriundos de duas das fontes. A rigor, de acordo com a lei de Snell para a refração, os raios são desviados nas interfaces entre zonas de

diferentes impedâncias elásticas, fazendo com esses raios tenham uma trajetória curva. Por razão de simplicidade, neste exemplo os raios são assumidos como retos, o que representa uma simplificação do problema.

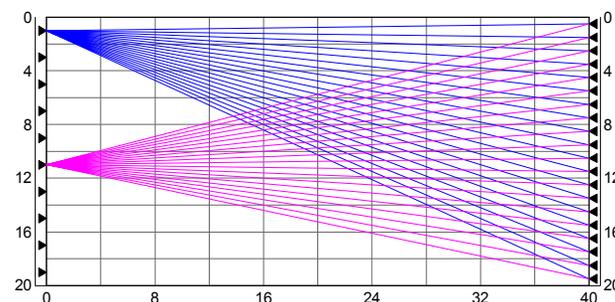


Figura 1 – Exemplo esquemático de um levantamento sísmico interpoços.

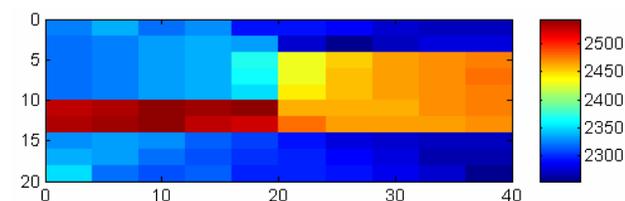


Figura 2 – Tomograma resultante da inversão dos dados registrados pela sísmica interpoços da Figura 1.

Os tomogramas, como o da Figura 2, são resultantes da inversão matemática dos tempos de trânsito registrados pelo conjunto de receptores posicionados em uma das extremidades da seção (neste caso, o poço do lado direito). Para executar a inversão é preciso antes discretizar a seção, ou seja, definir uma malha para a qual cada célula terá assinalado, pelo processo de inversão, um valor de velocidade. Na Figura 1, a malha de discretização corresponde à malha retangular desenhada na cor preta.

A principal informação registrada em um levantamento sísmico de tomografia interpoços é o conjunto de tempos de trânsito da onda entre os diversos pares fonte-receptor. Para transformar essa informação (tempo) em velocidade, é preciso conhecer a distância percorrida por cada raio. Como estamos interessados em conhecer as velocidades dentro de cada célula da malha de discretização, precisamos então conhecer os comprimentos dos segmentos dos raios dentro de cada uma das células. A matriz cujos elementos são os comprimentos desses segmentos de raio é chamada de matriz jacobiana e ela é obtida pela superposição do traçamento de raios com a malha de discretização. Como a velocidade, por definição, é dada pela razão entre o espaço e o tempo, podemos escrever

$$\left[ \frac{1}{V} \right] = \left[ \frac{t}{x} \right] \quad (1)$$

onde  $[t]$  é o vetor dos tempos de trânsito registrados,  $[x]$  é a matriz jacobiana, e  $\left[ \frac{1}{V} \right]$  é o vetor de vagarosidades. A vagarosidade é uma grandeza dada pelo inverso da velocidade. Desses três elementos, conhecemos o vetor dos tempos e matriz jacobiana, e o vetor de vagarosidades é o resultado da inversão. Portanto, para encontrar o vetor de vagarosidades, ou o seu inverso, o vetor de velocidades, é preciso antes encontrar a matriz inversa da jacobiana e multiplicá-la pelo vetor dos tempos de trânsito registrados. Daí, o termo inversão de dados. É corrente usar o termo inversão de dados referindo-se à construção de um modelo físico a partir da análise de um conjunto de dados. Esta forma genérica de se referir ao processo de inversão não está errada, mas a sua definição, a rigor, é um processo puramente matemático.

Os dados trabalhados em um processo de inversão são organizados em um sistema de equações da seguinte forma:

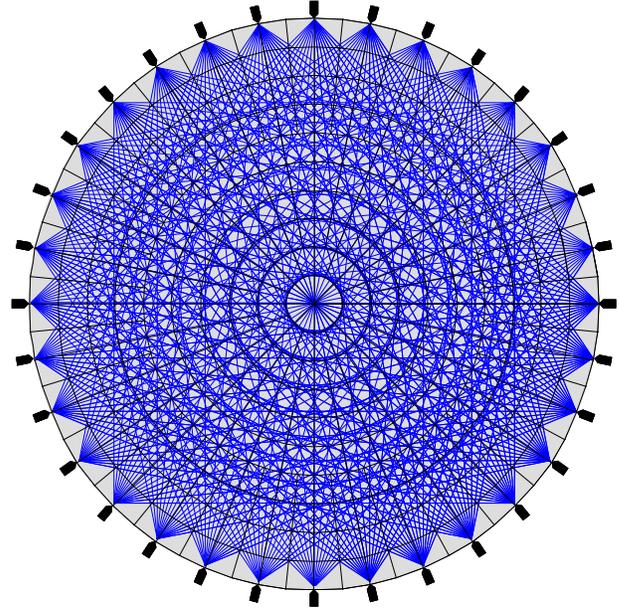
$$\begin{array}{c} \text{Número da célula} \\ \rightarrow \\ \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{V_1} \\ \frac{1}{V_2} \\ \vdots \\ \frac{1}{V_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_m \end{bmatrix} \quad (2) \\ \left. \begin{array}{c} \text{Número do raio} \\ \downarrow \end{array} \right\} \end{array}$$

onde o primeiro elemento é a matriz jacobiana e os dois outros são os vetores de vagarosidade e de tempo. O número  $m$  de elementos do vetor dos tempos é igual ao número de pares fonte-receptor do sistema de aquisição (ou o número de raios), o vetor das vagarosidades, por sua vez, tem o mesmo tamanho  $n$  do número de células da malha de discretização, enquanto que a matriz jacobiana tem a dimensão do número de células pelo número de raios ( $m \times n$ ).

### Tomografia ultrassônica em testemunhos

Scott Jr *et al.* (1993) mostraram, através de um experimento utilizando 20 transdutores piezoelétricos colados em torno de um testemunho, que é possível imagear, pela geração de um tomograma da seção reta, a distribuição das tensões internas no testemunho. Já Soares *et al.* (2004) apresentaram os resultados de um estudo no qual se demonstrou, através de diversas simulações, que é possível imagear heterogeneidades internas de um testemunho através do método de tomografia ultrassônica. Essas heterogeneidades são representadas por zonas com velocidades maiores ou menores que a velocidade média. Demonstrou-se ainda que, usando um arranjo composto por trinta e dois transdutores ultrassônicos em volta do testemunho, ainda que fosse adotada a simplificação do raio reto, o modelo inicial podia ser relativamente bem recuperado, desde que os contrastes de velocidades não fossem excessivamente elevados. Neste trabalho, será adotada

a mesma malha de discretização e o mesmo arranjo de transdutores utilizados em Soares *et al.* (2004). Este esquema de aquisição, mostrado na Figura 3, resulta em 544 raios e 408 células de discretização.



**Figura 3** – Esquema de disposição dos 32 eletrodos em volta do testemunho, com os respectivos 544 raios e as 408 células da malha de discretização.

### O projeto construtivo do tomógrafo

Com base nas simulações feitas, foi desenvolvido o projeto construtivo do tomógrafo ultrassônico. O equipamento é composto por um grande anel de alumínio com 32 pistões regularmente distribuídos ao longo da circunferência do anel. Os pistões têm acionamento pneumático e, no seu interior, cada pistão contém um transdutor piezoelétrico que tanto pode ser um transdutor de onda P quanto um transdutor de onda S. Com o objetivo de testar alguns itens planejados para o equipamento projetado, foi construído um protótipo do tomógrafo (vide Figura 4), com apenas dois pistões, onde experimentalmente se determinou que a pressão ideal de trabalho dos pistões é de 200 psi. Com este nível de pressão dos pistões sobre o testemunho, garante-se o necessário acoplamento acústico, sem causar danos mecânicos significativos no testemunho. Testemunhos de rochas mal consolidadas ficam susceptíveis a danos maiores, o que eventualmente pode inviabilizar o uso do tomógrafo para o imageamento de rochas desse tipo.

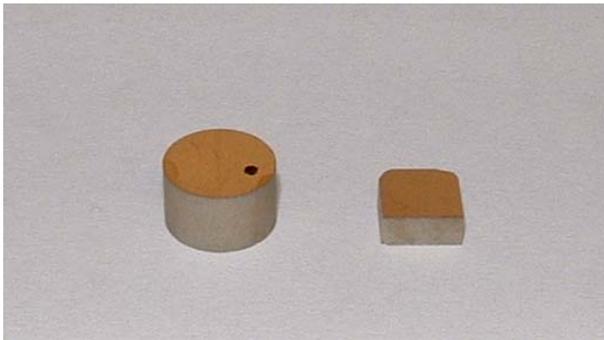
Os transdutores utilizados são basicamente um sanduíche construído com duas placas metálicas recheado pela cerâmica artificial PZT (Zircotitanato de Chumbo). Esta cerâmica possui propriedades piezoelétricas, ou seja, quando submetida a uma diferença de potencial elétrico, ela se deforma com amplitude e frequência central que dependem da geometria do cristal. Por outro lado, quando submetida a uma deformação, gera uma diferença de potencial entre as duas placas. Portanto, os cristais piezoelétricos agem

tanto como fontes como também como receptores. Eles são, na verdade, convertedores de energia, da forma elétrica para a mecânica, e vice-versa.



**Figura 4** – Protótipo do tomógrafo ultrassônico, construído para testar alguns itens do equipamento final.

A Figura 5 apresenta dois transdutores piezoelétricos, um de onda P e outro de onda S, utilizados no tomógrafo ultrassônico. A frequência central dos transdutores é de 500 KHz, o que confere aos tomogramas uma resolução da ordem de 5mm. O valor exato da resolução depende também das velocidades apresentadas pelo testemunho. De um modo geral, quanto maior a velocidade, menor a resolução. Na Figura 5 o diâmetro do transdutor de onda P (redondo) é 7mm e o lado do transdutor de onda S (quadrado) tem o comprimento de 5mm. Essas dimensões foram definidas com base no diâmetro e comprimento ideais para os pistões do tomógrafo.



**Figura 5** – Transdutores de onda P (esquerda) e de onda S (direita) utilizados no tomógrafo ultrassônico para testemunhos.

O sistema de aquisição de dados e controle do tomógrafo é gerenciado por um computador, o qual contém diversos componentes especializados para o controle, aquisição e processamento dos dados. Esse sistema contém internamente um osciloscópio digital, relés de chaveamento para 200 canais e *softwares* de automação e controle. Todo o processo (controle do aparelho, aquisição, armazenamento, tratamento e inversão dos dados) é automatizado.

A Figura 6 apresenta um desenho esquemático do equipamento projetado. Ele possui um anel que contém os pistões com os transdutores piezoelétricos. O testemunho é inserido no equipamento de modo que os pistões o envolvem ao longo de uma seção reta. O sistema de controle e aquisição controla o deslocamento vertical do anel ao longo do testemunho, definindo a seção reta imageada em cada ensaio. No entanto, a principal função do sistema de aquisição e controle é distribuir, a cada instante, as funções de emissão e recepção das ondas entre os 32 transdutores, além de registrar os sinais recebidos, e medir os tempos referentes à primeira quebra das ondas.

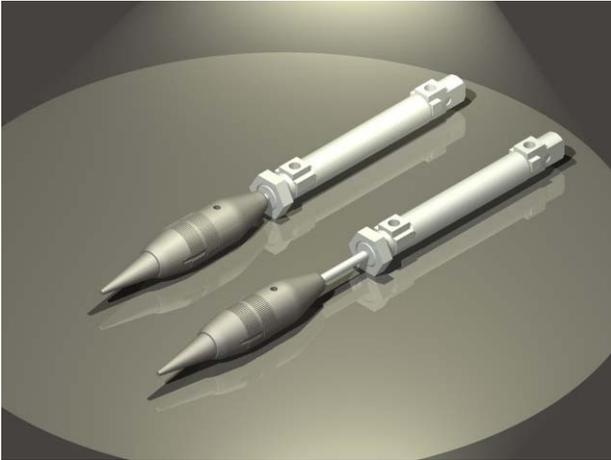


**Figura 6** – Desenho esquemático do tomógrafo ultrassônico projetado.

O elemento sensor do tomógrafo ultrassônico se constitui no componente principal do equipamento. Este tomógrafo foi projetado de modo que os transdutores pudessem ser continuamente reutilizados, uma vez que esses componentes importados são relativamente caros. Este é um caráter inovador no desenvolvimento deste equipamento de tomografia ultrassônica, um ganho substancial em relação a trabalhos anteriores como o de Scott Jr *et al.* (1993) onde os transdutores eram colados, com uma resina epóxi, na parede do testemunho, o que os inutilizava para o registro de novos tomogramas.

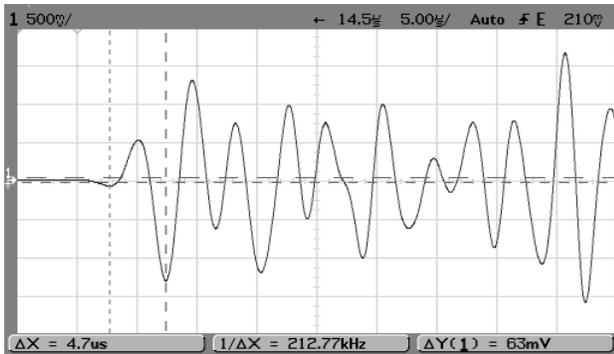
A Figura 7 mostra o desenho esquemático de dois pistões, um com o lanço recolhido e outro com o lanço estendido. Esse movimento do lanço permite colocar a

ponta da cápsula, que contém o transdutor, em contato direto com o testemunho.



**Figura 7** – Desenho esquemático dos pistões cujas cápsulas, na extremidade do seu lança, contém os transdutores piezoelétricos.

Para fins de ilustração, a Figura 8 apresenta um traço registrado pelo equipamento protótipo (Figura 4).



**Figura 8** – Exemplo de traço, da onda P, registrado pelo protótipo do tomógrafo.

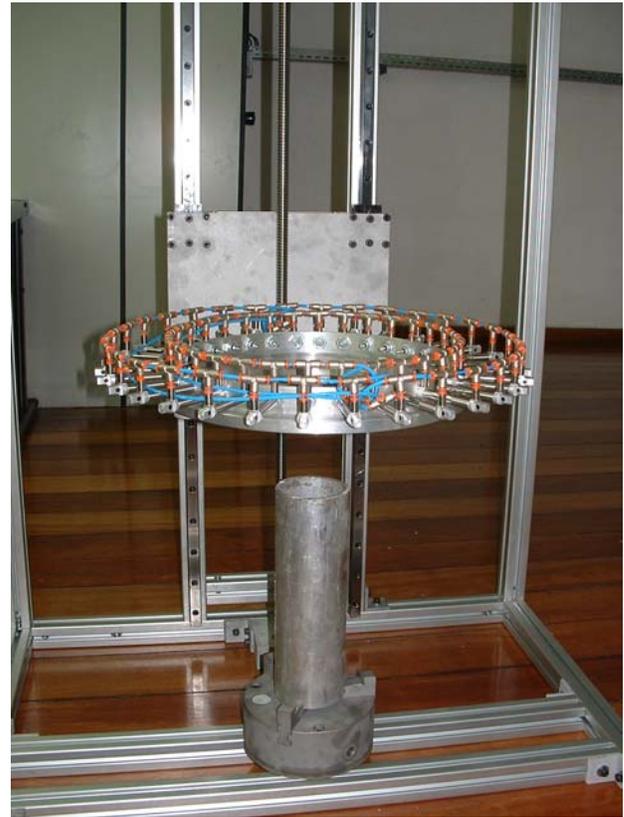
### Estágio atual de construção do tomógrafo

No momento em que este artigo foi escrito o tomógrafo se encontrava ainda em fase de construção. Todos os componentes eletrônicos necessários já haviam sido adquiridos e as peças mecânicas usinadas. Os sistemas mecânico e pneumático haviam sido montados, e a montagem da parte eletrônica se encontrava em desenvolvimento. A fotografia da Figura 9 mostra, em parte, o estágio atual de construção do tomógrafo.

### Efeito das tensões sobre os tomogramas acústicos

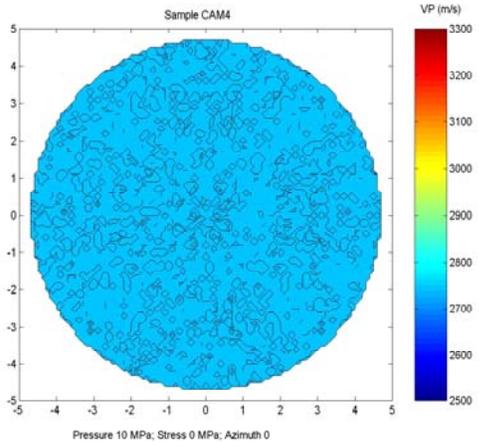
Com o objetivo de simular o efeito das tensões sobre a variação de velocidades internas em testemunhos, foram considerados os parâmetros elásticos de segunda e terceira ordem da amostra de arenito CAM4, conforme metodologia descrita em Soares *et al.* (2002). Conhecendo-se esses parâmetros elásticos, é possível prever as velocidades elásticas apresentadas pela rocha quando submetida a qualquer estado de tensões.

As Figuras 10 a 15 são tomogramas da amostra CAM4 simulados para vários estados de tensão. O efeito do aumento na tensão compressiva ( $\sigma$ ) aplicada na direção vertical (azimute  $0^\circ$ ), com a rocha sob uma pressão hidrostática constante ( $P$ ) de 10 MPa, pode ser apreciado das Figuras 10 a 13. À medida que a tensão aumenta, a velocidade da onda P também aumenta, sendo este aumento de velocidade especialmente notável na direção da tensão aplicada. Note-se também o decréscimo de velocidade que ocorre na direção perpendicular à direção da tensão aplicada. A relação monotônica entre tensão e velocidade sugere a possibilidade de uso do mapeamento das velocidades para estimar a magnitude das tensões nas quais um corpo rochoso se encontra submetido. O estado de tensões na Figura 13 corresponde ao momento de ruptura da amostra CAM4, que ocorreu sob uma tensão de 15 MPa.

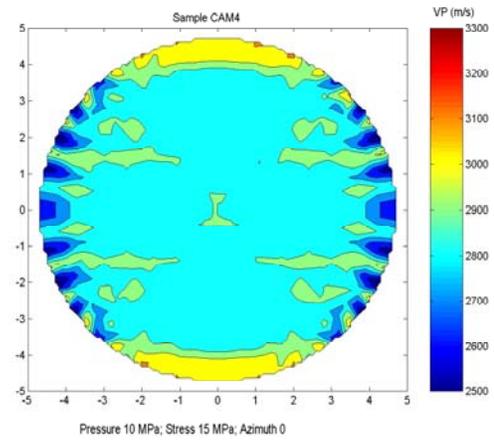


**Figura 9** – Estágio atual da construção do tomógrafo ultrassônico para testemunhos.

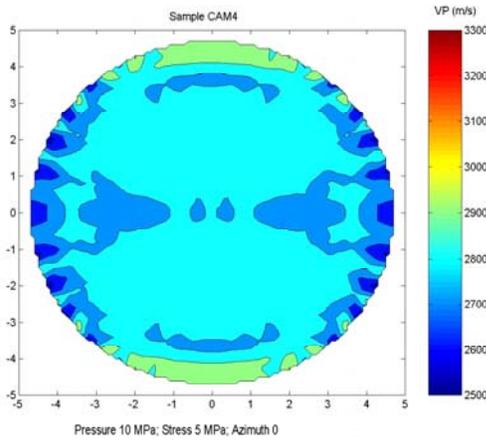
As Figuras 13 a 15 ilustram o efeito da aplicação de uma tensão uniaxial compressiva constante (15 MPa) mas em azimutes crescentes (em passos de 45 graus). Estas figuras mostram uma clara distinção da direção na qual a tensão foi aplicada, confirmando o uso de tomogramas de onda P na estimativa da orientação das tensões aplicadas a um maciço rochoso. Com base nestes resultados, pode-se afirmar que a tomografia acústica de testemunhos é uma ferramenta com grande potencial para a caracterização completa do estado de tensões *in situ*, servindo para identificar as direções dos componentes principais de tensão e, potencialmente, também as magnitudes desses componentes de tensão.



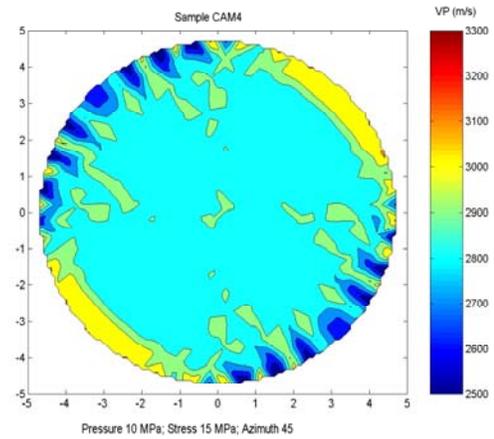
**Figura 10** – Tomograma simulado para a amostra CAM4.  $P = 10$  MPa;  $\sigma = 0$ ;  $Az = 0^\circ$ . A onda P apresenta um comportamento isotrópico.



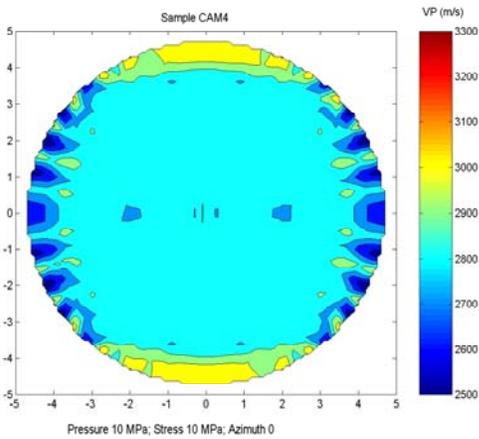
**Figura 13** – Tomograma simulado para a amostra CAM4.  $P = 10$  MPa;  $\sigma = 15$  MPa;  $Az = 0^\circ$ . Mais uma vez tensão  $\sigma$  está igualmente distribuída na direção vertical.



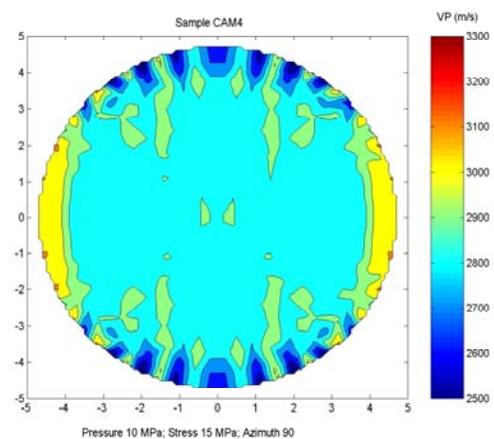
**Figura 11** – Tomograma simulado para a amostra CAM4.  $P = 10$  MPa;  $\sigma = 5$  MPa;  $Az = 0^\circ$ . A tensão  $\sigma$  é igualmente distribuída na direção vertical.



**Figura 14** – O tomograma mostra claramente o azimute da tensão aplicada.  $P = 10$  MPa;  $\sigma = 15$  MPa;  $Az = 45^\circ$ .



**Figura 12** – Tomograma simulado para a amostra CAM4.  $P = 10$  MPa;  $\sigma = 10$  MPa;  $Az = 0^\circ$ . A tensão  $\sigma$  também está igualmente distribuída na direção vertical.



**Figura 15** – O tomograma mostra o azimute igual a  $90^\circ$  da tensão aplicada.  $P = 10$  MPa;  $\sigma = 15$  MPa;  $Az = 90^\circ$ .

## Conclusões

Este trabalho apresentou os resultados parciais até o momento alcançados no projeto e construção de um tomógrafo ultrasônico para testemunhos. Foram apresentadas as linhas gerais de funcionamento do método tomográfico e as especificações técnicas adotadas no projeto construtivo do equipamento. A tomografia ultrasônica em testemunhos pode ser bastante útil na identificação de vários atributos petrofísicos, tais como heterogeneidade composicional, presença de descontinuidades, saturação parcial e padrão interno de distribuição de tensões. A técnica tomográfica ultrasônica em testemunhos envolve a inferência da velocidade sísmica local a partir dos tempos de trânsito registrados por um grande número de pares transmissor-receptor convenientemente distribuídos em torno do testemunho. Para o arranjo de transdutores utilizado, a simplificação assumida ao se considerar raios retos é aceitável, desde que não ocorram contrastes de velocidade muito fortes. Foi demonstrado, através de simulações, que a tomografia ultrasônica de testemunhos representa uma técnica promissora para a identificação da direção das tensões *in situ* e, potencialmente, também para a estimativa das magnitudes dessas tensões.

## Agradecimentos

O autor agradece a PETROBRAS pelo financiamento do projeto e construção do tomógrafo ultrasônico para testemunhos, bem como aos professores Jadir da Conceição da Silva e Jorge Leonardo da Silva, também integrantes do grupo de pesquisas em petrofísica sísmica do CNPq, por suas decisivas contribuições no trabalho de inversão de dados de tomografia.

## Referências

**Scott Jr, T.E., Ma, Q., Reches, Z. (1993).** Acoustic tomographic imaging of dynamic stress fields. School of Petroleum and Geological Engineering, Univ. of Oklahoma, RMRC-93-12, USA.

**Soares, J.A., Silva, J.C., Martins, J.L. (2002).** Third-order elastic constants and stress-induced anisotropy on Açú sandstone, Potiguar Basin, onshore Brazil. Abstracts of the 72<sup>nd</sup> SEG Annual Meeting. Salt Lake City, USA. Paper 203.

**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.