



ESTUDO DE PARÂMETROS MICROESTRUTURAIS DE ROCHAS-RESERVATÓRIO  
PARA DIFERENTES RESOLUÇÕES UTILIZANDO MICROTOMOGRAFIA  
COMPUTADORIZADA 3D

Alessandra de Castro Machado

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2012

ESTUDO DE PARÂMETROS MICROESTRUTURAIS DE ROCHAS-RESERVATÓRIO  
PARA DIFERENTES RESOLUÇÕES UTILIZANDO MICROTOMOGRAFIA  
COMPUTADORIZADA 3D

Alessandra de Castro Machado

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

---

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc..

---

Profa. Inayá Corrêa Barbosa Lima, D.Sc.

---

Prof. Luis Fernando de Oliveira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2012

Machado, Alessandra de Castro

Estudo de Parâmetros Microestruturais de Rochas-Reservatório para diferentes Resoluções utilizando Microtomografia Computadorizada 3D/ Alessandra de Castro Machado. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

VIII, 57 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 52 - 57.

1. Microtomografia. 2. Rochas-reservatório. 3. Processamento de imagens. I. Lopes, Ricardo Tadeu. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

“Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente,  
mas o que melhor se adapta às mudanças.”

*Charles Darwin*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por me dar forças e iluminar meus caminhos.

Aos meus pais, Ozório Rodrigues Machado e Neuzely Sales de Castro Machado, à minha irmã Carolina de Castro Machado e ao meu namorado Hygor Huguenin pelo apoio e encorajamento que me deram desde o início deste trabalho.

Às amigas Pollyanna Sampaio, Grazielle Suhett, Francine Suhett e Chimeni Suhett que dividiram comigo não apenas os bons momentos, mas também todas as dificuldades que passei nestes últimos dois anos.

Ao meu orientador, prof. Ricardo Tadeu Lopes e à prof.<sup>a</sup> Inayá Corrêa Barbosa Lima que me orientaram e me deram todo o suporte e ensinamentos necessários para a realização deste trabalho.

Aos amigos da turma de mestrado do ano de 2010 que me ajudaram e caminharam comigo durante todo o curso.

Aos amigos que fiz no LIN e que dividiram o dia-a-dia de trabalho comigo. Em especial à Milena Oliveira que me ensinou a parte prática e também a lidar com os problemas do cotidiano, sempre muito paciente.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDOS DE PARÂMETROS MICROESTRUTURAIS DE ROCHAS-  
RESERVATÓRIO PARA DIFERENTES RESOLUÇÕES UTILIZANDO  
MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA 3D

Alessandra de Castro Machado

Fevereiro/2012

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

Com a crescente necessidade de entendimento nos meios porosos em rochas-reservatório, torna-se primordial seu estudo. Este trabalho tem o objetivo de investigar a porosidade de rochas-reservatório. Para tal, foi utilizada a técnica de microtomografia computadorizada 3D ( $\mu$ CT), que é um ensaio não destrutivo, com um alto poder de resolução. As aquisições foram feitas em diferentes resoluções de imagem (10, 20, 40 e 60  $\mu$ m) utilizando-se um microtomógrafo de bancada de alta resolução e energia (Skyscan, modelo 1173).

Os resultados demonstram que deve ser feita uma análise crítica do custo/benefício no que diz respeito à resolução dos ensaios de  $\mu$ CT e o tempo de processamento e obtenção dos dados. As diferenças apresentadas em todas as etapas do ensaio (aquisição, reconstrução, processamento e análise), são altamente dependentes das resoluções das imagens. Por exemplo, a resolução de 10  $\mu$ m apresenta longos períodos de aquisição e reconstrução, além de um difícil processamento de dados, e em contrapartida, com a resolução de 60  $\mu$ m perde-se informação quantitativa sobre os poros das rochas-reservatório.

Nesse contexto, conclui-se que a melhor resolução a ser trabalhada sem a perda de informação é a 20  $\mu$ m, especialmente quando se tem amostras de rochas-reservatórios com diâmetros variando entre 25 mm e 38 mm.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDY OF MICROSTRUCTURAL PARAMETERS OF RESERVOIR ROCKS FOR  
DIFFERENT RESOLUTIONS USING 3D COMPUTED MICROTOMOGRAPHY

Alessandra de Castro Machado

February/2012

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

With increasing need of better understanding of porous medium in reservoir rocks, it becomes essential its study. The objective of this work is to investigate porosity from reservoir rocks. For such it was used computed 3D microtomography ( $\mu$ CT), which is a nondestructive technique, with a high resolution capacity. Acquisitions were performed in different image resolutions (10, 20, 40 e 60  $\mu$ m) using a high resolution and energy microtomograph (Skyscan, 1173 model).

Results show that a critical analysis of cost/benefit in regard to resolution of measures in  $\mu$ CT, processing time and data acquisition must be done. Differences found in all steps of the experiment (acquisition, reconstruction, processing and analysis) are highly dependent of image resolution. For example 10  $\mu$ m resolution needs longer acquisition and reconstruction times besides a harder data processing and, instead, 60  $\mu$ m resolution loses quantitative information about pores in reservoir rocks.

In this context it can be concluded that the best resolution to be worked with without loss of information is 20  $\mu$ m especially when reservoir rocks samples have diameters ranging from 25 to 38 mm.

# ÍNDICE

Capítulo 1 – Introdução.....	1
Capítulo 2 – Revisão bibliográfica.....	3
Capítulo 3 – Fundamentos Teóricos.....	8
3.1 Microtomografia Computadorizada 3D.....	8
3.2 Física das Rochas.....	15
3.3 Processamento da Imagem.....	19
Capítulo 4 – Metodologia.....	26
4.1 Descrição das Amostras.....	26
4.1.1 Amostra 1.....	26
4.1.2 Amostra 2.....	27
4.2 Equipamentos.....	27
4.3 Aquisição e Reconstrução das Imagens.....	29
4.3.1 Aquisição.....	29
4.3.2 Reconstrução.....	31
4.3.3 Quantificação e Visualização.....	34
Capítulo 5 – Resultados.....	41
5.1 Furos na parte inferior da amostra 1.....	41
5.2 Furos na parte inferior da amostra 2.....	42
5.3 Volume teórico dos furos na parte inferior das amostras.....	43
5.4 Amostra 2 completa.....	44
5.5 Análise dos Resultados.....	45
5.5.1 Amostras 1 e 2 (furo na parte inferior).....	45
5.5.2 Amostra 2 completa.....	48
Capítulo 6 – Conclusão.....	51
Referências Bibliográficas.....	52



# Capítulo 1

## Introdução

Recursos energéticos como água, gás e petróleo ocupam os espaços vazios contidos nas rochas, o que torna o conhecimento dos aspectos relacionados aos poros essenciais para a investigação de reservatórios. A descrição petrográfica das rochas é muito importante, porém, na análise do potencial para armazenamento de hidrocarbonetos é necessário a obtenção de dados petrofísicos quantitativos para maior aproximação nos cálculos de porosidade e permeabilidade [01].

As características das rochas são normalmente estudadas em duas dimensões analisando lâminas finas ou polidas por microscopia de luz transmitida ou incidente, respectivamente [02]. Há também métodos indiretos que utilizam injeção de gás ou mercúrio em picnômetros. Porém a quantificação por petrografia necessita de um trabalho minucioso, que depende muito tempo, e normalmente os resultados são limitados à análise bidimensional das lâminas. No caso dos métodos indiretos, apesar de se obter informações sobre o volume de porosidade, as técnicas não permitem a observação direta dos poros, além dos problemas relacionados à penetração ineficiente do gás [01].

Pesquisas petrofísicas através da análise de imagens eram feitas através da varredura de lâminas petrográficas impregnadas, e reconstruções tridimensionais através de modelos matemáticos. Porém, com o acesso à microtomografia de raios x, esse processo é dispensado devido à automatização dos resultados [01].

A microtomografia computadorizada 3D por raios x ( $\mu$ CT-3D) de alta resolução é uma técnica de grande potencial para a visualização e caracterização da estrutura interna de objetos em 3D, pois é uma técnica precisa, rápida e não requer nenhuma etapa delicada de preparação da amostra (como impregnação, desbaste, polimento,...) [02]. Além disso, é um método não destrutivo que produz imagens que correspondem de forma fiel a cortes seriados através do objeto estudado. Imagens sequenciais contíguas são compiladas para criar representações tridimensionais que podem ser processadas digitalmente para executar eficientemente uma grande disposição de medições e visualizações [03].

A grande vantagem da  $\mu$ CT-3D é a obtenção de informações qualitativas e quantitativas tridimensionais do volume, tamanho, forma, distribuição e conectividade das estruturas internas das rochas, em microescala podendo chegar a nanoescala [01].

O objetivo deste trabalho é estabelecer uma nova metodologia de análise de rochas-reservatório utilizando a Microtomografia Computadorizada 3D, para comparar todo o processo de análise (aquisição, reconstrução e processamento das imagens) das imagens em diferentes resoluções, avaliando parâmetros microestruturais de amostras de rochas-reservatório. O principal parâmetro microestrutural, estudado neste trabalho é a porosidade das amostras de rochas-reservatório.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

A  $\mu$ CT-3D de alta resolução é uma nova tecnologia ideal para uma ampla gama de investigações Geológicas, Biológicas, Endodônticas, em Ciências Agrárias e de Materiais, entre outras.

Em endodontia, MARTINS et al [04] utilizaram a  $\mu$ CT-3D em um estudo piloto que focou-se na investigação da qualidade do preenchimento tridimensional do sistema de canais radiculares por três técnicas de obturação distintas. Neste sentido, e com recurso à análise imaginológica com  $\mu$ CT-3D, foi avaliada estatisticamente a influência da técnica de obturação na qualidade do tratamento através de dois parâmetros: o volume de espaço vazio, e pela existência ou não de extrusão de material obturador.

Também em endodontia, CHIRANI et al [05] utilizaram a  $\mu$ CT-3D para avaliar a geometria do canal radicular e as mudanças anatômicas após o preparo endodôntico de molares superiores humanos e obtiveram resultados satisfatórios das imagens tridimensionais do canal e da área e volume calculados.

Em 2010, YIN e Cheung et al [06] realizaram um estudo para avaliar as alterações morfológicas do sistema de canais em forma de C, antes e depois da instrumentação utilizando a  $\mu$ CT-3D para avaliar alguns parâmetros, como por exemplo o volume da dentina removida. Com a  $\mu$ CT-3D não apenas um exame transversal da raiz, mas também a configuração tridimensional do canal pode ser avaliada em alta resolução.

BENYÓ et al [07], também utilizaram a  $\mu$ CT-3D em endodontia, apresentando um procedimento de processamento de imagens dedicada à detecção automática do eixo medial do canal radicular de registros dentários feitos com  $\mu$ CT-3D, criando assim um sistema de imagens que pode ajudar de forma eficiente a preparação de vários tipos de intervenções endodônticas.

Em ciências biológicas, SENNERBY et al [08] testaram a utilização da técnica de  $\mu$ CT-3D para avaliar a estrutura óssea ao redor de implantes. Ele avaliou amostras de implantes de titânio. As imagens microtomográficas forneceram uma boa visualização da estrutura óssea e do implante, apesar de o titânio ter criado algumas distorções e de a resina também ter diminuído a qualidade da imagem devido à sua radiopacidade.

Ainda em ciências biológicas, SILVA et al [09], realizaram uma análise microestrutural óssea trabecular utilizando  $\mu$ CT-3D de um fêmur bovino investigando o arranjo estrutural ósseo a partir da aquisição das imagens microtomográficas de alta resolução. Foram analisados quatro parâmetros da microestrutura trabecular (volume tecidual, volume ósseo, fração de volume ósseo e a área superficial tecidual). Os resultados obtidos mostram que a microtomografia computadorizada 3D por raios x é uma técnica de grande potencial para a caracterização da qualidade óssea gerando bons parâmetros para o diagnóstico de doenças do metabolismo ósseo.

Também em uma investigação sobre estrutura óssea, LIMA et al [10] apresentaram uma análise que, através da técnica de  $\mu$ CT-3D em tempo real e de conceitos de estereologia, investiga a estrutura óssea em amostra de calcâneo humano e de fêmur de rato wistar. As visualizações 3D auxiliaram no entendimento da morfologia das amostras analisadas, ajudando a obter informações sobre as conexões internas e a forma de ligação das trabéculas. Foi possível fazer o levantamento da estrutura inspecionada e verificar características básicas, o que é relevante quando o interesse está voltado para o estudo de doenças que envolvem arquitetura óssea, tal como a osteoporose.

Em medicina, MENESES et al [11] realizaram um estudo para análise de imagens médicas mostrando a viabilidade da aplicação metodológica de Redes Neurais Artificiais e sua adequação às características das imagens obtidas por  $\mu$ CT-3D, para evitar perdas ocasionadas por outras técnicas de manipulação e tratamento de imagens. Confirmando assim a possibilidade do uso de Redes Neurais Artificiais para reconhecimento de padrões de tecido ósseo para imagens obtidas por  $\mu$ CT-3D.

Também em medicina, PEREIRA [12] defende a hipótese de que a ruptura do vaso *vasorum* ocorre como um fenômeno secundário, e não como um dos fatores causais na fisiopatologia do hematoma intramural, e o estudo tridimensional desses vasos só foi possível graças ao advento da  $\mu$ CT-3D, assim como a sua anatomia e distribuição foram melhor entendidas pela microarteriografia através da injeção de um polímero de silicone.

Em ciências florestais, BELINI et al [13] aplicou a microtomografia na análise da madeira de *Amburana cearensis*, *Hymenaea courbaril* e *Tabebuia sp*, possibilitando a obtenção de imagens da estrutura macro e microscópica da madeira e permitindo ainda a sua caracterização e descrição e também a avaliação quantitativa da estrutura anatômica da madeira, a reconstrução da disposição dos elementos anatômicos em 3D e a análise não destrutiva de painéis, carvão vegetal e demais produtos da madeira.

Em ciências agrárias, MACEDO et al [14] usaram a  $\mu$ CT-3D para investigar características físicas do solo, como a macroporosidade e determinação de densidade das partículas do solo. Nas imagens microtomográficas foram visualizados pontos com alta densidade que não eram detectados na tomografia com resolução milimétrica.

Em Ciências dos Materiais, CARVALHO et al [15] estudaram uma importante propriedade do concreto, que é a porosidade de sua matriz, sendo assim possível avaliar também outras importantes propriedades, como a resistência mecânica, o grau da impermeabilidade, a resistência à abrasão e etc. Neste trabalho foi feita uma comparação entre o valor encontrado para a porosidade da matriz do concreto calculado a partir de imagens obtidas por  $\mu$ CT-3D e imagens obtidas por scanner comercial. Os resultados mostraram compatibilidade entre os dois métodos utilizados.

Ainda em Ciências dos Materiais, LIMA et al [16] fizeram uma caracterização de materiais cerâmicos através de microtomografia computadorizada 3D e os resultados mostraram que o uso das imagens microtomográficas para a caracterização de estruturas complexas é um método não destrutivo muito vantajoso e eficaz. A visualização 3D auxilia no entendimento da morfologia das amostras uma vez que nela tem-se a noção espacial de como as conexões internas estão dispostas e interligadas. Quantificando as imagens tomográficas através da estereologia quantitativa é possível estudar as características internas de materiais cerâmicos com resolução da ordem de microns de uma forma não invasiva.

Também sobre materiais cerâmicos, ROCHA et al [17] utilizaram a técnica de transmissão de raios gama e de  $\mu$ CT-3D para a avaliação da porosidade e da distribuição do tamanho dos poros de espumas cerâmicas de SiC. Concluindo que as duas técnicas utilizadas se mostraram boas ferramentas na quantificação não destrutiva da porosidade das amostras consideradas.

MAURICIO ALVES et al [18] fizeram uma investigação da técnica de  $\mu$ CT-3D visando ampliar as possibilidades de uso como procedimento de análise de materiais porosos. Eles analisaram amostras de espuma de vidro fabricadas a partir de rejeitos industriais, quanto a parâmetros morfológicos, como porosidade e área superficial e também foram construídos modelos 3D das amostras, fornecendo uma visão mais ampla da conectividade e forma dos poros.

MAURICIO et al [19] também utilizaram  $\mu$ CT-3D para analisar outros tipos de amostras. Desta vez mapeou uma amostra de tecido impregnado com nanopartículas de prata, sendo assim possível observar a alta porosidade do polímero de justa posição e também o gradiente de concentração de prata ao longo da área analisada. Pastilhas de vidro à base de fosfato sinterizado com celulose como agente espumante também foram analisadas visando observar sua macroporosidade.

MAIRE et al [20] fizeram um trabalho que descreve a técnica de  $\mu$ CT-3D e as especificações para média e alta resolução, que são exigidas para as aplicações em Ciências dos Materiais. Esta técnica foi utilizada para investigar a microestrutura e mecanismo de danos em vários tipos de materiais, tal como uma espuma metálica ou compósitos da matriz de metais especiais e ligas. Em cada caso a microtomografia permitiu a visualização clara da microestrutura inicial na resolução adequada, e quando combinado com experimentos de compressão, por exemplo, gera informações importantes sobre a estrutura interna das amostras estudadas.

Em Geologia, VASCONCELLOS et al [21] aplicaram a técnica de  $\mu$ CT-3D para a caracterização e descrição de inclusões em cristais de diamante e observaram inclusões esverdeadas e castanhas, na forma de fraturas irregulares que se concentram nas bordas do cristal. As seções microtomográficas e o modelo tridimensional possibilitaram a análise da forma das inclusões e do coeficiente de atenuação relativo entre inclusões e diamante, concluindo que esta técnica permite caracterizar, descrever e quantificar essas inclusões e também a individualização de diferentes fases, inclusões de fraturas e auxilia na descrição das características morfológicas externas do mineral.

Visando a exploração da técnica de  $\mu$ CT-3D em aplicações geológicas, KETCHAN e CARLSON [03] fizeram um artigo fornecendo à geocientistas interessados, uma compreensão das primeiras noções de tomografia e  $\mu$ CT-3D de raios-x, como a digitalização, instrumentação e métodos que podem ser otimizados para funções particulares de cada imagem, e algumas das questões que influenciam a utilização adequada dos dados da tomografia, juntamente com a descrição de várias aplicações geológicas.

Em geociências, REMEYSEN e SWENNEN [02] fizeram um estudo utilizando a  $\mu$ CT-3D para a caracterização 3D das fases mineralógicas (calcita, dolomita, anidrita) e porosidade em rochas reservatório carbonáticas. Para distinguir entre os diferentes minerais um procedimento de dupla energia foi desenvolvido, dando densidade e número atômico efetivo do objeto digitalizado. A natureza 3D dos resultados possibilita a avaliação da heterogeneidade da amostra, que é uma característica intrínseca de rochas reservatório, a conectividade dos poros e fases minerais e, conseqüentemente, avalia a permeabilidade e o potencial do reservatório.

Outro trabalho sobre rochas reservatório foi realizado por FERNANDES et al [22] para determinar parâmetros microestruturais e fazer a reconstrução 3D das imagens dessas rochas utilizando a técnica de  $\mu$ CT-3D. A caracterização dessas rochas é de grande importância para a indústria petrolífera. A metodologia utilizada possibilita a caracterização detalhada de propriedades petrofísicas, tais como, porosidade e distribuição de tamanho dos poros e também permeabilidade.

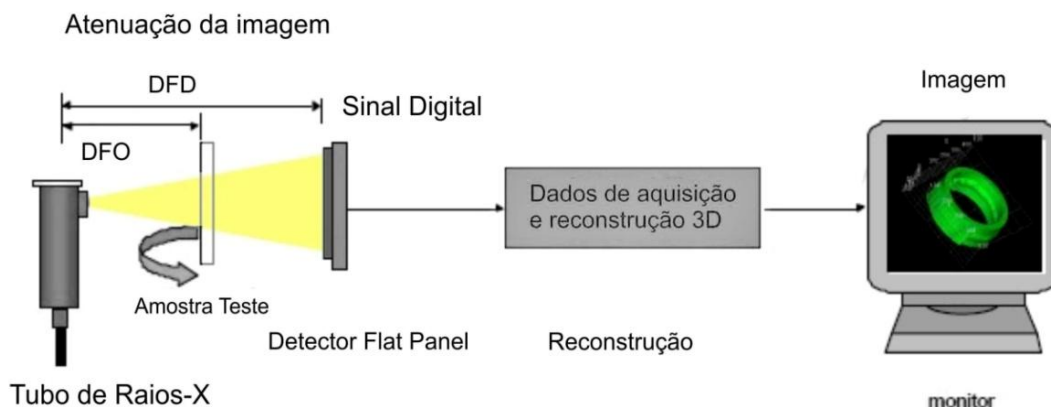
# Capítulo 3

## Fundamentos Teóricos

### 3.1 Microtomografia Computadorizada

A Tomografia Computadorizada (TC) é uma técnica de ensaio não-destrutivo que permite a obtenção de imagens de uma seção de um corpo de prova, através de um conjunto de projeções do plano e com o auxílio de um computador com um programa de reconstrução de imagens [23]. O que significa que múltiplos raios projetados sobre o corpo de prova, em vários ângulos em um mesmo plano, fornecem uma imagem 3D do objeto. A principal vantagem da TC é ser uma técnica não invasiva que nos fornece uma proporcionalidade em tons de cinza entre a imagem e sua densidade. Os dados das imagens representam a distribuição da densidade do material dentro o objeto a ser inspecionado [24]. A figura 3.1 mostra o esquema de um sistema de TC 3D, desde a aquisição da imagem pelo tomógrafo até a imagem final reconstruída.

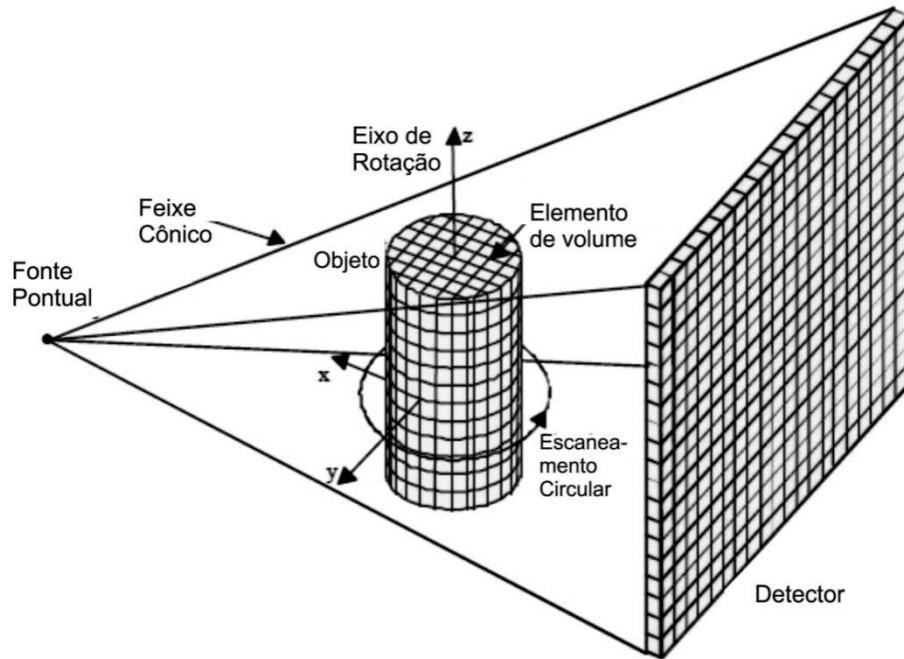
O princípio de aquisição de uma TC é basicamente composto por um ou vários detectores colocados diametralmente opostos a uma fonte de raios X, e um corpo de prova situado no caminho do feixe, conforme a figura 3.1.



**Figura 3.1:** Esquema do Sistema Tomográfico [25].



Para que se possa obter a imagem de uma seção de um corpo de prova é necessário que se obtenham várias projeções, em passos angulares constantes [26]. Na tomografia industrial, em geral, é o corpo de prova que se movimenta, e não a fonte e o detector que são fixos, como mostrado na figura 3.2, onde o objeto é rotacionado no eixo z formando a imagem no detector.



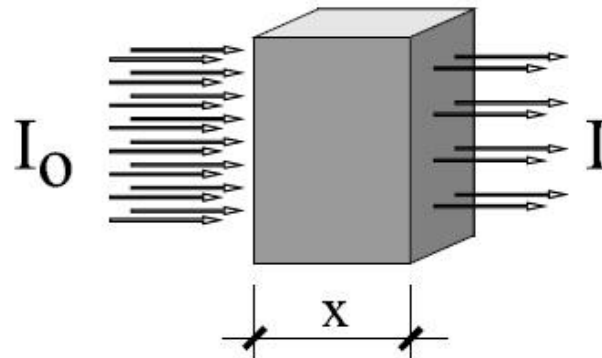
**Figura 3.2:** Princípio da formação da imagem tomográfica [25].

A Microtomografia Computadorizada possui o mesmo embasamento da tomografia, tendo sido especialmente desenvolvida para a inspeção de microestruturas. O diferencial desta técnica está relacionado ao tamanho do foco do tubo de raios x e à resolução do detector.

Existem hoje vários tamanhos de foco, como, o foco normal (de 4 a 1mm), mini foco (de 1 a 0,1mm) até o micro foco (de 100 a 1 $\mu$ m) [48]. O pequeno diâmetro do foco do tubo de raios x é uma característica muito importante, pois quanto menor for esse parâmetro, melhor se dará a focalização das estruturas inspecionadas [27].

O princípio de funcionamento da  $\mu$ CT-3D: quando um feixe de raios x com intensidade  $I_0$  atravessa um objeto com espessura  $x$ , conforme a figura 3.3, a intensidade de radiação  $I$  após a transmissão do feixe é dada pela equação 3.1, onde  $\mu$  é o coeficiente de atenuação do material.

Se a trajetória do feixe inclui regiões com diferentes coeficientes de atenuação ( $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ ) então a intensidade  $I$  é dada pela equação 3.2 [28].



**Figura 3.3:** Atenuação de um feixe de fótons por uma amostra [28].

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

$$I = I_0 e^{-\sum_{i=1}^n \mu_i x_i} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

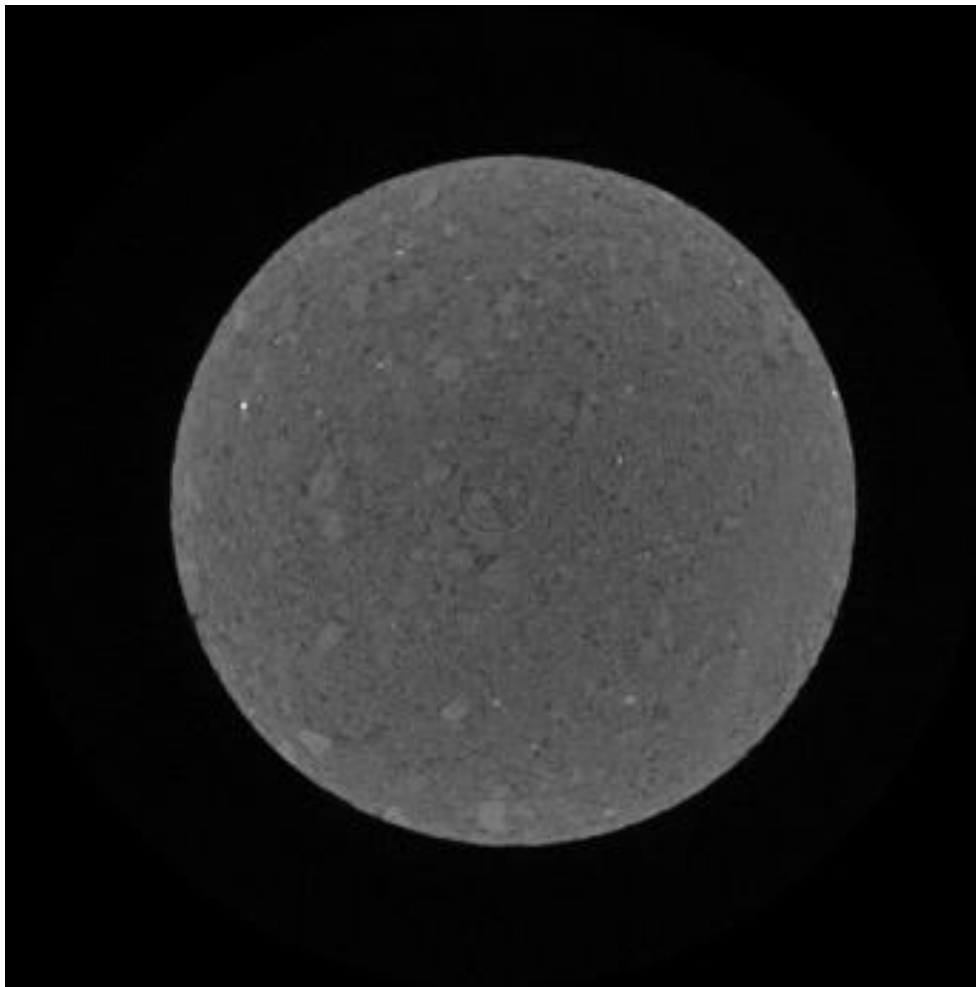
As expressões dadas acima são, contudo, válidas apenas com a suposição de que todos os raios  $x$  utilizados são monocromáticos (mesmo comprimento de onda), o que não ocorre na realidade, pois as fontes de raios  $x$  são policromáticas [29]. E nesta condição temos a equação 3.3:

$$I = \int_0^{E_{\text{máx}}} I_0 \exp[-\oint \mu_i(x_i, y_i, E) dl] dE \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Os fótons de baixa energia são absorvidos enquanto que os de maior energia penetram no objeto. Assim, para que o feixe fique o mais monocromático possível e contenha fótons com intensidades de energia muito próximas, os fótons de baixa energia e menos penetrantes podem ser eliminados através de uma filtragem feita, por exemplo, com placas de alumínio, cobre ou latão.

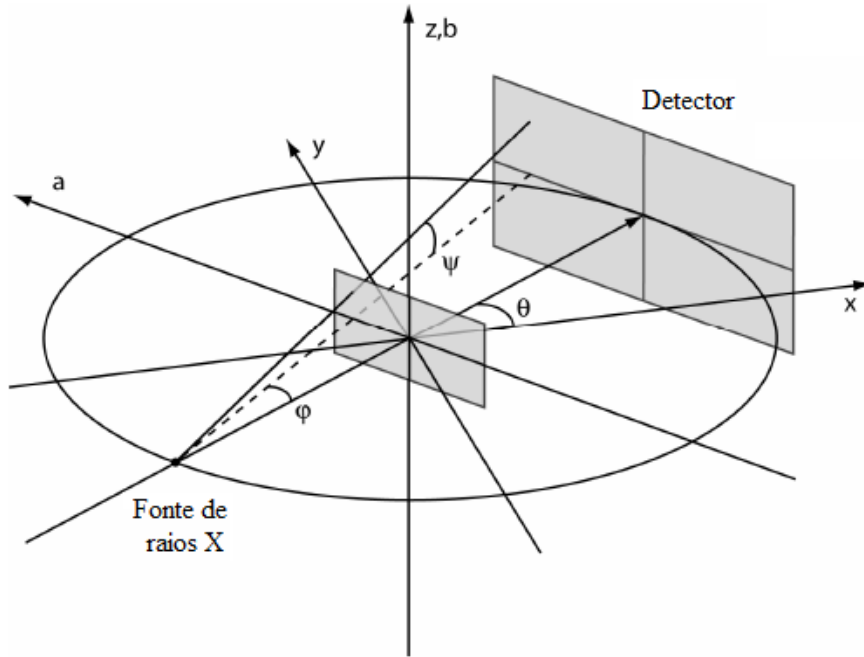
Estes filtros ajudam na diminuição de um artefato de imagem chamado endurecimento de feixe, que faz com que a borda de um objeto apareça mais brilhante do que o centro, mesmo que o material seja homogêneo. Como os raios X de menor energia são atenuados mais prontamente do que de alta energia raios X, um feixe policromático passando por um objeto perde preferencialmente as partes de baixa energia de seu espectro. Isto significa que, como o feixe passa através de um objeto, o coeficiente de atenuação efetivo de qualquer material diminui, assim os raios que fazem caminhos curtos atenuam mais proporcionalmente do que os raios que fazem caminhos longos.

Esse processo geralmente se manifesta com bordas mais brilhantes que o interior da amostra, como na figura 3.4 [03].



**Figura 3.4:** Exemplo de imagem com artefato de endurecimento de feixe e artefato e anel.

O feixe do tubo de raios x do microtomógrafo é o feixe cônico (Figura 3.5). Sua vantagem é que ele permite a reconstrução de um espaço 3D diretamente através dos dados de projeção 2D, sem a necessidade de reconstruir cada fatia até a formação do volume. Para reconstruir o volume tridimensional, é necessário o uso de um algoritmo [30]. O algoritmo mais utilizado é o de Feldkamp que será descrito a seguir [31].



**Figura 3.5:** Representação do feixe cônico [32].

A projeção bidimensional é obtida através do objeto tridimensional  $f(x,y,z)$ . Assim a projeção  $P(\theta,a,b)$  para um feixe paralelo é determinada pela equação 3.4:

$$P(\theta,a,b) = P(\theta, a(x,y,\theta), b(x,y,\theta)) = \oint f(x,y,z) dl \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Onde  $a$  e  $b$  são, respectivamente, as coordenadas horizontais e verticais do detector;  $L$  é o caminho efetuado pelo raio entre a fonte e o detector e  $\theta$  é o ângulo de projeção. Assim, as coordenadas  $a$  e  $b$  do detector se relacionam com  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $\theta$  através das equações 3.5 e 3.6, a seguir:

$$a(x,y,\theta) = R \frac{-x\sin\theta + \cos\theta}{R + x\cos\theta + y\sin\theta} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

$$b(x,y,z,\theta) = z \frac{R}{R + x\cos\theta + y\sin\theta} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

onde  $R$  é a distância entre a fonte e detector.

A realização da reconstrução para um feixe cônico é praticamente feita do mesmo modo que a do feixe paralelo. Mas, com o aumento da complexidade geométrica um número de fatores a ponderar se faz necessário no algoritmo de reconstrução. Assim, para realizar a reconstrução, a equação 3.7 é utilizada [31].

$$\tilde{P}(\theta, a, b) = \left( \frac{R}{\sqrt{R^2 + a^2 + b^2}} P(\theta, a, b) \right) * g(a) \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Onde  $*$  denota convolução e  $g(a)$  é o filtro rampa. O fator na frente da projeção é chamado pré-fator de peso e pode ser relacionado com a geometria do feixe através da relação dada na equação 3.8.

$$\frac{R}{\sqrt{R^2 + a^2 + b^2}} = \cos\varphi \cos\psi \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Onde  $\varphi$  e  $\psi$  são os ângulos leque e cônico, respectivamente.

O pré-fator de peso e a projeção filtrada  $\tilde{P}(\theta, a, b)$  são finalmente retroprojetadas no espaço tridimensional do objeto  $f(x, y, z)$ , dado pela equação 3.9.

$$f(x, y, z) = \int_0^{2\pi} \frac{R^2}{(R + x \cos \theta + y \sin \theta)^2} \tilde{P}(\theta, a(x, y, \theta), b(x, y, \theta)) d\theta \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Outro artefato é muito comum, chamado artefatos em anel. Eles aparecem como círculos totais ou parciais centrados no eixo de rotação (Figura 3.4, página 11). Eles são causados por mudanças na saída de detectores individuais ou conjuntos de detectores, que causam o raio correspondente, ou raios correspondentes, em cada fim de terem valores anômalos; a posição de um anel corresponde à área de maior sobreposição destes raios durante a reconstrução. Uma série de fatores pode causar essa mudança, todos os quais têm sua base em detectores com resposta de forma diferente às mudanças de condições de digitalização [03].

Uma vez já reconstruída, a imagem é mostrada em forma de uma matriz digital  $N \times M$  "pixels", onde  $N$  representa o número de "pixels" existentes na vertical e  $M$  os da horizontal. Para cada valor do "pixel" designa-se um valor de cinza que é proporcional a  $\mu(x, y)$ , ponto a ponto. Assim, tem-se que a região mais densa aparece mais clara e conseqüentemente a região menos densa aparece mais escura. Dos 256 níveis de cinza (o máximo para tais), a escala é realizada da seguinte forma: 0 para o preto e 255 para o branco e, os valores que são intermediários a estes equivalem aos níveis de cinza propriamente dito [24].

### 3.2 Física das rochas

As rochas-reservatório provêm de bacias sedimentares, originadas pela deposição de detritos de outras rochas (magmáticas e metamórficas), geralmente transportados por agentes, tais como, água e ar. Elas são classificadas, em geral, como rochas brandas e porosas [34].

Na sua maioria os reservatórios de petróleo estão localizados abaixo de uma camada impermeável, formada pela rocha geradora de onde os hidrocarbonetos migram rumo às rochas porosas, tal como os arenitos, calcários e dolomitas, que constituem rochas armazenadoras potenciais de óleo cru. Portanto, a caracterização do comportamento deste tipo de rocha é de grande interesse para a indústria do petróleo [35].

Logo, as informações sobre as propriedades das rochas, a exemplo das propriedades dos fluidos, constituem-se em fatores decisivos para o estudo de comportamento de reservatórios de petróleo e, portanto, a sua coleta e sua interpretação devem merecer uma atenção especial, através de um trabalho exaustivo e metuculoso [36].

As propriedades físicas têm um papel importante na caracterização de rochas, pois fornecem uma estimativa do comportamento potencial geotécnico da massa de rocha. A rocha, similarmente ao solo, é composta por minerais e diferentes fluidos. Para a determinação das proporções de cada um desses minerais e das propriedades físicas do material é necessário realizar ensaios tais como: densidade, porosidade, teor de umidade, velocidade de propagação de onda, permeabilidade, durabilidade e resistência. De maneira simplificada pode-se dizer que a rocha-reservatório pode ser vista como um material sólido, poroso e geralmente preenchido com algum tipo de fluido como água, óleo ou gás [34].

A seguir têm-se o conceito de algumas das propriedades físicas citadas acima, porém neste trabalho a propriedade física estudada é a porosidade.

### 3.2.1 Porosidade

A porosidade pode ser vista como uma medida do volume dos espaços vazios em relação ao volume total da rocha, composta principalmente por microfissuras, poros e fraturas, abertas provavelmente pela variação de tensões [37]. Ela mede a capacidade de armazenamento de fluidos [36].

A porosidade é definida como sendo a relação entre o volume de vazios de uma rocha e o volume total da mesma, como dado na equação 3.10:

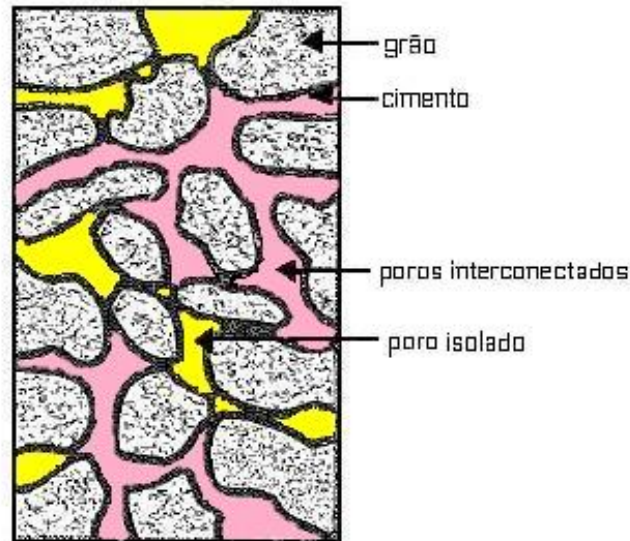
$$\phi [\%] = \frac{V_v}{V_t} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Onde  $\phi$  é a porosidade medida em porcentagem,  $V_v$  o volume de vazios e  $V_t$  o volume total [36].

Existem quatro tipos de porosidade, a absoluta, a efetiva, a primária e a secundária:

- a- Absoluta: É a relação entre volume total de vazios de uma rocha e o volume total da mesma.
- b- Efetiva: É a relação entre espaços vazios interconectados de uma rocha e o volume total da mesma. Do ponto de vista da engenharia de reservatórios a porosidade efetiva é o valor que se deseja quantificar, pois representa o espaço ocupado por fluidos que podem ser deslocados do meio poroso.
- c- Primária: É aquela que se desenvolveu durante a deposição do material sedimentar.
- d- Secundária: É aquela resultante de alguns processos geológicos subsequentes à conversão dos sedimentos em rochas [36].

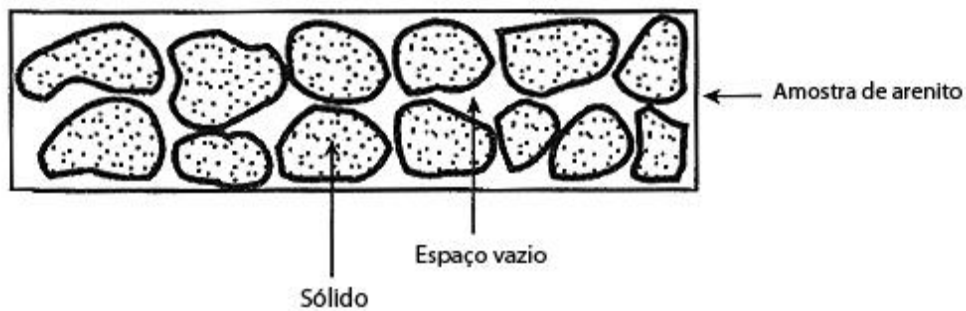




**Figura 3.6:** Seção transversal de uma amostra de rocha [36].

A maioria dos depósitos comerciais de petróleo ocorre em reservatórios formados por rochas sedimentares, principalmente em arenitos e calcários. Entretanto, vários outros tipos de rochas podem apresentar porosidade suficiente para serem localmente importantes como reservatórios.

- a- Arenitos: os arenitos são a mais freqüente rocha-reservatório encontrada em todo o mundo. Eles podem ser espessos, atingindo várias centenas de metros de espessura, e podem apresentar grande continuidade lateral. A figura 3.6 apresenta um desenho esquemático de uma amostra de arenito. A porosidade dos arenitos pode ser de dois tipos: intergranular e por fraturas.



**Figura 3.7:** Desenho esquemático de uma amostra de arenito [36].

- b-** Carbonatadas: são os calcários, as dolomitas e aquelas intermediárias entre os dois. A porosidade é provavelmente localizada, tanto lateral quanto verticalmente, dentro de uma camada. Por outro lado, os poros podem ser muito maiores que os de arenitos, dando à rocha uma grande permeabilidade. A porosidade em uma rocha carbonatada pode ser primária ou secundária.
  
- c-** Outras rochas: apesar de os maiores reservatórios de óleo e gás serem arenitos ou rochas carbonatadas principalmente, com poros disseminados, mas também devidos à fraturas, vários outros tipos de rocha podem possuir porosidade suficiente para se tornarem localmente importantes como reservatórios. Em alguns casos a porosidade é intersticial, mas na maioria dos casos é devida à presença de fissuras. Os seguintes tipos de rocha podem ser encontrados como rochas-reservatórios: conglomerados e brechas, folhetos fraturados, siltes, arcósios e rochas ígneas ou metamórficas fraturadas [36].

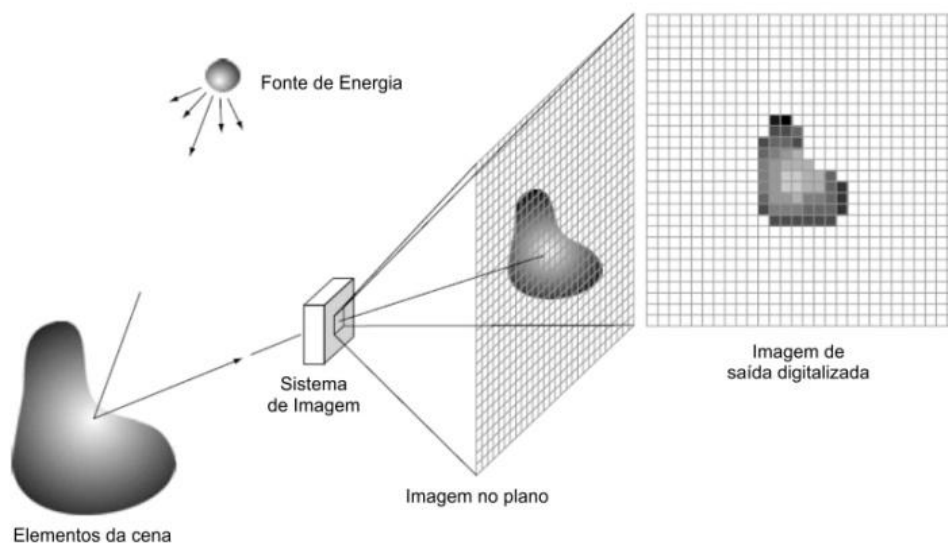
### 3.3 Processamento da Imagem

Interesse em métodos de processamento de imagens digitais decorre de duas áreas de aplicação principais: melhoria da informação da imagem para interpretação humana, e processamento de dados de imagem para o armazenamento, transmissão e representação.

Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional,  $f(x, y)$ , onde  $x$  e  $y$  são coordenadas espaciais (plano), e a amplitude de  $f$  em qualquer par de coordenadas  $(x, y)$  é chamada de intensidade ou nível de cinza da imagem naquele ponto. Quando  $x$ ,  $y$ , e os valores de amplitude de  $f$  são todos finitos (quantidades discretas) chamamos a imagem de uma imagem digital. Note que uma imagem digital é composta por um número finito de elementos, cada qual com um determinado local e valor. Estes elementos são referidos como elementos da figura, elementos de imagem, pels, e pixels. Pixel é o termo mais utilizado para designar os elementos de uma imagem digital.

No entanto, o processamento de imagens pode ser dividido em três níveis de processos informatizados: baixo, médio e de alto nível. Baixo nível de processos envolve operações primitivas, como pré-processamento de imagem para reduzir o ruído, realce de contraste e nitidez da imagem [40]. Um processo de baixo nível tem suas entradas e saídas no formato de imagens. O nível médio de processamento de imagens envolve tarefas como segmentação (particionamento de uma imagem em regiões ou objetos), a descrição desses objetos para reduzi-los a uma forma adequada para o processamento do computador, e classificação (reconhecimento) de objetos individuais [40]. Um processo de nível médio processa imagens, mas suas saídas são atributos extraídos das imagens (por exemplo, bordas, contornos, e a identidade de objetos individuais). Finalmente, de alto nível de processamento envolve traduzir o significado de um conjunto de objetos reconhecidos, como na análise de imagens [40].

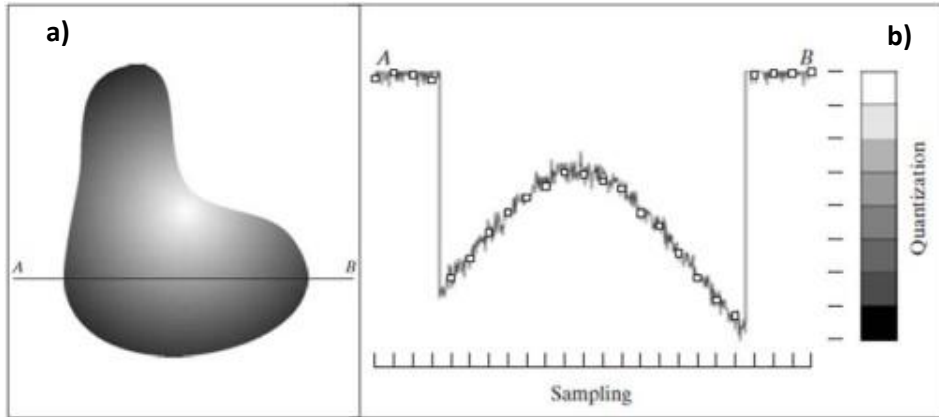
Aquisição de imagem é o primeiro processo (Figura 3.10). Os tipos de imagens em que estamos interessados são gerados pela combinação de uma "iluminação" de origem e a reflexão ou absorção de energia dessa fonte pelos elementos da "cena" a ser fotografada. A iluminação, por exemplo, pode se originar de uma fonte de energia eletromagnética, tais como radar, infravermelho, ou raios X. Mas, poderia também se originar a partir de fontes menos tradicionais, como ultra-som ou mesmo um padrão de iluminação gerada por computador. Da mesma forma, os elementos de cena podem ser objetos familiares, mas eles podem ser facilmente moléculas, formações rochosas enterradas, ou um cérebro humano.



**Figura 3.10:** Exemplo do processo de aquisição de uma imagem digital [40].

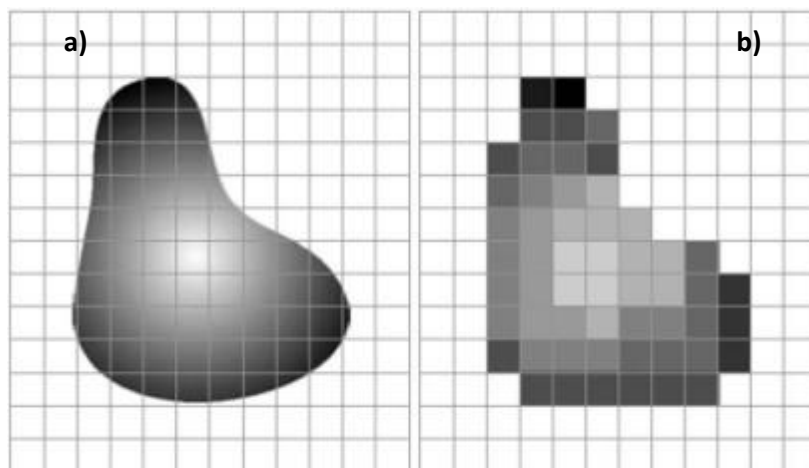
A partir disso, vemos que existem inúmeras maneiras de adquirir imagens, mas nosso objetivo em todos é o mesmo: gerar imagens digitais a partir de dados sensorizados. A saída da maioria dos sensores é uma forma de onda de tensão contínua, cuja amplitude e comportamento espacial estão relacionados com o fenômeno físico que está sendo percebido. Para criar uma imagem digital, é preciso converter os dados de tensão contínua em formato digital. Isto envolve dois processos: amostragem e quantização [40].

Para se fazer a conversão para o formato digital, temos de provar a função em ambas as coordenadas e em amplitude. A digitalização dos valores das coordenadas  $x$  e  $y$  é chamada de amostragem e a digitalização dos valores de amplitude é chamada quantização.



**Figura 3.11:** Imagem contínua (a) e Amostragem e Quantização (b) [40].

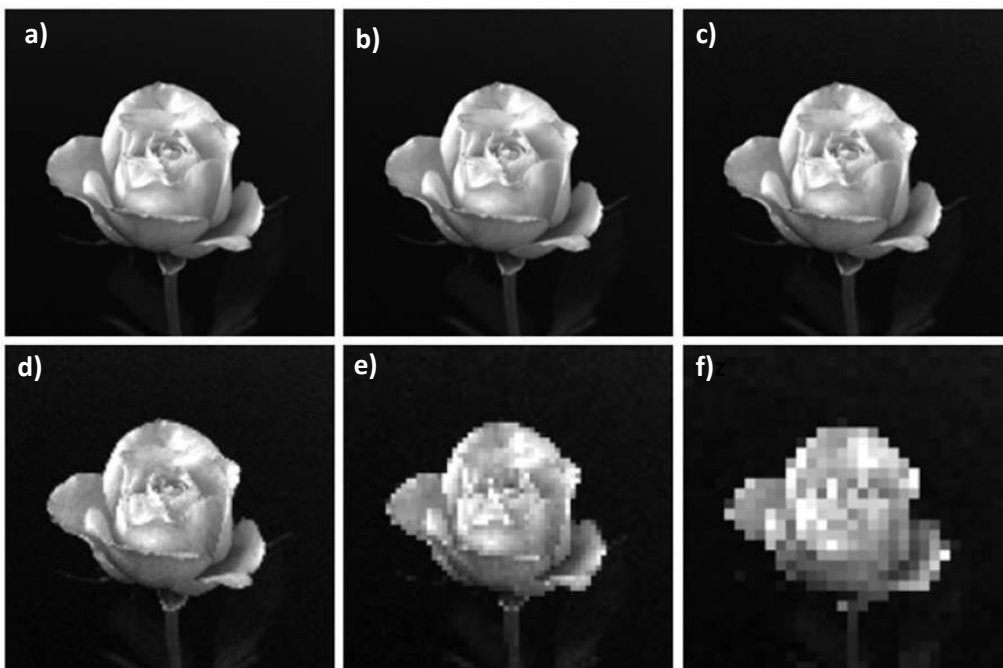
O resultado da amostragem e quantização é uma matriz de números reais. Suponha que uma imagem  $f(x, y)$  é amostrada para que a imagem digital resultante tenha  $M$  linhas e  $N$  colunas. Os valores das coordenadas  $(x, y)$  agora se tornaram quantidades discretas. Para maior clareza e conveniência de notação, usa-se valores inteiros para essas coordenadas discretas [40].



**Figura 3.12:** (a) Imagem contínua projetada pra uma série de sensores, (b) Resultado da amostragem e quantização da imagem [40].

A amostragem é o principal fator que determina a resolução espacial de uma imagem. Basicamente, a resolução espacial é o menor detalhe discernível em uma imagem. Resolução de níveis de cinza, da mesma forma, refere-se à menor alteração perceptível no nível de cinza. Devido a considerações de hardware, o número de níveis de cinza é normalmente uma potência inteira de 2. O número mais comum é de 8 bits, com 16 bits sendo usado em algumas aplicações onde a valorização do nível de cinza é necessária. Às vezes encontramos sistemas que podem digitalizar os níveis de cinza de uma imagem com 10 ou 12 bits de precisão.

Para se referir a uma imagem digital de níveis de cinza, usa-se dizer que o tamanho é  $M \times N$ , tendo uma resolução espacial de  $M \times N$  pixels e uma resolução de níveis de cinza.



**Figura 3.13:** A figura (a) tem uma resolução de 1024 x 1024, a (b) 512 x 512, a figura (c) 256 x 256, a (d) 128 x 128, (e) 64 x 64 e a última (f) tem resolução de 32 x 32 [40].

Compare a fig. 3.13(a) com o 512 x 512 da imagem na fig.3.13(b) e observe que é praticamente impossível diferenciar estas duas imagens. Em seguida, o 256 x 256 na imagem da fig.3.13(c) mostra um padrão quadriculado muito leve e fino nas bordas entre as pétalas da flor e do fundo preto. A granulação ligeiramente mais acentuada em toda a imagem também está começando a aparecer. Estes efeitos são muito mais visíveis na imagem 128 x 128 na fig. 3.13(d), e tornam-se pronunciado no 64x 64 e 32 x 32 nas imagens das Figs.3.13 (e) e (f), respectivamente [40].

O objetivo principal do aprimoramento da imagem é processar uma imagem de modo que o resultado seja mais adequado do que a imagem original para uma aplicação específica.

Não existe uma metodologia específica e padrão para o aprimoramento de imagem. Quando uma imagem é processada para interpretação visual, o espectador é o juiz final de quanto bem um determinado método funciona. Avaliação visual da qualidade da imagem é um processo subjetivo.

Abordagens de aprimoramento de imagem se dividem em duas grandes categorias: métodos de domínio espacial e métodos no domínio da frequência. O termo domínio espacial refere-se ao plano da imagem em si, e abordagens nesta categoria são baseadas em manipulação direta de pixels em uma imagem. Técnicas de processamento de domínio de frequência baseiam-se em modificar os coeficientes gerados pela Transformada de Fourier de uma imagem [40].

Um dos métodos de aprimoramento de imagens utilizados neste trabalho foi a utilização de filtros de suavização (Filtro Mediano e Filtro Gaussiano).

O Filtro Mediano, como o próprio nome indica, substitui o valor de um pixel pela mediana dos níveis de cinza na vizinhança desse pixel (o valor original do pixel é incluído no cálculo da mediana). O filtro mediano se baseia na idéia de que, como o pixel que estamos avaliando é o pixel central de uma janela, tal pixel provavelmente deveria possuir o valor central (mediana) da mesma janela.

Filtros de mediana são bastante populares porque, para certos tipos de ruído aleatório, eles oferecem excelentes capacidades de redução de ruído. Filtros de mediana são particularmente eficazes na presença de ruído impulsivo, também chamado de ruído “salt-and-pepper” por causa de sua aparência como pontos brancos e pretos sobrepostos a uma imagem [40].

Filtros gaussianos são baseados em funções gaussianas.  $H(u)$  denota um domínio da frequência, dado pela equação 3.10:

$$H(u) = Ae^{\frac{-u^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Onde  $\sigma$  é o desvio padrão da curva de gauss. Pode-se mostrar que o filtro correspondente no domínio espacial é representado pela equação 3.11:

$$h(x) = \sqrt{2\pi} \sigma A e^{-2\pi^2 \sigma^2 x^2} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

A segmentação particiona uma imagem em suas regiões constituintes ou objetos. O nível em que o particionamento é realizado depende do problema. Ou seja, a segmentação deve parar quando o objeto de interesse em uma aplicação tenha sido isolado.

Segmentação de imagens é uma das tarefas mais difíceis no processamento de imagem. A precisão da segmentação determina o eventual sucesso ou fracasso de processos de análise computadorizada. Algoritmos de segmentação de imagens geralmente são baseados em uma das duas propriedades básicas de valores de intensidade: descontinuidade e similaridade. Na primeira categoria, a abordagem é particionar uma imagem baseada em mudanças bruscas de intensidade, tais como bordas de uma imagem. As principais abordagens da segunda categoria são baseadas em particionamento de uma imagem em regiões que são semelhantes de acordo com um conjunto de critérios pré-definidos. Thresholding (Limiarização) é um exemplo de método nesta categoria.

Devido às suas propriedades e sua forma de implementação, o thresholding tem uma posição central em aplicações de segmentação de imagem. A mais usual de todas as técnicas de thresholding é particionar o histograma da imagem usando um Thresholding Global único, T. O particionamento do histograma é feito de acordo com o objetivo a ser atingido [40].



A segmentação é então realizada por digitalização de pixel por pixel da imagem e rotula cada pixel como objeto ou fundo, dependendo se o nível de cinza daquele pixel é maior ou menor do que o valor de  $T$ . O sucesso deste método depende inteiramente de quão bem a aquisição da imagem foi feita. Este limiar alcança uma segmentação limpa, eliminando as sombras e deixando apenas os objetos em si.

Quando há razão para acreditar que o fundo e objeto ocupam áreas comparáveis na imagem, um bom valor inicial para  $T$  é o nível médio de cinza da imagem. Quando os objetos são pequenos em comparação com a área ocupada pelo fundo (ou vice-versa), então um grupo de pixels vai dominar o histograma e o nível médio de cinza não é tão boa escolha inicialmente. Um valor inicial mais apropriado para  $T$  em casos como este é um valor central, ou seja, a mediana entre os níveis máximo e mínimo de cinza [40].

# Capítulo 4

## Materiais e Métodos

### 4.1 Descrição das Amostras

As rochas-reservatório utilizadas como amostras neste trabalho são as amostras 1 e 2. Foram feitos furos nestas rochas com o objetivo de se criar uma metodologia padrão para o mapeamento de poros.

#### 4.1.2 Amostra 1

A amostra 1 é uma Rocha-Reservatório com  $37,61\text{mm} \pm 0,01$  de diâmetro e  $50,28\text{mm} \pm 0,01$  de altura. A Figura 4.1 mostra uma foto da amostra 1.



**Figura 4.1:** Foto da amostra 1.

Nesta amostra foram feitos alguns furos na parte superior e dois furos na parte inferior. Os furos da parte inferior foram feitos com uma broca de  $1,5\text{mm} \pm 0,01$  de diâmetro. As alturas destes furos são  $14,65\text{mm} \pm 0,01$  e  $8,57\text{mm} \pm 0,01$  e ele se dispõem em forma de cruz.

#### 4.1.2 Amostra 2

A amostra 2 é uma Rocha-Reservatório com  $25,03\text{mm} \pm 0,01$  de diâmetro e  $50,83\text{mm} \pm 0,01$  de altura. A figura 4.2 mostra uma foto da amostra 2.



**Figura 4.2:** Foto da amostra 2.

Nesta amostra também foram feitos furos na parte superior e inferior. Os dois furos da parte inferior foram feitos com uma broca de  $1,2\text{mm} \pm 0,01$  de diâmetro. As alturas destes furos da parte inferior são  $14,20\text{mm} \pm 0,01$  e  $9,50\text{mm} \pm 0,01$  e eles se dispõem em forma de cruz.

#### 4.2 Equipamentos

Para a análise das amostras 1 e 2, as aquisições foram feitas utilizando-se um microtomógrafo Skyscan Modelo 1173 High Energy, pertencente ao Laboratório de Geologia Sedimentar (LAGESED) do Departamento de Geologia da UFRJ, com as especificações e condições experimentais descritas a seguir.

Este equipamento possui um tubo de raios X microfocado com anodo de tungstênio, ponto focal menor que 5 $\mu$ m e potência de 8 W, que pode ser operado com energia variando entre 40 e 130 kV e corrente de 0 a 100  $\mu$ A. Este microtomógrafo utiliza um detector do tipo “flat panel” com matriz 2240 X 2240 pixels, tamanho de pixel de 50 $\mu$ m e 12bits de range dinâmico, com aquisição de objetos com até 140 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento.

Este sistema utiliza geometria de feixe em forma de leque para aquisição das imagens transmitidas por feixes de raios X do objeto em diferentes posições angulares. Durante a aquisição dos dados o objeto pode rotacionar 180° ou 360° com um passo fixo, a cada passo uma imagem transmitida é adquirida sendo salva como arquivos 16 bits extensão em TIFF.

A tabela 4.1 mostra a especificação completa do Microtomógrafo de bancada SkyScan 1173 e a Figura 4.3 mostra uma foto deste equipamento.

**Tabela 4.1:** Especificações técnicas do Microtomógrafo SkyScan 1173 [44].

<b>Especificações do Microtomógrafo SkyScan 1173</b>	
Fonte de Raios-x	40 - 130 kV, 8W, <5 $\mu$ m tamanho local
Detector de Raios-x	Sensor Flat Panel livre distorção 2240x2240 pixels, 12 bits.
Tamanho máx. do objeto	140 mm de diâmetro, 200 mm de comprimento (100-140 comprimento de scanneamento).
Resolução Espacial	<4 - 5 $\mu$ m de detectabilidade de detalhes, 7 - 8 $\mu$ m de resolução de baixo contraste.
Reconstrução	PC único ou reconstrução volumétrica de cluster.
Segurança radiológica	<1 $\mu$ Sv/h em qualquer ponto da superfície do instrumento.



**Figura 4.3:** Foto do Microtomógrafo SkyScan 1173 do LAGESED.

### **4.3 Aquisição e Reconstrução das Imagens**

#### **4.3.1 Aquisição**

As aquisições foram feitas utilizando-se dois porta-amostras de acrílico. Para a amostra 1 o porta amostra tem 1,01mm de espessura e para a amostra 2 a espessura do porta-amostra é de 3,10mm, como mostrado na figura 4.4. Os porta-amostras têm espessuras diferentes porque foram confeccionados para utilizarem a mesma de acrílico, mesmo tendo diâmetros diferentes.



**Figura 4.4:** Porta amostras utilizados.

As amostras foram scaneadas com uma tensão aplicada de 130kV, corrente de  $61\mu\text{A}$ , filtros de alumínio (com 1,0mm de espessura) e cobre (0,15mm de espessura), afim de minimizar o efeito de endurecimento de feixe, resoluções espaciais de 10, 20, 40 e  $60\mu\text{m}$  e passo de  $0,5^\circ$  em  $360^\circ$ . A figura 4.5 é uma foto da amostra dentro do microtomógrafo no momento da aquisição.



**Figura 4.5:** Foto do Microtomógrafo com a amostra.

A relação das condições de aquisição utilizada nesta metodologia está relacionada na Tabela 4.2. A exposição é o tempo total de exposição de cada frame. A rotação é graduação em que a amostra gira. A média de frames é o número de quadros que se faz para uma projeção. O movimento aleatório é uma correção de alinhamento que se faz a cada certo número de imagens aquiritadas. Modo de câmera offset permite aumentar o campo de visão horizontal de duas vezes por digitalizar um objeto em dois ciclos de aquisição. Este modo demora o dobro do tempo de varredura e aumenta o tamanho dos arquivos de projeção duas vezes.

**Tabela 4.2:** Condições de Aquisição das imagens.

<b>[Aquisição]</b>	
Número de Fatias	1200
Tensão da Fonte (kV)	130
Corrente da Fonte ( $\mu$ A)	61
Distância Fonte-Detector (mm)	364
Filtro	Al 1,0mm + Cu 0,15mm
Extensão da Imagem	TIFF
Exposição (ms)	800
Rotação (deg)	0.3
Média de Frames	ON (3)
Movimento Aleatório	ON (3)
Usar Rotação 360	SIM
Camera Offset	ON ou OFF

As variações das condições de aquisição utilizadas em relação as amostras 1 e 2 (furos na parte inferior) , estão descritas nas tabelas 4.3.

**Tabela 4.3:** Variações de condições de aquisição.

<b>Amostra</b>	<b>Aquisição</b>		
	Resolução	Câmera OFFSET	Duração do scaneamento
1	10 $\mu$ m	ON	02:04:45 h
	20 $\mu$ m	OFF	00:58:53 h
2	10 $\mu$ m	ON	02:04:17 h
	20 $\mu$ m	OFF	00:58:23 h

### 4.3.2 Reconstrução

As reconstruções das projeções foram feitas utilizando-se o programa NRecon da SkyScan (versão 1.6.4.1) / InstaRecon (versão 1.3.5.0), com licença do Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN) do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ. O pacote NRecon da SkyScan é usado para reconstruir seções transversais de imagens a partir de imagens de projeções de tomografia, principalmente as projeções de feixe cônico de raios X. Os dados nativos são reconhecidos automaticamente. Este programa também pode reconstruir os dados não-nativos de tomografia, se o formato de arquivo e nomes de arquivos seguirem as convenções, e um arquivo de log correspondente for criado. O pacote de software de reconstrução consiste de dois programas: o usuário NRecon que é o programa de interface e o InstaRecon que é o mecanismo de reconstrução. Após o processo de aquisição, a imagem capturada é reconstruída usando um algoritmo de reconstrução Feldkamp [31].

Alguns poucos parâmetros podem ser ajustados manualmente durante a reconstrução usando a função de visualização. A função “fine tuning” do NRecon é projetada para fazer estes ajustes com o lançamento de uma série de “previews”. Você pode ajustar um parâmetro de cada vez, mantendo todos os outros parâmetros fixos. Desta forma, você pode ajustar quatro parâmetros: pós-alinhamento, correção de endurecimento de feixe, correção de artefatos em anel e nível de suavização [33].

Neste trabalho usou-se as correções de Endurecimento de feixe e de Artefatos e Anel.

Quatro formatos de saída são fornecidos: 8-bit BMP (0-255), 16-bit TIFF (0-65535), 8-bit JPG (0-255) e PNG de 8 bits (0-255). Para converter o ponto flutuante imagem de seção transversal à precisão limitada destes formatos, mostrando a faixa dinâmica na seção histograma, são usados valores dentro da faixa dinâmica e são mapeados em [0, 255] em formato BMP / JPG / PNG ou [0, 65535] no formato TIFF, e à valores fora da faixa são atribuídos 0 (se abaixo do limite inferior) ou o valor máximo (se acima do limite máximo) [33].



A relação das condições de reconstrução utilizada nesta metodologia está relacionada na Tabela 4.4:

**Tabela 4.4:** Condições de Reconstrução das imagens.

<b>[Reconstrução]</b>	
Programa de Reconstrução	Nrecon
Versão do Programa	1.6.4.1
Mecanismo de Reconstrução	InstaRecon
Versão do Mecanismo	1.3.5.0
Número de imagens reconstruídas	1624
Extensão do arquivo de resultado	BMP
Intervalo Angular de Reconstrução (deg)	360
Suavização	1

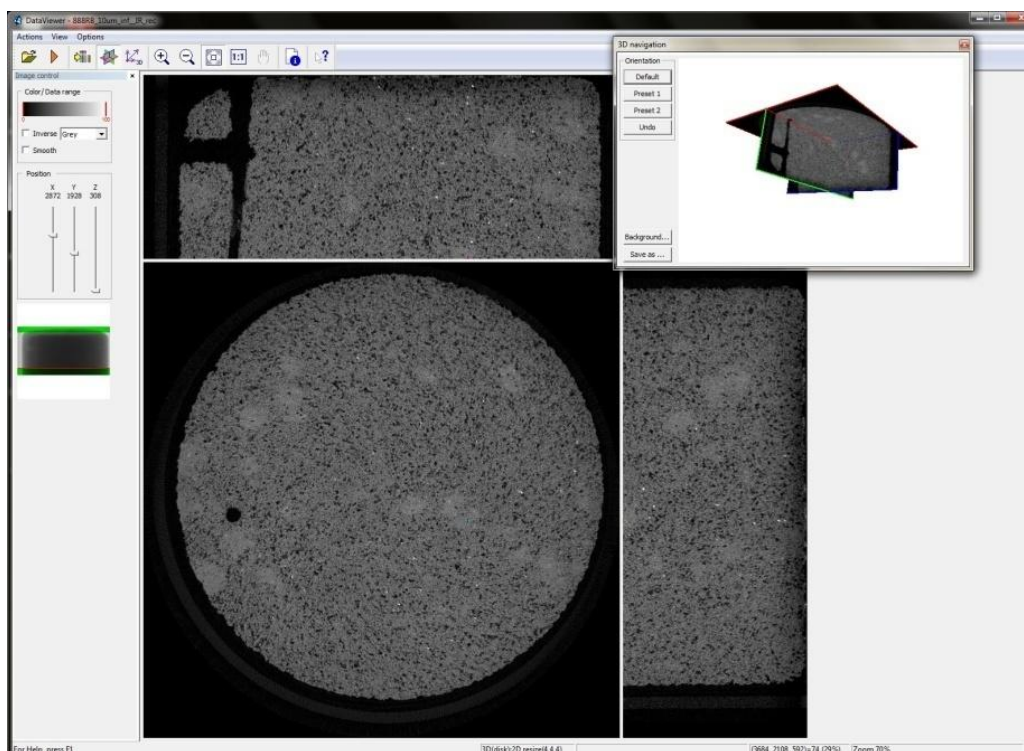
As variações das condições de reconstrução utilizadas em relação as amostras 1 e 2 (furos na parte inferior) , estão descritas nas tabelas 4.5. A Correção de artefato em anel é aplicada sobre as projeções antes de quaisquer outros passos de pré-processamento. A imagem corrigida é uma média de projeções e pode-se selecionar a profundidade de correção em um intervalo de 20 posições.

**Tabela 4.5:** Variações de condições de reconstrução.

<b>Amostra</b>	<b>Reconstrução</b>			
	Duração da Reconstrução por fatia	Correção de Artefato em Anel	Correção de Endurecimento de Feixe	Intervalo de Coeficiente de Atenuação ( $\text{mm}^{-1}$ )
1	1,5117 s	15	20%	0,0013 a 0,0228
	0,38813 s	15	20%	0,0013 a 0,0228
2	1,538793 s	10	25%	0,0016 a 0,0316
	0,398634 s	10	25%	0,0016 a 0,0316

### 4.3.3 Quantificação e Visualização

Para visualização da imagem reconstruída foi utilizado o programa Data Viewer, um exemplo da imagem de um dos plugues reconstruídos está na figura 4.6 que mostra três cortes da imagem (vista transversal, longitudinal e sagital).



**Figura 4.6:** Exemplo de visualização dos três cortes da imagem gerado pelo programa Data Viewer.

O processamento da imagem foi realizado no Programa CT-Analyser (Versão 1.11.8.0) [41] com o objetivo de mapear e quantificar os furos feitos nas amostras 1 e 2. O CT-Analyser representa um ambiente abrangente para a obtenção de imagens do modelo 3D e de dados quantitativos a partir de conjuntos de dados do scanearmento da  $\mu$ CT-3D. A comunicação de dados é flexível - incluindo folha de cálculo (por exemplo, Excel) que já sai pronta em uma tabela de dados, e também adequados às exigências de análise de alto rendimento de um laboratório [41].

A figura 4.7 mostra uma janela de trabalho do CT-Analyser.

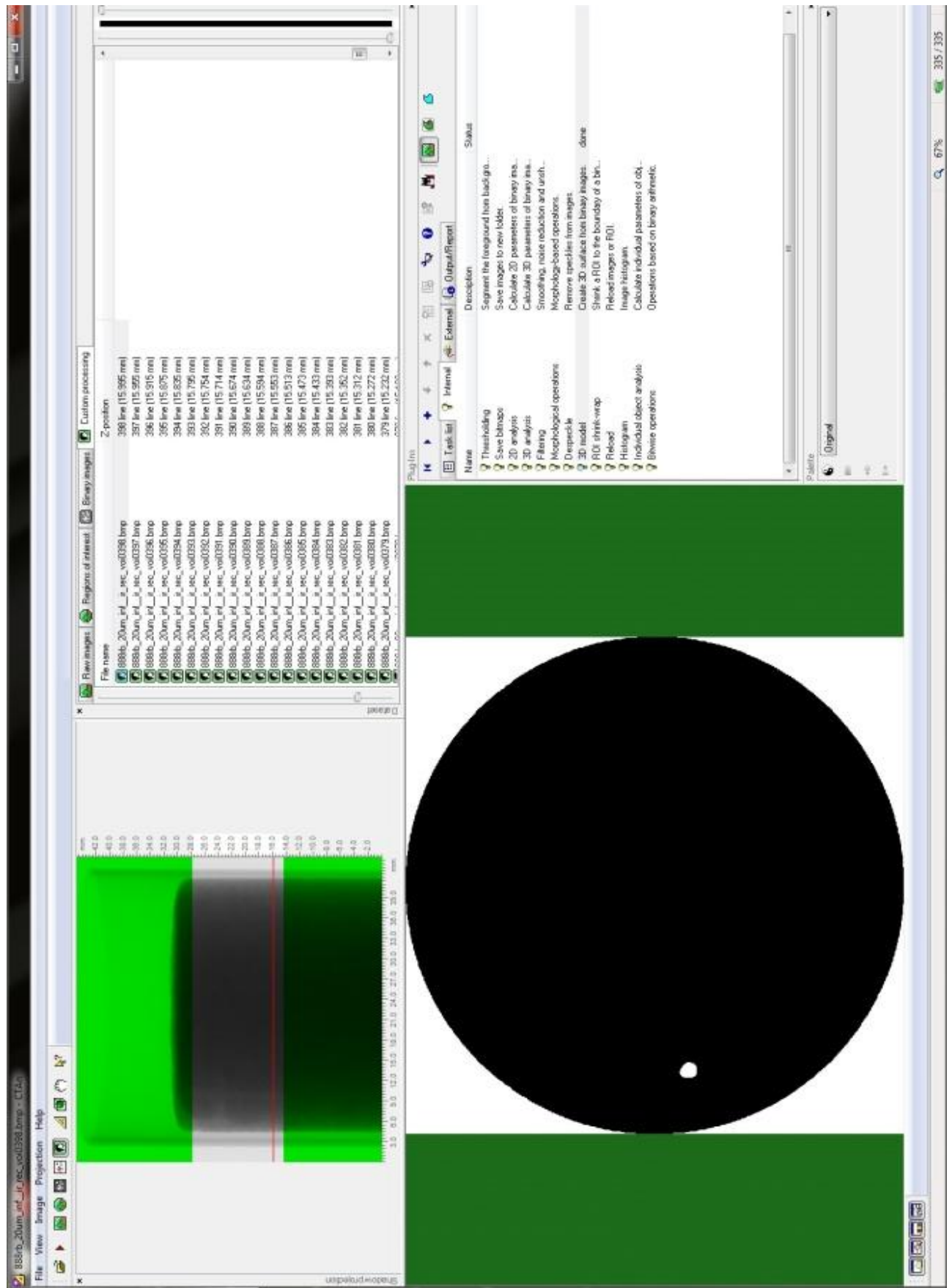


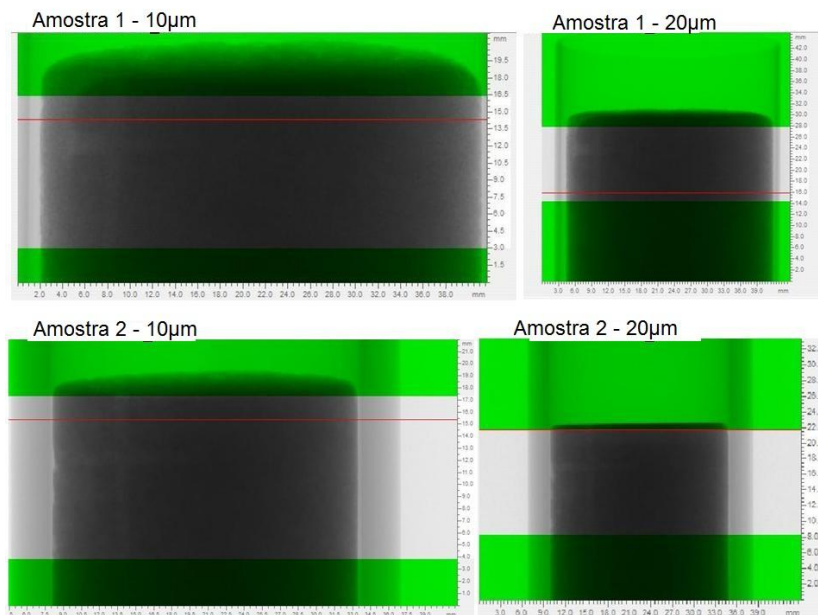
Figura 4.7: Exemplo de uma janela de trabalho do CT-Analyser.

Todos os cálculos são realizados a partir de uma região selecionada. A seleção consistente e precisa das regiões ou volumes de interesse é fundamentalmente importante para a obtenção de dados precisos e significativos. O termo "região de interesse", ou ROI, irá se referir a região selecionada de uma imagem única e transversal. A análise 2D é realizada dentro de um ROI. O "volume de interesse" refere-se a soma coletiva de todos os ROIs de um conjunto contíguo de fatias de imagens transversais, o que representa um volume selecionado 3D. A análise morfométrica em 3D é realizada em um VOI. Note no entanto que a análise do tipo 2D também pode ser realizada em um VOI, integrando ou somando os resultados das análises 2D sobre muitas fatias [42].

Todos os objetos binarizados, dentro de uma região de interesse (ROI), são analisados em conjunto e os resultados integrados são calculados, como por exemplo, o volume total do furo. Todos os cálculos são feitos com base na seleção do ROI. Na análise 3D temos um volume de interesse inspecionado, o VOI. Ele se refere à soma de todos os ROIs ao longo de todas as seções transversais, representando o volume 3D selecionado. As medidas são feitas nas imagens segmentadas e binarizadas [42].

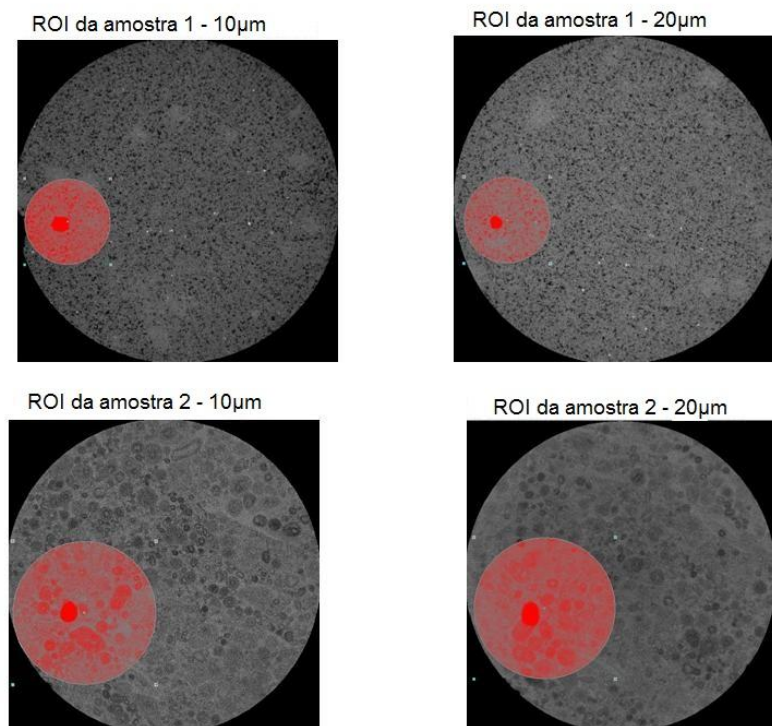
Após a reconstrução dos dados, o procedimento de quantificação dos furos das amostras pode ser descrito da seguinte forma:

- a-** Determinação do número total de fatias quantificadas. A partir do número total de fatias reconstruídas foram retiradas das análises as fatias que não contabilizam o furo da amostra ou a constituição total dela. A figura 4.8 mostra que algumas regiões (em verde) foram subtraídas no topo e na base, pois não são representativas para a quantificação dos furos.



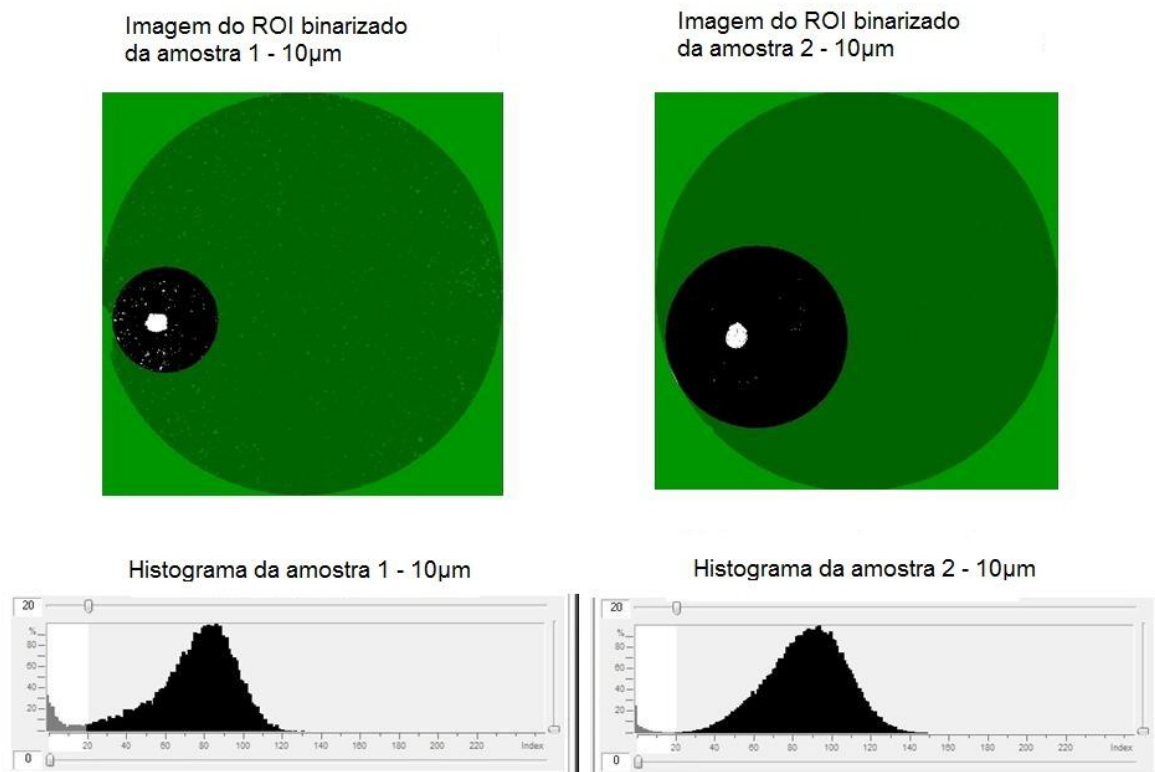
**Figura 4.8:** imagem radiográfica dos plugues.

**b-** Determinação do ROI. Foi escolhido um ROI circular com diâmetro inferior ao diâmetro da amostra, envolvendo apenas a região do furo, como é mostrado na figura 4.9. Desta forma foi determinado o volume de interesse VOI;



**Figura 4.9:** Imagem radiográfica mostrando o ROI escolhido (círculo vermelho).

- c- Escolha do nível de thresholding com base na visualização do histograma da imagem. A figura 4.10 mostra exemplos de imagens do ROI binarizado com seu respectivo histograma utilizado para a escolha do nível de segmentação. O limiar inferior utilizado foi 0 (zero) e o superior 17 (dezesete). Esses valores foram utilizados para as duas amostras e nas duas resoluções.



**Figura 4.10:** Exemplos de imagem do ROI com seu respectivo histograma.

- d- Processamento da imagem. Foram aplicados filtros para suavizar a imagem, eliminando assim estruturas que não deveriam ser quantificadas (porosidade inerente à rocha). Os filtros utilizados foram o Filtro Médio e o Filtro Gaussiano. Após a utilização destes filtros foi feita a binarização da imagem utilizando o “plug-in Thresholding”, este “plug-in” é onde definimos o limiar inferior e superior para a binarização;

e- Análise 3D. Inicia-se uma análise da imagem tridimensional (3D) dos objetos binarizados selecionados dentro do volume de interesse (VOI). Quando se realiza esta análise uma série de parâmetros pode ser calculada, como por exemplo, o volume total contido no VOI (TV), o volume total dos objetos binarizados (BV) e também o percentual de porosidade total (Po(tot.)). Os parâmetros morfométricos são calculados pelo CT-Analyser seja em 3D diretamente com base em uma superfície renderizada (processada digitalmente) do modelo de volume, ou em 2D a partir de imagens individuais de seções transversais binarizadas.

Os parâmetros calculados neste trabalho foram:

- i. **Volume total contido no VOI (TV, mm<sup>3</sup>):** Volume total do volume de interesse (VOI). A medida do volume 3D é baseada no modelo de volume Marching Cubes do VOI.
- ii. **Volume total de objetos binarizados no VOI (BV, mm<sup>3</sup>):** Volume total de objetos binarizados dentro do VOI. A medida do volume 3D é baseado no modelo de volume Marching Cubes dos objetos binarizados dentro do VOI.
- iii. **Percentual de VOI ocupado pelos objetos binarizados (BV/TV, %):** A proporção do VOI ocupada por objetos sólidos binarizados. Este parâmetro só é relevante se o volume estudado é totalmente contido dentro de uma região bem definida bifásica de sólidos e do espaço. O significado do volume medido em percentagem depende dos critérios aplicados na escolha do volume de interesse.
- iv. **Volume de espaço poroso aberto (Po.V(op), mm<sup>3</sup>):** O volume total de todos os poros abertos dentro do VOI. Um poro aberto é definido como qualquer espaço localizado dentro de um objeto sólido ou entre objetos sólidos, que tem qualquer conexão 3D para o espaço fora do objeto ou objetos.
- v. **Percentual de porosidade Aberta (Po.(op), %):** Porcentagem de porosidade aberta é o volume de poros abertos (como definido acima) como uma porcentagem do volume total de VOI.

- vi. **Volume total de espaço poroso (Po.V(tot), mm<sup>3</sup>):** O volume total de todos os poros abertos e fechados dentro do VOI.
  - vii. **Percentual de porosidade total (Po.(tot), %):** Porosidade total é o volume de todos os poros abertos, mais fechados (como definido acima) como uma porcentagem do volume total de VOI [42].
- f- **Modelo 3D.** Este “plug-in” irá construir um modelo em 3D dos objetos atuais binarizados dentro do VOI atual (volume de interesse). O algoritmo escolhido foi Marching Cubes 33 que é uma recente melhoria do algoritmo original Marching Cubes, um modelo explícito mostrando detalhes e até voxels individuais, bom para objetos finamente detalhados. O formato de arquivo escolhido foi P3G que é um formato de modelo da SkyScan, onde o tamanho do modelo é pequeno e médio e este formato é útil, pois o tamanho do arquivo é relativamente pequeno e uma opção de suavização adicional está disponível no CT-Volume para modelos P3G [41]. CT-Volume (CTVol) é um aplicativo para visualização e manipulação de modelos de superfície 3D a partir de imagens de micro-TC. Os modelos 3D são criados no programa CT- Analyser (CTAN). O objetivo desses modelos é fazer com que os aspectos visíveis e tangíveis da estrutura 3D de um objeto que foi fotografado por micro-CT. Modelos únicos e múltiplos podem ser vistos. Visualização pode ser reforçada pela criação de filmes animados [43]. Um exemplo de visualização 3D no CT-Vol está figura 4.11.



**Figura 4.11:** Exemplo de modelo 3D visualizado no CT-Vol [43].



# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1 Furos na parte inferior da amostra 1

A tabela 5.1 mostra as diferenças em todas as etapas de processamento das imagens. As quantificações dos parâmetros morfométricos, tanto para a resolução de 10 $\mu$ m, quanto para de 20 $\mu$ m foram feitas após uma diminuição da resolução, como mostra a tabela 5.1 para a amostra 1.

**Tabela 5.1:** Diferenças no processamento da amostra 1

Diferenças na amostra 1			
Resolução	Aquisição	Reconstrução	Processamento
	Tempo de duração	Tempo de duração por slice	Matriz final
10 $\mu$ m	02:04:45 h	1,511700 segundos	893x893
20 $\mu$ m	00:58:53 h	0,388130 segundos	877x877

Essa diminuição na matriz de resolução faz com que as imagens que serão quantificadas estejam na mesma resolução. As aquisições feitas com 10 $\mu$ m geram imagens com uma matriz de 4224 x 4224, então na etapa de processamento faz-se uma diminuição dessa resolução. As aquisições feitas com 20 $\mu$ m geram imagens com 2440 x 2440. Assim a matriz final utilizada para a quantificação tem aproximadamente a mesma resolução.

Como no processo de binarização somente os furos foram analisados, tem-se que o volume de espaço poroso aberto é igual ao volume total de espaço poroso e o percentual de porosidade aberta é igual ao percentual de porosidade total.

Os resultados obtidos na análise 3D dos furos feitos na parte inferior da amostras no programa de processamento de imagens CT-Analyser para a amostra 1 estão na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2:** Parâmetros morfométricos da amostra 1.

<b>AMOSTRA 1</b>				
<b>Descrição</b>	<b>10µm</b>	<b>20µm</b>	<b>diferença</b>	<b>% da diferença</b>
<b>TV (mm<sup>3</sup>)</b>	972,16	977,17	5,01	<b>0,52</b>
<b>BV (mm<sup>3</sup>)</b>	36,23	34,4	1,83	<b>5,05</b>
<b>BV/TV (%)</b>	3,72	3,52	0,2	<b>5,38</b>
<b>Po. V(tot) (mm<sup>3</sup>)</b>	935,92	942,77	6,85	<b>0,73</b>
<b>Po. (tot) (%)</b>	96,27	96,47	0,2	<b>0,21</b>

## 5.2 Furos na parte inferior da amostra 2

A tabela 5.3 mostra as diferenças em todas as etapas de processamento das imagens. As quantificações dos parâmetros morfométricos, tanto para a resolução de 10µm, quanto para de 20µm foram feitas após uma diminuição da resolução, como mostra a tabela 5.3 para a amostra 2

**Tabela 5.3:** Diferenças no processamento da amostra 2

<b>Diferenças na amostra 2</b>			
<b>Resolução</b>	<b>Aquisição</b>	<b>Reconstrução</b>	<b>Processamento</b>
	Tempo de duração	Tempo de duração por slice	Matriz final
<b>10 µm</b>	02:04:17 h	1,538793 segundos	617x617
<b>20 µm</b>	00:58:23 h	0,398634 segundos	606x606

Assim, analogamente aos resultados da amostra 1, os resultados obtidos na análise 3D dos furos feitos na parte inferior da amostras no programa de processamento de imagens CT-Analyser para a amostra 2 estão na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4:** Comparação dos resultados da amostra 2.

<b>AMOSTRA 2</b>				
<b>Descrição</b>	<b>10µm</b>	<b>20µm</b>	<b>diferença</b>	<b>% da diferença</b>
<b>TV (mm<sup>3</sup>)</b>	1453,31	1459,27	5,96	<b>0,41</b>
<b>BV (mm<sup>3</sup>)</b>	24,29	22,54	1,75	<b>7,20</b>
<b>BV/TV (%)</b>	1,67	1,54	0,13	<b>7,78</b>
<b>Po. V(tot) (mm<sup>3</sup>)</b>	1429,02	1436,72	7,7	<b>0,54</b>
<b>Po. (tot) (%)</b>	98,32	98,45	0,13	<b>0,13</b>

### 5.3 Volume teórico dos furos na parte inferior das amostras

Os resultados teóricos dos valores de volume dos furos das amostras foram obtidos com as dimensões dos furos. Na amostra 1 os furos da parte inferior foram feitos com uma broca de 1,5mm ± 0,01 de diâmetro. As alturas destes furos são 14,65mm ± 0,01 e 8,57mm ± 0,01 e ele se dispõem em forma de cruz. Na amostra 2 os dois furos da parte inferior foram feitos com uma broca de 1,2mm ± 0,01 de diâmetro. As alturas destes furos da parte inferior são 14,20mm ± 0,01 e 9,50mm ± 0,01 e eles também se dispõem em forma de cruz.

Os resultados teóricos encontrados para o volume dos furos das amostras e comparação deles com as quantificações feitas no CT-Analyser estão relacionados na tabela 5.5.

**Tabela 5.5:** Volume teórico dos furos das amostras.

<b>Descrição</b>	<b>Amostra 1</b>		<b>Amostra 2</b>	
	<b>10µm</b>	<b>20µm</b>	<b>10µm</b>	<b>20µm</b>
<b>Teórico (mm<sup>3</sup>)</b>	38,37±0,02	38,37±0,02	25,37±0,02	25,37±0,02
<b>BV (mm<sup>3</sup>)</b>	36,23	34,4	24,29	22,54
<b>Percentual da diferença(%)</b>	5,57	10,34	4,25	11,15

#### 5.4 Amostra 2 completa

Uma nova análise foi realizada utilizando a mesma metodologia, avaliando os parâmetros microestruturais da amostra de rocha-reservatório 2 completa, levando em consideração os furos na parte inferior e também os furos da parte superior em quatro resoluções: 10, 20, 40 e 60 $\mu\text{m}$ .

Houve algumas diferenças no processamento das imagens, desde a aquisição até a renderização para as diferentes resoluções. O limiar para a binarização inferior utilizado foi 0 (zero) e o superior 20 (vinte), e esses valores foram utilizados para a amostra 2 completa nas quatro resoluções. As outras diferenças estão descritas na tabela 5.6.

**Tabela 5.6:** Diferenças no processamento da amostra 2 completa.

<b>AMOSTRA 2 (completa)</b>				
<b>Resolução</b>	<b>Diferença na Aquisição</b>	<b>Diferença no Processamento</b>		
	Tempo de duração	Matriz	Tempo	Nº de fatias
<b>10 <math>\mu\text{m}</math></b>	07:57:05 h	608x608	3h e 42 min	1222
<b>20 <math>\mu\text{m}</math></b>	01:42:56 h	597x597	3h e 02 min	1201
<b>40 <math>\mu\text{m}</math></b>	00:45:00 h	598x598	1h e 48 min	1201
<b>60 <math>\mu\text{m}</math></b>	00:22:37 h	400x400	32 min	804

A Tabela 5.7 mostra os resultados encontrados para os parâmetros morfométricos no CT-Analyser nas quatro resoluções.

**Tabela 5.7:** Resultados da análise 3D da amostra 2 completa.

<b>AMOSTRA 2 (completa)</b>				
<b>Descrição</b>	<b>10<math>\mu\text{m}</math></b>	<b>20<math>\mu\text{m}</math></b>	<b>40<math>\mu\text{m}</math></b>	<b>60<math>\mu\text{m}</math></b>
<b>TV (<math>\text{mm}^3</math>)</b>	19680,9	19693,63	19693,63	19665,91
<b>BV (<math>\text{mm}^3</math>)</b>	48,25	42,99	40,92	28,3
<b>BV/TV (%)</b>	0,24	0,21	0,2	0,14
<b>Po. V(tot) (<math>\text{mm}^3</math>)</b>	19632,65	19650,64	19652,71	19637,59
<b>Po. (tot) (%)</b>	99,75	99,78	99,79	99,85

## 5.5 Análise dos Resultados

### 5.5.1 Amostras 1 e 2 (furo na parte inferior)

A análise dos resultados foi feita em caráter comparativo da análise 3D, comparando as condições de aquisição, de reconstrução e de processamento da imagem entre as resoluções de 10 $\mu$ m e 20 $\mu$ m para as amostras 1 e 2.

A diferença nas condições de aquisição entre as resoluções de 10 $\mu$ m e 20 $\mu$ m foi o tempo de duração do scaneamento. Na aquisição da resolução de 10 $\mu$ m leva-se aproximadamente o dobro do tempo de aquisição da resolução de 20 $\mu$ m. As Tabelas 5.1 e 5.3 mostram o tempo de duração de cada scaneamento para cada amostra e resolução.

Em relação às condições de reconstrução, também há diferença no tempo de reconstrução por slice, sendo aproximadamente quatro vezes maior para a resolução de 10 $\mu$ m. As Tabelas 5.1 e 5.3 mostram o tempo de duração de reconstrução por slice para cada amostra e resolução. Também houve diferença em alguns parâmetros, tais como, Correção de Artefato em Anel, Correção de Endurecimento de Feixe e no intervalo de coeficiente de atenuação utilizado, essas diferenças se devem ao fato das amostras 1 e 2 serem de densidades diferentes.

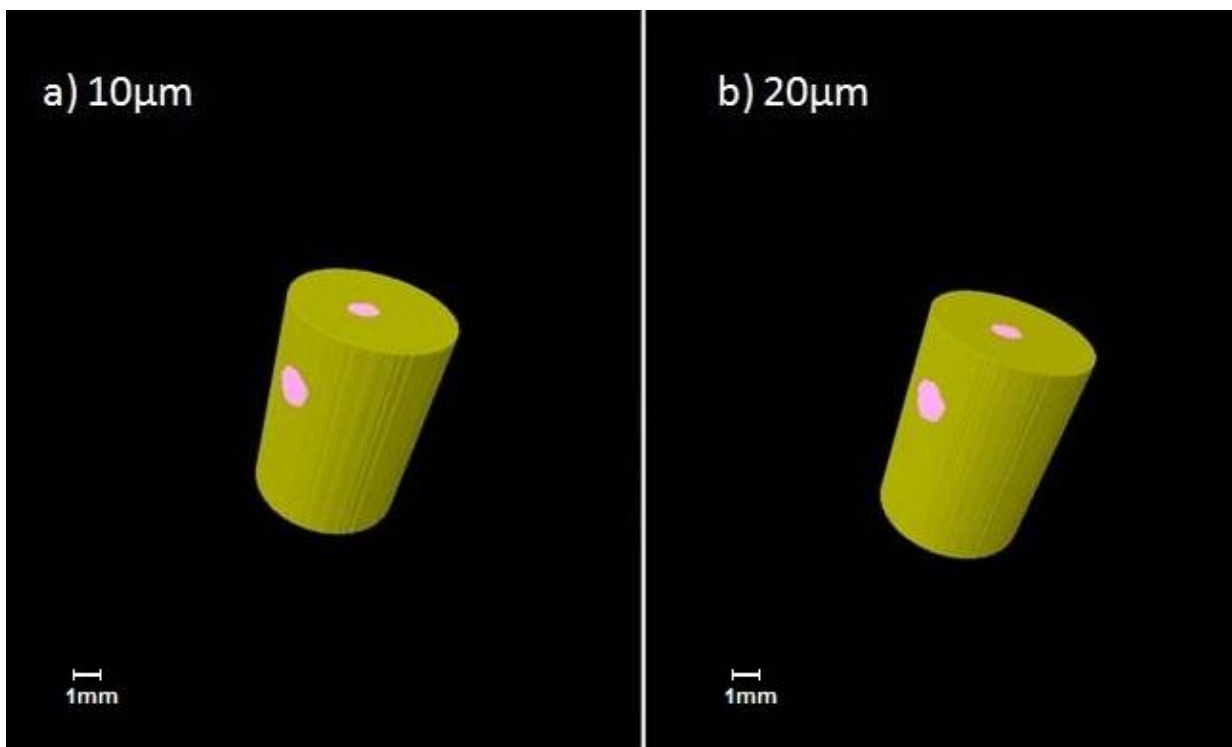
No processamento da imagem houve diferença no tempo de processamento. As aquisições com resolução de 10 $\mu$ m têm matriz de 4224x4224 e as aquisições com resolução de 20 $\mu$ m têm matriz de 2240x2240, então foi feita uma redução desta resolução antes do processamento, por isso as aquisições de 10 $\mu$ m levam muito mais tempo para serem renderizadas.

Tendo as imagens processadas e na mesma resolução observa-se a diferença dos resultados de cada parâmetro entre as resoluções de 10 $\mu$ m e 20 $\mu$ m para cada amostra. Analisando as tabelas 5.2 (amostra 1) e 5.4 (amostra 2) da comparação dos resultados dos parâmetros microestruturais da análise 3D do programa CT-Analyser dos furos na parte inferior nota-se como resultado uma diferença de menos de 10% entre os parâmetros para as resoluções de 10 $\mu$ m e 20 $\mu$ m.

Em relação ao valor teórico do volumes dos furos, tanto para a amostra 1, quanto para a amostra 2, têm-se que o volume teórico encontrado e os valores dos volumes quantificados pela análise 3D do CT-Analyser têm uma diferença de menos de 10%, para as duas resoluções, como mostram a tabela 5.5. Um detalhe importante é que para a resolução de 10 $\mu$ m a diferença é bem menor do que para a resolução de 20 $\mu$ m.

As duas amostras apresentaram uma diferença muito grande de tempo de aquisição, reconstrução e processamento das imagens, sendo a resolução de 10 $\mu$ m a que leva o maior tempo em todos os processos e também gera imagens que ocupam muito espaço em disco, diferentemente da resolução de 20 $\mu$ m, que em todos os aspectos tem um processamento mais fácil, mas nem por isso, de menor qualidade.

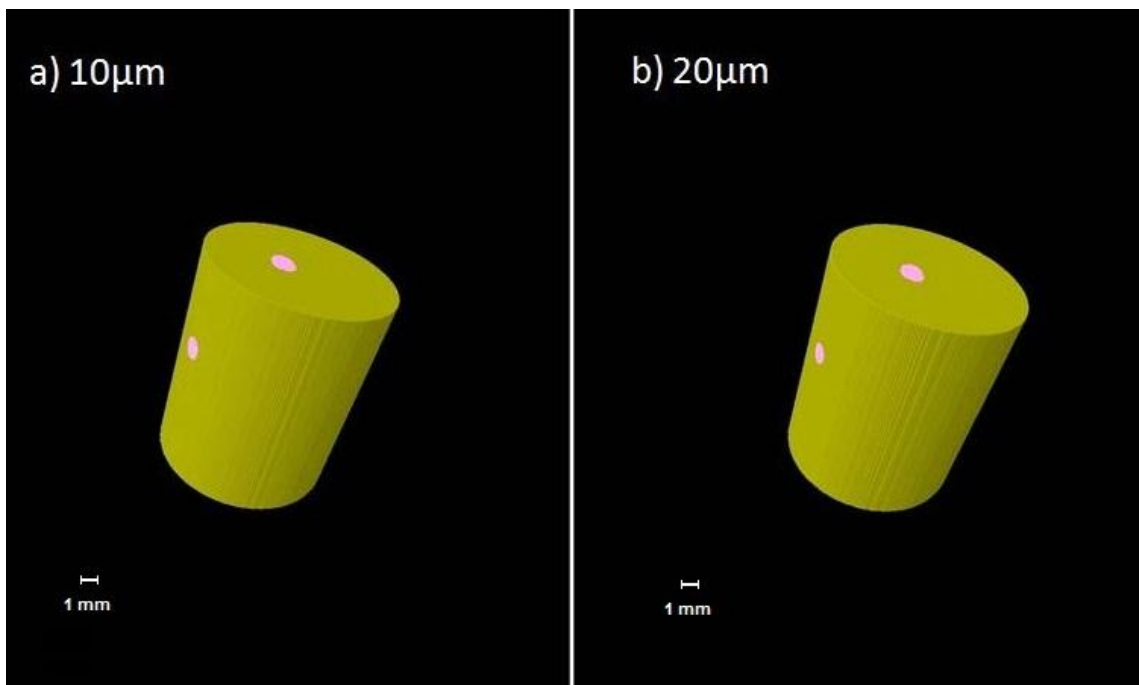
Os modelos tridimensionais construídos após a análise 3D dos furos na parte inferior das amostras estão nas figuras 5.1 e 5.2 para a amostra 1 nas resoluções de 10 e 20 $\mu$ m, respectivamente. E para a amostra 2 nas resoluções de 10 e 20 $\mu$ m, estão nas figuras 5.3 e 5.4 respectivamente.



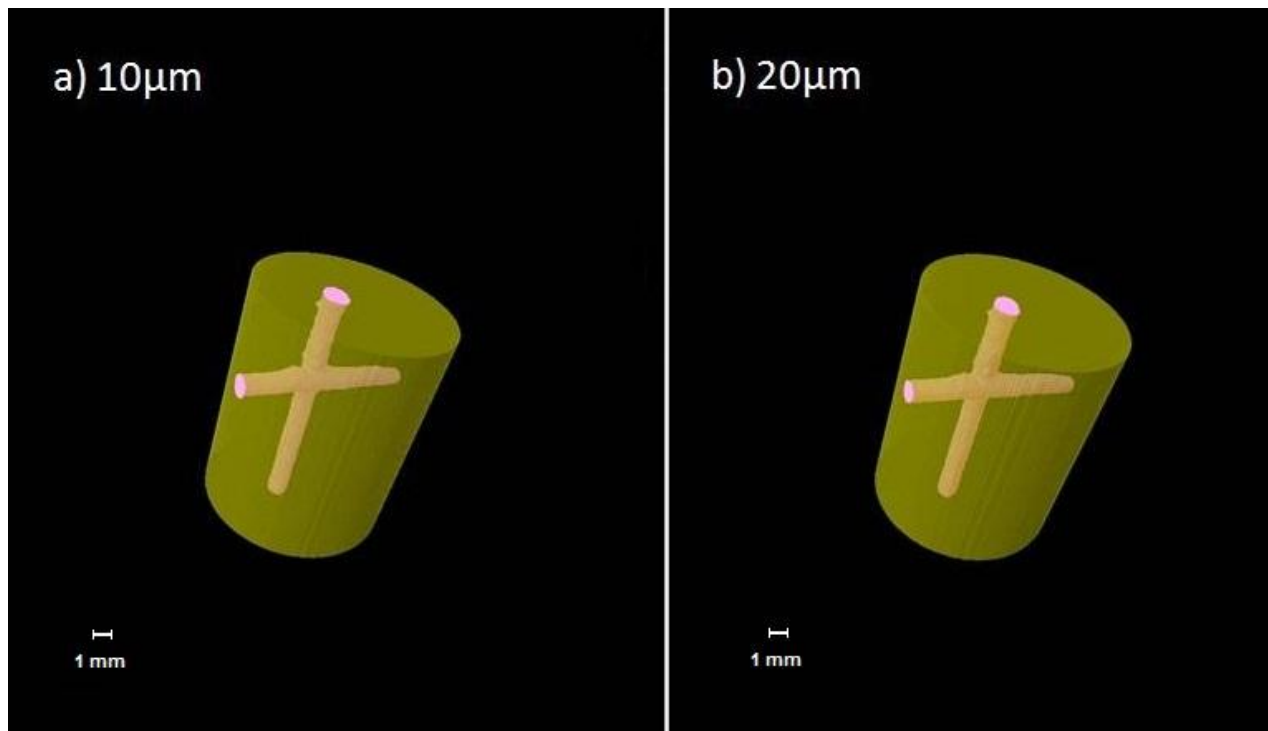
**Figura 5.1:** Modelos 3D da amostra 1 na resolução de 10 $\mu$ m (a) e de 20 $\mu$ m (b).



**Figura 5.2:** Modelos 3D da amostra 1 na resolução de 10µm (a) e de 20µm (b).



**Figura 5.3:** Modelos 3D da amostra 2 na resolução de 10µm (a) e de 20µm (b).



**Figura 5.4:** Modelos 3D da amostra 2 na resolução de 10µm (a) e de 20µm (b).

### 5.5.2 Amostra 2 completa

A análise dos resultados também foi feita em caráter comparativo, observando as condições de aquisição, de reconstrução e de processamento da imagem entre as resoluções de 10µm, 20µm, 40µm e 60µm para a amostra.

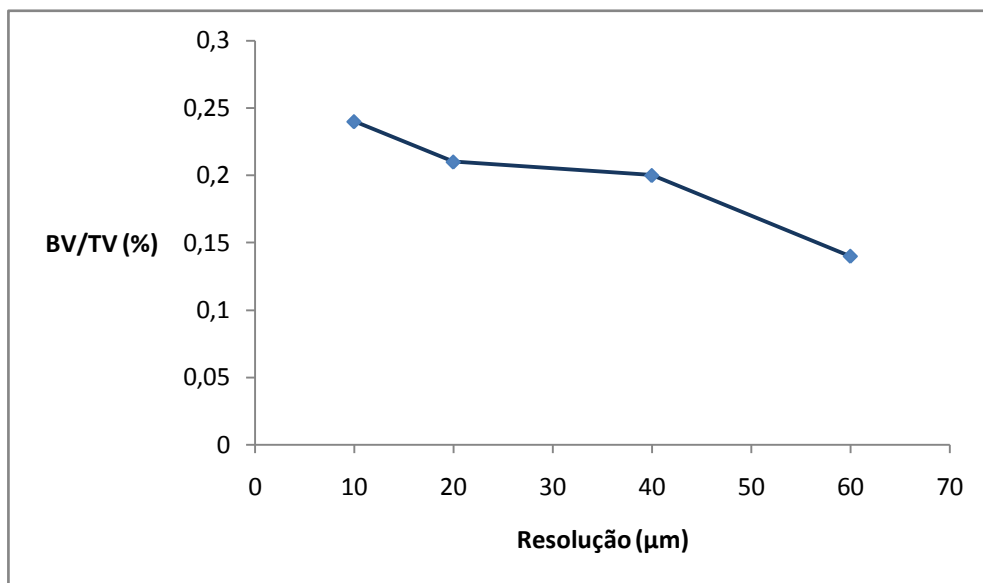
A diferença nas condições de aquisição entre as resoluções foi o tempo de duração do scaneamento, na aquisição da resolução de 10µm leva-se aproximadamente quatro vezes do tempo de aquisição da resolução de 20µm. A resolução de 20µm leva aproximadamente o dobro do tempo da resolução de 40µm, e esta leva aproximadamente um tempo três vezes maior de que de 60µm. A tabela 5.6 mostra o tempo de duração de cada scaneamento para cada resolução.

Em relação às condições de reconstrução, também há diferença no tempo de reconstrução por slice, sendo a resolução de 10µm a que leva mais tempo para ser reconstruída.



No processamento da imagem houve diferença no tempo de processamento. As imagens com resolução de 10 $\mu$ m são maiores do que as imagens com resolução de 20 $\mu$ m, 40 $\mu$ m e 60 $\mu$ m, por isso levam muito mais tempo para serem renderizadas, como mostrado na tabela 5.6, por exemplo, enquanto o processamento das imagens com resolução de 60 $\mu$ m levam 32 minutos, a de 10 $\mu$ m leva 3 horas e 42 minutos.

De acordo com a tabela 5.7, na resolução de 60 $\mu$ m perde-se informações em relação às outras resoluções, pode-se notar esta queda na Figura 5.5 que mostra um gráfico que compara o parâmetro BV/TV para as quatro resoluções.

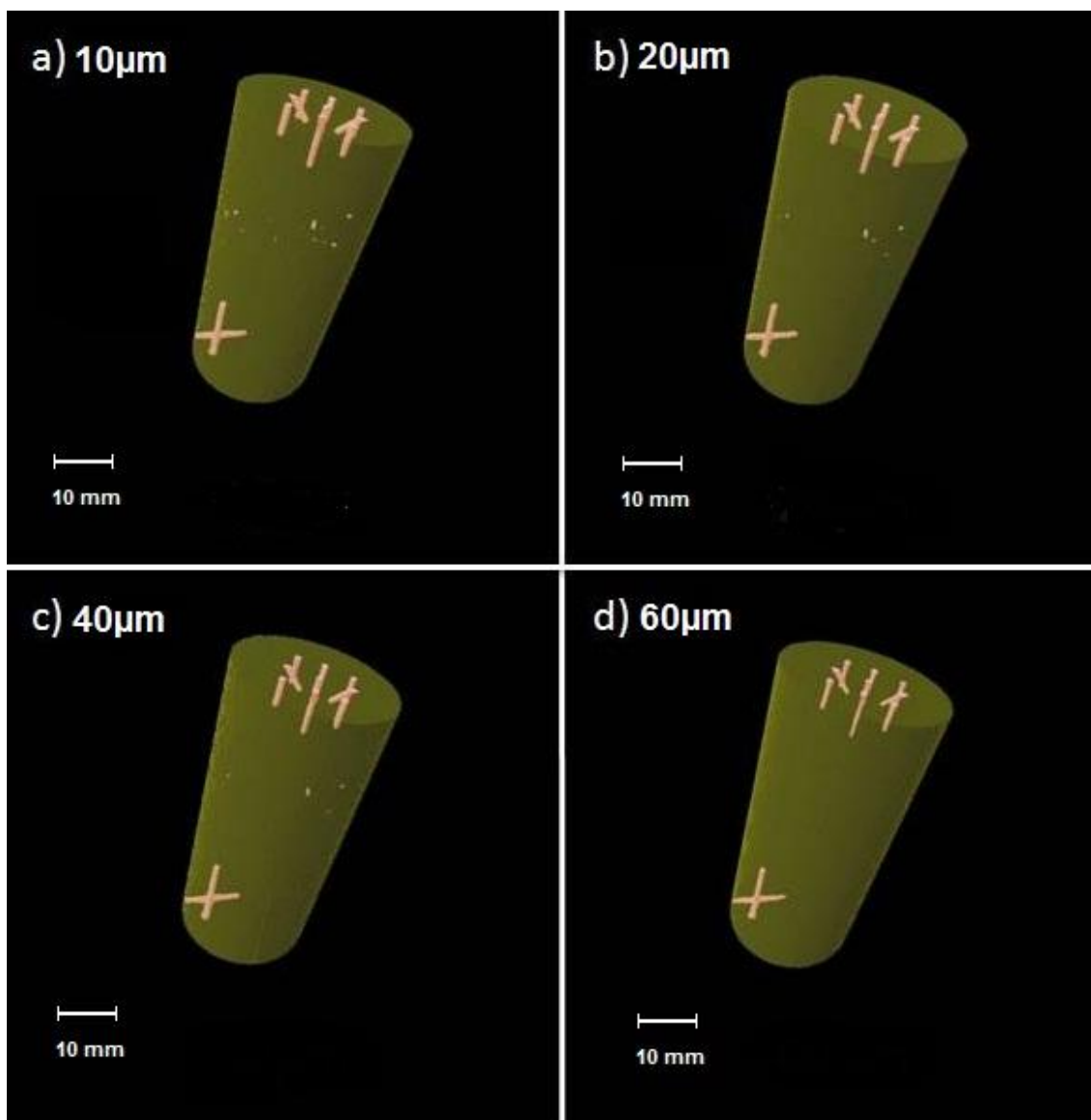


**Figura 5.5:** Gráfico BV/TV versus Resolução para a amostra 2 completa.

A análise da amostra 2 completa nas resoluções de 10, 20, 40 e 60 $\mu$ m, mostrou que o tempo de processamento segue o mesmo padrão da análise anterior, quanto maior a resolução maior é o tempo de processamento, tanto para aquisição e reconstrução, quanto para a renderização das imagens.

A tabela 5.7 mostra os resultados encontrados para os parâmetros microestruturais na análise 3D do CT-Analyser, e nela nota-se que a diferença entre as resoluções de 10 $\mu$ m e 20 $\mu$ m é pequena, e que a partir da resolução de 40 $\mu$ m as imagens começam a perder informações. A resolução 60 $\mu$ m é a que leva o menor tempo de processamento, porém é a resolução que mais se perde informações sobre a imagem.

Os modelos tridimensionais construídos após a análise 3D da amostra MC16 inteira para todas as resoluções estão na figura 5.6.



**Figura 5.6:** Modelos 3D da amostra 2 completa para a resolução de 10µm (a), 20µm (b), 40µm (c) e 60µm (d).

# Capítulo 6

## Conclusão

A metodologia desenvolvida atende ao objetivo de mapear os canais existentes nas amostras de rochas-reservatório 1 e 2. Todo o processamento descrito, desde a aquisição até a análise das imagens tridimensionais é válido para o estudo de parâmetros microestruturais dessas rochas.

As diferenças apresentadas em todas as etapas (aquisição, reconstrução, processamento e análise), não justificam a utilização de uma resolução alta, como a de 10 $\mu$ m, pois esta acarreta longos períodos de aquisição e reconstrução e um difícil processamento. E também não é recomendada uma resolução de 60 $\mu$ m, mesmo tendo pequenos períodos de aquisição e reconstrução e um processamento mais fácil. Sendo assim a resolução de 20 $\mu$ m se apresenta como a melhor resolução para ensaios com amostras de rochas-reservatório de diâmetro variando entre 25mm e 38mm, utilizando o Microtomógrafo SkyScan 1173 e a metodologia apresentada neste trabalho.

A técnica de Microtomografia Computadorizada 3D é adequada para a caracterização de amostras porosas, como as de Rochas-Reservatório, fornecendo parâmetros microestruturais internos que possibilitam o estudo petrofísico desses materiais. Uma sugestão para trabalhos futuros é incluir neste estudo de porosidade, outras propriedades físicas para se obter uma análise completa dessas rochas.

# Referências Bibliográficas

- [01]LOPES, A., NETO, J. R., MARCHESE, C., FISCHER, G., FIORI, A., & MENDES, R. (2010). "A microtomografia de raios x aplicada ao estudo da porosidade em rochas" *45º Congresso Brasileiro de Geologia* .
- [02]REMEYSEN, K., & SWENNEN, R. (2008). "Application of Microfocus computed tomography in carbonate reservoir characterization: Possibilities and limitations." *Marine and Petroleum Geology*, 25(6), 486-479.
- [03]KETCHAM, R., & CARLSON, W. (2001). "Acquisition, optimization and interpretation of x ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences" *Computers & Geoscience* , 27(4), 381-400.
- [04]MARTINS, S. C., MELLO, J., MARTINS, C. C., MAURÍCIO, A., & GINJEIRA, A. (2011). "Comparação da obturação endodôntica pelas técnicas de condensação lateral, híbrida de Tagger e Thermafil: estudo piloto com Micro-tomografia Computadorizada". *Revista Portuguesa de Estomatologia, Medicina Dentária e Cirurgia Maxilofacial*, 52(2), 59-69.
- [05]CHIRANI, R. A. (2007). "Microtomography: a method to assess root canal geometry and changes after endodontic preparation". *European Cells and Materials* , vol.13, 6.
- [06]YIN, X., CHEUNG, G. S.-P., ZAHNG, C., MASUDA, Y. M., KIMURA, Y., & MATSUMOTO, K. (2010). "Micro-computed Tomographic Comparison of Nickel-Titanium Rotary versus Traditional instruments in C-Shaped Root Canal System". *Journal of Endodontics* , vol. 36, 708-712.
- [07]BENYÓ, B., SZILÁGYI, L., HAIDEGGER, T., KOVÁCS, L., & NAGY-DOBÓ, C. (2009). "Detection of the root canal's centerline from dental micro-ct records". *31st Annual International Conference of the IEEE EMBS* .

[08]SENNERBY, L., WENNERBERG, A., & PASOP, F. (2001). "A new microtomographic technique for non-invasive evaluation of the bone structure around implants". *Clin. Oral Impl. Res* , vol. 12, 91-94.

[09]SILVA, A., ALVES, J., SILVA, O. D., JUNIOR, N., GAZZIRO, M., PEREIRA, J., et al. (2009). "Análise Microestrutural óssea trabecular utilizando Microtomografia Tridimensional". *XVII Congresso Argentino de Bioingenieria* .

[10]LIMA, I., LOPES, R., OLIVEIRA, L., & ALVES, J. (2009). "Análise de Estrutura óssea através de Microtomografia Computadorizada 3D". *Revista Brasileira de Física Médica* , vol. 2, 6-10.

[11]MENESES, A., PINHEIRO, C., VALENTE, O., CARDOSO, T., ALVES, J., SCHIRRU, R., et al. (2008). "Análises de Imagens Médicas através de Sistemas Computacionais Inteligentes para o apoio ao Diagnóstico clínico". *Revista Eletrônica TECCEN*, vol. 2, 1-9.

[12]PEREIRA, A. H. (2010). "Ruptura dos vasa vasorum e hematoma intramural da aorta: um paradigma em mudança". *Jornal Vasculiar Brasileiro*, vol. 9, 57-60.

[13]BELINI, U., FILHO, M. T., LASSO, P., & MUÑIZ, G. (2010). "Potencialidade da microtomografia de raios x (micro-CT) para a caracterização anatômica da madeira de folhosas tropicais". *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, vol. 11, 69-77 .

[14]MACEDO, A., & CRESTANA, S. (1999). "Avaliação da macroporosidade e da densidade de partículas do solo através da microtomografia de raios x". *Resvista Brasileira de Ciência do Solo* , 23, 763-771.

[15]CARVALHO, G., PÊSSOA, J., LIMA, I., & ASSIS, J. D. (2010). "Caracterização do Concreto utilizando Microtomografia por Raios x e Scanner Comercial". *XXXIII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional* .

[16]LIMA, I., APPOLONI, C., OLIVEIRA, L. F., & LOPES, R. T. (2007). "Caracterização de Materiais Cerâmicos através da Microtomografia Computadorizada 3D". *Revista Brasileira da Arqueometria, Restauração e Conservação*, vol. 1, 22-27 .

[17]ROCHA, W., APPOLONI, C., OLIVEIRA, L., FERNANDES, C., & LOPES, R. (2005). "Análise microestrutural de cerâmicas porosas SiC por transmissão de raios gama e microtomografia de raios x". *International Nuclear Atlantic Conference - INAC* .

[18]MAURICIO, V. L., & ALVES, O. L. (2009). "Microtomografia de raios x: uma poderosa técnica para caracterização de materiais porosos". *XVII Congresso Interno de Iniciação Científica da Unicamp* .

[19]MAURICIO, V. L., MAZALI, I. O., & ALVES, O. L. (2008). "Microtomografia de raios x: Grande potencial para análise e caracterização de materiais". *31ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química* .

[20]MAIRE, E., BUFFIÈRE, J.-Y., SALVO, L., JEAN JACQUES BLANDIN, W. L., & LÉTANG, J. M. (2001). "On the application of x ray Microtomography in the field of Materials Science". *Advanced Engineering Materials*, vol. 3, 539-546 .

[21]VASCONCELLOS, E., LOPES, A., NETO, J. R., FISCHER, G., & MARCHESE, C. (2010). "Microtomografia de raios x aplicada ao estudo de inclusões em diamantes". *5 Simpósio de Geologia do Diamante* .

[22]FERNANDES, J., APPOLONI, C., & FERNANDES, C. (2009). "Determinação de parâmetros microestruturais e reconstrução de imagens 3D de rochas reservatório por microtomografia de raios x". *Revista Ciências Exatas e Naturais*, vol. 11, 35-47.

[23]NOGUEIRA, L. P. (2008). *Quantificação histomorfométrica óssea a partir de Microtomografia 3D por contraste de fase e transmissão de Raios x utilizando Luz Síncrotron*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ.

[24]LIMA, I. C. (2002). *Quantificação histomorfométrica 2D a partir de tomografia computadorizada 3D*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Dissertação de M.Sc, COPPE/UFRJ.

[25]ANDREUCCI, R. (2003). *Apostila de Radiologia Industrial*. Fonte: <http://www.infosolda.com.br/andreucci>.

[26]BRAZ, D. (1997). *Tomografia Computadorizada no Estudo da Mecânica da Fratura em Misturas Asfálticas*. Rio de Janeiro, RJ: Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ.

[27]LIMA, I. C. (2006). *Caracterização de estruturas internas ósseas através das técnicas de microtomografia computadorizada tridimensional e fluorescência de raios x*. Rio de Janeiro, RJ: Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ.

[28]SILVA, A. M. (2009). *Análise morfométrica 2D e 3D de amostras de osso trabecular utilizando microtomografia tridimensional por raios x*. São Carlos: Dissertação de M.Sc. EESC/USP.

[29]SALES, E. D. (2010). *Estudo da qualidade óssea através das técnicas de microtomografia e microfluorescência de raios x*. Rio de Janeiro, RJ: Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ.

[30]VIDAL, F. V. (2011). *Investigação de microarquitetura óssea através de microtomografia 3D*. Nova Friburgo: Dissertação de M.Sc. UERJ.

[31]FELDKAMP, L., DAVIS, L., & KRESS, J. (1984). "Practical Cone-beam Algorithm". *Journal of the Optical Society American*, 1(6), 612-619.

[32]FORSBERG, F. (2008). *X ray Microtomography and Digital Volume Correlation for Internal Deformation and Strain Analysis*. Doctoral Thesis. Lulea University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Experimental Mechanics.

[33]SkyScan. (2011). *NRecon User Guide*. Fonte: <http://www.skyscan.be>

[34]BUCHELI, A. J. (2005). *Estudo de Propriedades e Comportamento Geomecânico de Rochas-Reservatório*. Rio de Janeiro, RJ: Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ.

- [35]SUGUIO, K. (1982). *Rochas Sedimentares*. São Paulo: Edgard Blucher LTDA.
- [36]ROSA, A., CARVALHO, R., & XAVIER, J. (2006). *Engenharia de Reservatórios de Petróleo*. Editora Interciência LTDA.
- [37]PALCHIK, V., & HATZOR, Y. (2002). "Crack damage stress as a composite function of porosity and elastic matrix stiffness in dolomites and limestones". *Engineering Geology*, vol. 63, 233-245.
- [38]GOODMAN, R. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.
- [39]NASCIMENTO, E. D. (2010). *Estudo paramétrico para modelagem e simulação computacional de reservatórios carbonáticos em sub-sal*. Rio de Janeiro, RJ: Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ.
- [40]GONZALEZ, R., & WOODS, R. (2001). *Digital Images Processing*. New Jersey: Prentice Hall.
- [41]SkyScan. (2010). *The user's guide CT-Analyser*. Fonte: <http://www.skyscan.be>
- [42]SkyScan. (2009). *Morphometrics Parameters in CT-Analyser*. Fonte: <http://www.skyscan.be>
- [43]SkyScan. (2008). *The user's guide CT-Volume*. Fonte: <http://www.skyscan.be>
- [44]SkyScan. (2011). *SkyScan 1173 User Guide*. Fonte: <http://www.skyscan.be>
- [45]LIMA, I., APPOLONI, C. R., OLIVEIRA, L. F., & LOPES, R. T. (2006). "Caracterização de materiais porosos através da microtomografia computadorizada 3D". *Revista Brasileira de Arqueometria Restauração e Conservação*, Ed. Especial (1), 82.



[46]JENNESON, P., ATKINSON, E., WAI, P., & DORAN, S. (2004). "Optimisation of x ray micro-tomography for the low-dose analysis of highly-dosed gels". *Journal of Physics: Conference series 3* , 257-260.

[47]SIMIONOVICI, A., CHUKALINA, M., SCHROER, C., DRAKOPOULOS, M., SNIGIREV, A., SNIGIREVA, I., et al. (2000). "High-Resolution x-ray fluorescence Microtomography of Homogeneous Samples". *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 47, 2736-2740.

[48]UMBAUGH, S. E., *Computed Imaging*. CRC Press Publisher, USA, 2005.