

3 Tomografia Computadorizada de Raios X

3.1. Fundamentos Teóricos de Tomografia Computadorizada de Raios X

A Tomografia Computadorizada de Raios X é uma técnica que permite a avaliação de modo não destrutivo e em tempo real da estrutura interna dos objetos, baseando-se na atenuação de raios X pela matéria. Neste método de inspeção, a imagem gerada preserva a informação espacial completa do objeto analisado, sendo derivada de um grande número de observações sistemáticas em diferentes ângulos, e reconstruída com o auxílio de um sistema computacional. A técnica foi desenvolvida na Inglaterra em 1972 por Hounsfield e revolucionou a radiologia médica pela produção de imagens anatômicas de precisão e detalhes clínicos extraordinários e pelo fato de permitir a reconstrução 3D do objeto a partir das imagens das seções transversais do mesmo.

Para melhor entendimento do processo de geração e interpretação de imagens por tomografia de raios X, são apresentados os tópicos a seguir.

3.1.1. Geração de raios X e interação com a matéria:

Uma fonte de raios X consiste de uma lâmpada à base de tungstênio que emite fótons dentro de um restrito espectro de energia, situado entre 50 e 140 KeV. Os fótons emitidos são orientados centrífuga e randomicamente, tais quais os emitidos por uma lâmpada convencional incandescente, e são sucessivamente colimados através de placas metálicas com pequenas aberturas lineares. O conjunto de colimadores absorve os fótons que se chocam contra suas paredes, deixando passar através de sua abertura um feixe contínuo de raios X com largura e espessura idênticas às dimensões da fenda dos colimadores.

Quando raios X atravessam um objeto, interações ocorrem entre energia e a matéria, e parte da energia é removida do feixe incidente. Essa remoção ocorre por absorção e por espalhamento. Para energias acima de 100 keV, os raios X interagem com a matéria, predominantemente através do efeito de espalhamento

(efeito Compton), o qual é dependente da densidade do material. À medida que a energia diminui, a absorção fotoelétrica, dependente do número atômico do material, vai se tornando o mecanismo dominante. A presença desses dois mecanismos permite que, através do controle apropriado do nível energético dos raios X, se façam medições seletivas com a geração de dois tipos de imagens, uma em função da densidade (empregada neste trabalho) e a outra do número atômico do material.

Segundo Wellington e Vinegar (1987) um feixe monocromático de raios X, com intensidade de fótons I_0 e passando através de uma seção transversal de um objeto, sofre uma atenuação que é proporcional ao caminho percorrido pelo feixe no interior do objeto (X_0) e à sua capacidade intrínseca de absorção de raios X, traduzida pelo coeficiente de atenuação de raios X (μ) da matéria que o compõe. A redução da intensidade do feixe incidente (I_0) para a do feixe emergente (I) é dada conforme a Lei de Beer:

$$I = I_0 \cdot e^{(-\mu X_0)} \quad (3.01)$$

Onde:

X_0 = Distância percorrida pelo feixe de fótons no interior do objeto [m];

μ = Coeficiente de atenuação linear médio da matéria componente do objeto [1/m];

I_0 = Intensidade do feixe original de fótons medido diretamente por detector exclusivo, posicionado junto à fonte de raios X, sem sofrer qualquer atenuação do objeto em estudo [W];

I = Intensidade do feixe de fótons após atenuação provocada pelo objeto [W].

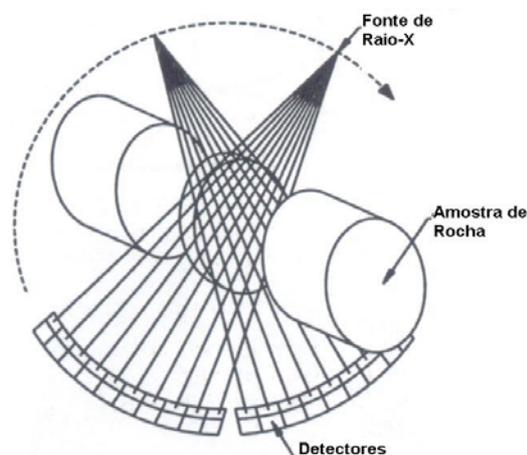


Figura 3.01.– Configuração do sistema de aquisição de imagens do tomógrafo

O coeficiente de atenuação μ é uma medida para a probabilidade que um fóton de raio X tem, em ser atenuado quando atravessa o objeto. A equação 2 (Curry et al., 1990) fornece a aproximação de μ para fótons entre o espectro de energia entre 30 a 200 KeV.

$$\mu = (1/2000) * \rho * N_A \left[0.597 * 10^{-24} * e^{[-0.0028 * (E - 30)]} + 1.25 * 10^{-24} * Z^{2.0} / E^{1.9} + 9.8 * 10^{-24} * Z^{3.8} / E^{3.2} \right] \quad (3.02)$$

Onde:

ρ = Massa específica do objeto (Kg/m³);

N_A = Número de Avogrado (1/kmol);

E = Energia do fóton (KeV);

Z = Número atômico.

Para materiais compostos de diversos átomos é usado um número atômico efetivo, definido pela seguinte equação .

$$Z_e = (\sum f_i \cdot Z_i^{3,8})^{1/3,8} \quad (3)$$

Onde:

Z_e = número atômico efetivo;

Z_i = número atômico das i^{th} espécies;

f_i = fração de elétrons sobre os i^{th} números atômicos das espécies.

3.1.2.

Formação da Imagem

Para a reconstrução da imagem, a área da seção transversal pode conceitualmente, ser discretizada em pequenas células de dimensão y (0,5 mm²), denominadas pixels. A seção possui uma espessura determinada e constante. Logo, tal discretização pode ser compreendida pelo aspecto volumétrico, onde cada elemento discreto de volume, aqui designado voxel, possui dimensões laterais y e espessura z . Deriva de tal discretização a visualização teórica de que a seção transversal seja formada pelo ordenamento matricial de $n \times n$ voxels. Em cada voxel o coeficiente de atenuação é considerado constante. Desse entendimento, podemos interpretar a atenuação global de um feixe de raios X como o somatório da atenuação individual (μ_i) de cada voxel situado em sua trajetória (raio soma), sendo:

$$I_i = I_{i0} \cdot e^{(-\mu_i X)} \quad (3.04)$$

$$I = I_0 - \sum_{i=0}^n [I_{i0} \cdot e^{(\mu_i X)}] \quad (3.05)$$

Onde:

y = Dimensão da seção linear do voxel i ;

n = Número de voxels presentes na trajetória do feixe.

Nenhum esforço foi feito para modificar os algoritmos originais de reconstrução médica, residente no tomógrafo utilizado, para aplicação em rocha. O algoritmo empregado é um algoritmo de ultra resolução (AH_07541) projetado para a reconstrução da cabeça humana, região que apresenta maiores contrastes de densidade.

Os métodos de reconstrução da imagem fazem a deconvolução do raio soma de modo a determinar o valor do coeficiente de atenuação de cada pixel. Os valores obtidos são normalizados para uma escala apropriada, uma vez que na prática não se utilizam os valores absolutos do coeficiente de atenuação linear, e sim uma escala de números tomográficos.

3.1.3.

Unidades utilizadas em imagens tomográficas:

A unidade padrão para tomógrafos médicos é a unidade Hounsfield (HU), que é relacionada à atenuação de raios X pela equação 6.

$$HU(x,y) = \frac{\mu_{(x,y)} - \mu_w}{\mu_w} \times 1000 \quad (3.06)$$

Onde:

$HU(x,y)$ = unidade Hounsfield como função da posição;

$\mu(x,y)$ = coeficiente de atenuação para raios X do material, também como função da posição;

μ_w = coeficiente de atenuação para raios X da água.

Por convenção, o valor padrão de HU para a água é 0 e para o ar é - 1000. Desta forma, cada unidade HU representa uma alteração de 0,1 % no coeficiente de atenuação do material investigado em relação à água. Tomógrafos médicos são calibrados utilizando-se ar e água como padrões, exatamente por isso, unidades Hounsfield representam a escala utilizada em medicina.

A aquisição de imagens dos ensaios de produção de areia para esta dissertação foi realizada no Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios X do CENPES. O tomógrafo deste laboratório é da marca Picker - PQS / 1200 detectores.

Este equipamento é calibrado com rochas de composição semelhante àquelas que serão investigadas. Neste caso, os valores gerados pelo tomógrafo não podem ser associados à escala Hounsfield. Por este motivo, os resultados são apresentados como números CT que são números relacionados com a densidade volumétrica do material usados como escala de trabalho. Na maioria dos tomógrafos, a faixa de unidades CT vai de -1000 representando o ar a 3000, representando materiais bastante densos. Rochas reservatório estão geralmente na faixa de 1000 a 2000.

Devido a uma série de defeitos apresentados por este equipamento nos últimos tempos, não se realizou nenhuma calibração específica para os materiais empregados : arenito Rio Bonito e o arenito sintético.

3.1.4. Escala de cores ou tons de cinza:

Uma vez obtida a matriz de números CT, estes são convertidos para uma escala de cores ou tonalidades de cinza, gerando uma imagem representativa da estrutura interna do material analisado.

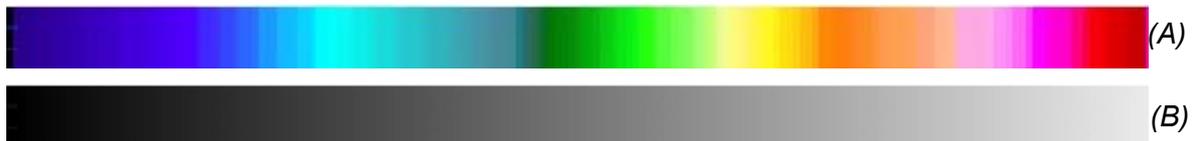


Figura 3.02.- Escala de cores (A) e de tonalidades de cinza (B).

O mapa de cores que acompanha as seções transversais mostra a variação da atenuação dos raios X pelo material analisado. Nele as cores do espectro visível são associadas a números CT, resultantes da atenuação dos raios X pela matéria. Para garantir uma melhor visualização das heterogeneidades presentes nas

amostras, estas cores são associadas a um intervalo limitado de números CT, de acordo com a absorção apresentada por cada amostra em particular. Por isso, não é possível comparar seções visualizadas com diferentes escalas de cores. Cabe aqui ressaltar que é possível uma associação, ainda que não quantitativa, entre números CT e densidade da amostra. Em imagens apresentadas em tons de cinza, tons mais escuros representam regiões de baixa densidade em relação às áreas mais claras. O negro representa regiões com números CT abaixo do limite inferior da escala escolhida, enquanto o branco representa regiões com números CT acima do limite superior. Para imagens apresentadas em escala de cores, tons de azul escuro representam regiões de baixa densidade, enquanto as vermelhas representam regiões de alta densidade. As cores intermediárias presentes no mapa de cores representam densidades também intermediárias.

3.2.

Utilização da Tomografia Computadorizada de Raios X em Rochas

Somente na década de 80 a tomografia computadorizada de raios X passou a ser aplicada nas áreas de petrofísica e engenharia de reservatórios para os estudos de mecânica das rochas; correlação entre testemunhos e perfis dos poços; caracterização da invasão do fluido de perfuração; quantificação de mineralogias complexas de algumas rochas, e em outros casos.

A seguir são citados alguns trabalhos envolvendo tomografia computadorizada na área de rochas.

Cook *et al* (1993) utilizaram a tomografia computadorizada de raios X para acompanhar a evolução do padrão de invasão do fluido de perfuração em poços de petróleo. A figura 3.03 mostra a interação arenito/lama bentonítica por um período de 10 horas.

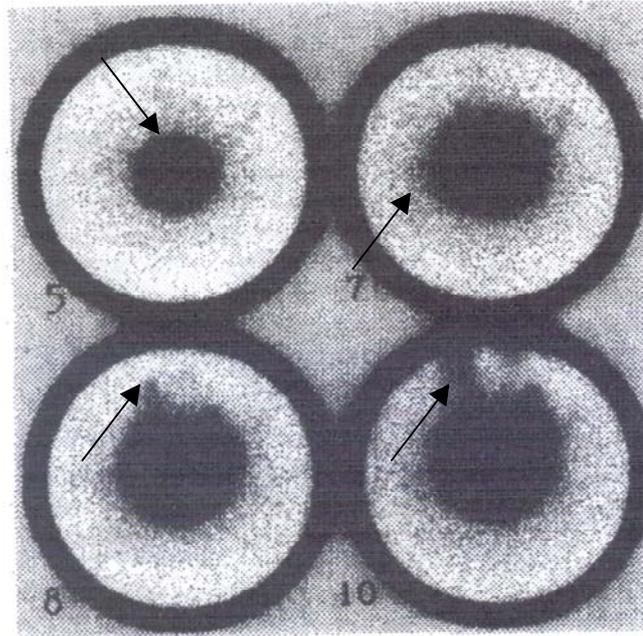


Figura 3.03 – Evolução da invasão de fluido de perfuração durante um período de 10 horas. A região escura ao redor do poço indica que o fluido de saturação da rocha (alta densidade) é deslocado por uma solução menos densa que é o fluido de perfuração. Os números indicam horas desde o início do ensaio.

Pôde-se observar, pelas regiões mais escuras da imagem, que até 5 horas do início da injeção do fluido o padrão invasão permanece concêntrico com o poço. Entretanto, após 7 horas de circulação do fluido, a invasão se torna assimétrica, com pequena alteração abaixo do poço, mas com crescimento de *fingers* de invasão do fluido acima deste. Esta evolução é direcionada pela flutuação da invasão do fluido, e pode ser um fator importante na interpretação dos perfis de poços horizontais.

Verhelst *et al.* (1995) empregaram a tomografia computadorizada de raios X na investigação de heterogeneidades em amostras de arenito e siltito. As fraturas encontradas nas amostras foram divididas em fraturas de alta e de baixa densidade tomográfica. As fraturas preenchidas por material com alta densidade são visualizadas nas regiões de tons de cinza mais claros. E as fraturas com material de baixa densidade são representadas em tons de cinza escuro. A figura 3.04 representa seções tomografadas de amostras de arenito e siltito, respectivamente. Uma seção é tomada na direção longitudinal e a outra na transversal ao eixo das amostras. Nestas duas amostras ocorrem com alta e baixa densidade com

complexa distribuição espacial, configurando um meio altamente heterogêneo que exerce influência sobre o comportamento geomecânico.

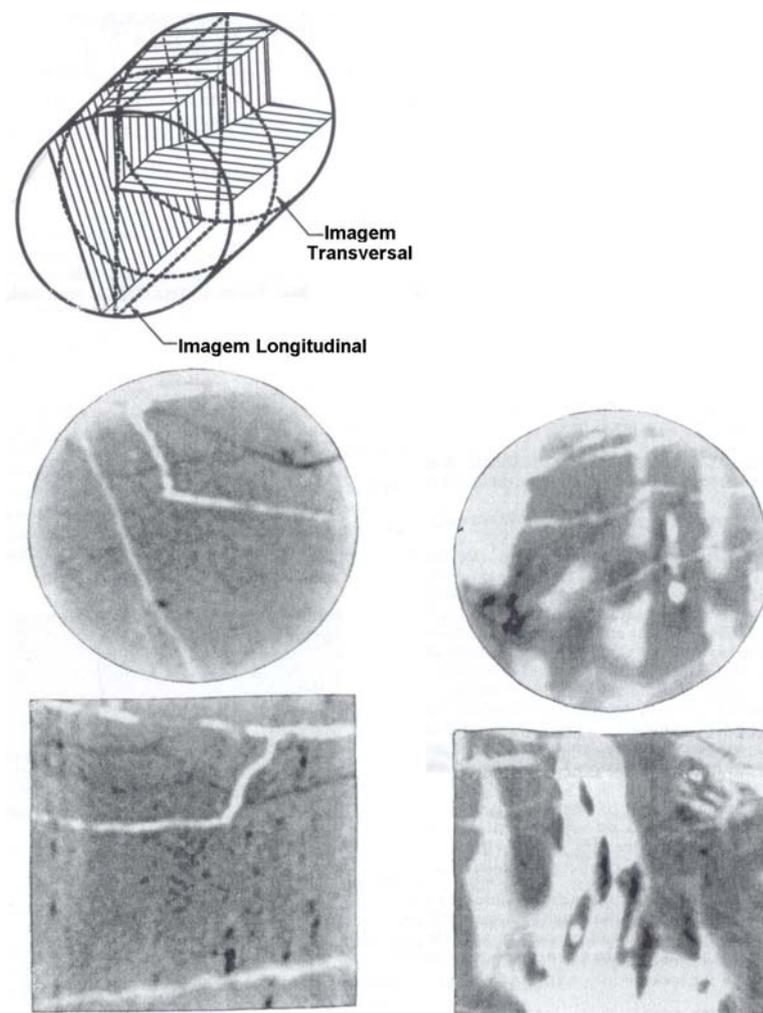


Figura 3.04 – Exemplo de seções de uma amostra de arenito (à esquerda) e de siltito (à direita)

Em 1999, Sugawara et al, sugeriram um procedimento para acompanhar o processo de saturação por água em rochas reservatório a partir de imagens tomográficas. Como citado na seção anterior, a imagem da tomografia computadorizada de raios- X consiste de valores de CT de cada pixel e o valor de CT é geralmente proporcional à densidade. Consequentemente, o incremento nominal da densidade da amostra devido à penetração da água nos poros da rocha pode ser detectado aplicando a subtração de imagens tomográficas antes, durante e depois da saturação. Exemplo da aplicação desta técnica, durante ensaios de saturação unidimensional, é apresentado na Figura 3.05.

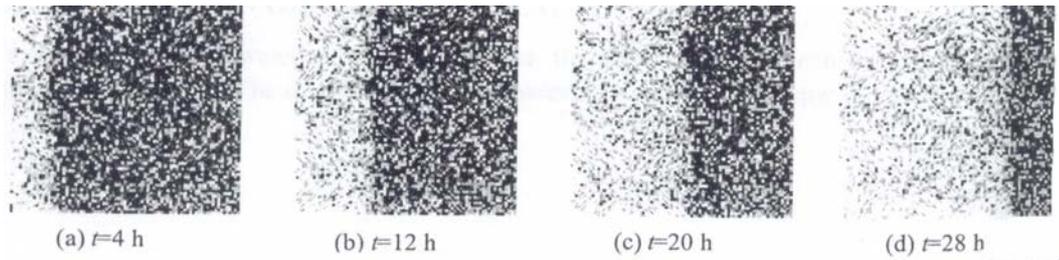


Figura 3.05 – Processo de saturação por água observado por imagens tomográficas. O avanço da região mais clara nas figuras representa o aumento da densidade pela invasão da água nos poros da rocha.

Feng *et al* (2004) elaboraram um programa experimental em que amostras de arenito, saturadas com soluções químicas com diferentes valores de pH e concentração de íons, foram submetidas a ensaios de compressão triaxial. O objetivo deste trabalho foi analisar a influência corrosiva destas soluções na resistência da rocha baseando-se em imagens e valores de CT. As amostras de arenito foram retiradas da fundação da barragem de Xianglangdi sobre o Rio Amarelo, China. A pressão de confinamento utilizada foi de 5 MPa e a tensão axial foi aplicada com taxa de carregamento igual a 1,3 MPa/min. A partir destes ensaios, Feng *et al* puderam concluir que as reações químicas das substâncias corrosivas provocam redução da resistência da rocha, aceleração da propagação da ruptura e mudança no modo de ruptura da mesma. A variação no padrão de ruptura pode ser observada nas imagens representadas na figura 3.06 ao final dos ensaios de compressão triaxial.

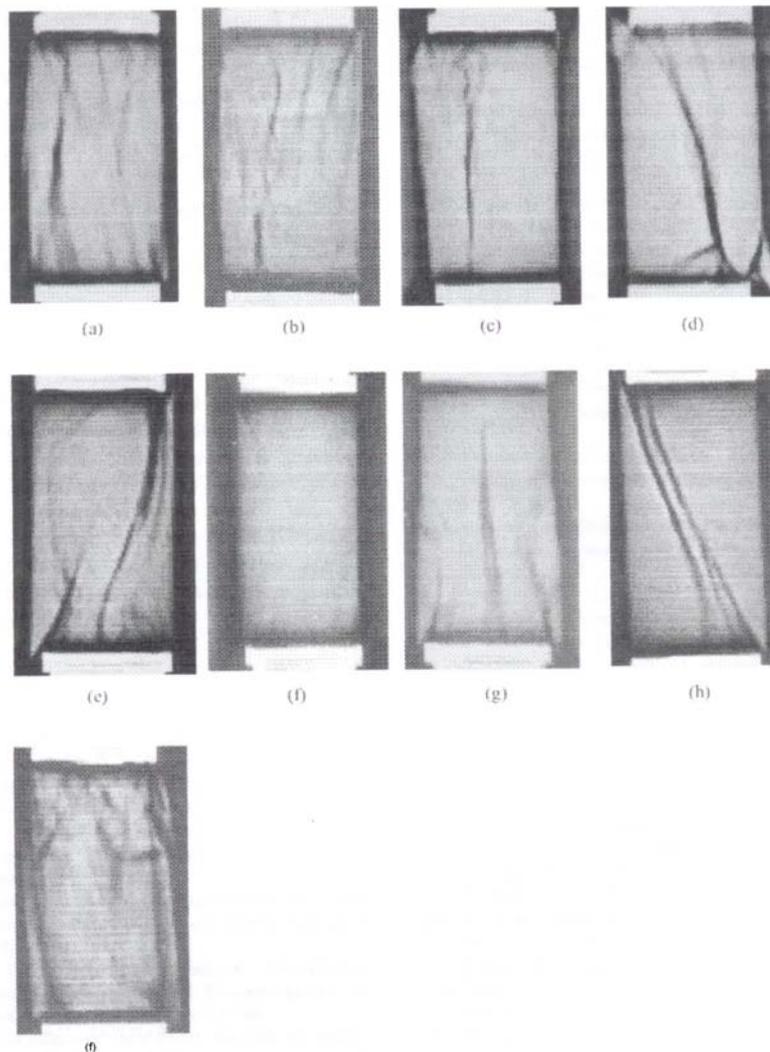


Figura 3.06 – Imagens ao final dos ensaios de compressão triaxial em amostras de arenito saturadas com diferentes soluções aquosas ou no estado natural: (a) NaCl em pH 7; (b) NaCl em pH 9; (c) NaCl em pH 12; (d) ar; (e) água do Rio Amarelo (China); (f) água destilada; (g) CaCl_2 em pH 9; (h) NaCl em pH 2; e (i) NaHCO_3 em pH 9.

Ensaio de compressão simples com acompanhamento em tempo real por tomografia computadorizada de raios X foram realizados por Santos *et al.* (2004). Dados sobre o modo de propagação de rupturas, bem como pressão de início da ruptura, são de grande importância na área de Mecânica das Rochas. Neste caso as informações obtidas nos ensaios de compressão simples são utilizadas para prever o comportamento da rocha no processo de produção de areia em poços.

Para realização dos ensaios, cada um dos corpos de prova foi colocado em uma célula triaxial projetada especialmente para ensaios de produção de areia no tomógrafo, detalhada no próximo capítulo. A taxa do carregamento axial foi

aplicada ao sistema com auxílio de um controlador/atuador de pressão GDS, também especificado no capítulo 4.

A célula triaxial contendo o corpo de prova foi posicionada na mesa do tomógrafo conforme visualizado na figura 3.07. Em seguida foi realizado um ensaio radiográfico que consiste de um exame longitudinal do corpo de prova. Serve também como orientação para a elaboração dos planos de cortes transversais a serem executados conforme exemplificado na figura 3.08. Por este motivo, estas imagens são chamadas de pilotos. Estes planos de cortes, utilizados em todas as etapas dos testes, apresentam seções transversais com espessura e espaçamento de 5mm.



Figura 3.07 – Posicionamento da célula triaxial na mesa do tomógrafo.

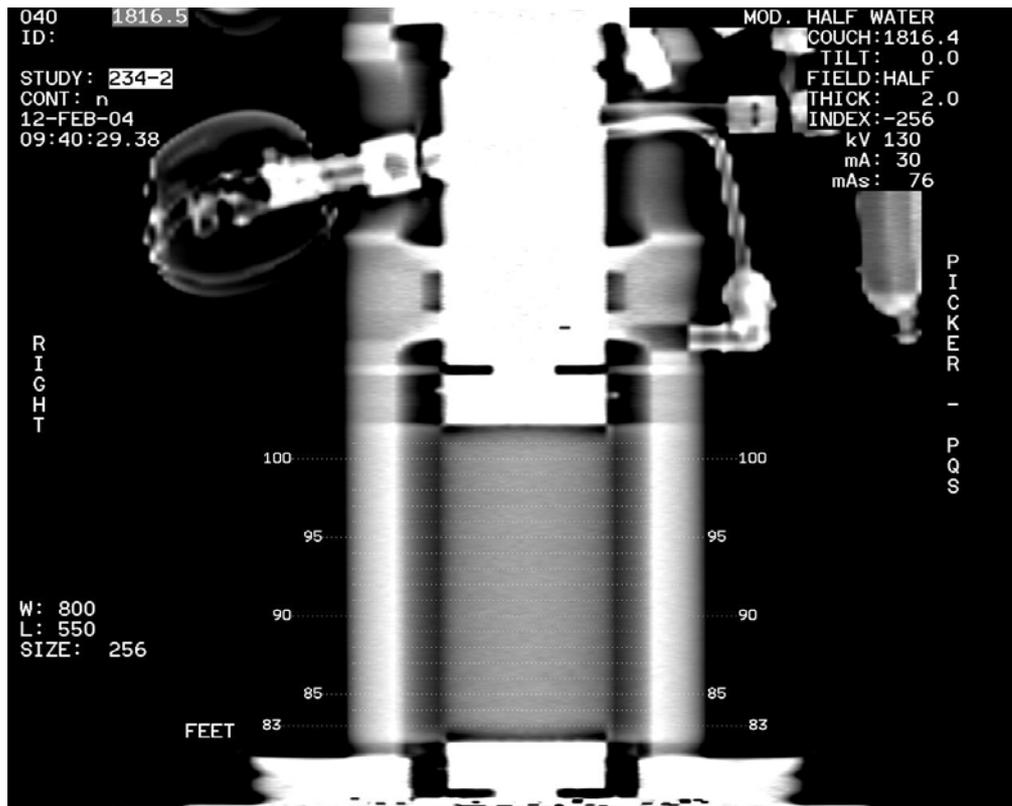


Figura 3.08 – Imagem longitudinal do corpo de prova apresentando o plano de cortes.

Após completado o exame longitudinal, foram obtidas imagens tomográficas definidas pelo plano de cortes com tensão axial nula. Em seguida, foram estabelecidas rampas de carregamento axial, isto é, foram aplicadas variações de tensão em um determinado intervalo de tempo para cada um dos corpos de prova.

Para ilustrar este trabalho, utilizou-se o corpo de prova G-4. Trata-se de uma amostra de argamassa com diâmetro igual a 49,91 mm e altura de 97,64 mm. A rampa de pressão aplicada para este corpo de prova foi de 0 à 20 MPa em 2 horas, ou seja, a taxa de carregamento foi igual a 0,17MPa/min. A aquisição de imagens foi realizada em tempo real e as seções transversais e longitudinais pilotos são apresentados nas figuras 3.09 a 3.12, acompanhadas das respectivas posições em relação à base do piloto e pressões.

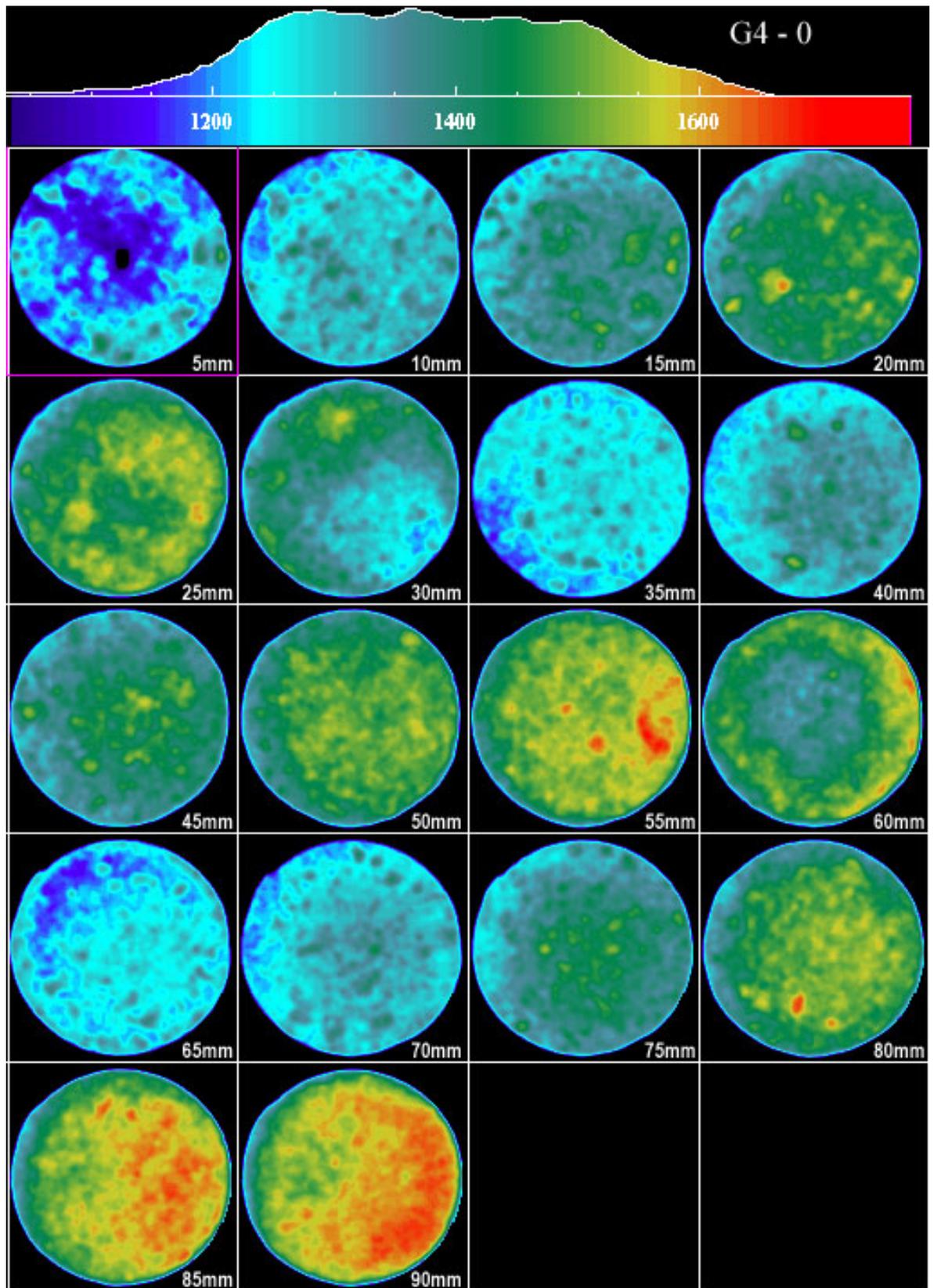


Figura 3.09 – Seções transversais do corpo de prova G-4 com tensão axial nula.

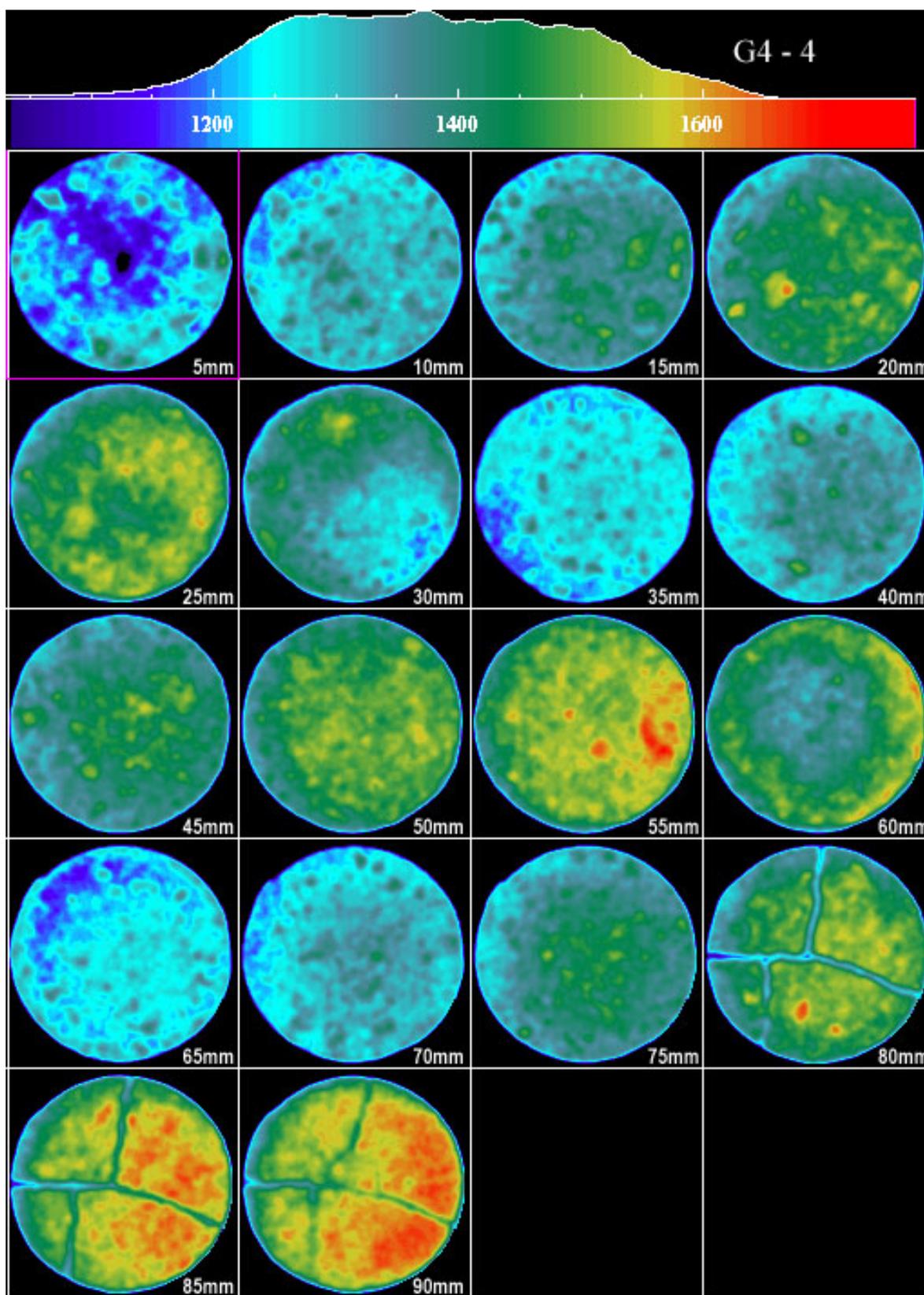


Figura 3.10– Seções transversais do corpo de prova G-4 com tensão axial de 2,5 MPa, após 15 minutos do início do ensaio. Notar início da ruptura nas três últimas seções.

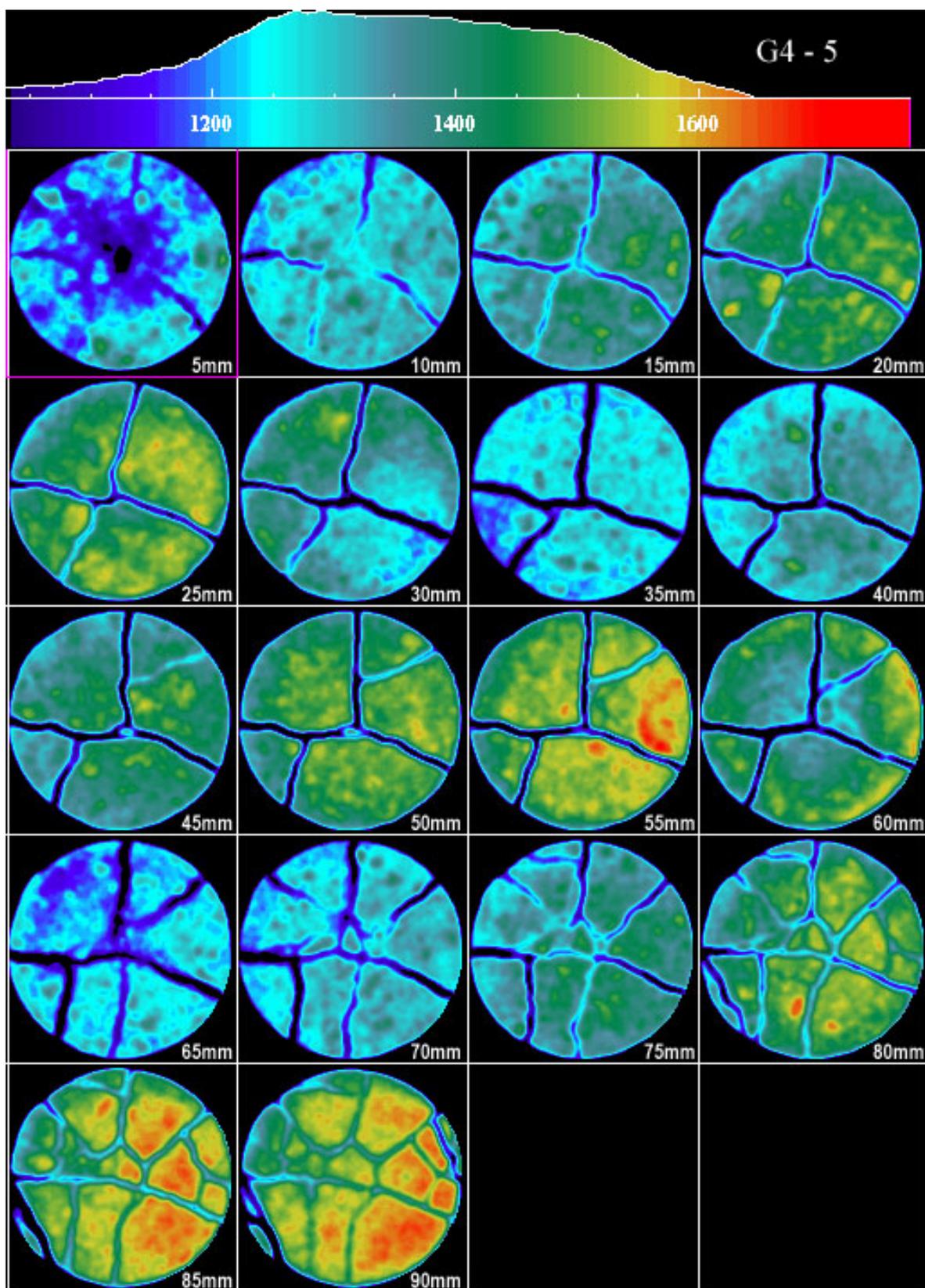


Figura 3.11 – Seções transversais do corpo de prova G-4 com tensão axial de 3,3 MPa, após 20 minutos do início do ensaio.

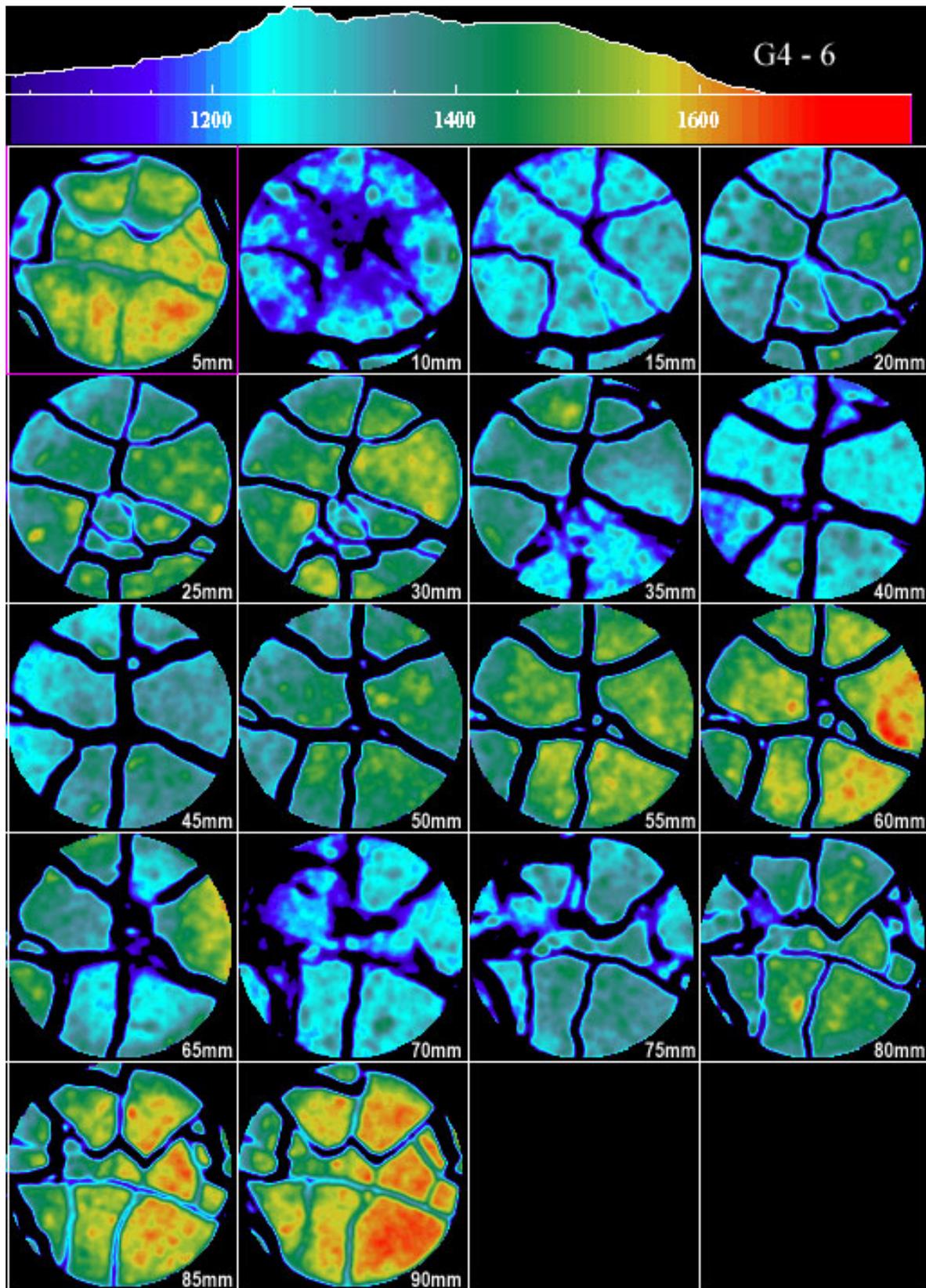


Figura 3.12 – Seções transversais do corpo de prova G-4 com tensão axial de 4 MPa, após 25 minutos do início do ensaio.

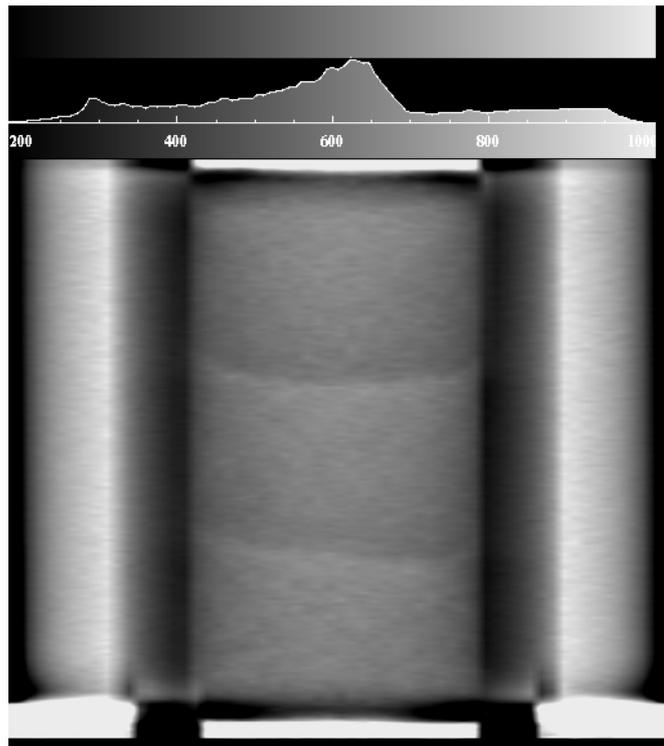


Figura 3.13 -Piloto do corpo de prova G-4 com tensão axial nula. Através da tomografia pode-se observar o acamamento da amostra provocado pela confecção em camadas.

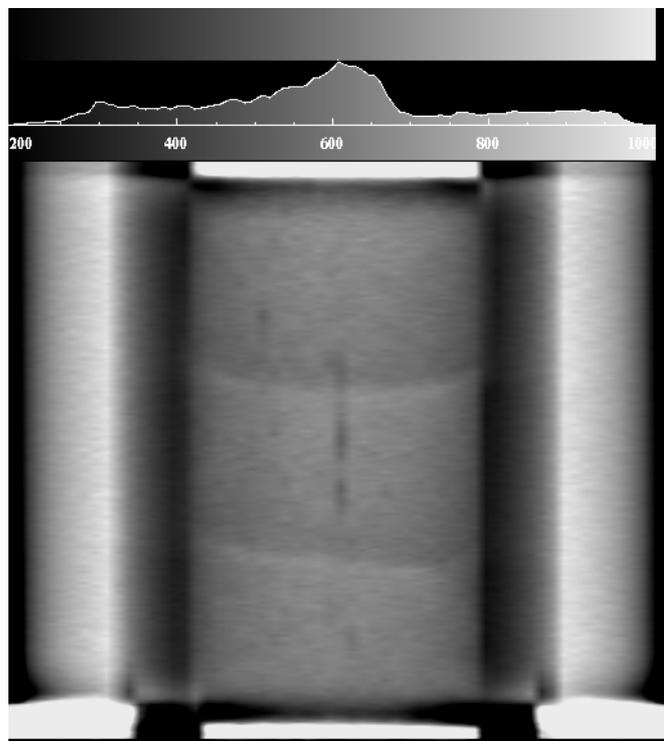


Figura 3.14 - Piloto do corpo de prova G-4 com tensão axial de 2,8 MPa, após 17 minutos do início do ensaio. Observa-se início de fraturas se propagando a partir da região central do corpo de prova.

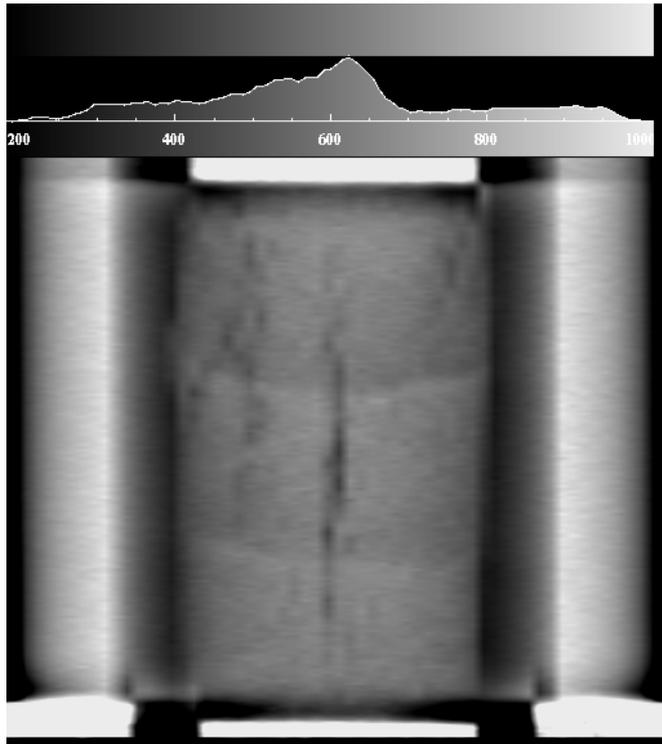


Figura 3.15 - Piloto do corpo de prova G-4 com tensão axial de 3,8 MPa, após 23 minutos do início do ensaio. Verifica-se a extensão da fratura central e aparecimento de outras na extremidade superior.

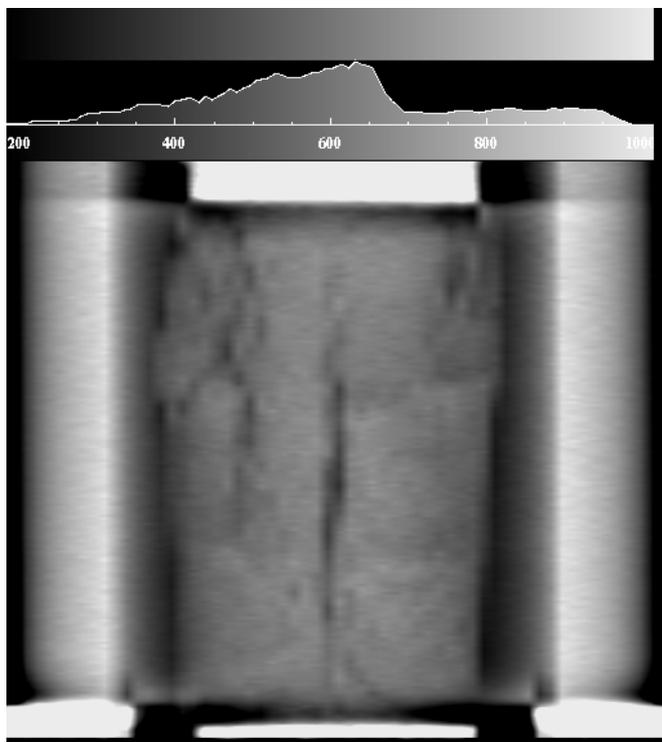


Figura 3.16 - Piloto do corpo de prova G-4 com tensão axial de 5 MPa, após 30 minutos do início do ensaio.

Santos concluiu que, aplicação da técnica de tomografia computadorizada se mostrou eficaz na visualização da estrutura interna do corpo de prova. Foi possível o acompanhamento por imagens transversais e longitudinais da propagação da ruptura em ensaios de compressão simples em rochas.



Figura 3.17 - Foto do corpo de prova G-4 antes do ensaio.



Figura 3.18 - Foto do corpo de prova G-4 após o ensaio.

A partir das imagens das seções transversais foi possível reconstruir o ensaio tridimensionalmente através do software Ensignt desenvolvido por CEI – Computacional Engineering International (USA). A seguir são apresentadas fotos instantâneas, a um certo ângulo, das visualizações 3D do corpo de prova (figuras 3.23 a 3.25).

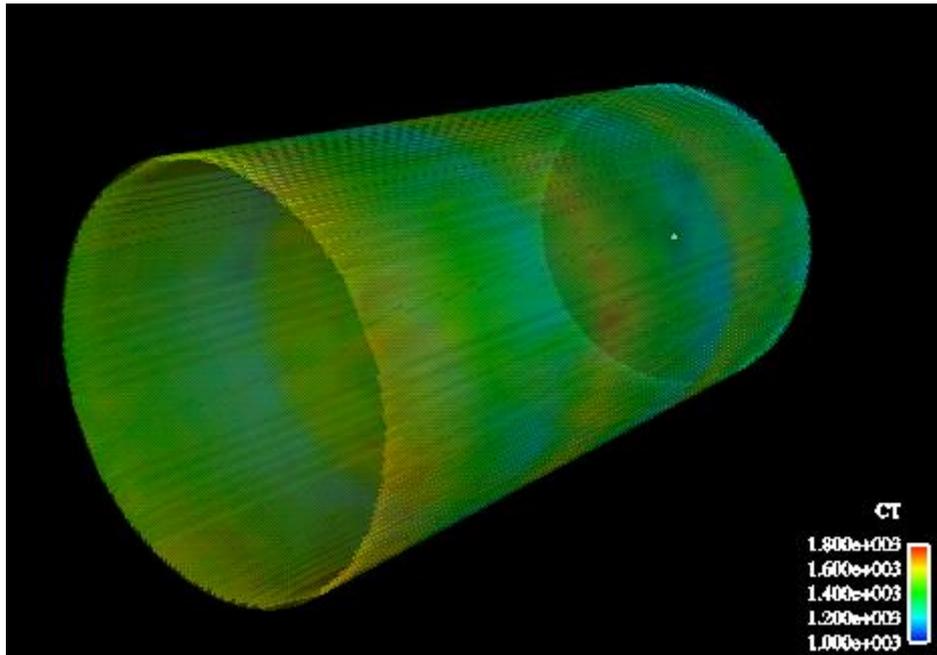


Figura 3.19 – Instantâneo da reconstrução 3D no início do ensaio.

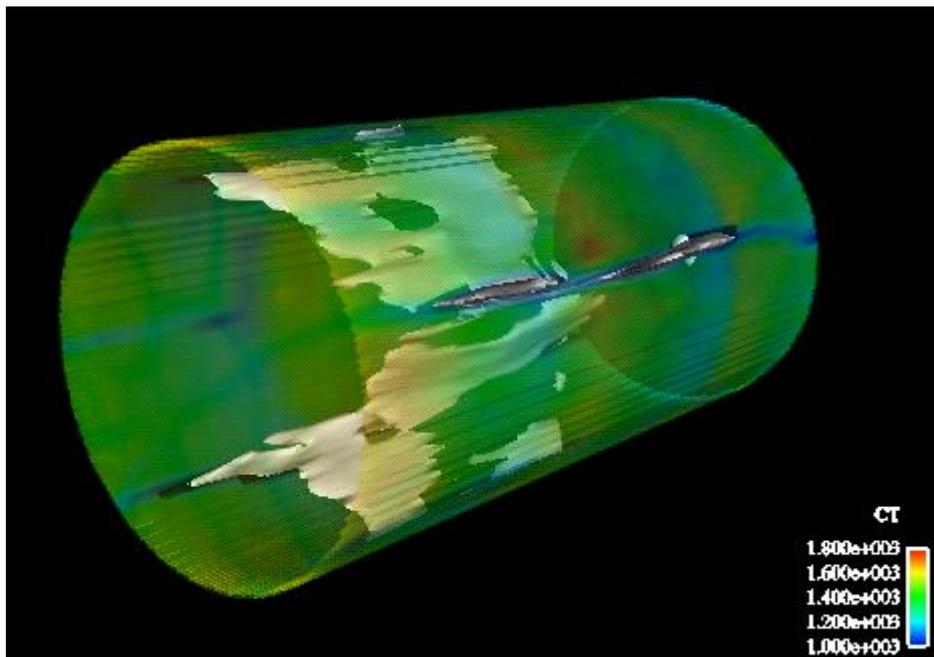


Figura 3.20 – Instantâneo da reconstrução 3D com tensão axial de 3,3 MPa, após 20 minutos do início do ensaio.

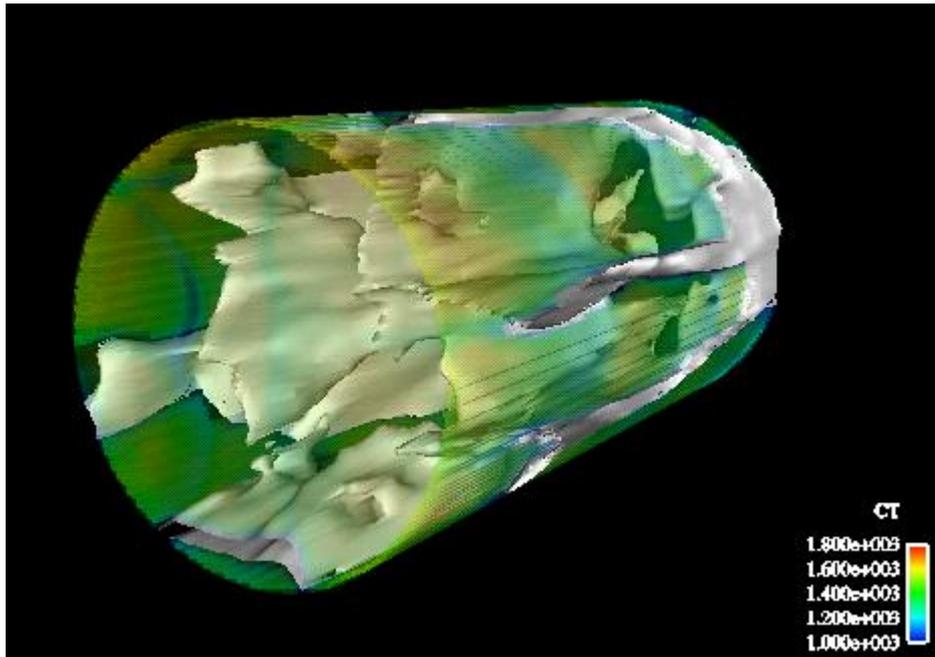


Figura 3.21 – Instantâneo da reconstrução 3D com tensão axial de 5 MPa, após 30 minutos do início do ensaio.