

2

Tomografia Computadorizada de Raios X

2.1

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.

Informações técnicas de geração e interpretação de imagens mencionadas a seguir foram fornecidas pelo CENPES, aonde foram feitos os ensaios com a utilização da tomografia de raios X.

2.1.1

Formação da Imagem

Para a reconstrução da imagem, a área da seção transversal pode conceitualmente, ser discretizada em pequenas células de dimensão X , 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 x 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 de cada voxel situado em sua trajetória.

Nenhum esforço foi feito para modificar os algoritmos originais de reconstruções médicas, residentes 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.

Este equipamento é calibrado com rochas de composição semelhante às aquelas 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 usado 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 Sergi e o arenito sintético.

2.1.2

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.

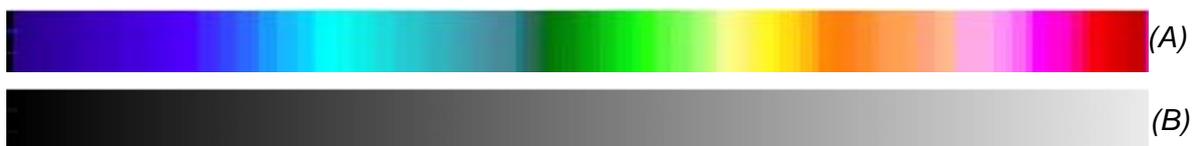


Figura 2.01 – Escala de cores (A) e de tonalidades de cinza (B).

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.

2.2

Utilização da Tomografia Computadorizada de Raios X em Rochas

Segundo Santos (2004), 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.

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 2.02:

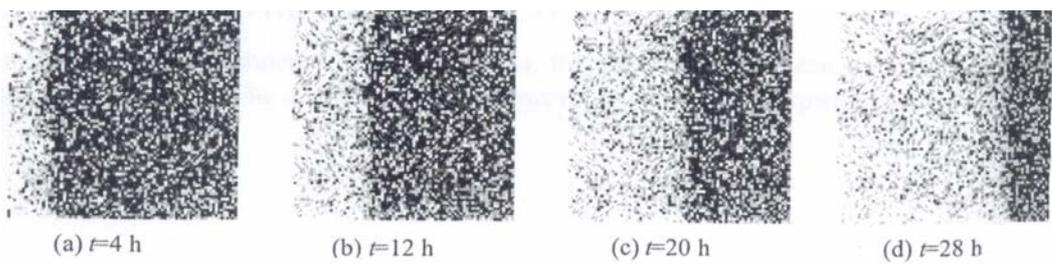


Figura 2.02 – Processo de saturação por água observada por imagens tomográficas. O avanço da região mais clara nas figuras representa o aumento da densidade pela invasão da água nos poros da rocha.

Ensaios de compressão simples com acompanhamento em tempo real por tomografia computadorizada de raios X foram realizados por Costa *et al.* (2006). Dados sobre o modo de propagação de rupturas, bem como sobre a 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 Pressurizador, também especificado no capítulo 4.

A célula triaxial contendo o corpo de prova foi posicionada na mesa do tomógrafo conforme visualizado na figura 2.03. 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 2.04. 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 2.03 – Posicionamento da célula triaxial na mesa do tomógrafo.

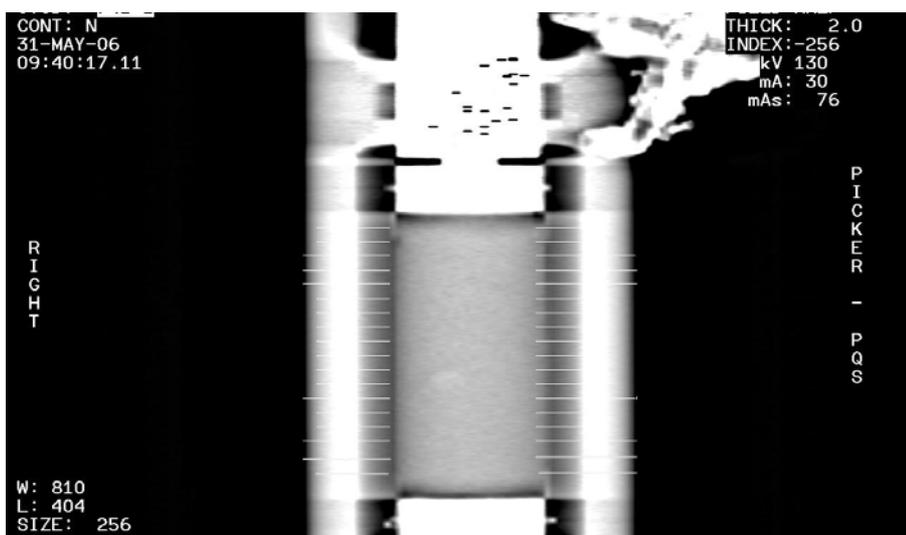


Figura 2.04 – Imagem longitudinal do corpo de prova apresentando o plano de cortes.

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 SER-1. Trata-se de uma amostra de arenito Sergi com diâmetro igual a 49,91 mm e altura de 98,64 mm. A rampa de pressão aplicada para este corpo de prova foi de 0 a 20 MPa em

53 minutos, ou seja, a taxa de carregamento foi igual a 0,01bar/seg. A aquisição de imagens foi realizada em tempo real e as seções transversais e longitudinais pilotos são apresentados nas figuras 2.06 a 2.08, acompanhadas das respectivas posições em relação à base do piloto e pressões.

Com a compressão da amostra, o material do pistão (aço) aparece na primeira seção, aumentando a densidade da imagem tomográfica. Por isso, os últimos estágios apresentam a última seção magenta, significando que a densidade está acima do limite máximo da escala de cores escolhida. Figura 2.08.

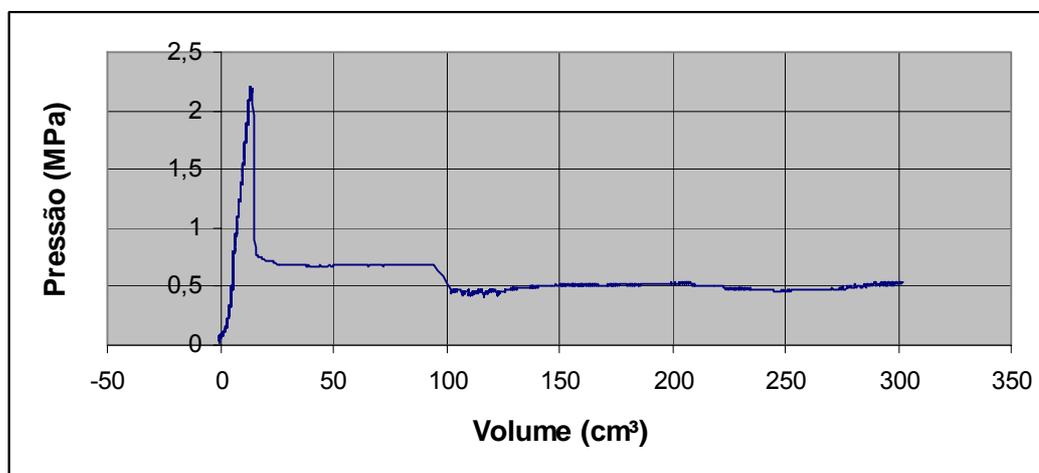


Figura 2.05 – Gráfico ensaio Uniaxial SER-1.

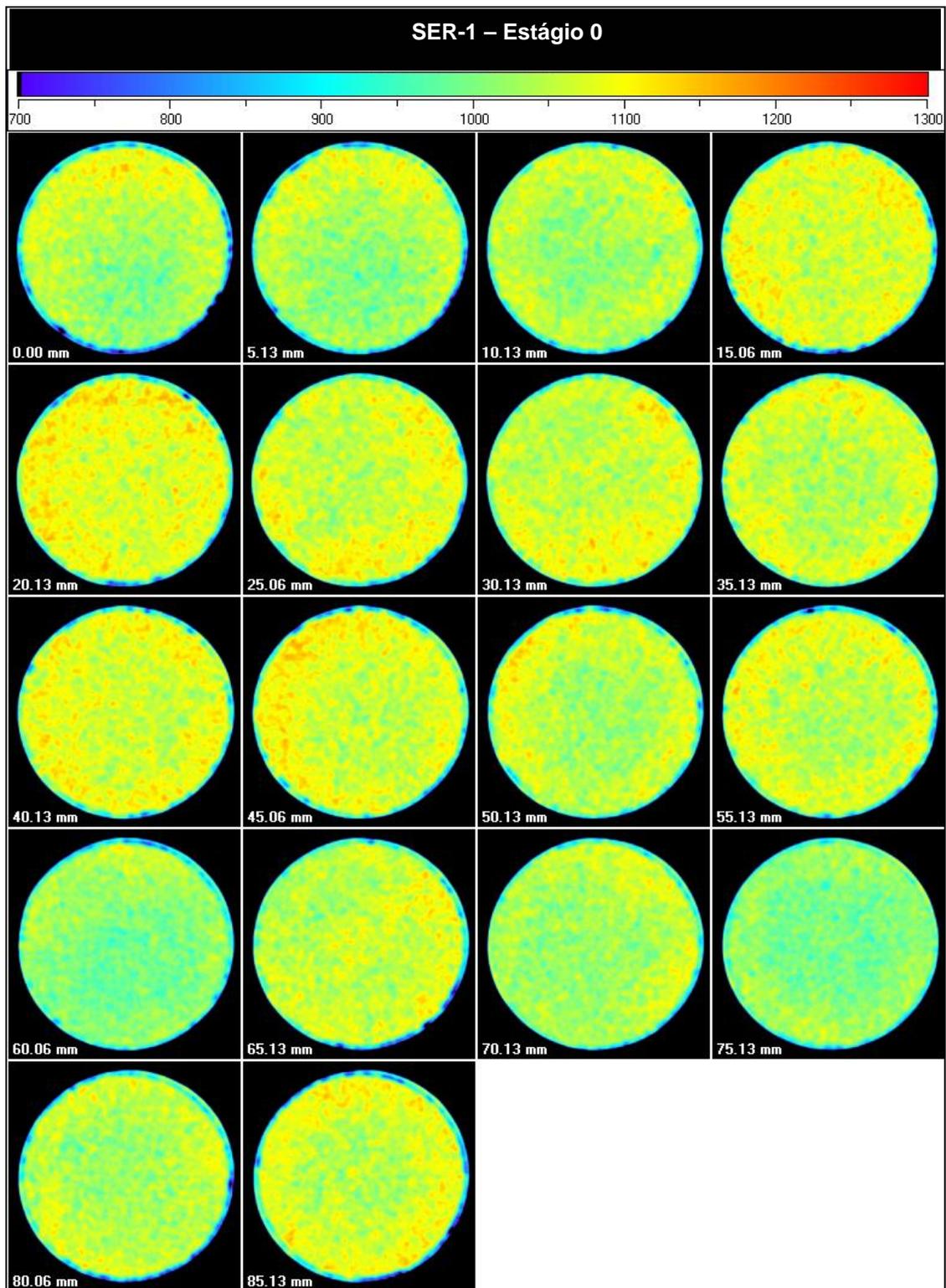


Figura 2.06 – Seções transversais do corpo de prova SER-1 com tensão axial nula.

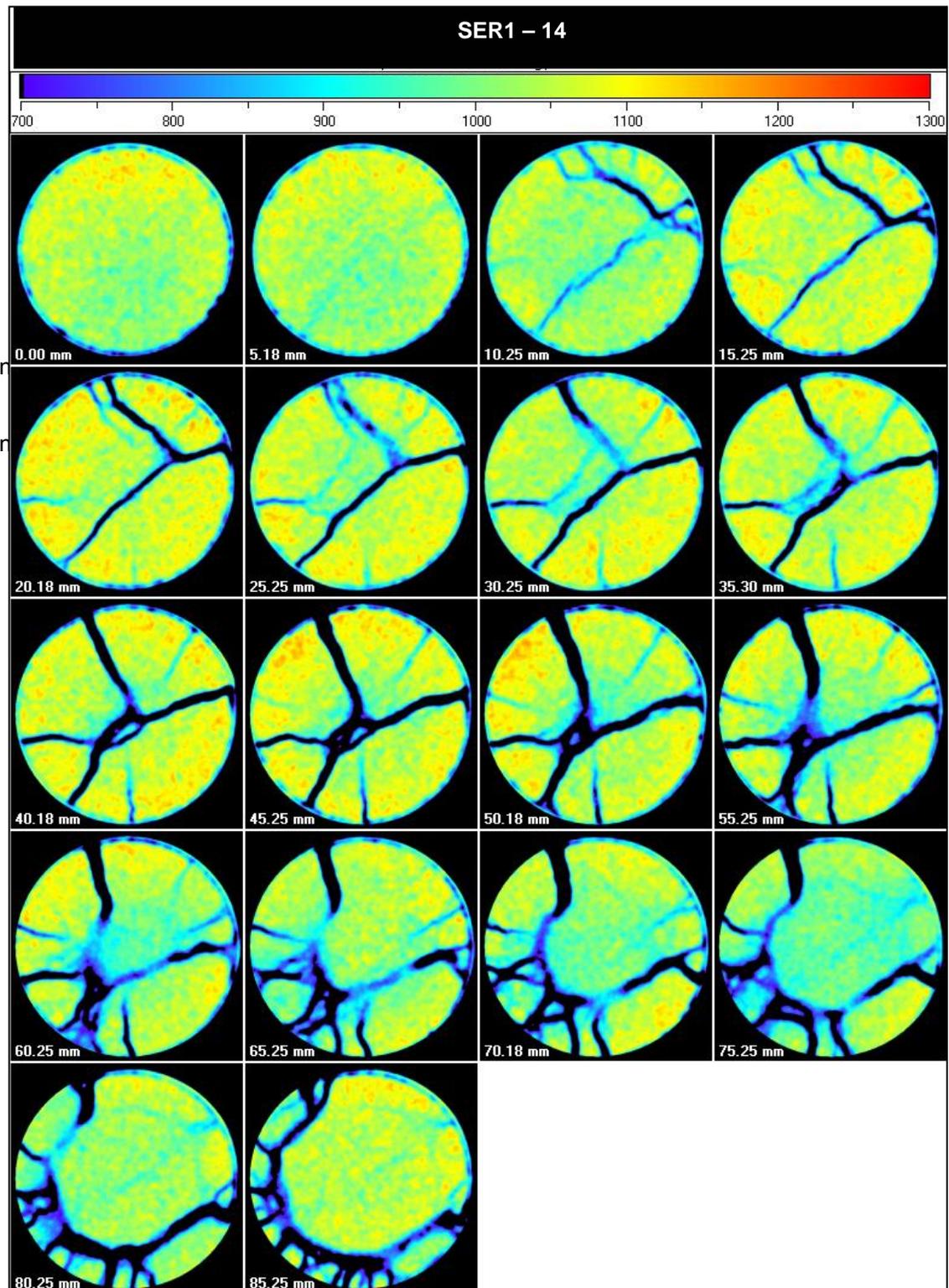


Figura 2.07 – Seções transversais do corpo de prova SER-1 com tensão axial 18 bar (1,8MPa), após 33 minutos do ensaio. Neste tempo, foi o ponto de início da ruptura do ensaio.

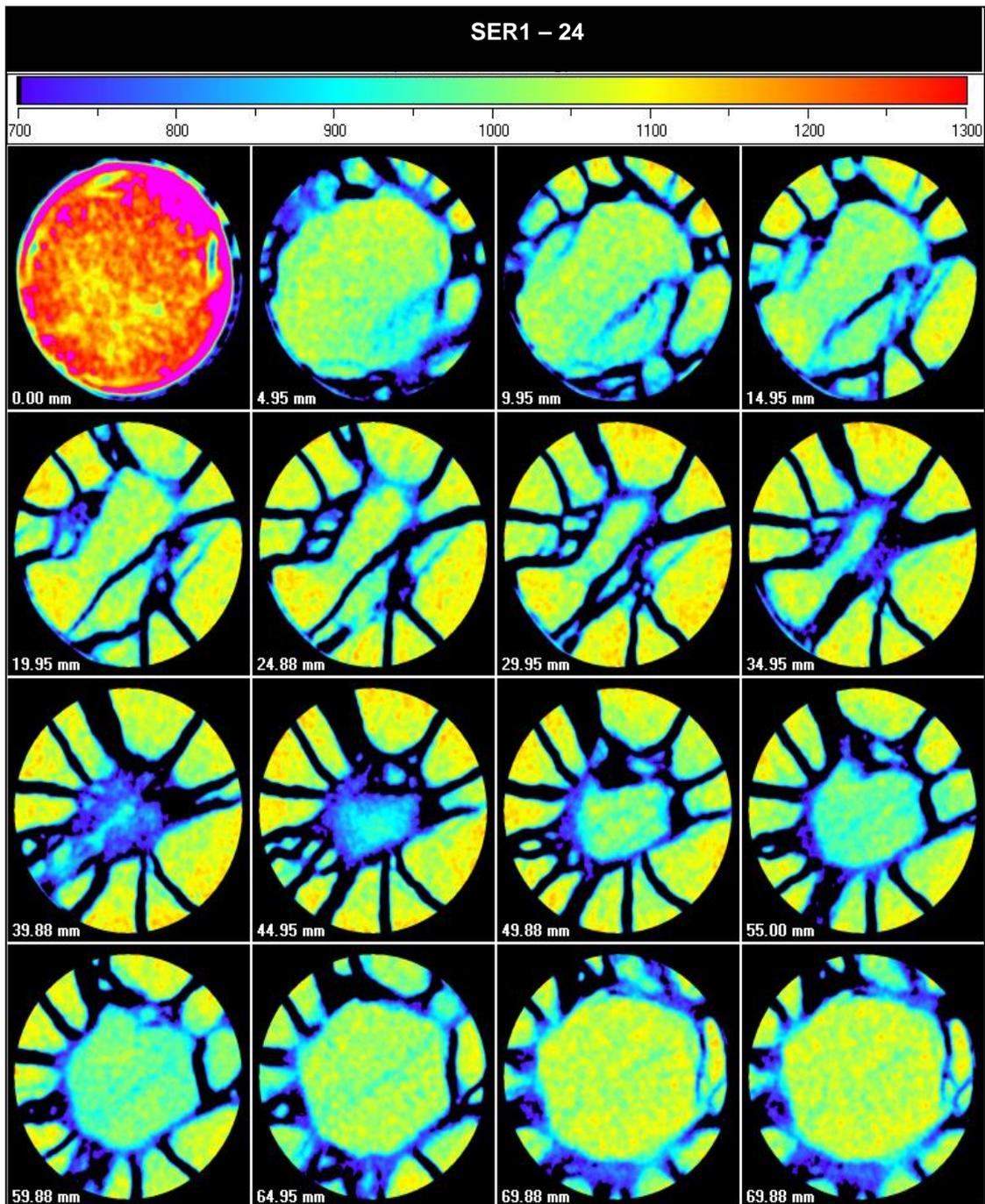


Figura 2.08 – Seções transversais do corpo de prova SER-1 com tensão axial 31,5bar (3,2MPa), no fim do ensaio.

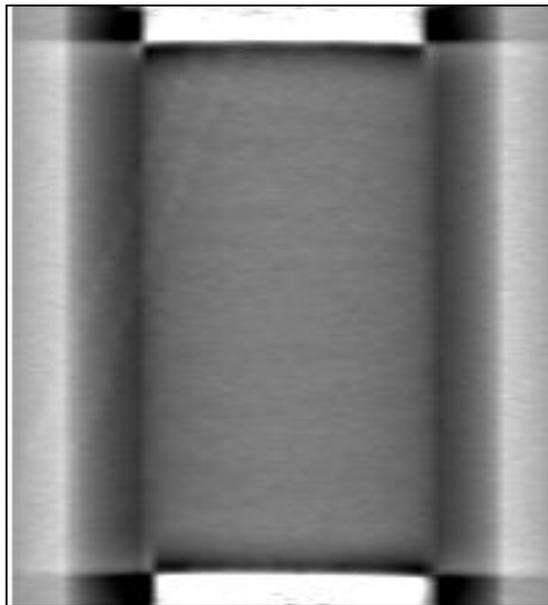


Figura 2.09 – Piloto do corpo de prova SER-1 com tensão axial nula.

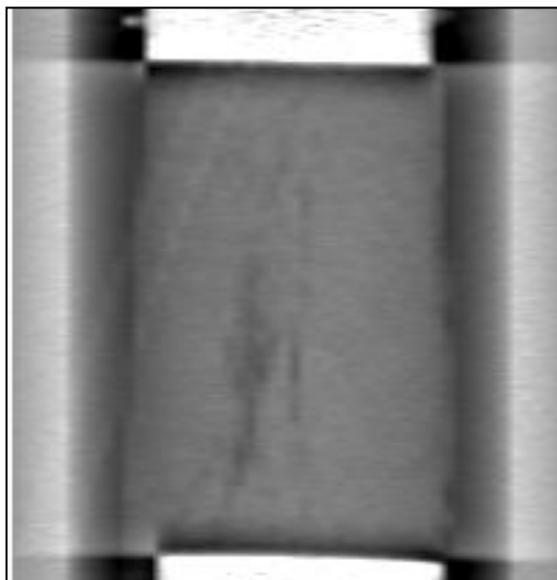


Figura 2.10 – Piloto do corpo de prova SER-1 com tensão axial de 21bar (2,1Mpa) após 35 minutos do início do ensaio. Observa-se o início da fratura se propagando nas proximidades centrais do corpo de prova.

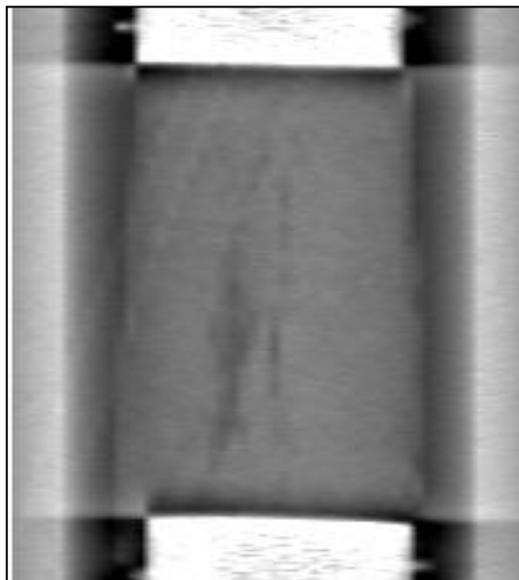


Figura 2.11 – Piloto do corpo de prova SER-1 com tensão axial de 24,6bar (2,5Mpa) após 40:49s do início do ensaio.

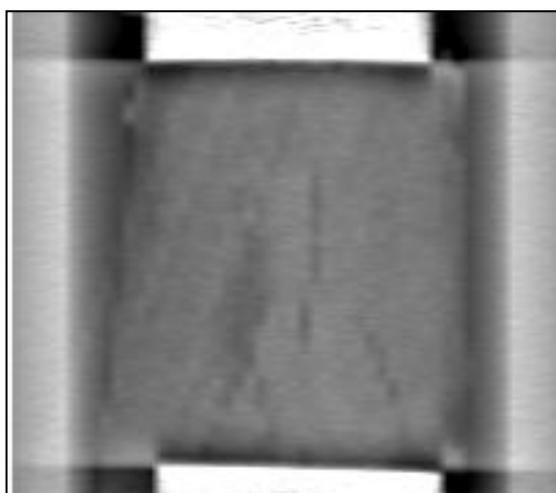


Figura 2.12 – Piloto do corpo de prova SER-1 com tensão axial de 31,5bar (3,2Mpa) no fim do ensaio com 53 minutos.

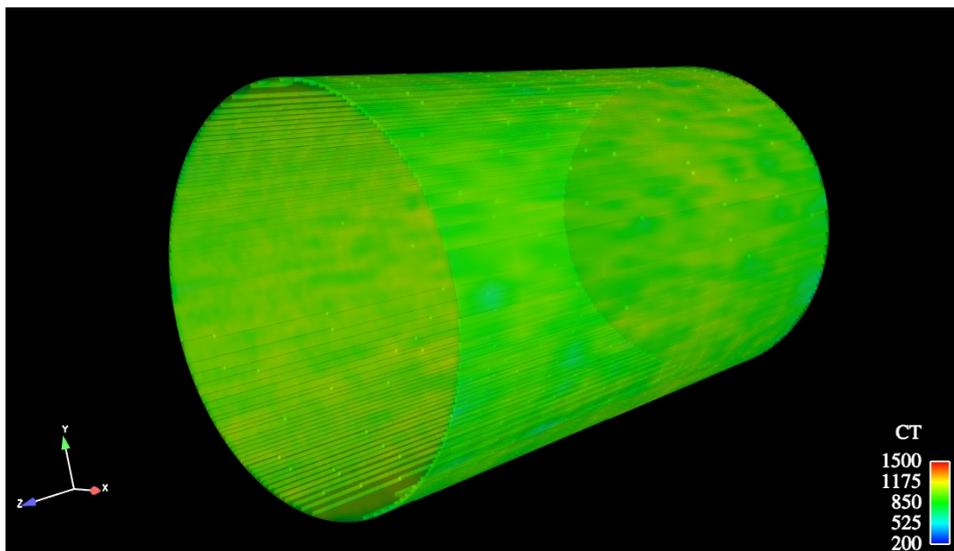


Figura 2.13 – Instantâneo da reconstrução 3D no início do ensaio.

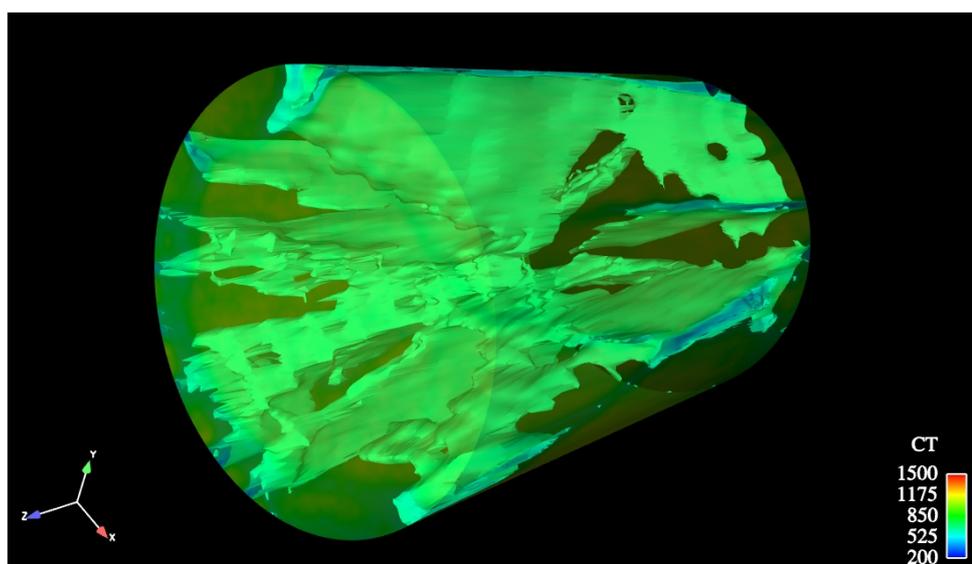


Figura 2.14 – Instantâneo da reconstrução 3D com tensão axial de 2,1MPa, após 35 minutos do início do ensaio.

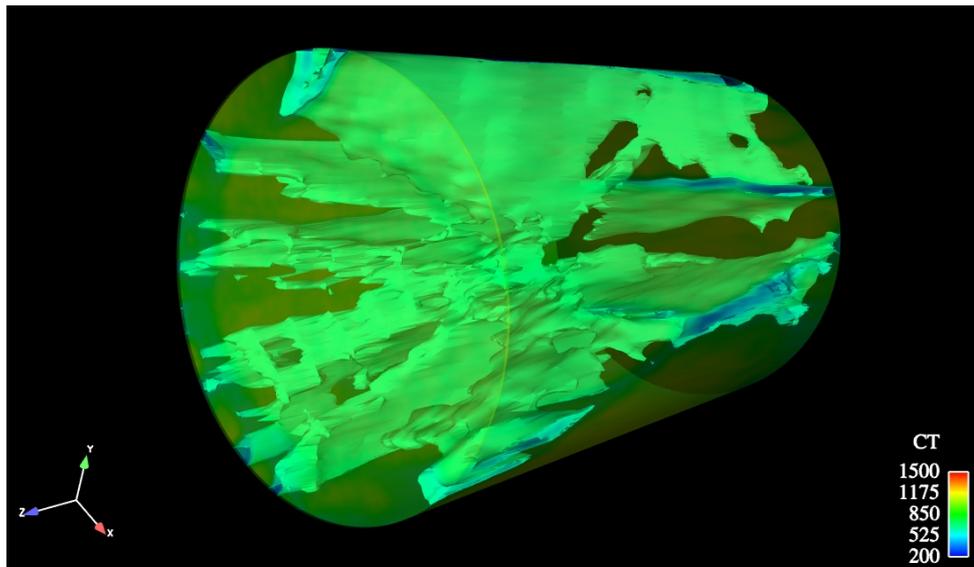


Figura 2.15 – Instantâneo da reconstrução 3D com tensão axial de 2,5MPa, após 40:49s minutos do início do ensaio.

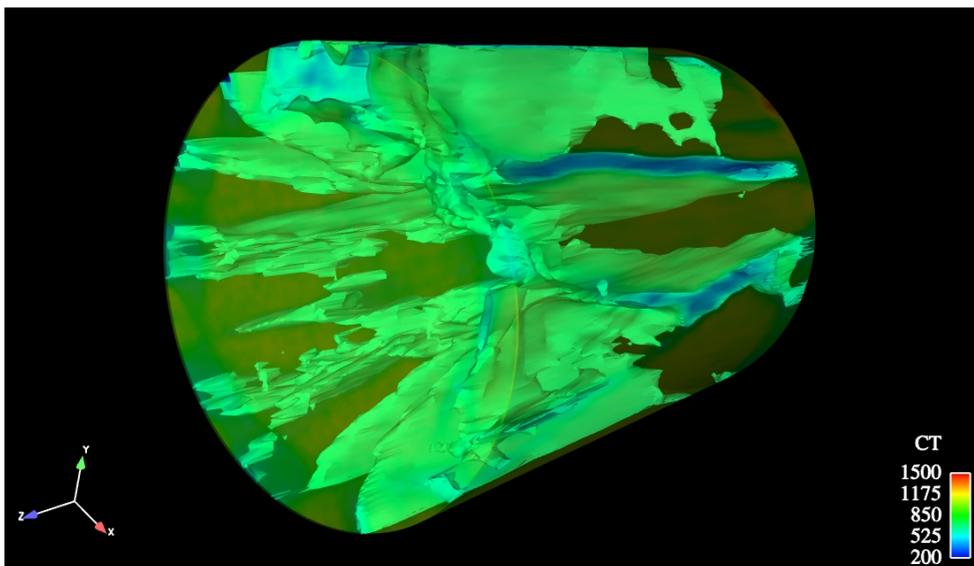


Figura 2.16 – Instantâneo da reconstrução 3D com tensão axial de 3,2MPa, após 53:00 minutos do início do ensaio.