



**UFRJ** - Universidade Federal do Rio de  
Janeiro

**CCMN** – Centro de Ciências Matemáticas  
e da Natureza

Imageamento interno de testemunhos  
artificiais através de tomografia ultra-  
sônica

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM  
GEOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO,  
COMO REQUISITO OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA  
TRABALHO  
FINAL DE CURSO (IGLU08)

RIO DE JANEIRO – RJ – BRASIL  
MARÇO DE 2007

IMAGEAMENTO INTERNO DE TESTEMUNHOS ARTIFICIAIS  
ATRAVÉS DE TOMOGRAFIA ULTRA-SÔNICA

MAIRA DA COSTA DE OLIVEIRA LIMA

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
GEOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO,  
COMO REQUISITO OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA TRABALHO  
FINAL DE CURSO (IGLU08)

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOFÍSICA

ORIENTADOR: JOSÉ AGNELO SOARES (UFRJ)

APROVADA POR:

---

Prof. Paula Lucia Ferrucio da Rocha, UFRJ

---

Prof. Jadir da Conceição da Silva, UFRJ

---

Prof. José Agnelo Soares, UFRJ

RIO DE JANEIRO – RJ – BRASIL  
MARÇO DE 2007

## FICHA CATALOGRÁFICA

Lima, Maira C de Oliveira.

Imageamento interno de testemunhos artificiais através de tomografia ultra-sônica. [Rio de Janeiro] 2007.

31p.:

Monografia (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Instituto de Geociências – Departamento de Geologia, 2007.

Orientador: José Agnelo Soares (UFRJ)

1. Tomografia ultra-sônica
2. Ondas Sísmicas
3. Velocidade de onda P
4. Testemunhos artificiais

- Monografia. I. Soares, J.A. (Orient.). II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Geociências. Departamento de Geologia. III. Imageamento interno de testemunhos artificiais através de tomografia ultra-sônica.

RESUMO DA MONOGRAFIA APRESENTADA AO CURSO DE GRADUAÇÃO  
EM GEOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO  
REQUISITO OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA TRABALHO FINAL DE CURSO  
(IGLU08)

IMAGEAMENTO INTERNO DE TESTEMUNHOS ARTIFICIAIS ATRAVÉS DE  
TOMOGRAFIA ULTRA-SÔNICA.

MAIRA DA COSTA DE OLIVEIRA LIMA

MARÇO DE 2007.

ORIENTADOR: JOSÉ AGNELO SOARES (UFRJ)

SETOR: GEOFÍSICA

O Laboratório de Petrofísica da UFRJ dispõe de um tomógrafo ultra-sônico para testemunhos, totalmente projetado e construído no próprio Laboratório, sendo este um equipamento inédito no Brasil. O tomógrafo é composto por um conjunto de 32 transdutores piezoelétricos regularmente espaçados em torno do testemunho, gerando 544 valores de tempo de trânsito para cada tomograma adquirido. Este conjunto de tempos de trânsito é invertido, gerando um tomograma que representa a distribuição de velocidades das ondas elásticas dentro do testemunho. Por sua vez, a distribuição de velocidades reproduz o mapeamento de propriedades petrofísicas como composição mineral, saturação fluida e tensões. Com o objetivo de testar a capacidade do tomógrafo para o reconhecimento de heterogeneidades e estruturas internas comumente presentes em testemunhos de sondagem, neste trabalho foram preparados modelos artificiais de testemunhos os quais foram submetidos à tomografia ultra-sônica. Os modelos são constituídos basicamente de cimento-cola com inclusões internas, de diversas formas e tamanhos, compostas de rochas. Os resultados mostram que os tomogramas obtidos identificam a presença dessas heterogeneidades e estruturas, seu tamanho e formas aproximadas, apresentando velocidades indicativas da sua composição. Uma amostra composta apenas por cimento-cola apresentou um tomograma cujas velocidades da onda P estavam restritas a um curto intervalo, indicando uma relativa homogeneidade da amostra. Uma segunda amostra, contendo um cilindro de arenito no seu interior, apresentou um tomograma que representa de forma adequada um corte no plano radial da amostra. Neste tomograma a imagem do cilindro interno de arenito é bastante clara, tanto em tamanho como em forma. Uma terceira amostra contendo um cubo de granito foi também imageada por tomografia ultra-sônica, cujo tomograma apresenta nitidamente a diferença de velocidade da onda P na matriz de cimento em relação à heterogeneidade granítica. O presente estudo identifica ainda as limitações do método quanto à sua resolução, a sua robustez frente a fortes contrastes de velocidades e a possível formação de artefatos na imagem, devido a efeitos como a difração da onda nas bordas agudas das

heterogeneidades. Os resultados apresentados neste trabalho sugerem que a tomografia ultra-sônica de testemunhos pode ser aplicada com sucesso na caracterização de depósitos minerais, avaliando a heterogeneidade do depósito e a presença de estruturas e descontinuidades na escala dos testemunhos.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cheila Maria de Oliveira Lima e Jair Porfírio da Costa Lima, por estar sempre ao meu lado me dando força e me encorajando para enfrentar todas as barreiras que apareceram na minha frente, ao meu noivo, Vlamir Anderson Oliveira Santo, por me ajudar sempre que precisei, e entender as minhas faltas devido aos meus estudos.

Ao meu orientador José Agnelo Soares, por me ajudar nesse trabalho, me guiando e ensinando, dando-me uma grande contribuição para o meu aperfeiçoamento profissional. Agradeço pela paciência também!

Aos funcionários e professores do Departamento de Geologia, que tanto contribuíram para a minha formação profissional e intelectual.

Aos grandes amigos que fiz durante o curso: Luciana Santos de Oliveira, Julio César de Lima Sales e Gilmar Pauli Dias, que sempre estiveram ao meu lado, nas horas boas e ruins, sempre me apoiando durante todo o curso. Desejo que todos nós permanecemos assim, sempre unidos, mesmo depois de subirmos esse degrau. Boa sorte!

E não posso deixar de agradecer aos meus “tios” Walda Simon e Gilberto Simon (in memoriam) por sempre me ajudar em tudo que precisei, não me deixando desistir nunca! Amo muito vocês.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	iii
AGRADECIMENTOS.....	v
SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. ONDAS SISMICAS.....	03
2.1. Velocidade das ondas sísmicas.....	03
2.1.1. Velocidade e densidade.....	04
2.1.2. Velocidade e porosidade.....	04
2.1.3. Velocidade e pressão.....	04
2.1.4. Velocidade e litologia.....	04
2.1.5. Velocidade e temperatura.....	04
2.1.6. Velocidade e frequência.....	05
3. TOMOGRAFIA ULTRA-SONICA.....	06
4. MATERIAL ANALISADO.....	12
5. TOMOGRAMAS OBTIDOS.....	19
6. CONCLUSÕES.....	28
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Visão geral do tomógrafo ultra-sônico utilizado neste trabalho .....	06
Figura 2 – Foto de detalhe do anel tomográfico.....	07
Figura 3 – Diagrama esquemático apresentando os 544 raios registrados.....	08
Figura 4 – Exemplo de onda P observada no tomógrafo .....	09
Figura 5 – Malha utilizada para a inversão dos dados do tomógrafo.....	10
Figura 6 – Tomograma de velocidade da onda P .....	11
Figura 7 – Detalhe do arranjo dos pistões em volta do testemunho.....	12
Figura 8 – Testemunho artificial com inclusão cilíndrica de arenito.....	13
Figura 9 – Testemunho artificial com inclusão de marga.....	13
Figura 10 – Testemunho artificial com inclusão cilíndrica de quartzito.....	15
Figura 11 – Testemunho artificial com inclusão de cubo grande de granito.....	16
Figura 12 – Testemunho artificial com inclusão de cubo pequeno de granito.....	16
Figura 13 – Testemunho artificial com inclusão de meio-cilindro de granito.....	17
Figura 14 – Testemunho artificial com inclusão de arenito com furo vazio.....	18
Figura 15 – Testemunho artificial com inclusão de arenito com furo preenchido.....	18
Figura 16 – Testemunho artificial fabricado com cimento puro com correspondente tomograma de velocidade da onda P.....	19
Figura 17 – Testemunho artificial com inclusão cilíndrica de arenito com correspondente tomograma de velocidade da onda P.....	20
Figura 18 – Testemunho artificial com inclusão cilíndrica de marga com correspondente tomograma de velocidade da onda P.....	21
Figura 19 – Testemunho artificial com inclusão cilíndrica de quartzito com correspondente tomograma de velocidade da onda P.....	22
Figura 20 – Testemunho artificial com inclusão de um cubo grande de granito com correspondente tomograma de velocidade da onda P.....	23
Figura 21 – Testemunho artificial com inclusão de um cubo de granito menor com correspondente tomograma de velocidade da onda P.....	24
Figura 22 – Testemunho artificial com inclusão de meio cilindro de granito com correspondente tomograma de velocidade da onda P.....	25
Figura 23 – Testemunho artificial com inclusão de arenito cujo furo se encontra vazio com correspondente tomograma de velocidade da onda P.....	26

Figura 24 – Testemunho artificial com inclusão de arenito com furo preenchido com correspondente tomograma de velocidade da onda P.....27



## 1. INTRODUÇÃO

A propagação de ondas sísmicas acontece com diferentes velocidades no interior da Terra, dependendo do tipo de rocha que elas atravessam. Essa velocidade depende de um conjunto de variáveis como composição mineralógica, densidade e saturação das rochas, e ainda de variáveis ambientais com temperatura e pressão sob as quais as rochas se encontram submetidas.

A tomografia elástica é um método que utiliza ondas sísmicas para imagear o interior das rochas de forma indireta e indestrutiva. A tomografia elástica pode ser implementada em diferentes escalas: desde a tomografia sísmica interpoços, que gera uma imagem da seção geológica compreendida entre dois poços distantes entre si de algumas dezenas ou centenas de metros, até a tomografia elástica na frequência ultra-sônica, que gera uma imagem do interior de testemunhos de rocha, os quais possuem dimensões (diâmetros) de apenas algumas polegadas. A imagem gerada pelo método da tomografia é chamada de tomograma, e é obtida através da aplicação de um método de inversão dos tempos registrados em cada par fonte-receptor, visando determinar a variação interna de velocidade da onda na amostra.

Este trabalho consiste da análise de dez testemunhos artificiais, cuja composição é basicamente cimento-cola (ou cimento Portland) e inclusões de rochas com diversas formas e tamanhos previamente conhecidos. O objetivo do trabalho é testar a capacidade do tomógrafo em identificar corretamente, em termos de forma, tamanho e velocidade, a presença de heterogeneidades passíveis de ocorrência no interior de testemunhos reais.

Guardadas as diferenças de escala, os resultados e conclusões decorrentes deste trabalho podem ser estendidos para a análise da tomografia sísmica interpoços. Essa extensão pode se dar em termos do potencial de imageamento do método da tomografia elástica, das dificuldades práticas para a sua implementação, dos possíveis artefatos presentes nos tomogramas (e



suas causas), da resolução esperada e da influência de variáveis como contraste de velocidades e anisotropia elástica.

A tomografia ultra-sônica utilizada neste trabalho é do tipo tomografia de tempo de trânsito de ondas compressoriais transmitidas, não sendo aproveitada nenhuma informação por ventura registrada sobre ondas refletidas ou qualquer outro tipo de onda que não a diretamente transmitida. Nenhum tratamento foi dispensado também em termos da inversão das amplitudes dos traços registrados.



## 2. ONDAS SÍSMICAS

As ondas sísmicas são usadas no estudo do interior da Terra. Essas ondas apresentam percursos radiais deformados devido à variação de densidade e composição, e tem seu efeito comparado à refração da luz.

Há dois tipos de ondas que se propagam em todas as direções: ondas compressoriais e cisalhantes. Nas ondas compressoriais, primárias, ou simplesmente P, as partículas do meio vibram paralelamente à direção de propagação; nas ondas cisalhantes, secundárias ou simplesmente S, as vibrações das partículas são perpendiculares à direção de propagação da onda.

Numa onda sísmica há transmissão não apenas de vibrações das partículas do meio, mas também de deformações do meio: as ondas P correspondem a deformações de dilatação e compressão, causando alteração no volume do corpo, e as ondas S correspondem a deformações tangenciais não resistindo a alterações na sua forma.

A velocidade de propagação da onda P é maior que a da S. Por isso, a onda P é a primeira a chegar a um determinado ponto de registro, seguida da onda S. As ondas P se propagam em meio fluido e sólido, sendo o primeiro conhecido com meio acústico e o segundo como meio elástico. As ondas S se propagam apenas em meios sólidos.

### 2.1. VELOCIDADE DAS ONDAS SÍSMICAS

As velocidades de propagação das ondas P e S ( $V_p$  e  $V_s$ ) dependem essencialmente da densidade, porosidade, pressão, litologia, frequência e temperatura do material por onde passam.

*2.1.1. Velocidade e densidade* – em geral, quanto maior for a densidade de uma rocha, maior a velocidade das ondas sísmicas. É justamente esta propriedade que permite utilizar as ondas sísmicas para obter informações sobre a estrutura e a composição em grandes



profundidades. Por exemplo, analisando as vibrações provocadas por explosões artificiais controladas em uma bacia sedimentar, podem-se deduzir as velocidades sísmicas nas várias camadas sedimentares da bacia e obter informações sobre eventuais estruturas geológicas importantes.

2.1.2. *Velocidade e porosidade* – A porosidade é uma propriedade física definida pela relação entre volume de poros e o volume total de certo material. Esses poros que estão presentes nas rochas as diferenciam de sólidos homogêneos. A porosidade é uma variável determinante na definição da velocidade de propagação de uma rocha (Thomas, 2000).

2.1.3. *Velocidade e pressão* – Pressão confinante é a pressão externa a qual uma amostra de rocha é submetida. Essa pressão é parcialmente transmitida aos fluidos dentro dos poros da rocha, pois parte da pressão confinante é suportada pelo arcabouço mineral da rocha. A diferença entre a pressão confinante e a pressão de poros é chamada de pressão efetiva. A pressão efetiva tem forte influência sobre as velocidades das ondas P e S de rochas. Com o fechamento dos poros pelo aumento da pressão efetiva, há um aumento na velocidade de propagação.

2.1.4. *Velocidade e litologia* – Rochas são compostas por diversos minerais os quais podem apresentar diferenças importantes de velocidades. Os minerais apresentam maiores densidades, conseqüentemente maiores velocidades em comparação aos fluidos contidos nos espaços porosos. As velocidades das rochas são controladas, em princípio pela sua composição mineral.

2.1.5. *Velocidade e temperatura* – As velocidades de propagação das ondas P e S variam suavemente com a temperatura. Isto acontece devido à diferença de compressibilidade entre os diferentes



elementos da matriz rochosa, o que afeta também a pressão e a viscosidade dos fluidos saturantes entre diversos pontos da rocha.

2.1.6. *Velocidade e frequência* – Quando são usadas frequências altas para a medição de velocidades, como no caso das frequências ultrasônicas, podem ser observados efeitos de espalhamento da onda. Por causa desse efeito, a velocidade pode diminuir com o aumento da frequência, pois o raio espalhado percorre uma trajetória mais longa e a velocidade, calculada com base na trajetória reta, é artificialmente reduzida. As velocidades medidas a baixas frequências sofrem pouco ou nenhum efeito de espalhamento, de modo que as velocidades aparentes medidas são mais representativas.



### 3. TOMOGRAFIA ULTRA-SÔNICA

O tomógrafo ultra-sônico para testemunhos, desenvolvido pelo Laboratório de Petrofísica da UFRJ é um equipamento inédito, embora seu método não seja original, pois a tomografia ultra-sônica é usada em outras áreas, como na medicina. O equipamento usado neste trabalho possui um conjunto de 32 pistões pneumáticos que contém sensores (transdutores piezoelétricos), permitindo a aquisição de inúmeros tomogramas com o mesmo conjunto de sensores. A Figura 1 apresenta uma fotografia do tomógrafo ultra-sônico utilizado neste trabalho. Já na Figura 2 pode-se visualizar o anel tomográfico em detalhe, inclusive contendo uma amostra de testemunho artificial durante o seu imageamento para este trabalho.

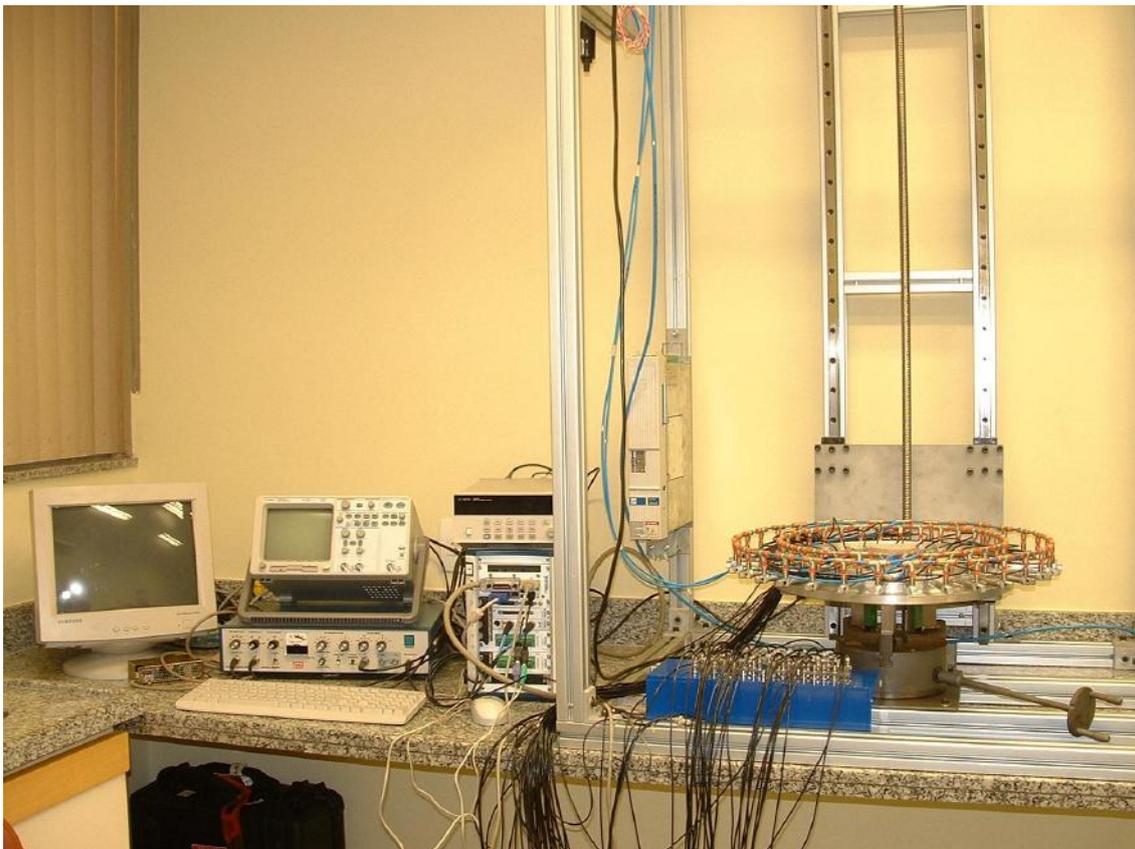


Figura 1 – Visão geral do tomógrafo ultra-sônico utilizado neste trabalho.

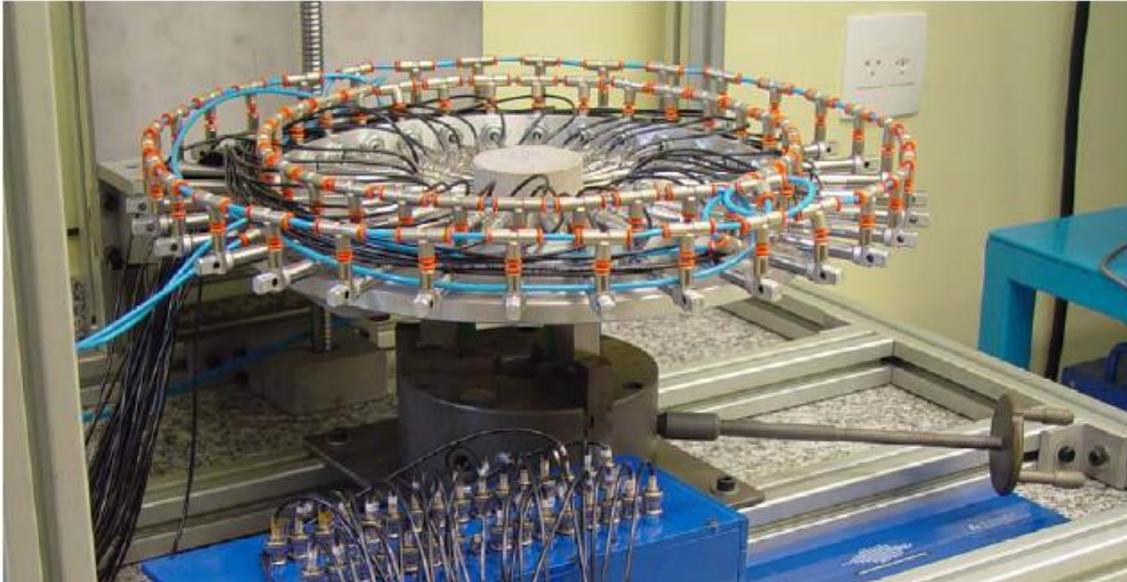


Figura 2 – Foto de detalhe do anel tomográfico durante a realização de uma aquisição tomográfica em um testemunho artificial.

Para realizar uma tomografia de transmissão, é necessário distribuir um conjunto de transdutores em volta de um testemunho. Cada transdutor age como fonte, e os demais transdutores como receptores, em um determinado instante de tempo. Em outro momento aquele transdutor que agia como fonte passa a agir como receptor. O processo de aquisição dos dados consiste em controlar em cada momento qual transdutor irá agir como fonte e quais serão os receptores. O processo termina quando todos os transdutores já tiveram a sua oportunidade de agir como fonte. A Figura 3 apresenta um diagrama esquemático do conjunto de traços registrados no tomógrafo ultra-sônico. Foram utilizados 32 transdutores dispostos em volta do testemunho e o esquema de aquisição previa que, em cada momento, apenas os transdutores do hemisfério oposto ao transdutor-fonte registrariam as suas respectivas formas de onda (traços). Esse esquema de aquisição resulta no registro de 544 traços. Neste trabalho foi considerada a simplificação dos raios retos, ou seja, desprezou-se o efeito dos contrastes de velocidade na mudança de direção dos raios. Devido à alta densidade de informação, e para pequenos contrastes de velocidade, essa aproximação é válida na maioria dos casos.

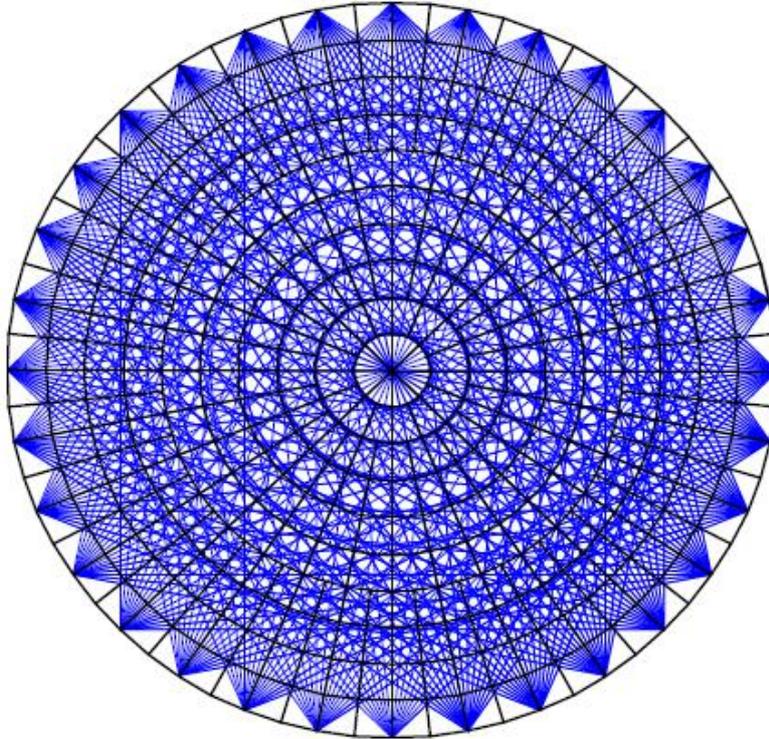


Figura 3 – Diagrama esquemático apresentando os 544 raios registrados.

O processo de aquisição de dados consiste no registro das formas de onda para todos os 544 raios, com posterior reconhecimento dos tempos de chegada da onda compressional em cada um dos traços. A Figura 4 mostra um exemplo de forma de onda (traço) registrado no tomógrafo. Trata-se de uma onda P, logo o tempo de chegada da onda é identificado como o tempo do primeiro evento (pico ou vale) que é registrado como o tempo medido correspondente àquele par fonte-receptor. No entanto a onda, ao percorrer o próprio sistema de aquisição (ponteiras dos pistões, cabos e outros componentes), acrescenta um valor constante de tempo ao tempo efetivamente gasto pela onda para percorrer a distância fonte-receptor interna do testemunho. Dessa forma, esse valor constante de tempo (tempo do sistema) deve ser deduzido do tempo medido, a fim de se obter o tempo de propagação da onda na rocha.

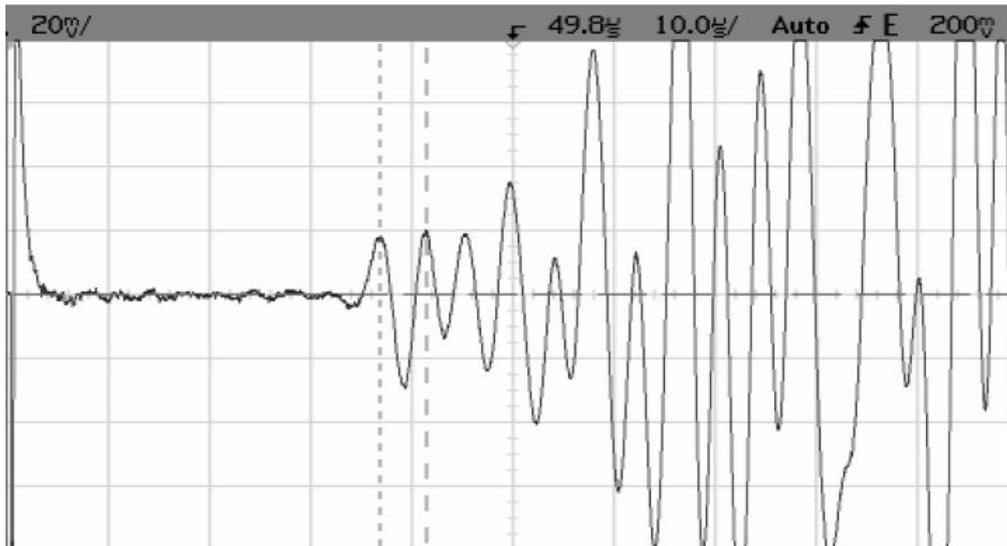


Figura 4 – Exemplo de onda P observada no tomógrafo.

Na inversão dos dados, o percurso de todos os raios através de uma malha de células que discretiza a seção reta do testemunho é representado por uma matriz, chamada de matriz jacobiana. Os elementos dessa matriz são os comprimentos de cada segmento de raio dentro de cada uma das células da malha de discretização. A Figura 5 apresenta a malha de células utilizada para a inversão dos dados do tomógrafo ultra-sônico, a qual possui 408 células radialmente distribuídas. O processo de inversão de dados busca identificar valores constantes de velocidade para cada uma das células que, em conjunto, explicam os tempos de propagação medidos em todos os pares fonte-receptor. Eventualmente a solução encontrada no processo de inversão não é a única, mas um dos possíveis cenários que explicam os tempos registrados.

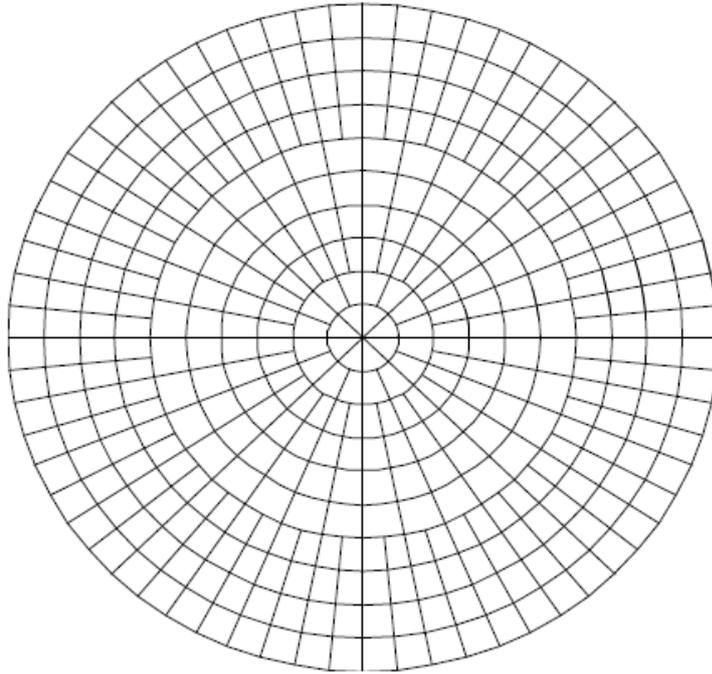


Figura 5 – Malha utilizada para a inversão dos dados do tomógrafo, com 408 células radialmente distribuídas.

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

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

onde o primeiro elemento do lado esquerdo é a matriz jacobiana e os outros dois elementos são os vetores de vagarosidade e de tempo. Os índices m e n correspondem aos números do raio e da célula, respectivamente. A vagarosidade corresponde ao inverso da velocidade, sendo o vetor de vagarosidades (um valor para cada célula) o resultado direto da inversão dos dados, sendo posteriormente convertido para um vetor de velocidades. A inversão dos dados tomográficos fornece então 408 valores de velocidade, um



valor para cada célula da malha de discretização. O produto final da tomografia são os mapas de velocidade para cada uma das seções retas analisadas no testemunho, os quais são obtidos pela suavização da imagem gerada pelo conjunto de velocidades fornecidas pelo processo de inversão. Um exemplo de tomograma obtido em um testemunho de rocha é apresentado na Figura 6, extraído de Soares (2006).

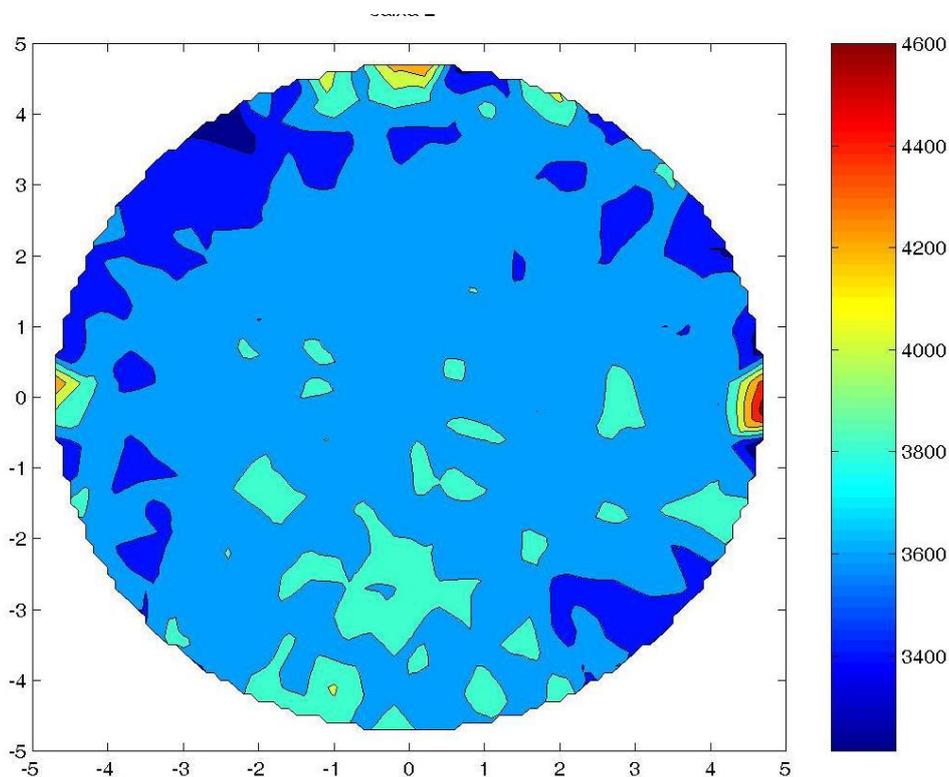


Figura 6 – Tomograma de velocidade da onda P em testemunho de rocha (extraído de Soares, 2006).

O método de inversão utilizado neste trabalho foi o método ART (Fox *et alli*, 1949; Scales & Smith, 1997). Este método baseia-se no algoritmo de Kaczmarz para a solução de um sistema de equações lineares. Uma característica importante é que pode ser implementado considerando isoladamente cada traço, evitando a manipulação de matrizes gigantescas. Após a inversão dos dados foi utilizado um algoritmo MATLAB® para a geração dos tomogramas.



#### 4. MATERIAL ANALISADO

Foram confeccionados para o presente trabalho 09 “testemunhos” artificiais. Eles foram fabricados com cimento puro, do tipo *Portland*, ou cimento-cola. Internamente a essas amostras foram inseridas inclusões variadas de rochas previamente escolhidas, com altura igual ao arcabouço. Dentre as amostras analisadas, apenas uma é composta unicamente de cimento puro, para previamente identificar os tempos, e conseqüentemente as velocidades das ondas no cimento. A Figura 7 apresenta uma foto de detalhe da amostra composta por cimento puro. Essa amostra cilíndrica possui 4,5 cm de altura e 7,5 cm de diâmetro. A fotografia exhibe a posição em que o testemunho é analisado no tomógrafo e o arranjo dos pistões em sua volta.



Figura 7 – Detalhe do arranjo dos pistões em volta do “testemunho” artificial fabricado de cimento puro.



A Figura 8 apresenta um testemunho confeccionado de cimento-cola com uma inclusão de arenito em forma de cilindro. Ele possui as seguintes dimensões: 4,5cm de altura e 7,5cm de dimensão, sendo que a inclusão possui apenas 4,0 cm de diâmetro. Observe que a inclusão cilíndrica se encontra levemente descentralizada em relação à amostra.

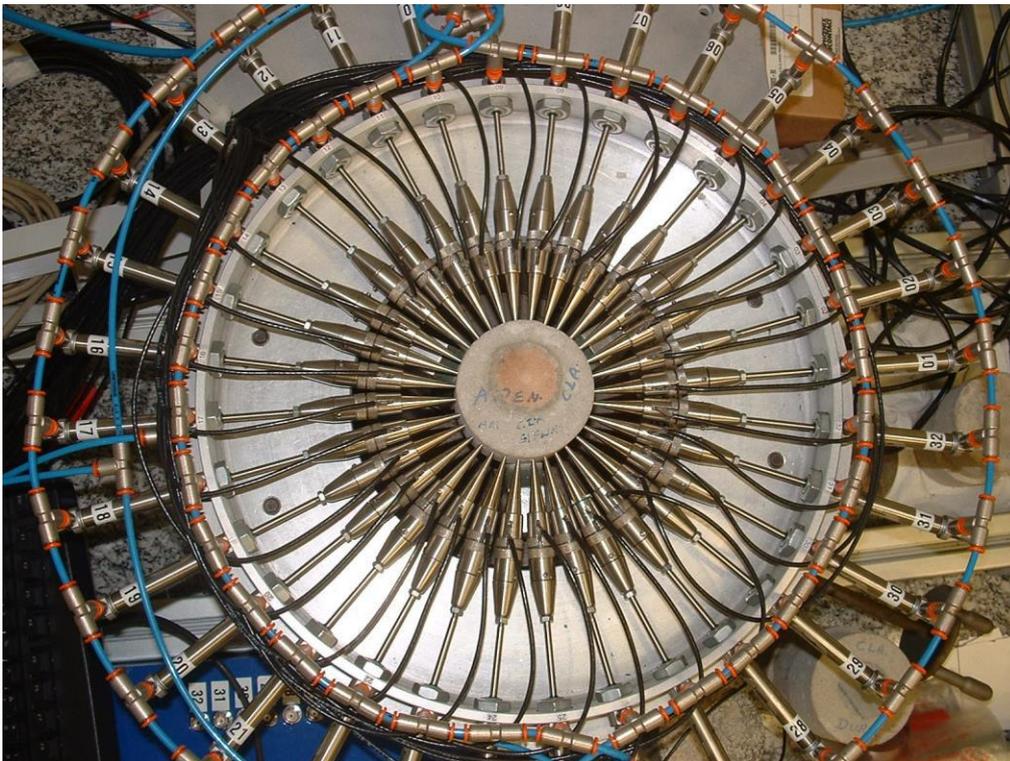


Figura 8 – Testemunho artificial com inclusão cilíndrica de arenito.



A Figura 9 apresenta uma amostra de cimento-cola com inclusão cilíndrica de marga. Ela possui 5,0 cm de altura, 7,5 cm de diâmetro e a inclusão possui 4,0 cm de diâmetro. Observe o arranjo dos pistões em torno do testemunho.

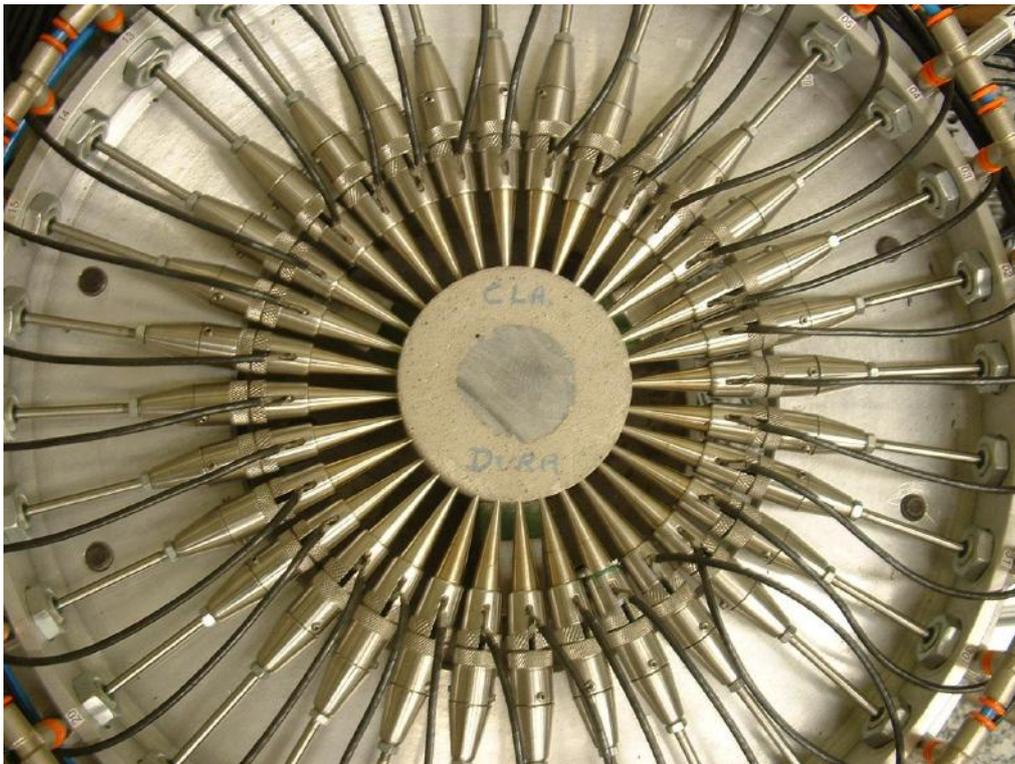


Figura 9 – Testemunho artificial com inclusão de marga.



A Figura 10 mostra a fotografia de um testemunho confeccionado em cimento puro com uma inclusão cilíndrica de quartzito. Esta amostra possui 5,5 cm de altura, 7,8 cm de diâmetro e a inclusão possui 5,0 cm de diâmetro.

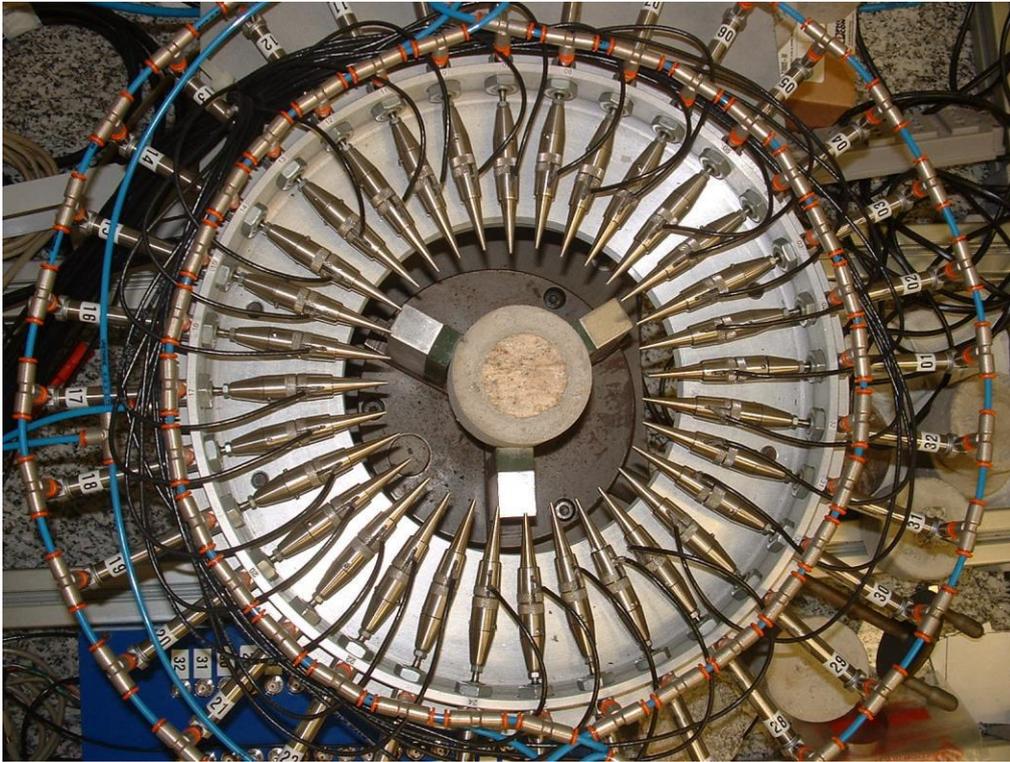


Figura 10 – “Testemunho” de cimento puro com inclusão cilíndrica de quartzito.

Os testemunhos analisados no presente trabalho foram confeccionados com inclusões de formas diferenciadas, de modo a testar a capacidade do tomógrafo em identificar tais variações nas dimensões e formas das inclusões. A Figura 11 apresenta um testemunho confeccionado em cimento-cola com inclusão de um cubo grande de granito, possuindo as seguintes dimensões: 4,0 cm de altura, 7,8 cm de diâmetro e a inclusão 4,0 cm de diâmetro. Já a Figura 12 apresenta um uma amostra confeccionada em cimento-cola com uma inclusão de um cubo menor de granito com as seguintes medidas: 4,0 cm de altura, 7,8 cm de diâmetro e inclusão de 3,0 cm de diâmetro. A Figura 13 apresenta um testemunho fabricado em cimento puro uma inclusão de meio-cilindro de granito com medidas: 4,5 cm de altura, 7,5 cm de diâmetro e inclusão de 5,5 cm de comprimento por 3,0 cm de largura.

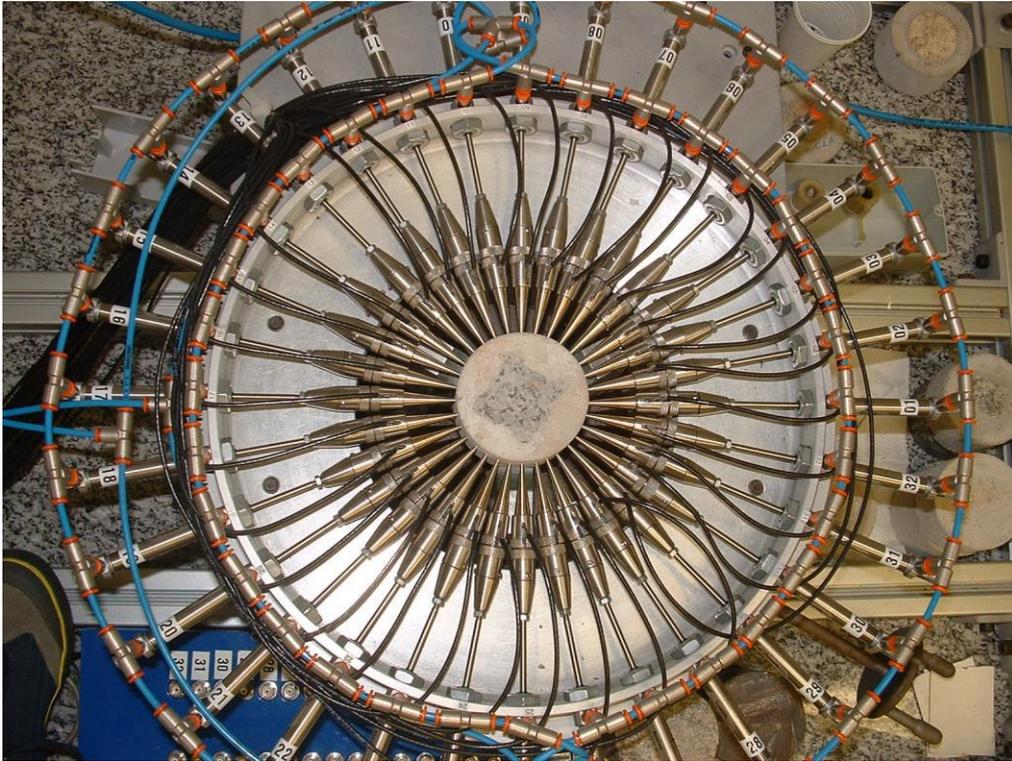


Figura 11 – Testemunho artificial com inclusão de cubo grande de granito.

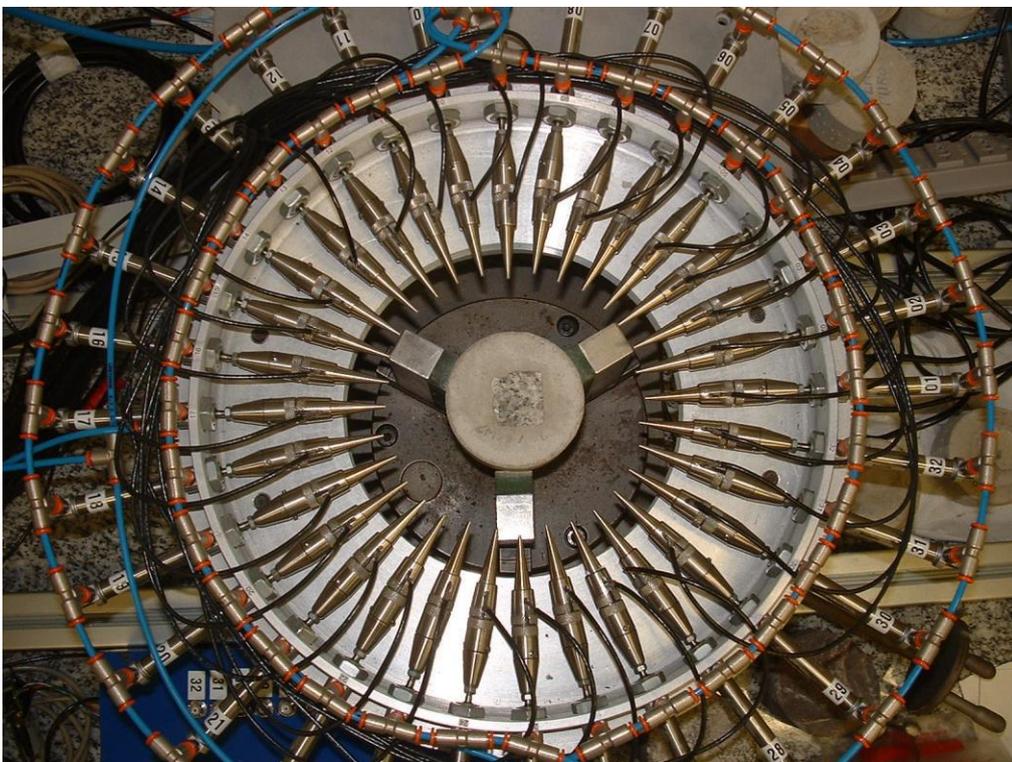


Figura 12 – Testemunho artificial com inclusão de cubo pequeno de granito



Figura 13 – “Testemunho” de cimento puro com inclusão de meio-cilindro de granito.

A Figura 14 exibe uma fotografia de um testemunho artificial composto por cimento-cola no qual foi inserida uma inclusão composta por um cilindro de arenito furado longitudinalmente, possuindo as seguintes medidas: arcabouço com 4,5 cm de altura e 7,5 cm de diâmetro, inclusão com 5,0 cm de diâmetro e furo com 1,0 cm de diâmetro. Neste caso o furo se encontra vazio. Já na amostra exibida na Figura 15 também há uma inclusão composta por um cilindro de arenito furado longitudinalmente, no entanto, neste caso o furo se encontra preenchido por cimento-cola. As medidas deste testemunho são: arcabouço com 4,5 cm de altura e 7,8 cm de diâmetro, inclusão com 8,0 cm de diâmetro e furo com 1,0 cm de diâmetro. Obviamente, o furo vazio se encontra na verdade preenchido por ar, o que confere uma grande variação de velocidade na interface ar-arenito. Portanto, se espera que o tomograma obtido na amostra da Figura 15 consiga representar de forma mais adequada a realidade do que o tomograma obtido pela inversão dos dados registrados na amostra da Figura 14. A velocidade da onda compressional (som) no ar é da



ordem de 340 m/s enquanto que no cimento-cola a velocidade da onda compressional está em torno de 2000 m/s.

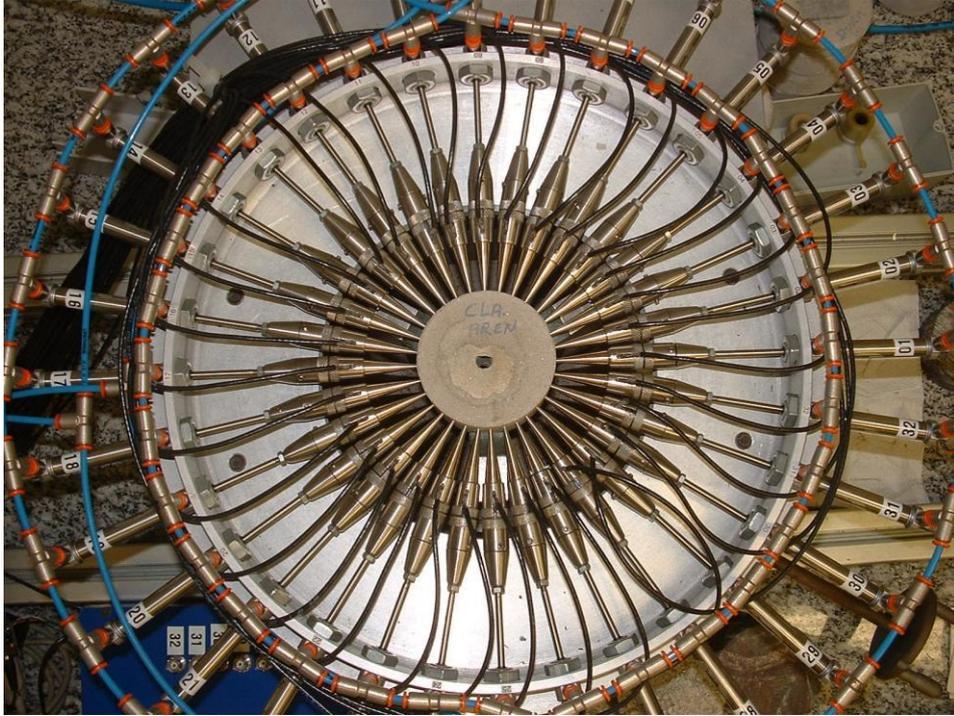


Figura 14 – Testemunho artificial com inclusão de arenito cujo furo se encontra vazio.

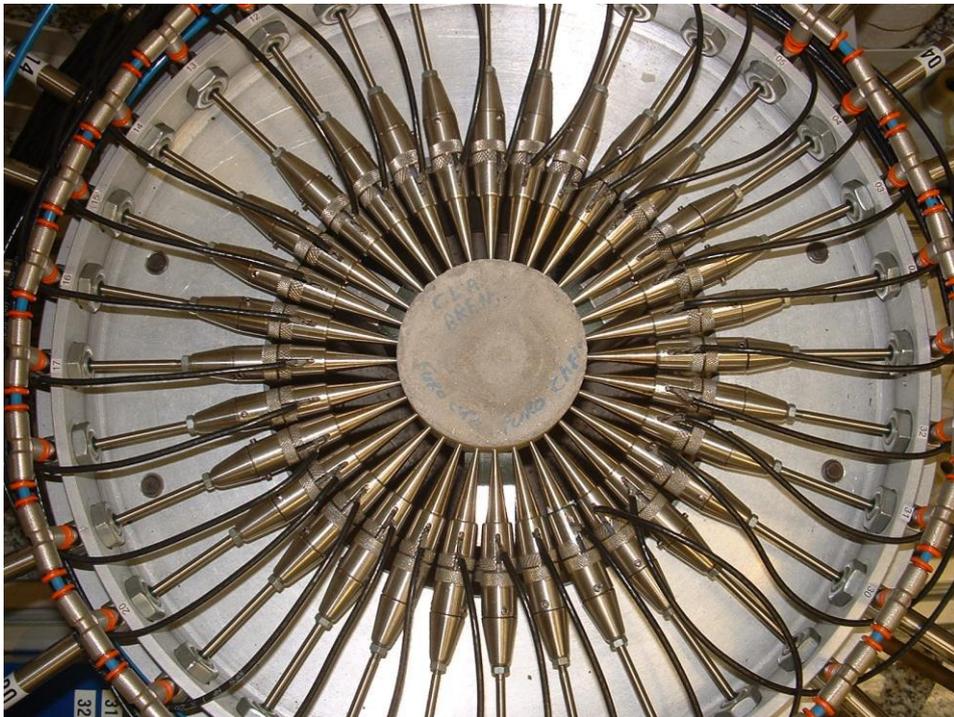


Figura 15 – Testemunho artificial com inclusão de arenito cujo furo se encontra preenchido por cimento-cola.



## 5. TOMOGRAMAS OBTIDOS

A inversão dos dados registrados pela tomografia ultra-sônica dos diversos testemunhos artificiais descritos no item 04 forneceu os tomogramas apresentados nas Figuras 16 a 24.

O tomograma da Figura 16 exibe uma distribuição de velocidades relativamente homogênea, com velocidades variando em sua maior parte de 3400m/s até 3800m/s. Portanto, a aparente heterogeneidade do tomograma é devido aos limites da escala de cores os quais são controlados pelas anomalias de velocidades resultantes do processo de inversão linear.

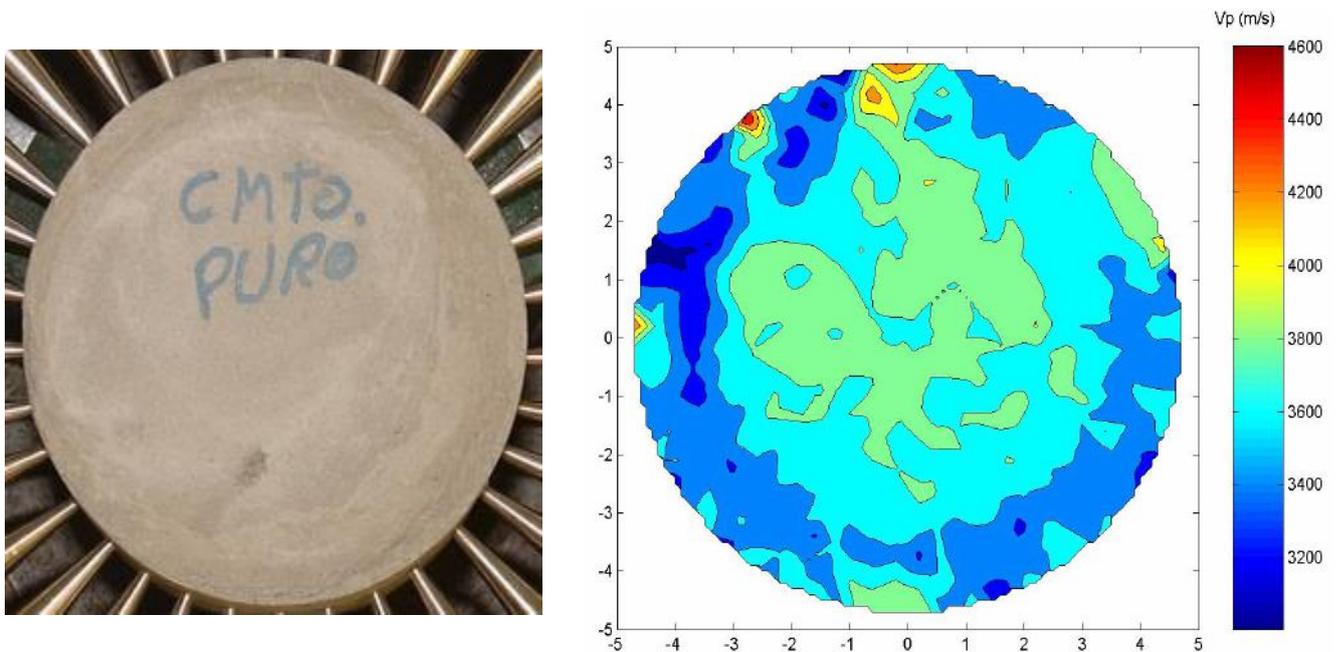


Figura 16 – Testemunho artificial fabricado com cimento puro (esquerda) com correspondente tomograma de velocidade da onda P (direita).



O tomograma da Figura 17 mostra claramente que a inclusão cilíndrica de arenito foi quase que perfeitamente identificada tanto em termos de forma, dimensão e posicionamento, perante o fato da inclusão apresentar velocidade de onda P inferior à correspondente velocidade do arcabouço, composto por cimento cola. As velocidades dentro da inclusão variam de 1400m/s a 1600m/s e fora dela, no arcabouço de cimento cola, de 2000m/s a 2600m/s, em sua maior parte.

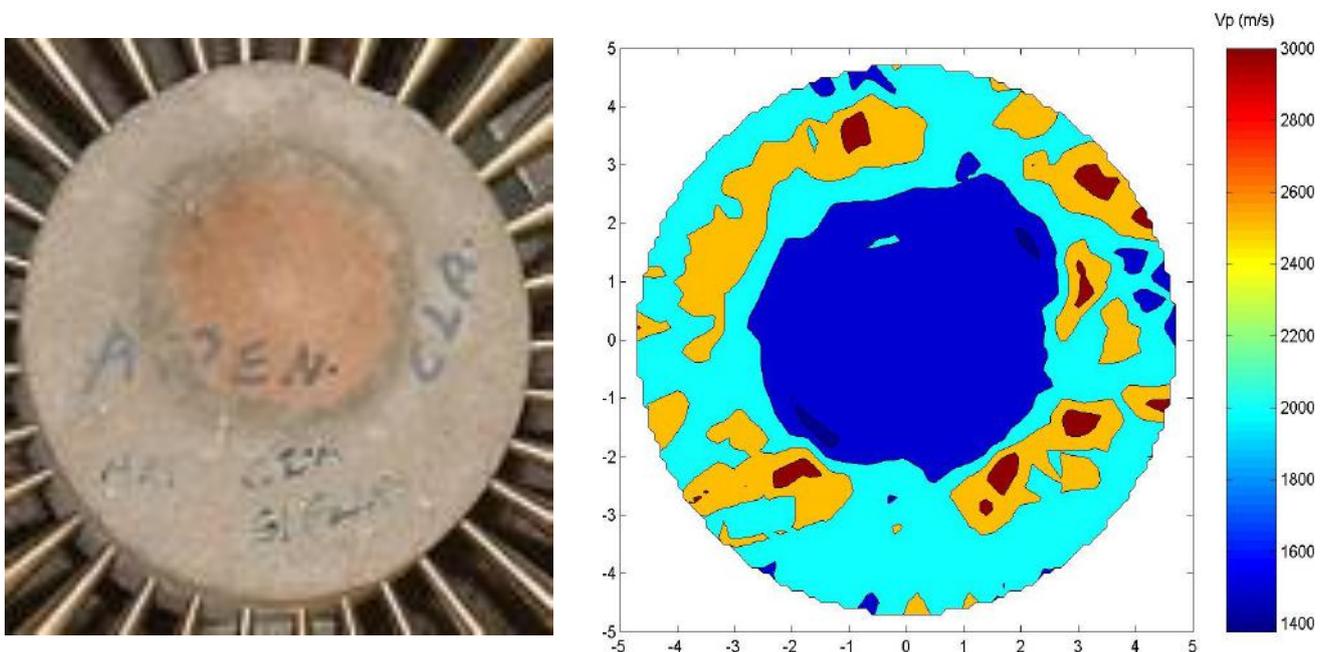


Figura 18 – Testemunho artificial com inclusão cilíndrica de arenito (esquerda) com correspondente tomograma de velocidade da onda P (direita).



Novamente, a Figura 18 mostra que a tomografia ultra-sônica é um excelente método de imageamento de inclusões minerais. Neste caso, a inclusão de marga é identificada também de forma quase perfeita quanto à forma, dimensão e posicionamento. A imagem tomográfica da inclusão de marga é mais heterogênea do que a da inclusão de arenito (Figura 17) e apresenta velocidades superiores (de 3500m/s a 4200m/s), o que é coerente com o tipo litológico da inclusão. As velocidades apresentadas pela inclusão de cimento cola são semelhantes às aquelas já discutidas na Figura 17.

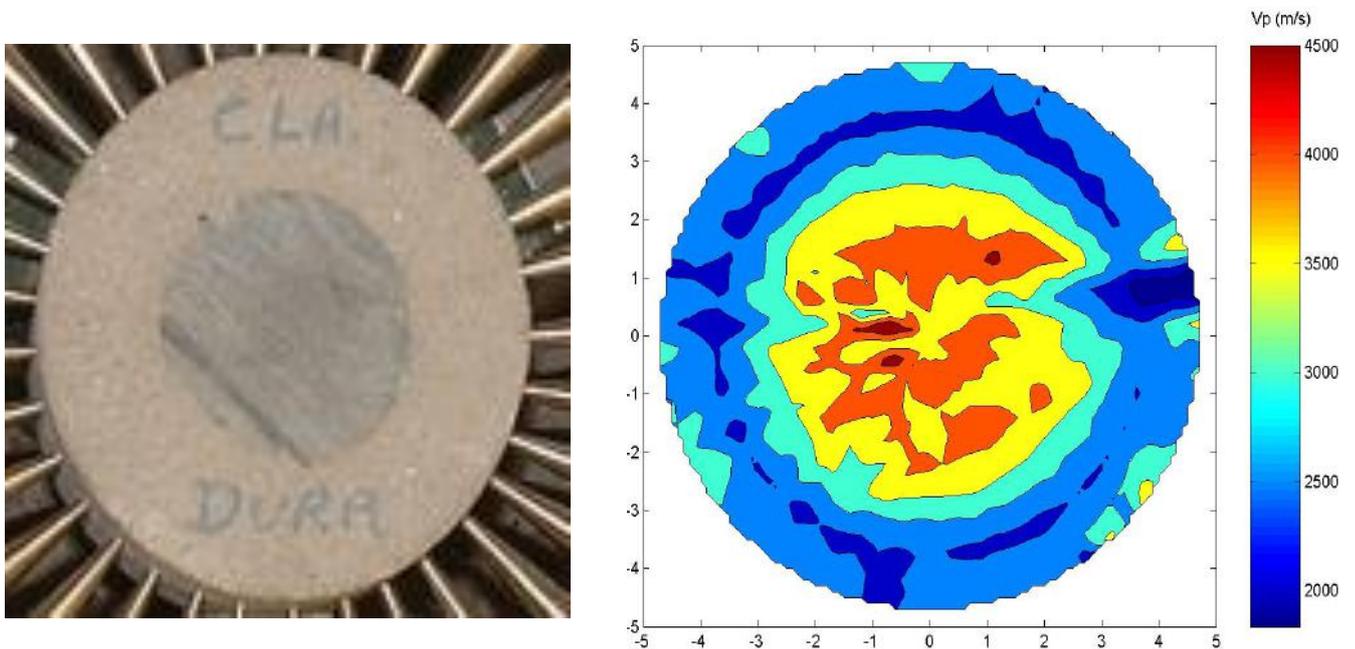


Figura 18 – Testemunho artificial com inclusão cilíndrica de marga (esquerda) com correspondente tomograma de velocidade da onda P (direita).



A Figura 19 apresenta um tomograma que não representa de forma adequada à inclusão cilíndrica de quartzito presente na amostra. Este resultado reforça a convicção baseada em experiências anteriores de que o algoritmo de inversão tomográfica utilizado neste trabalho não suporta a presença de materiais com forte grau de anisotropia, como é o caso da inclusão quartzítica. Sempre que o testemunho apresenta alto grau de anisotropia, o tomograma obtido apresenta essa forte discrepância. Para imagear corretamente amostras com elevado grau de anisotropia é preciso modificar o programa de inversão de dados, de modo a incorporar a anisotropia de velocidades. Esse ponto fica como sugestão para trabalhos de pesquisas futuros.

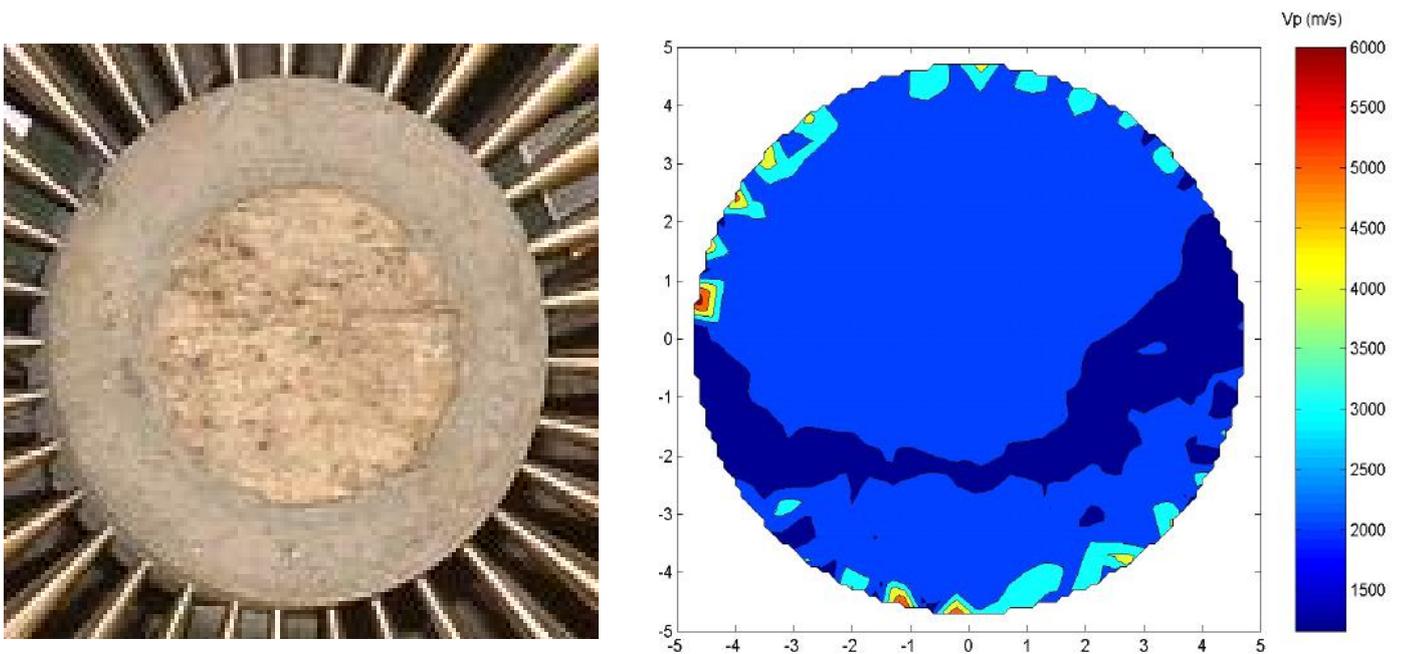


Figura 19 – Testemunho artificial com inclusão cilíndrica de quartzito (esquerda) com correspondente tomograma de velocidade da onda P (direita).



A Figura 20 mostra que o cubo grande de granito foi identificado relativamente bem em termos de tamanho, forma, posicionamento e disposição espacial. Observe que as quatro quinas do cubo estão posicionadas em ângulos verdadeiros. Veja também que ocorrem artefatos de inversão na vizinhança das quinas do cubo. Isso ocorre provavelmente devido ao fenômeno de difração na área das quinas. Estes fenômenos de deformação não estão incorporados no algoritmo de inversão utilizado neste trabalho, o qual prevê apenas os fenômenos de transmissão da onda. A velocidade da onda P na inclusão granítica varia de 4000m/s a 4500m/s e no arcabouço de cimento cola está variando de 2300m/s a 3000m/s. Acredita-se que as velocidades mais elevadas para o arcabouço são devido à alta velocidade e grande dimensão da inclusão granítica.

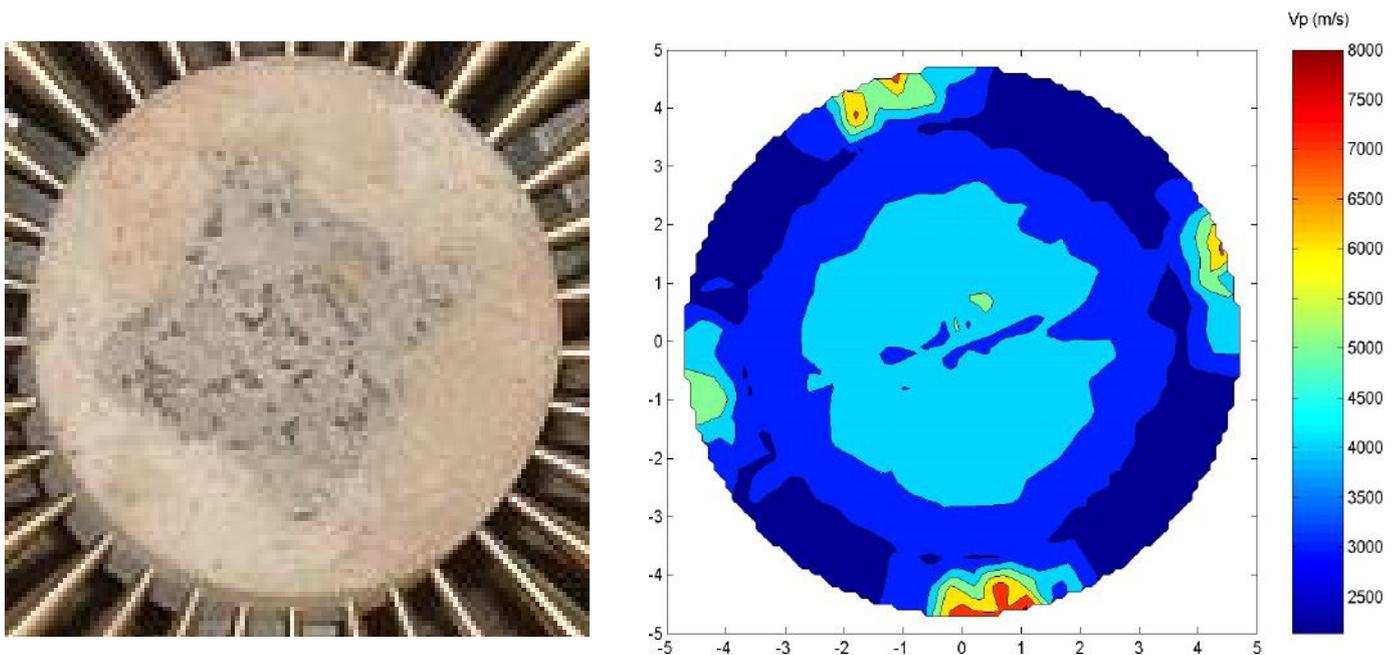


Figura 20 – Testemunho artificial com inclusão de um cubo grande de granito (esquerda) com correspondente tomograma de velocidade da onda P (direita).



Na Figura 21 vemos que o cubo pequeno de granito foi identificado bem do ponto de vista da localização, forma e disposição espacial, embora haja uma importante imprecisão em relação ao tamanho da inclusão. Isso demonstra a resolução limitada da técnica de imageamento por tomografia ultra-sônica. Objetos pequenos e com forte contraste de velocidade em relação ao meio hospedeiro podem ser imageados com imprecisão. A tomografia de Raio X, que trabalha com freqüências muito mais elevadas, possui melhor resolução. Em relação às velocidades, observa-se que devido ao aumento exagerado no tamanho aparente da inclusão, a sua velocidade é aparentemente reduzida. Dessa forma, a inclusão granítica apresenta velocidades em torno de 3000m/s e o arcabouço de cimento cola exibe velocidades de 1500m/s a 2500m/s.

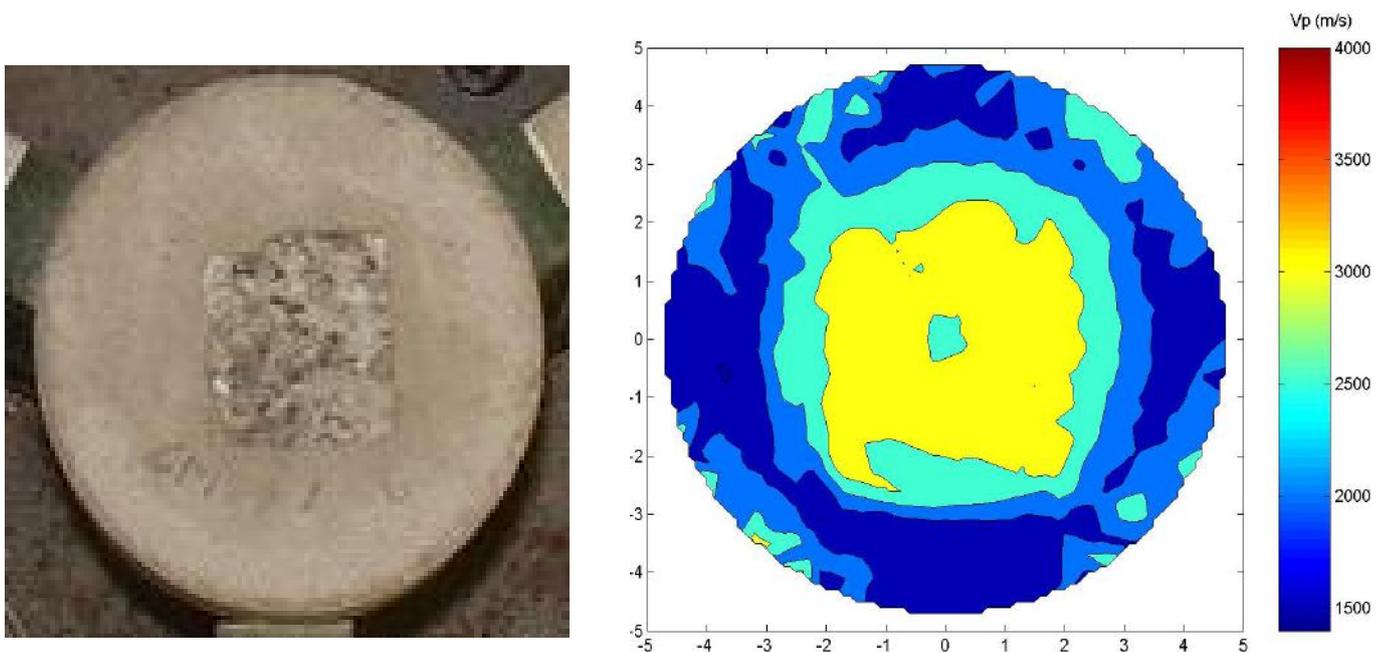


Figura 21 – Testemunho artificial com inclusão de um cubo de granito menor (esquerda) com correspondente tomograma de velocidade da onda P (direita).



A inclusão granítica com forma de meio cilindro, da Figura 22, foi bem imageada no seu respectivo tomograma, quanto à forma, dimensão, localização e disposição espacial. A velocidade da inclusão está em torno de 3500m/s e o arcabouço de cimento cola exibe velocidades de 2000m/s a 2500m/s. Essas velocidades são compatíveis com os materiais da amostra. Mas uma vez são observados efeitos de difração nas quinas da inclusão granítica.

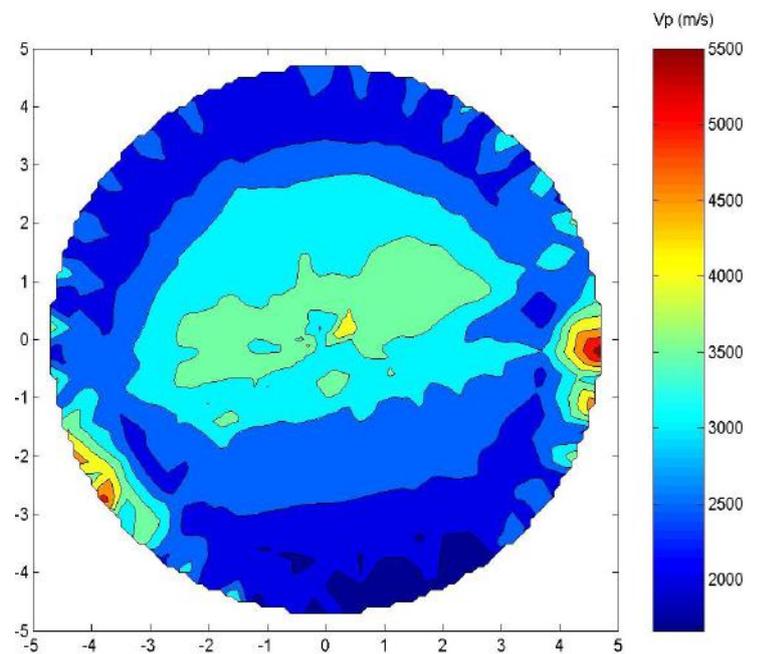


Figura 22 – Testemunho artificial com inclusão de meio cilindro de granito (esquerda) com correspondente tomograma de velocidade da onda P (direita).



O tomograma da Figura 23 apresenta na sua zona de baixa velocidade no seu centro. Isso se dá devido à presença do cilindro de arenito com um furo no seu centro. Observa-se as menores velocidades no centro da inclusão, o que ocorre devido ao furo. No entanto, devido à pequena dimensão do furo e do seu forte contraste de velocidade, a forma e o tamanho da inclusão e do furo, não correspondem fielmente à realidade. Mais uma vez demonstra-se aqui o limite de resolução da técnica. O arcabouço de cimento cola apresenta velocidades coerentes, de 2000m/s a 2500m/s, e as velocidades da inclusão, de 1200m/s a 1500m/s, estão fortemente influenciadas pela presença do furo vazio.

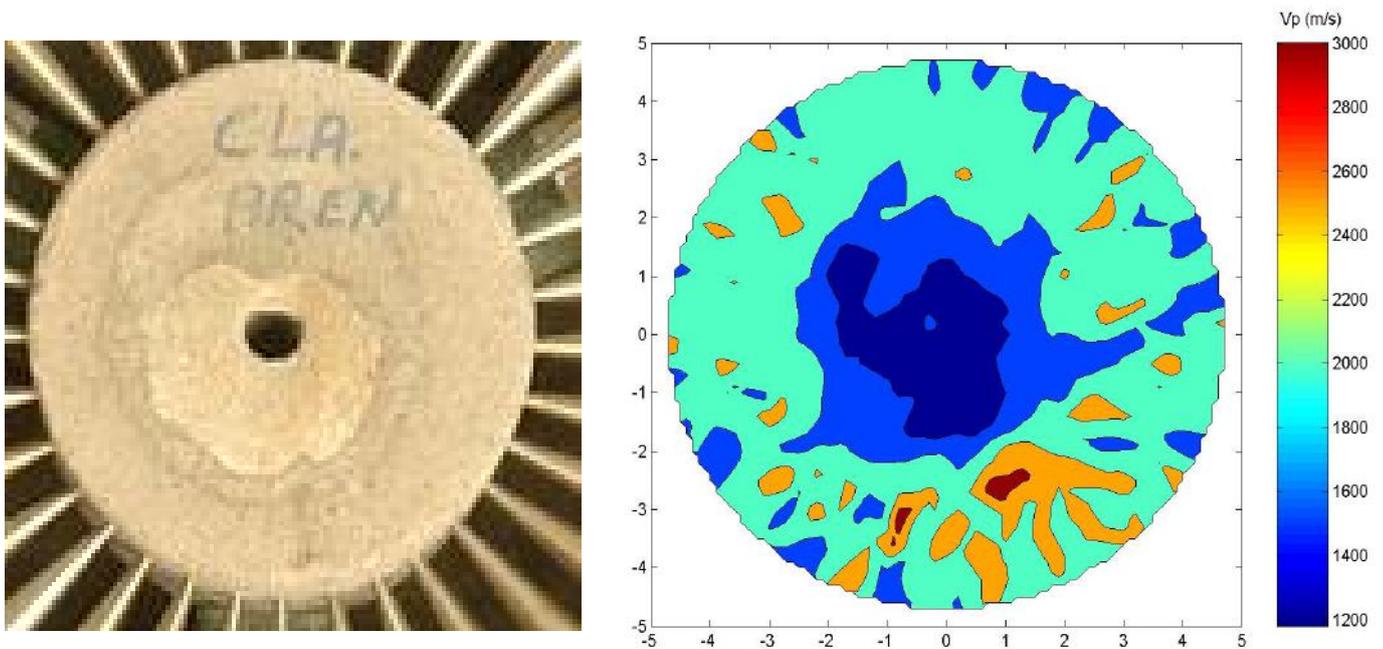


Figura 23 – Testemunho artificial com inclusão de arenito cujo furo se encontra vazio (esquerda) com correspondente tomograma de velocidade da onda P (direita).



O tomograma da Figura 24 identificou claramente a presença da inclusão de arenito com um furo central preenchido por cimento cola. Observe a leve descentralização da inclusão na amostra, o que é fielmente reproduzida no tomograma. A inclusão, embora distorcida, apresenta velocidades compatíveis, inclusive exibindo uma zona de alta velocidade na região do furo preenchido. A velocidade do cimento cola variam de 2200m/s a 2600m/s e o arenito possui velocidades entre 1800m/s a 2100m/s.

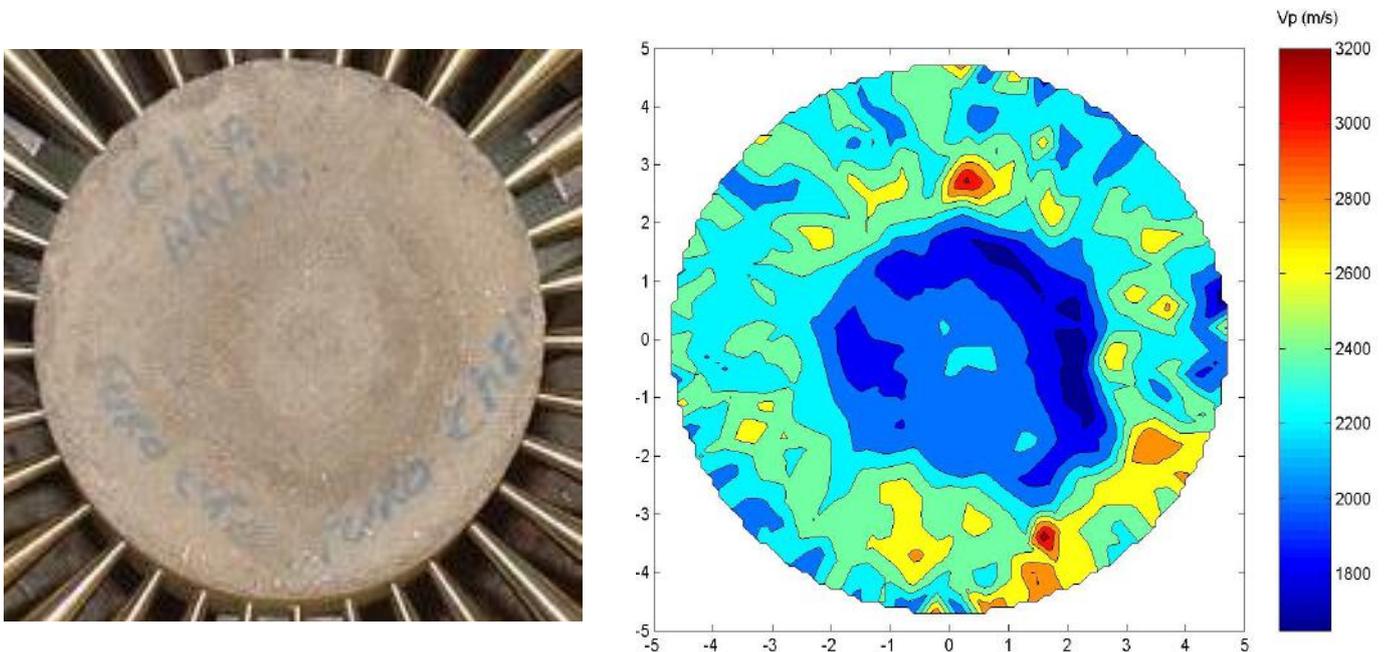


Figura 24 – Testemunho artificial com inclusão de arenito cujo furo se encontra preenchido por cimento-cola (esquerda) com correspondente tomograma de velocidade da onda P (direita).



## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho demonstra a capacidade da técnica de tomografia ultra-sônica de imagear o interior de testemunhos de poços através do imageamento de amostras artificiais de cimento ou cimento-cola com inclusões conhecidas de rochas com tamanhos e formas variadas. Nos nove testemunhos artificiais utilizados para a elaboração do presente trabalho, verificou-se que, na maioria deles, o tomógrafo foi bem eficaz na detecção das inclusões. A velocidade determinada para o material que compõe o arcabouço das diferentes amostras não variou muito. Já a velocidade das diferentes inclusões variou de acordo com o material que as compõem.

Características importantes das inclusões como forma, localização, disposição espacial, tamanho e grau de rigidez, podem ser determinadas, com níveis variados de precisão, através da tomografia ultra-sônica das rochas. Outras propriedades petrofísicas como porosidade, densidade, fluido saturante, tensão e tipo litológico podem ser avaliados através dos tomogramas de velocidade.

O algoritmo usado neste trabalho para a inversão dos dados de tomografia ultra-sônica possui restrições no que diz respeito à anisotropia dos materiais. Para materiais de elevado grau de anisotropia acústica o tomograma obtido apresenta uma grande discrepância em relação à amostra real. O efeito da anisotropia sobre o tomograma resultante pôde ser visto na amostra que contém uma inclusão de quartzito. Outro padrão característico rotineiramente presente nos tomogramas é a ocorrência de artefatos causados por difração da onda em inclusões que possuem bordas agudas, como nos casos dos cubos de granito e no meio cilindro de granito. Para o perfeito imageamento desses tipos de inclusões faz-se necessário que o programa de inversão de dados seja modificado, de modo a incorporar a anisotropia de velocidades e a filtragem do fenômeno de difração.

A resolução da técnica de imageamento de testemunhos por tomografia ultra-sônica é limitada, especialmente na presença de contrastes fortes de



velocidade. No entanto, todo o processo de inversão de dados tomográficos aqui utilizado supõe a presença de contrastes de velocidade pequenos.

Como recomendações para trabalhos futuros são sugeridos os seguintes temas:

- Incorporação da anisotropia de velocidades no algoritmo de inversão de dados tomográficos;
- Filtragem dos tempos relativos aos eventos de difração antes da inversão dos dados tomográficos em amostras contendo inclusões angulosas;
- Através do mapeamento das velocidades em sucessivos tomogramas, monitorar a evolução de frentes de saturação fluida, injeção de vapor e campos de tensão (ou poro-pressão) em blocos de rochas.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERY, G. B. (1993). Basics of seismic velocities. *The Leading Edge*, November 1993, pp. 1087-1091. Society of Exploration Geophysicists. USA.
- FERNANDES, R.A.R. (1998). Modelagem e migração para meios anisotrópicos utilizando a equação acústica completa da onda. Dissertação de mestrado. PPPG – UFBA.
- FOX, L.; HUSKEY, H.; WILKINSON, J. (1949). Notes on the solution of algebraic linear simultaneous equations. *Q. J. Mech. Appl. Math*, 1, 149-173.
- HOOD, J.A. (1990). Fracture estimation in anisotropic media. PhD Thesis, University of Hawaii.
- OHKUBO, T. & TERASAKI, A. (1977). Physical property and seismic wave velocity of rock. Urawa Research Institute, Oyo technical Note RP-479. Tokio. 13 pp.
- OPIELINSKI, K.J. & GUDRA, T. (2000). Ultrasound transmission tomography image distortions caused by the refraction effect. *Ultrasonics*, 38, 424 – 429. Elsevier.
- SCALES, J. and SMITH, M. L. (1997). Introductory geophysical inverse theory. Samizdat Press. Colorado School of Mines. 202 pp.
- SOARES, A. J., 2004. Ultrasonic tomography in cores. Abstracts of the 66th EAGE Conference. Paris, France. Paper G007.
- SOARES, A. J., 2005. Projeto e construção de um tomógrafo ultra-sônico para testemunhos. *Ninth International Congress of the Brazilian Geophysical Society*.
- SOARES, A. J., 2006. Anisotropia elástica induzida por tensões e heterogeneidades: Análise por tomografia ultra-sônica de testemunhos. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- TEIXEIRA, W., TOLEDO, M. C. M., FAIRCHILD, T. R. and TAIOLI, F. (2000). Decifrando a Terra. Ed. Oficina de textos – p. 45
- THOMAS, J. E. (2000). Velocidades Sísmicas. Rio de Janeiro, PETROBRAS, Universidade Petrobrás, núcleo BA, 132 p.



WYLLIE, M. R. J., GREGORY, A. R. and GARDNER, L.W. (1956). Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, Tulsa, vol.21, n.1, p. 41-70.