



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

JAQUIEL SALVI FERNANDES

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO ESPAÇO
POROSO DE ROCHAS RESERVATÓRIO DA BACIA DO RIO
TIBAGI POR MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS X**

JAQUIEL SALVI FERNANDES

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO ESPAÇO
POROSO DE ROCHAS RESERVATÓRIO DA BACIA DO RIO
TIBAGI POR MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS X**

Tese apresentada ao curso de Pós – graduação em Física da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Física.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Appoloni

Londrina
2009

Catálogo Elaborado pela Divisão de Processo Técnico da Biblioteca Central da
Universidade Estadual de Londrina.

Dados Internacionais de Catalogação – na – Publicação (CIP)

F363c Fernandes, Jaquiel Salvi.

Caracterização microestrutural do espaço poroso de rochas reservatório da bacia do rio Tibagi por microtomografia de raios X / Jaquiel Salvi Fernandes. – Londrina, 2009, 208 f. :il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Appoloni

Tese (Doutorado em Física) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós – Graduação em Física, 2009

1. Física nuclear – Teses. 2. Microtomografia de raios X – Teses. 3. Arenito – Teses. 4. Técnicas e aplicações nucleares – Teses. I. Appoloni, Carlos Roberto. II. Universidade Estadual de Maringá. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós – Graduação em Física. IV. Título.

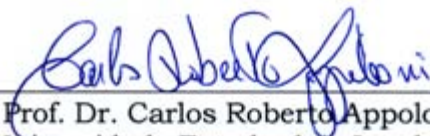
CDU 539.146

JAQUIEL SALVI FERNANDES

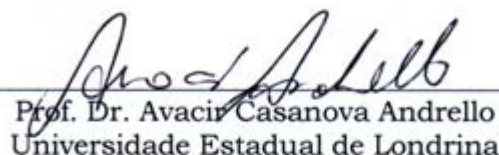
**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO ESPAÇO POROSO
DE ROCHAS RESERVATÓRIO DA BACIA DO RIO TIBAGI POR
MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X**

Tese apresentada ao curso de Pós – graduação em Física da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Física.

BANCA EXAMINADORA



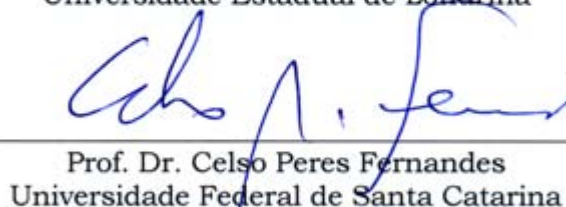
Prof. Dr. Carlos Roberto Appoloni
Universidade Estadual de Londrina



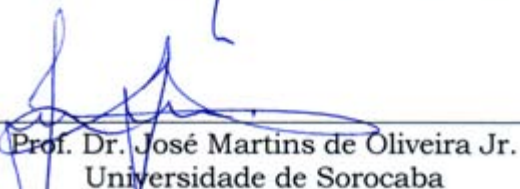
Prof. Dr. Avacir Casanova Andrello
Universidade Estadual de Londrina



Prof. Dr. Marcos de Castro Falleiros
Universidade Estadual de Londrina



Prof. Dr. Celso Peres Fernandes
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. José Martins de Oliveira Jr.
Universidade de Sorocaba

Londrina 18 de dezembro de 2009

À minha esposa Carla e à minha filha Millena
que irá nascer em 23 de janeiro de 2010.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela excelente vida que tem me proporcionado por todos esses anos, aos meus pais Celso Fernandes e Tânia Maria Fernandes, aos meus sogros Adelmir e Joracy Santin, pelo incentivo, apoio e carinho.

Agradeço, em especial, ao Professor Doutor Carlos Roberto Appoloni pela amizade, companheirismo e excelente orientação, que foi indispensável para a realização deste trabalho.

Aos professores Avacir Casanova Andrello, Celso Peres Fernandes, José Martins de Oliveira Júnior, Marcos de Castro Falleiros, Otavio Portezan Filho e Paulo Sérgio Parreira pela participação em minhas bancas de defesa e/ou qualificação.

Aos amigos Ademar O. Ferreira e Rodrigo O. Bastos que, além da grande amizade, terem fornecido a maioria das amostras que foram analisadas neste trabalho.

Aos amigos e colegas de linha de pesquisa Anderson C. Moreira e Leonardo C. Marques, pelo companheirismo e ajuda em grande parte das medidas realizadas neste trabalho.

Aos amigos Elias Antunes dos Santos e Walmir Eno Pöttker, pela amizade, companheirismo e incentivo para que eu realizasse e concluísse o Mestrado, o que acabou me impulsionando ao Doutorado.

Aos amigos Fábio Lopes e Paulo Sérgio Parreira, técnico e professor, do Laboratório de Física Nuclear Aplicada, pelo companheirismo, amizade e ajuda na realização das pesquisas.

Aos amigos, António (Tonhão), Luiz Diego, Diogo, Eduardo, Iara, Isaias, Marcelo, Patrocínio, Renato, Ricardo, Rodrigo Nagata, Tiago, Viviane, Wisley, e outros tantos do Grupo de Física Nuclear Aplicada e do Departamento de Física da UEL, pelo convívio e amizade.

Aos professores e funcionários do Departamento de Física pela hospitalidade, amizade e conhecimento transmitido.

Ao CENPES/PETROBRAS por fornecer parte da infra-estrutura necessária ao desenvolvimento desta pesquisa, em especial a Ailton Souza, Guilherme Moreira, Marcos Klotz de Souza e Rose Lima.

Às seguintes instituições, pela formação, oportunidade de realização do curso, infra-estrutura e facilidades oferecidas na execução deste trabalho: Departamento de Física/UEL, LMPT/UFSC, Fundação Araucária e CAPES.

FERNANDES, Jaquiel Salvi. **Caracterização microestrutural do espaço poroso de rochas reservatório da bacia do rio Tibagi por microtomografia de raios X**. 2009. 208 p. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

RESUMO

A microtomografia computadorizada de raios X (μ -CT) é uma metodologia de análise não destrutiva que permite a visualização da estrutura interna dos materiais. Suas principais aplicações na indústria do petróleo são voltadas para a caracterização de rochas reservatório e visualização tridimensional de sua estrutura porosa. Neste contexto, este trabalho apresenta os princípios da metodologia microtomográfica e o procedimento para a análise de imagens, no que diz respeito a porosidade, distribuição de tamanho de poros e reconstrução de imagens tridimensionais (3-D), através de softwares específicos. Para tal, utilizamos um microtomógrafo da Skyscan, modelo 1172, com resolução espacial máxima de 1 μ m, o primeiro instalado no Brasil. Dentre as imagens analisadas foram identificados os principais artefatos encontrados em reconstruções bidimensionais (2-D) de imagens microtomográficas, tais como: "beam hardening", "ring artifact", efeito de volume parcial e artefatos estrela. Foram determinadas as propriedades microestruturais de sete amostras de arenitos e siltitos paranaenses de várias formações geológicas de afloramentos da bacia do rio Tibagi. Também foi analisada uma amostra de arenito da formação Tumblagooda, proveniente de um afloramento no "Kalbari National Park" na Austrália e mais duas amostras para avaliação da acurácia da metodologia, uma com esferas de vidro e outra com linhas de nylon. A porosidade média total das rochas analisadas variou entre 4,2 % para a amostra 108 da formação Rio do Rastro e 15,3 % para a amostra Tumblagooda da formação Tumblagooda. Por fim, foi feita uma comparação entre os volumes 3-D reconstruídos das amostras e os modelos 3-D criados a partir de informações colhidas através da análise das seções 2-D das amostras.

Palavras-chave: Arenitos. Caracterização microestrutural. Distribuição de tamanho de poros. Imagens 3-D. Microtomografia de raios X. Porosidade. Siltitos.

FERNANDES, Jaquiel Salvi. **Microstructural characterization of the porous space of the reservoir rocks at the Tibagi river basin by X-ray microtomography**. 2009. 208 p. Thesis (Doctorate in Physics) – State University of Londrina, Londrina.

ABSTRACT

X-ray computerized microtomography (μ -CT) is a non-destructive methodology of analysis that allows the visualization of the internal structures of materials. Its main applications in oil industry are related to the characterization of reservoir rocks and the tridimensional visualization of its porous structure. In this context, this work presents the principles of the microtomographic methodology and the procedure for the analysis of images concerning porosity, pore size distribution and reconstruction of tridimensional images (3-D), by using specific softwares. A Skyscan microtomograph, model 1172, with maximum spacial resolution of 1 μ m, the first one installed in Brazil, was used. Among the analyzed images, this study identified the main artifacts found in bidimensional reconstructions (2-D) of microtomographic images such as beam hardening, ring artifact, partial volume effect and star artifact. The microstructural properties of seven samples of sandstone and siltstone from several outcrop geological formations at Tibagi River basin in the state of Paraná were determined. Also, a sandstone sample of Tumblagooda formation from an outcrop in Kalbari National Park, Australia, was analyzed, in addition to two other samples for methodology evaluation – one with glass spheres and the other with nylon threads. The total average porosity of the analyzed rocks ranged from 4.2 % for 108 sample of Rio do Rastro formation and 15.3 % for Tumblagooda sample of Tumblagooda formation. Lastly, a comparison was made between the 3-D reconstructed volumes of the samples and 3-D models created from the information collected by means of the analyses of 2-D sections of the samples.

Palavras-chave: Sandstones. Microstructural characterization. Pore size distribution. 3-D images. X-ray microtomography. Porosity. Porosity. Siltstones.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –Esquema da produção de raios X por desaceleração de elétrons em um tubo com alta tensão [15].	31
Figura 2 –Espectro típico de um tubo de raios X com alvo de Tungstênio em função da tensão aplicada [18].	32
Figura 3 –Espectro de energia do feixe proveniente do tubo de raios X após atravessar uma amostra composta por alumínio, água e arenito Berea [18].	32
Figura 4 –Representação esquemática do efeito fotoelétrico.....	34
Figura 5 –Representação esquemática do espalhamento Compton.	35
Figura 6 –Representação esquemática do espalhamento Rayleigh.....	36
Figura 7 –Representação esquemática do Espalhamento Thomson	37
Figura 8 –Método de transmissão dos raios X para: (a) um objeto com distribuição homogênea do coeficiente de atenuação, utilizando radiação monocromática; (b) um objeto com distribuição não homogênea, utilizando radiação monocromática; (c) um objeto com distribuição não homogênea, utilizando radiação policromática [25].....	38
Figura 9 –Representação esquemática do sistema de aquisição da Câmera CCD.....	44
Figura 10 –Projeções paralelas dadas pelo arranjo de raios paralelos para diferentes ângulos.....	45
Figura 11 –Arranjo tomográfico com detectores alinhados na forma de um semicírculo.	47
Figura 12 –Arranjo tomográfico com mesmo ângulo entre as linhas de radiação incidente com espaçamentos diferentes de chegada nos detectores.....	47
Figura 13 –Ilustração para auxílio na transformação das coordenadas cartesianas em polares.....	48
Figura 14 –Parâmetros usados no algoritmo de reconstrução de imagem.	49
Figura 15 –(A) Imagem bidimensional formada por elementos de área e (B) Imagem tridimensional caracterizada por elementos de volume [17].....	51
Figura 16 –Representação matricial de uma imagem.	51
Figura 17 –Representação de uma imagem em tons de cinza.....	52

Figura 18 –Imagem da amostra de siltito (PG6) da formação Rio do Sul em escala de cinza.	53
Figura 19 –Histograma de cinza da imagem da Figura 18.	55
Figura 20 –Máscara para um filtro 3x3 com coeficientes genéricos. Os níveis de cinza c_1, \dots, c_9 , estão posicionados seguindo a mesma ordem dos coeficientes [40].	56
Figura 21 –Janela de níveis de cinza utilizada para binarização da imagem em escala de cinza.	57
Figura 22 –Representação da resolução espacial para a borda de uma circunferência.	59
Figura 23 –Granito escaneado a energia de raios X de (A) 100 keV e (B) 200 keV [11].	61
Figura 24 –Imagem do arenito PG8 sem a correção de "beam hardening"	63
Figura 25 –Granito escaneado à energia de raios X de (A) 100 keV; (B) 200 keV [11].	64
Figura 26 –Correção dos "ring artifacts" de uma imagem microtomográfica pelo software de reconstrução.	65
Figura 27 –Exemplo de cinco resoluções para a mesma imagem.....	66
Figura 28 –Arenito proveniente do Cânion Guartelá no Paraná escaneado com uma resolução de 5 μm com sinais de artefatos.	67
Figura 29 –Porosidade intragranular gerada a partir da dissolução parcial de um plagioclásio (seta A); Porosidade intergranular (seta B) [49].	68
Figura 30 –Microtomografia ilustrando poro móldico bem delimitado devido à presença de material residual (seta).....	69
Figura 31 –Representação esquemática de uma área-fonte de ambiente de sedimentação marinha [51].....	74
Figura 32 –Abundância relativa das rochas ígneas e sedimentares na crosta terrestre. (a) em volume; (b) em área e (c) frequência relativa dos tipos mais comuns de rochas sedimentares [51].	75
Figura 33 –Arenito avermelhado com granulação média e camadas estratificadas marcadas por micas [51].....	77
Figura 34 –Siltito amarelado com presença de nódulos [51].....	78
Figura 35 –Esquema básico de funcionamento de um microtomógrafo.....	79
Figura 36 –Microtomógrafo da SkyScan modelo 1172 (adaptado de [54]).	80

Figura 37 –Microtomógrafo da SkyScan modelo 1172, com detalhe do porta amostras.	80
Figura 38 –Curva característica da tensão versus corrente no tubo do Microtomógrafo da SkyScan modelo 1172 (adaptado de [55]).	81
Figura 39 –Esquema do sistema de soma de pixels da câmera CCD.	82
Figura 40 –Tela de comando da tensão no tubo de raios X.	83
Figura 41 –Tela do software de aquisição do SkyScan1172.	84
Figura 42 –Mapa da localização da Bacia do Rio Tibagi [57].....	88
Figura 43 –Mapa geológico da Bacia do Rio Tibagi (adaptado de [58]).....	89
Figura 44 –Arenito da Formação Botucatu (amostra 107).	91
Figura 45 –Arenito da Formação Rio do Rastro (amostra 108).....	92
Figura 46 –Arenito da Formação Teresina (amostra 403).	93
Figura 47 –Arenito da Formação Rio Bonito (amostra MC16).	94
Figura 48 –Arenito da Formação Rio do Sul (amostra PG6).....	95
Figura 49 –Arenito da Formação Furnas (amostra PG8).	96
Figura 50 –Arenito da Formação Furnas (amostra PG19).	96
Figura 51 –Arenito da Formação Tumblagooda sobre o porta amostras do microtomógrafo.	97
Figura 52 –Tubo de vidro contendo esferas de vidro com 600 μm de diâmetro.	98
Figura 53 –Seção 2–D das esferas de vidro com diâmetro de 600 μm	98
Figura 54 –Tubo de vidro contendo linhas de nylon com $355 \pm 8 \mu\text{m}$ de diâmetro.	99
Figura 55 –Seção 2–D das linhas de nylon com diâmetro de $355 \pm 8 \mu\text{m}$	99
Figura 56 –Tela do software SkyScan1172.	100
Figura 57 –Tela do software NRecon.	102
Figura 58 –Tela do software CTan.	104
Figura 59 –Distribuição de tamanho de poros para as esferas de vidro com o software Imago.	105
Figura 60 –Tela de visualização com o software CTvol; (a) arenito silicificado da formação Botucatu; (b) a mesma imagem porém agora "entrando" na amostra.	106
Figura 61 –Visualização da tela de apresentação do software Imago com uma seção 2–D da amostra de um arenito da formação Tumblagooda.....	107
Figura 62 –Projeções da amostra PG8 com angulações de 0° , 90° e 180°	109
Figura 63 –Tela do software NRecon com as projeções da amostra PG8 carregadas.	111

Figura 64 – Tela do software NRecon com uma seção 2-D da amostra PG8 da Formação Furnas.	112
Figura 65 – Processo de binarização para as imagens das esferas de vidro. (a) seção 144 com aplicação do filtro mediano; (b) ROI da mesma seção binarizado, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.	116
Figura 66 – Processo de binarização para as imagens das linhas de nylon. (a) seção 300 com aplicação do filtro mediano; (b) ROI da mesma seção binarizado, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.	116
Figura 67 – Seção 301 binarizada da amostra de linhas de nylon; (a) imagem binarizada após a utilização do filtro mediano; (b) a mesma imagem após a utilização do filtro passa baixa e processo de erosão.	117
Figura 68 – Perfil de porosidade da amostra de esferas de vidro.	120
Figura 69 – Perfil de porosidade da amostra de linhas de nylon.	121
Figura 70 – Imagem das Esferas de vidro binarizada com inversão de fase, onde o preto representa os poros e o branco o sólido.....	121
Figura 71 – Imagem das linhas de nylon binarizada com inversão de fase, onde o preto representa os poros e o branco o sólido.....	122
Figura 72 – Distribuição de tamanho de fase média para a amostra de esferas de vidro com diâmetro nominal de 600 μm	123
Figura 73 – Distribuição de tamanho de fase média para a amostra de linhas de nylon com diâmetro de $355 \pm 8 \mu\text{m}$	124
Figura 74 – Imagem 3-D reconstruída das esferas de vidro ($4,6 \times 1,0 \times 0,7 \text{ mm}^3$).....	124
Figura 75 – Imagem 3-D reconstruída das linhas de nylon e tubo de vidro ($4,1 \times 3,3 \times 1,1 \text{ mm}^3$).	125
Figura 76 – Localização dos subvolumes criados para a determinação do VER em seção 2-D das amostras.....	126
Figura 77 – Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra 107 ($1 \times 1 \times 1$).....	126
Figura 78 – Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra 108 ($1 \times 1 \times 1$).....	127
Figura 79 – Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra 403 ($1 \times 1 \times 1$).....	127

Figura 80 –Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra MC16 (1 x 1 x 1).....	128
Figura 81 –Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra PG6 (1 x 1 x 1).....	128
Figura 82 –Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra PG8 (1 x 1 x 1).....	129
Figura 83 –Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra PG19 (1 x 1 x 1).....	129
Figura 84 –Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra Tumblagooda (1 x 1 x 1).....	130
Figura 85 –Imagem da amostra 403 com artefatos ocasionando uma falsa porosidade na amostra.	130
Figura 86 –Imagem da amostra PG19 com artefatos ocasionando uma falsa porosidade na amostra.	132
Figura 87 –Processo de binarização para as imagens da amostra 107; (a) seção 100 com aplicação do filtro passa baixa; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.	133
Figura 88 –Perfil de porosidade da amostra 107.....	134
Figura 89 –Distribuição de tamanho de poros média para a amostra 107.	136
Figura 90 –Imagem 3–D reconstruída da amostra 107 (1500 x 1001 x 300 μm^3), cinza escuro representa a fase porosa e o cinza claro a fase sólida.	136
Figura 91 –Imagem 3–D reconstruída da fase sólida da amostra 107.	138
Figura 92 –Processo de binarização para as imagens da amostra 108; (a) seção 110 reconstruída; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.....	139
Figura 93 –Perfil de porosidade da amostra 108.....	140
Figura 94 –Distribuição de tamanho de poros média para a amostra 108.	141
Figura 95 –Imagem 3–D reconstruída da amostra 108 (1500 x 1500 x 1500 μm^3), cinza representa a fase sólida e o amarelo a fase porosa.	142
Figura 96 –Processo de binarização para as imagens da amostra 403; (a) seção 850 reconstruída; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.....	143
Figura 97 –Seção 396 da amostra 403 com artefatos que aumentam a porosidade.....	144

Figura 98 –Perfil de porosidade da amostra 403.....	145
Figura 99 –Perfil de porosidade da amostra 403 para as seções 100 a 160 e 700 a 900.	146
Figura 100 –Distribuição de tamanho de poros média para a amostra 403 com resolução espacial de 3,9 μm	147
Figura 101 –Distribuição de tamanho de poros média para a amostra 403 com resolução espacial de 1,4 μm	147
Figura 102 –Seção 100 da amostra 403 com resolução espacial de 1,4 μm	148
Figura 103 –Imagem 3–D reconstruída da amostra 403 (1501 x 1501 x 800 μm^3), cinza representa a fase sólida e o amarelo a fase porosa.	150
Figura 104 –Processo de binarização para as imagens da amostra MC16; (a) seção 230 reconstruída; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.....	151
Figura 105 –Perfil de porosidade da amostra MC16.	152
Figura 106 –Distribuição de tamanho de poros média para a amostra MC16.	153
Figura 107 –Imagem 3–D reconstruída da amostra MC16 (1000 x 1000 x 1000 μm^3) cinza representa a fase sólida e o amarelo a fase porosa.	154
Figura 108 –Processo de binarização para as imagens da amostra PG6; (a) seção 100 reconstruída; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.....	155
Figura 109 –Perfil de porosidade da amostra PG6.	156
Figura 110 –Distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG6 com resolução espacial de 2,9 μm	157
Figura 111 –Distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG6 com resolução espacial de 1,2 μm	157
Figura 112 –Seção 17 da amostra PG6 com resolução espacial de 1,2 μm	158
Figura 113 –Imagem 3–D reconstruída da amostra PG6 (1201 x 1201 x 1201 μm^3) cinza representa a fase sólida e o amarelo a fase porosa.	160
Figura 114 –Processo de binarização para as imagens da amostra PG8; (a) seção 110 reconstruída; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.....	161
Figura 115 –Perfil de porosidade da amostra PG8.	161
Figura 116 –Distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG8.	162

Figura 117 –Imagem 3–D reconstruída da amostra PG8 (1503 x 1503 x 1503 μm^3) cinza representa a fase sólida e o amarelo a fase porosa.	163
Figura 118 –Processo de binarização para as imagens da amostra PG19; (a) seção 100 reconstruída; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.....	164
Figura 119 –Perfil de porosidade da amostra PG19.	165
Figura 120 –Distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG19 com resolução espacial de 5,0 μm	166
Figura 121 –Distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG19 com resolução espacial de 1,4 μm	167
Figura 122 –Seção 100 da amostra PG19 com resolução espacial de 1,4 μm	167
Figura 123 –Imagem 3–D reconstruída da amostra PG19 (1503 x 1503 x 1503 μm^3) cinza representa a fase sólida e o amarelo a fase porosa.	168
Figura 124 –Processo de binarização para as imagens da amostra Tumblagooda; (a) seção 500 reconstruída; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.....	170
Figura 125 –Perfil de porosidade da amostra Tumblagooda.	171
Figura 126 –Distribuição de tamanho de poros média para a amostra Tumblagooda.	172
Figura 127 –Imagem 3–D reconstruída da amostra Tumblagooda (1500 x 1500 x 1500 μm^3) cinza representa a fase sólida e o amarelo a fase porosa.	173
Figura 128 –Imagens para utilização nas operações aritméticas [41].	186
Figura 129 –Máscaras para filtros passa baixa 3x3 e 5x5.	188
Figura 130 –(A) Imagem original da amostra de arenito da formação Tumblagooda; (B) imagem com aplicação de um filtro passa baixa.	189
Figura 131 –Máscara 3x3 de um modelo usual de filtro passa alta.	190
Figura 132 –(A) Imagem original da amostra de arenito da formação Tumblagooda; (B) imagem com aplicação de um filtro passa alta.	190
Figura 133 –(A) Imagem original da amostra de arenito da formação Tumblagooda; (B) imagem com aplicação de um filtro mediana.	191
Figura 134 –Funcionamento do filtro da mediana.	191
Figura 135 –Forma que os elementos estruturantes assumem com o aumento do raio.	192

Figura 136 – Operação de erosão. (a) imagem original com pixels coloridos representando a fase porosa; (b) resultado da operação de erosão na imagem (a).....	193
Figura 137 – Aplicação da operação de erosão em uma imagem binarizada do arenito da formação Tumblagooda (branco é o poro e preto o sólido). (a) imagem original; (b) imagem com aplicação da operação de erosão. ...	194
Figura 138 – Operação de dilatação. (a) imagem oriunda da operação de erosão da Figura 136a; (b) resultado da operação de dilatação da imagem (a).	195
Figura 139 – Aplicação da operação de dilatação em uma imagem binarizada do arenito da formação Tumblagooda (branco é o poro e preto o sólido). (a) imagem oriunda da operação de erosão da Figura 137b; (b) imagem com aplicação da operação de dilatação.	195
Figura 140 – Operação de abertura. (a) imagem original; (b) resultado da operação de erosão da imagem (a); e (c) imagem final após a operação de abertura.....	196
Figura 141 – (a) imagem original; (b) operação de abertura da imagem (a); e (c) operação de fechamento da imagem (a).	197
Figura 142 – Curvas de autocorrelação da amostra 107.	199
Figura 143 – Modelo 3–D reconstruído da fase porosa da amostra 107 com fator de ampliação 2 (1168 x 1168 x 1168 μm^3).	199
Figura 144 – Curvas de autocorrelação da amostra 108.	200
Figura 145 – Modelo 3–D reconstruído da fase porosa da amostra 108 com fator de ampliação 2 (1168 x 1168 x 1168 μm^3).	200
Figura 146 – Curvas de autocorrelação da amostra 403.	201
Figura 147 – Modelo 3–D reconstruído da fase porosa da amostra 403 com fator de ampliação 2 (1580 x 1580 x 1580 μm^3).	202
Figura 148 – Curvas de autocorrelação da amostra MC16.	202
Figura 149 – Modelo 3–D reconstruído da fase porosa da amostra MC16 com fator de ampliação 2 (1020 x 1020 x 1020 μm^3).	203
Figura 150 – Curvas de autocorrelação da amostra PG6.	204
Figura 151 – Modelo 3–D reconstruído da fase porosa da amostra PG6 com fator de ampliação 2 (1168 x 1168 x 1168 μm^3).	204
Figura 152 – Curvas de autocorrelação da amostra PG8.	205
Figura 153 – Modelo 3–D reconstruído da fase porosa da amostra PG8 com fator de ampliação 2 (1993 x 1993 x 1993 μm^3).	205

Figura 154 –Curvas de autocorrelação da amostra PG19.....	206
Figura 155 –Modelo 3–D reconstruído da fase porosa da amostra PG19 com fator de ampliação 2 (1993 x 1993 x 1993 μm^3).....	207
Figura 156 –Curvas de autocorrelação da amostra PG19.....	208
Figura 157 –Modelo 3–D reconstruído da fase porosa da amostra Tumblagooda com fator de ampliação 2 (1168 x 1168 x 1168 μm^3).	208

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Classificação resumida das rochas sedimentares.....	75
Tabela 2 –Valor dos parâmetros utilizados nas aquisições dos dados microtomográficos para as amostras analisadas.....	84
Tabela 3 –Valores da resolução espacial e resolução de contraste para quatro materiais.	86
Tabela 4 –Composição da Bacia do Rio Tibagi.....	88
Tabela 5 –Características principais das amostras utilizadas.....	90
Tabela 6 –Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra de esferas de vidro.....	114
Tabela 7 –Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra de linhas de nylon.....	115
Tabela 8 –Valores da porosidade média encontrados para conjuntos de 100 seções da amostra de esferas de vidro.....	118
Tabela 9 –Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra da Formação Botucatu.....	131
Tabela 10 –Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra da Formação Rio do Rastro.	137
Tabela 11 –Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra da Formação Teresina.....	141
Tabela 12 –Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra MC16 da Formação Rio Bonito.	149
Tabela 13 –Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra da Formação Rio do Sul.	154
Tabela 14 –Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra da Formação Furnas.....	159
Tabela 15 –Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra PG19 da Formação Furnas.	163
Tabela 16 –Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra Tumblagooda.....	169
Tabela 17 –Valores da porosidade ϕ medido nas seções 2–D, na imagem 3–D e por porosimetria de mercúrio.....	174

Tabela 18 –Resumo das propriedades microestruturais das amostras analisadas.....	176
Tabela 19 –Resultado das operações aritméticas para as imagens da Figura 128.....	186

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	24
2 REVISÃO DA LITERATURA	27
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	30
3.1 TUBO DE RAIOS X	30
3.2 PROCESSOS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA	33
3.2.1 Efeito Fotoelétrico	33
3.2.2 Efeito Compton	34
3.2.3 Espalhamento Rayleigh	35
3.2.4 Espalhamento Thomson	36
3.3 COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO	37
3.3.1 Coeficiente de Atenuação Linear e de Massa.....	38
3.4 TOMÓGRAFOS E MICROTOMÓGRAFOS	39
3.4.1 Trajetória Histórica.....	40
3.4.2 Aquisição dos Dados	43
3.4.3 Algoritmo de Reconstrução	44
3.5 IMAGENS DIGITAIS	50
3.5.1 Imagens em níveis de Cinza	52
3.5.2 Histograma de uma Imagem.....	53
3.5.3 Processamento de Imagens	55
3.5.3.1 Segmentação de imagens (Binarização).....	56
3.5.4 Resolução Espacial	58
3.5.5 Resolução de Contraste	60
3.6 ARTEFATOS E EFEITOS NAS IMAGENS	62
3.6.1 Efeito de “Beam Hardening”	62
3.6.2 Efeito de “Ring Artifact”	64
3.6.3 Efeito de Volume Parcial.....	66
3.6.4 Outros Artefatos	66
3.7 PARÂMETROS MICROESTRUTURAIS	67
3.7.1 Porosidade (ϕ).....	67
3.7.2 Permeabilidade (k).....	70

3.7.3 Distribuição de Tamanho de Poros.....	72
3.8 ROCHAS RESERVATÓRIO	73
3.8.1 Arenitos	76
3.8.2 Siltitos.....	77
4 MATERIAIS E MÉTODOS	79
4.1 SISTEMA MICROTOMOGRÁFICO SKYSCAN 1172	79
4.1.1 Tubo de Raios X.....	80
4.1.2 Câmera CCD	81
4.1.3 Parâmetros de Aquisição	82
4.1.3.1 Tensão no tubo de raios X.....	82
4.1.3.2 Corrente no tubo de raios X.....	85
4.1.3.3 Passo angular	85
4.1.3.4 “Frames”	85
4.1.3.5 Resolução espacial.....	86
4.1.3.6 Resolução de contraste	86
4.1.3.7 Filtros físicos	87
4.2 AMOSTRAS	87
4.2.1 Arenito 107 (Formação Botucatu).....	90
4.2.2 Arenito 108 (Formação Rio do Rastro).....	91
4.2.3 Arenito 403 (Formação Teresina).....	92
4.2.4 Siltito MC16 (Formação Rio Bonito).....	93
4.2.5 Siltito PG6 (Formação Rio do Sul)	94
4.2.6 Arenito PG8 (Formação Furnas)	95
4.2.7 Arenito PG19 (Formação Furnas)	96
4.2.8 Arenito Tumblagooda.....	97
4.2.9 Amostras para Avaliação da Acurácia da Metodologia	97
4.3 SOFTWARES ESPECÍFICOS UTILIZADOS.....	100
4.3.1 Software SkyScan 1172.....	100
4.3.2 Software NRecon.....	101
4.3.3 Software CTan.....	103
4.3.4 Softwares de Visualização 3-D	105
4.3.5 Software Imago	106
4.4 IMAGENS MICROTOMOGRÁFICAS.....	108

4.4.1	Aquisição dos Dados	108
4.4.2	Reconstrução das Seções 2-D.....	109
4.4.2.1	Correção de Artefatos.....	110
4.4.3	Reconstrução das Imagens 3-D	112
4.4.4	Reconstrução dos Modelos 3-D.....	113
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	114
5.1	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DO MÉTODO	114
5.1.1	Binarização	115
5.1.2	Porosidade	117
5.1.3	Distribuição de Tamanho de Fase	120
5.1.4	Imagem 3-D.....	123
5.2	VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO (VER)	124
5.3	ARENITO 107 (FORMAÇÃO BOTUCATU)	131
5.3.1	Binarização	132
5.3.2	Porosidade	132
5.3.3	Distribuição de Tamanho de Poros.....	133
5.3.4	Permeabilidade	134
5.3.5	Imagem 3-D.....	135
5.4	Arenito 108 (Formação Rio do Rastro).....	137
5.4.1	Binarização	137
5.4.2	Porosidade	138
5.4.3	Distribuição de Tamanho de Poros.....	139
5.4.4	Permeabilidade	140
5.4.5	Imagem 3-D.....	140
5.5	ARENITO 403 (FORMAÇÃO TERESINA)	141
5.5.1	Binarização	142
5.5.2	Porosidade	142
5.5.3	Distribuição de Tamanho de Poros.....	145
5.5.4	Permeabilidade	148
5.5.5	Imagem 3-D.....	148
5.6	SILTITO MC16 (FORMAÇÃO RIO BONITO).....	149
5.6.1	Binarização	149
5.6.2	Porosidade	150

5.6.3 Distribuição de Tamanho de Poros.....	151
5.6.4 Permeabilidade	152
5.6.5 Imagem 3-D.....	152
5.7 SILTITO PG6 (FORMAÇÃO RIO DO SUL).....	153
5.7.1 Binarização	154
5.7.2 Porosidade	155
5.7.3 Distribuição de Tamanho de Poros.....	155
5.7.4 Permeabilidade	158
5.7.5 Imagem 3-D.....	158
5.8 ARENITO PG8 (FORMAÇÃO FURNAS)	159
5.8.1 Binarização	159
5.8.2 Porosidade	160
5.8.3 Distribuição de Tamanho de Poros.....	161
5.8.4 Permeabilidade	162
5.8.5 Imagem 3-D.....	162
5.9 ARENITO PG19 (FORMAÇÃO FURNAS)	163
5.9.1 Binarização	164
5.9.2 Porosidade	164
5.9.3 Distribuição de Tamanho de Poros.....	165
5.9.4 Permeabilidade	168
5.9.5 Imagem 3-D.....	168
5.10 ARENITO TUMBLAGOODA.....	169
5.10.1 Binarização	169
5.10.2 Porosidade	170
5.10.3 Distribuição de Tamanho de Poros.....	171
5.10.4 Permeabilidade	172
5.10.5 Imagem 3-D.....	172
5.11 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO	173
6 CONCLUSÕES.....	175
REFERÊNCIAS	179
APÊNDICES	185

APÊNDICE A – Processamento de Imagens.....	186
A.1 – Operações Aritméticas com Imagens	186
A.2 – Filtro Passa Baixa	188
A.3 – Filtro Passa Alta	189
A.4 – Filtro Mediano	190
APÊNDICE B – Noções de Morfologia Matemática	192
B.1 – Operação de Erosão	193
B.2 – Operação de Dilatação.....	194
B.3 – Operação de Abertura e Fechamento.....	195
APÊNDICE C – Modelos 3-D	198
C.1 – Arenito 107	198
C.2 – Arenito 108	200
C.3 – Arenito 403	201
C.4 – Siltito MC16	202
C.5 – Siltito PG6	203
C.6 – Arenito PG8.....	205
C.7 – Arenito PG19.....	206
C.8 – Arenito Tumblagooda.....	207

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Uma das grandes limitações na análise estrutural de materiais foi a impossibilidade de visualizar a sua estrutura interna sem a necessidade de destruí-los. Com o advento da criação dos tomógrafos computadorizados em 1972 essa limitação foi superada com a criação da imagem tridimensional (3-D) real da amostra, no entanto se fez necessário, com o passar do tempo, uma melhoria nestes equipamentos, no que diz respeito à resolução espacial, tempo de aquisição, entre outras. Após esta evolução, que foi relativamente rápida e nomeada de primeira, segunda, terceira e quarta geração de tomógrafos, surgiram os tomógrafos de alta resolução, com resoluções da ordem de centenas de micrometros (μm), o que propiciou uma investigação mais detalhada da microestrutura dos materiais.

Atualmente encontram-se disponíveis microtomógrafos, ditos de mesa, com resoluções da ordem de $1\ \mu\text{m}$ e nanotomógrafos com resoluções da ordem de centenas de nanômetros (nm).

A utilização destes equipamentos na análise de materiais, tais como rochas reservatório utilizadas neste trabalho, vem crescendo nos últimos anos, em particular pelas indústrias do petróleo e gás natural, que estão vendo na metodologia da microtomografia de raios X um grande futuro para suas análises.

O petróleo e o gás natural são misturas de hidrocarbonetos resultantes de processos físico-químicos, sofridos pela matéria orgânica que se depositou, juntamente com fragmentos de rochas, durante a formação de rochas sedimentares milhões de anos atrás. Devido a efeitos mecânicos, ocorre a migração do petróleo no subsolo, acumulando-se em rochas porosas e permeáveis denominadas rochas reservatório. Estas por sua vez, ficam envolvidas em outro tipo de rocha, as chamadas rochas selantes, que servem para selar (aprisionar) o petróleo neste reservatório, impedindo que ele se dissipe pelo solo.

Neste trabalho, através da metodologia de microtomografia de raios X e análise de imagens, são determinados alguns parâmetros microestruturais de arenitos e siltitos da Bacia do Rio Tibagi, retirados de afloramentos no estado do Paraná, que são ou podem vir a ser rochas reservatório de algum tipo de fluido. Esta metodologia fornece imagens bi e tridimensionais, das quais é possível obter diversas características, tais como, porosidade, permeabilidade, distribuição de tamanho de poros e criar um volume 3-D da amostra, possibilitando a visualização da real estrutura da rede porosa presente no volume escaneado. Através desta metodologia é possível estudar regiões volumétricas de materiais porosos sem danificá-los, portanto, também tem a característica de não ser destrutiva.

As aquisições microtomográficas encontradas no presente trabalho foram realizadas no primeiro microtomógrafo instalado no Brasil, Skyscan modelo 1172, adquirido pelo Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES/PETROBRAS), Rio de Janeiro-RJ, no ano de 2006, após o coordenador do Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Estadual de Londrina e um membro do CENPES/PETROBRAS irem aos Estados Unidos, em 2004, testar e avaliar vários equipamentos e decidirem por este, o mais adequado na época. Desde então, através de projetos envolvendo o Laboratório de Física Nuclear Aplicada, o Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas da Universidade Federal de Santa Catarina e o CENPES, foram realizadas dezenas de viagens ao CENPES para otimização do equipamento, medidas de rochas do estado do Paraná (arenitos e siltitos), medidas de rochas reservatório de poços de petróleo da Petrobras (arenitos) e mais recentemente, rochas reservatório (carbonatos) de poços de petróleo do pré-sal na Bacia de Santos.

A Petrobras, através do seu centro de pesquisas, vem desenvolvendo esforços nesta área, visando aplicar a metodologia microtomográfica nos estudos de seus reservatórios. Neste contexto se insere esse trabalho, que tem como objetivo paralelo a implantação da microtomografia computadorizada de raios X aplicada à indústria do petróleo.

Além disso, outros objetivos desta tese foram verificar a aplicabilidade deste microtomógrafo, bem como otimizá-lo para medidas de rochas, tais como arenitos, siltitos, carbonatos, entre outras. Também foram determinadas as propriedades microestruturais destas rochas, tais como, porosidade, distribuição de tamanho de poros e permeabilidade, a partir de imagens microtomográficas.

A metodologia da microtomografia de raios X é um método de inspeção que permite a obtenção de dados da microestrutura interna de materiais, na forma de imagens, a partir da irradiação externa das amostras [1]. Necessita da utilização de softwares adequados de tratamento e análise de imagens, que possibilitam a determinação de parâmetros importantes para o melhor conhecimento do material analisado.

Todos os parâmetros geométricos de interesse da estrutura de um material poroso podem ser obtidos com metodologias de análise digital das imagens microtomográficas, que envolvem pré-processamento, por exemplo, operações de morfologia matemática. Estas metodologias foram aplicadas ao conjunto completo de imagens de seções transversais obtidas para cada amostra, de onde foram calculadas, a porosidade total média, o perfil de porosidade, a permeabilidade e a distribuição de tamanho de poros de cada amostra.

Por fim, também foi aplicado um método de modelamento 3-D da estrutura porosa original, o qual é capaz de fazer isto com base nos parâmetros geométricos da estrutura

bidimensional (2-D) original, através do software Imago. Uma comparação entre as imagens 3-D reais e os modelos reconstruídos foi feita, no sentido de avaliar a eficácia do método de modelamento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A microtomografia computadorizada de raios X é derivada da tomografia computadorizada de raios X e segundo CORMARK [2] e FLANNERY, et al. [3] é uma metodologia não destrutiva que mede as variações de densidade do material. A metodologia utiliza a obtenção de uma série de imagens bidimensionais através da passagem de um feixe de raios X através de um objeto, para em seguida, com a utilização de um algoritmo matemático, reconstruir bi e tridimensionalmente a estrutura interna do mesmo.

Dentre os muitos artigos pesquisados na literatura, abaixo serão apresentados os considerados mais relevantes no contexto deste trabalho:

HOUNSFIELD [4] tornou possível a obtenção de imagens da estrutura interna de objetos porosos ou não, com a implementação do processo de tomografia computadorizada usando um arranjo de fonte de raios X e detector móveis, com o qual obtinha imagens das seções transversais do objeto sob análise, a partir de uma série de projeções unidimensionais de atenuação à vários ângulos. A seção transversal composta de pixels, representando vários coeficientes de atenuação, era obtida em um sistema computacional, onde as projeções unidimensionais eram processadas matematicamente por algoritmos de reconstrução. A imagem tridimensional era então gerada pelo empilhamento das seções bidimensionais inicialmente obtidas. O tomógrafo era do tipo translação-rotação, com um feixe bem colimado que define a resolução espacial do sistema (tamanho do voxel), sendo hoje conhecido como scanner de primeira geração.

APPOLONI, et. al. [5] fizeram uma revisão sobre microescaneamento e microtomografia utilizando tubos de raios X. Neste trabalho foram apresentados problemas encontrados na tomografia, bem como noções do processo de reconstrução de imagens. São discutidos os processos de obtenção de feixes de raios X monoenergéticos e sua vantagem em relação ao uso de um espectro contínuo. Mostram-se arranjos experimentais para microtomografia e características do sistema de aquisição de dados. São apresentados dados experimentais obtidos com um microtomógrafo, de onde se conclui que uma microtomografia de raios X é a imagem de uma amostra com dimensões típicas de milímetros, com uma resolução geométrica de poucas dezenas de micrometros ou menos. E ainda que um feixe monoenergético de raios X é muito útil por não apresentar artefatos de endurecimento de feixe, que provocam distorções nas imagens microtomográficas da amostra analisada.

Em outros trabalhos APPOLONI, et al. [6,7] utilizaram um scanner de microtomografia computadorizada de raios X, microfoco, para caracterizar o espaço poroso

de uma rocha reservatório (arenito). Neste trabalho, são evidenciados os conceitos relacionados à metodologia empregada. Foi utilizado um microtomógrafo Skyscan 1072, com anodo de tungstênio e operado a 60 kV e 165 μ A. A resolução espacial do equipamento variou de 2 a 5 μ m, dependendo da dimensão e composição da amostra. Passos angulares de 0,45° varrendo a amostra de 0 a 180° foram utilizados na aquisição. A metodologia mostrou-se de alta confiabilidade para tal estudo, fornecendo os perfis de porosidade ao longo da amostra, assim como a porosidade global média e a distribuição de tamanho de poros média.

Segundo COLES, et al. [8], com o desenvolvimento de equipamentos de microtomografia computadorizada de alta resolução, usando emissores de raios X do tipo *synchrotron*, possibilitou-se a obtenção de imagens tridimensionais de amostras com resoluções da ordem de micrometros. Esta metodologia é extremamente útil na caracterização de materiais de engenharia. Podendo-se, por exemplo, caracterizar a estrutura e avaliar as regiões onde se encontram os fluidos residuais em um processo de drenagem. Os autores também lembram que um tomógrafo usado na medicina obtém imagens com resoluções não melhores que 0,25 a 1,5 mm³, estas resoluções são insuficientes para caracterização de materiais. Comentam ainda que com a microtomografia tem-se conseguido coeficientes de atenuação dentro do material da ordem de 1 % e resoluções espaciais de aproximadamente 1 μ m. Neste artigo COLES et al. tiveram como objetivo caracterizar o material e identificar as regiões com os diferentes fluidos. Os mesmos obtiveram uma porosidade média de 34,5 % e distinguiram claramente a presença de água e óleo nas amostras.

MILLER, et. al. [9], com o auxílio da microtomografia de raios X de alta resolução, obtiveram imagens da estrutura porosa de resíduos de filtração. O sistema para obtenção das seções transversais é um avanço, pelo fato de utilizar um feixe de raios X cônico, que reduz muito o tempo de aquisição de dados. Neste tipo de tomógrafo, o detector é plano e a amostra, dentro do cone formado pelo feixe de raios X, gira em torno do próprio eixo a cada projeção obtida. É feita uma revisão da teoria de filtração e se discute como é possível analisar a imagem tridimensional da estrutura porosa, obtida após processamento computacional, a fim de obter as propriedades macroscópicas do meio poroso a partir das características microscópicas deste.

FARBER, et al. [10] utilizaram a microtomografia de raios X para avaliar a microestrutura de grânulos farmacêuticos. Os parâmetros estudados foram a porosidade total, a distribuição de tamanho de poros e a estrutura geométrica dos poros nos grânulos. Os resultados da porosidade e distribuição de tamanho de poros da microtomografia foram comparados com os da porosimetria de mercúrio. O microtomógrafo utilizado foi um Skyscan

1072 com resolução melhor que 4 μm . As aquisições foram realizadas de 0 a 180°, com passos angulares de 0,9° a uma potência de 4 W. O tempo de aquisição foi de 1 hora, com a utilização de filtro médio e correção geométrica. A resolução espacial utilizada foi de 11 e 3,42 μm para as amostras LS e HS, respectivamente. Para este caso, os autores concluíram que a microtomografia possui precisão inferior à porosimetria para a porosidade total, uma vez que a amostra possuía poros menores que a resolução empregada, porém, é capaz de fornecer informações morfológicas que não podem ser medidas com aquela. Além disso, ela fornece medida mais precisa da distribuição de tamanho de poros.

KETCHAM, et al. [11] descreveram os possíveis artefatos que podem ser encontrados em imagens microtomográficas, citando suas causas, efeitos e possíveis soluções. Analisaram amostras de arenito, eclogito, calcário, xisto, granito e saprolite. Para a otimização dos parâmetros envolvidos na aquisição utilizaram dois sistemas tomográficos: de alta resolução que possui spot focal duplo 0,8 e 1,8 mm, tensão 420 kV, potência de 800 W e 2000 W, respectivamente, fileira de 512 detectores (cintiladores de tungstado de cádmio de 0,25 x 0,5 x 0,5 mm); outro de ultra-alta resolução possui spot <10 μm ajustável, tensão 200 kV, potência de 8 W, câmera CCD de 512 x 512 pixels.

ROSENBERG, et al. [12] utilizaram um microtomógrafo com um microprobe de elétrons e alvo de nióbio, que proporcionou uma energia de 17 keV, fornecendo uma resolução espacial de 10 μm para a verificação da estrutura porosa e a distribuição 3-D das partículas em rochas reservatório (arenito da formação Fontainebleau e Brent). Também estudaram, através de um modelo, a molhabilidade de rochas e a baixa permeabilidade destas. Verificaram, através das imagens 3-D, a falta de conexão entre os poros, impossibilitando o fluxo de fluidos no interior da amostra. Concluíram que a microtomografia é um método muito eficaz para analisar a microestrutura de rochas reservatório.

ROLLAND DU ROSCOAT, et al. [13] determinaram, através da microtomografia de raios X síncrotron, a porosidade e a área da superfície específica para quatro tipos de papéis. Também analisaram a variação destas propriedades com a orientação do papel. Por fim, determinaram o volume elementar representativo das amostras analisadas. A resolução espacial utilizada foi de 0,7 μm , para um volume imageado de 1400 x 1400 x e μm^3 (e é a espessura do papel).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 TUBO DE RAIOS X

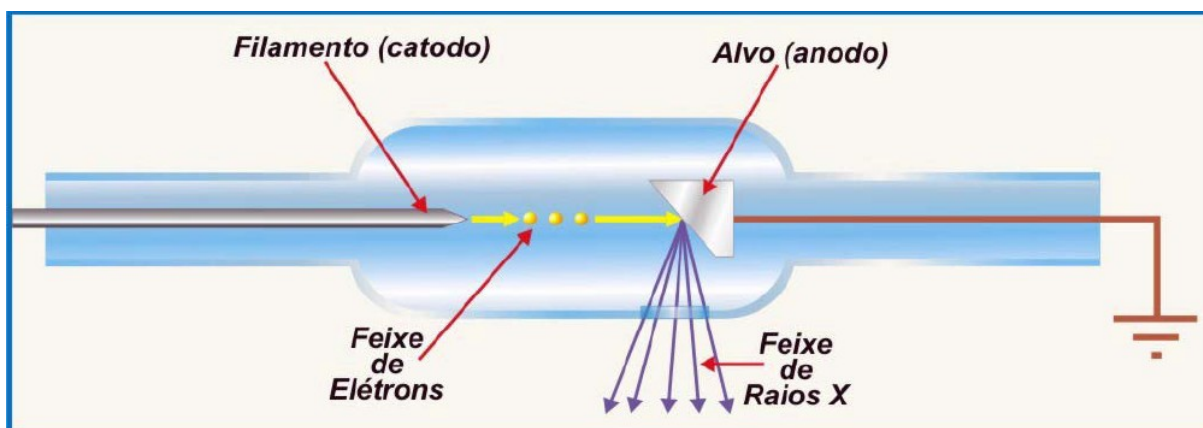
Em 1895 Wilhelm C. Roentgen trabalhando com tubos de raios catódicos submetidos a uma alta voltagem, verificou que os raios produzidos no interior destes, causavam a emissão de uma luz azulada em sua extremidade. Notou também que cristais de cianeto de bário e platina colocados próximos ao tubo apresentavam uma fluorescência toda vez que o tubo estava com alta tensão aplicada. Verificou que mesmo colocando materiais densos entre os cristais e o tubo esta fluorescência não cessava. Sendo assim, concluiu que não poderiam ser os raios catódicos os responsáveis por esse fenômeno, pois estes, não têm capacidade de atravessar mais que alguns centímetros de ar. Como não sabia qual era a natureza deste tipo de radiação capaz de sair fora do tubo e trespassar objetos densos, deu-lhe o nome de raios X. Vendo a importância de sua descoberta quase acidental, Roentgen aprofundou suas pesquisas e descobriu que os raios X eram capazes de impressionar chapas fotográficas, e que estes viajam em linha reta, e não estão sujeitos a influência de campos eletromagnéticos, são mais atenuados por materiais mais densos e podem revelar detalhes internos de objetos opacos à luz visível.

Hoje, sabe-se que a tensão aplicada ao tubo é que gerou os raios X, devido à aceleração dos elétrons ejetados do gás ionizado dentro deste. Estes elétrons acelerados colidiam com as paredes do tubo, sofrendo uma desaceleração abrupta, emitindo a radiação. Mais tarde, Coolidge [8,14] criou o modelo de tubo de raios X usado até os dias de hoje, no qual os elétrons são gerados em um filamento aquecido por uma corrente elétrica.

O tubo, mostrado esquematicamente na Figura 1, consiste de um invólucro de vidro de alto vácuo, contendo no seu interior o catodo e o anodo. O catodo, eletrodo negativo, é formado basicamente por um arame (filamento) de tungstênio enrolado em forma de uma mola e montado em uma célula projetada de modo a dirigir a corrente de elétrons em direção do anodo. O comprimento, diâmetro e posição do filamento são fatores que afetam o modo como o anodo é atingido pela corrente de elétrons. A quantidade de elétrons emitidos depende da temperatura do filamento: quanto maior a temperatura, mais elétrons são emitidos e, conseqüentemente, aumenta a corrente elétrica através do tubo. O anodo, eletrodo positivo, é usualmente feito de tungstênio, prata ou molibdênio. O tungstênio é geralmente escolhido

por ter alto ponto de fusão e alto número atômico, desse modo resiste ao calor, e é mais eficiente na produção de raios X do que materiais com menor número atômico [15].

Figura 1 –Esquema da produção de raios X por desaceleração de elétrons em um tubo com alta tensão [15].



O raio X é uma radiação formada na eletrosfera de um átomo. É proveniente do rearranjo de elétrons em transições decorrentes nos diferentes níveis orbitais ocasionadas por perturbações ou absorção de energia. Pode ser formada também pelo fenômeno de freamento (bremsstrahlung) em tubos de raios X ou em outras situações equivalentes. Os raios X são emissões eletromagnéticas de natureza semelhante à luz visível. Seu comprimento de onda vai de 0,05 ângström (5 pm) até centenas de ângströms (1 nm). A energia dos fótons de raios X é da ordem de eV (elétron-volt) e algumas centenas de keV. Sua interação com a matéria é feita através do efeito fotoelétrico, Compton e espalhamentos Rayleigh e Thomson [16], os quais serão melhor descritos na próxima seção.

O total freamento dos elétrons pode ocorrer em várias profundidades dentro do material alvo. Até chegar a este ponto, os elétrons podem sofrer outras interações. Este fato acaba por ocasionar a emissão de um feixe de raios X de diferentes energias. Outra forma de ocorrer esta policromia reside no fato de os raios X gerados pelo freamento (raios X primários) interagirem com o material alvo antes de emergirem desse e, dessa forma, darem origem a outros raios X (secundários) [17].

Para diminuir a extensão do espectro de energia discutido no parágrafo anterior, pode ser empregado o uso de filtros. O papel destes, é barrar os fótons de energia mais baixa fazendo com que a emissão fique o mais monocromática possível.

Na Figura 2 pode-se observar um espectro típico de um tubo de raios X com alvo de Tungstênio para diferentes potenciais aplicados (80 kV, 90 kV, 100 kV e 120 kV) [18]. Nota-se um alargamento na base dos espectros, este alargamento é devido á formação de um pico de menor energia ao lado da formação do pico de energia mais intensa. Na Figura 3 o feixe de raios X passa por uma amostra que absorve a faixa de menor energia.

Figura 2 –Espectro típico de um tubo de raios X com alvo de Tungstênio em função da tensão aplicada [18].

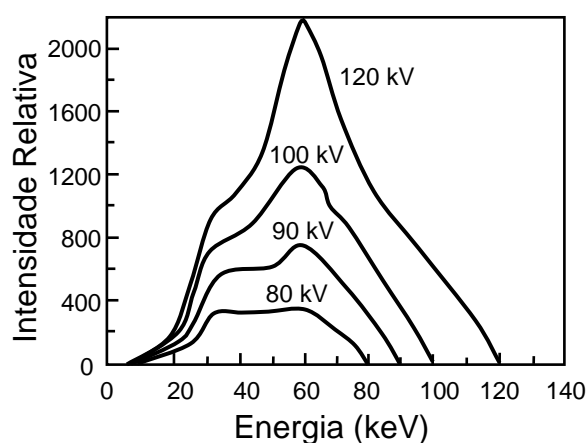
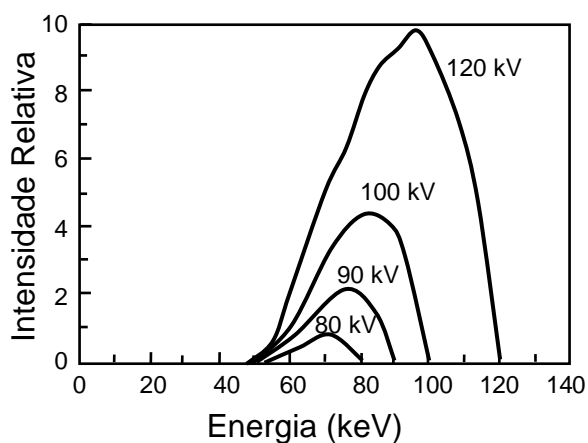


Figura 3 –Espectro de energia do feixe proveniente do tubo de raios X após atravessar uma amostra composta por alumínio, água e arenito Berea [18].



3.2 PROCESSOS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Quando raios X atravessam um objeto, interações ocorrem entre a energia e a matéria, e parte da energia é removida do feixe incidente. Essa remoção ocorre por absorção e por espalhamento, nos dois casos pelos átomos da matéria.

Um outro fator que influi na atenuação do feixe de radiação é a espessura da amostra. Cada tipo de amostra possui um valor, chamado “espessura ótima”, em que é otimizada a relação entre a transmissão e a absorção/espalhamento do feixe. O emprego de uma amostra com essa característica interfere na escolha dos tempos de medidas de modo a otimizá-los. O modo de calcular essa espessura é mostrado na equação (1) [19]:

$$d = a.E \quad (1)$$

onde d representa a "espessura ótima", a é uma constante (0,032 cm/keV) e E é a energia, em keV, da fonte empregada.

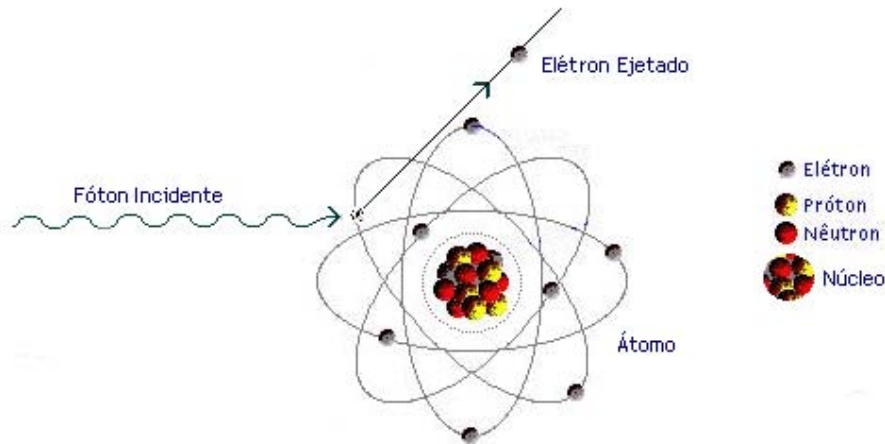
3.2.1 Efeito Fotoelétrico

O Efeito Fotoelétrico envolve a absorção de toda a energia de um fóton por um elétron atômico com a ejeção subsequente do elétron do átomo. A energia cinética do elétron ejetado é dada por:

$$T = h\nu - E_K \quad (2)$$

onde $h\nu$ é a energia do fóton incidente e E_K é a energia de ligação do elétron na camada K [20].

O efeito fotoelétrico ocorre, principalmente, com elétrons da camada K, que é a camada mais interna e que possui a maior energia de ligação. A ejeção do elétron dessa camada causa um rearranjo na eletrosfera, que ocasiona a emissão de raios X ou de elétrons Auger, produzido pelo efeito fotoelétrico interno do átomo [21]. A Figura 4 mostra um esquema do processo de ejeção de um elétron pelo efeito fotoelétrico.

Figura 4 – Representação esquemática do efeito fotoelétrico.

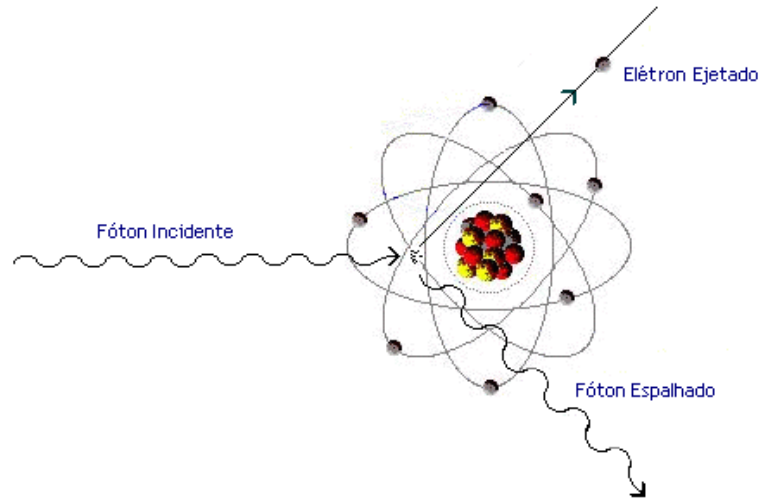
A equação (3) mostra a seção de choque fotoelétrica ($\text{cm}^2/\text{átomo}$) para a camada K, a qual é responsável por 80 % do efeito fotoelétrico [21].

$${}_a\tau_K = \varphi_0 Z^5 \alpha^4 2^{5/2} (mc^2/h\nu)^{7/2} \quad (3)$$

onde ${}_a\tau_K$ é a seção de choque da absorção fotoelétrica para a camada K; $\varphi_0 = 2,67\pi r_0^2$ onde $r_0 = e^2/mc^2$ é o raio clássico do elétron; α é a constante de estrutura fina ($\alpha = 1/137 = 2\pi e^2/hc$); mc^2 é a energia de repouso do elétron, e $h\nu$ é a energia do fóton incidente.

3.2.2 Efeito Compton

O fóton incidente sofre espalhamento inelástico na interação com elétrons pouco ligados (camada externa) ou livres. Na matéria, os elétrons estão ligados, entretanto, se a energia do fóton é alta em relação à energia de ligação, esta última energia pode ser ignorada e os elétrons podem ser considerados como essencialmente livres. Os elétrons são ejetados com uma certa energia cinética e o fóton é espalhado com energia menor que a incidente [20]. A Figura 5 mostra um esquema do espalhamento Compton em um átomo.

Figura 5 – Representação esquemática do espalhamento Compton.

As energias dos fótons incidente e espalhado são representadas como:

$$E = h\nu \quad (4)$$

$$E' = \frac{E}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad (5)$$

onde E é a energia do fóton incidente; E' é a energia do fóton espalhado, e $a = h\nu/m_0c^2$.

A equação (6) mostra a seção de choque total ($\text{cm}^2/\text{átomo}$) do espalhamento Compton, onde pode-se notar que a dependência do número atômico Z é linear [21].

$$\sigma_c = 2Z\pi r_0^2 \left\{ \frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left[\frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1+2\alpha) \right] + \frac{1}{2\alpha} \ln(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \right\} \quad (6)$$

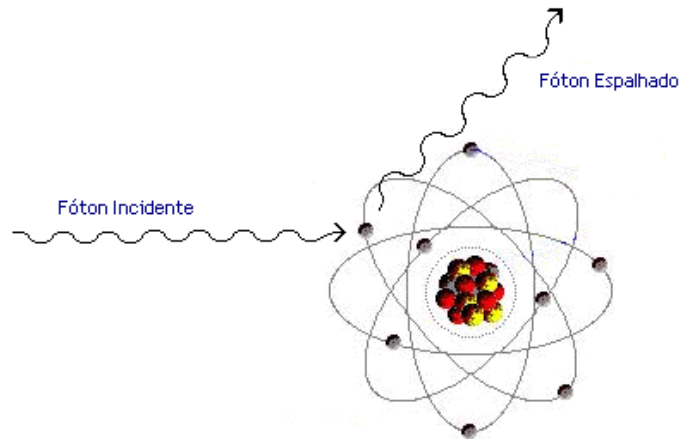
onde $a = h\nu/mc^2$, $h\nu$ é a energia do fóton incidente, m é a massa do elétron, $r_0 = e^2/mc^2$ e Z é o número atômico.

3.2.3 Espalhamento Rayleigh

O espalhamento elástico, também conhecido como coerente, é o processo em que o fóton incidente sofre apenas um desvio da sua trajetória inicial ao interagir com o

campo dos elétrons ligados. Neste processo, todos os elétrons no átomo participam de maneira coerente. Há apenas uma mudança no momento linear do fóton, mas sua energia inicial é conservada [20,22], uma representação pode ser vista na Figura 6.

Figura 6 – Representação esquemática do espalhamento Rayleigh



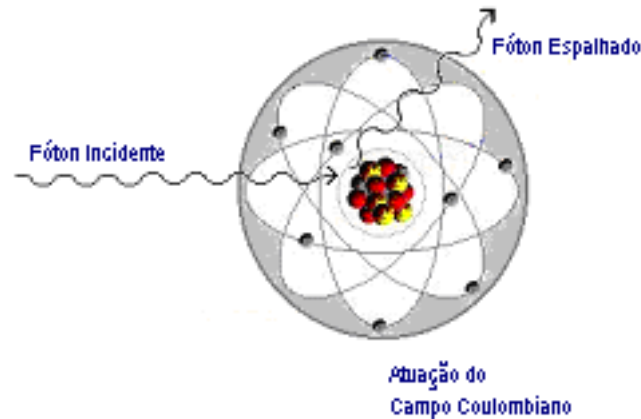
A equação (7) mostra a dependência da seção de choque ($\text{cm}^2/\text{átomo}$) com o número atômico [21].

$$d\sigma_R = r_0 |f_\theta|^2 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} d\Omega \quad (7)$$

onde f_θ é o fator de espalhamento atômico; $d\Omega$ é o ângulo sólido na direção de θ . Para comprimento de onda (λ) grande, $f_\theta \rightarrow Z$.

3.2.4 Espalhamento Thomson

O espalhamento Thomson ocorre quando um fóton interage elasticamente com o campo dos elétrons do material fazendo estes oscilarem. Esta oscilação irradia uma nova onda na mesma fase e frequência da onda da radiação incidente. A energia inicial do fóton é conservada com mudança no seu momento linear [23].

Figura 7 – Representação esquemática do Espalhamento Thomson

A seção de choque ($\text{cm}^2/\text{átomo}$) do espalhamento Thomson é dada pela equação (8) [21].

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_0^2 \quad (8)$$

onde: $r_0 = e^2/mc^2$.

3.3 COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO

Nas seções anteriores foram resumidas as formas de interação da radiação eletromagnética com a matéria, sendo que cada uma desempenha um papel importante em uma faixa de energia dos fótons incidentes. Cada processo possui uma seção de choque representando a probabilidade de absorção dos raios X de uma dada energia por um determinado material. Então, para que seja possível calcular qual é a probabilidade total para interação de um fóton com o alvo, é necessário fazer a soma de todas as seções de choque individuais já apresentadas, o que fica sendo:

$$\sigma = \tau_k + \sigma_R + \sigma_T + Z\sigma_C \quad (9)$$

onde τ_k , σ_R , σ_T e σ_C representam as seções de choque para o Efeito Fotoelétrico, Espalhamento Rayleigh, Espalhamento Thomson e Compton, respectivamente, e Z é o número atômico do

material alvo. Multiplicando todas as seções de choque pela densidade de átomos por m^3 , N , obtém-se a probabilidade por unidade de comprimento para uma interação [8]:

$$\mu = N(\tau_k + \sigma_R + \sigma_T + Z\sigma_C) \quad (10)$$

A probabilidade fornecida pela equação (10) é mais comumente conhecida como o coeficiente de absorção total e é o inverso do livre caminho médio de um fóton [20].

3.3.1 Coeficiente de Atenuação Linear e de Massa

Quando a radiação eletromagnética incide sobre um material de espessura x , parte da radiação é espalhada e parte é absorvida pelos processos já descritos. Uma fração da radiação atravessa o material sem interagir. A intensidade I do feixe emergente está associada á intensidade I_0 do feixe incidente pela Lei de Lambert-Beer [24]:

$$I = I_0 e^{-\mu'x} \quad (11)$$

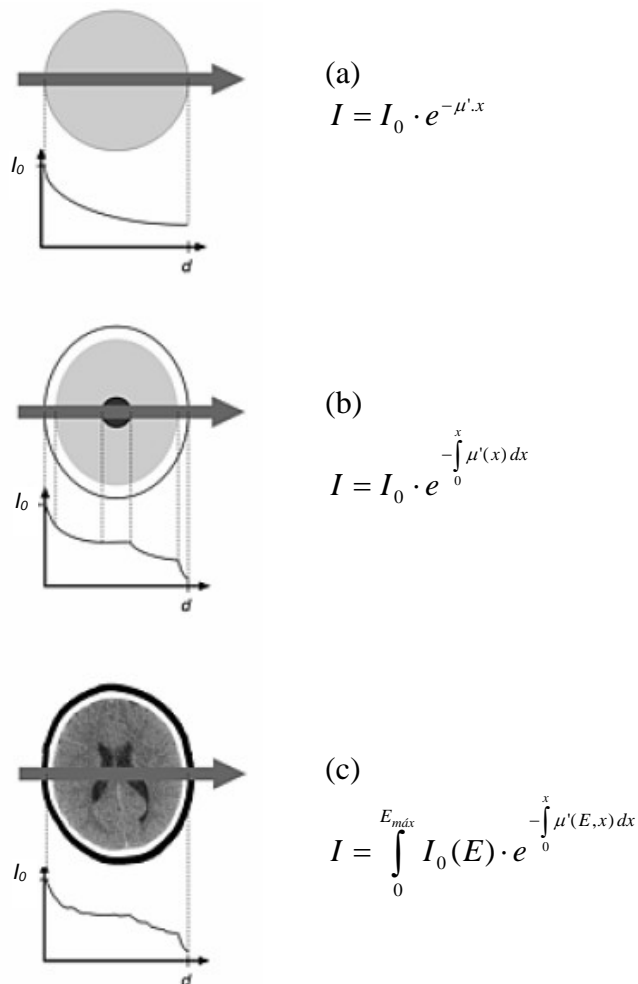
onde x representa a espessura do material usado como amostra (cm), μ' o coeficiente de atenuação linear (cm^{-1}), I_0 é a intensidade do feixe incidente na amostra e I é a intensidade do feixe emergente da amostra. As intensidades são dadas em contagens por unidade de tempo. O coeficiente de atenuação linear μ' , que aparece na equação (11), pode ser definido como:

$$\mu' = \mu\rho \quad (12)$$

onde μ' é o coeficiente de atenuação de massa (cm^2/g), e ρ é a densidade volumétrica da amostra (g/cm^3).

À direita da Figura 8 estão as equações que descrevem a atenuação dos raios X em diferentes tipos de situações [25].

Figura 8 – Método de transmissão dos raios X para: (a) um objeto com distribuição homogênea do coeficiente de atenuação, utilizando radiação monocromática; (b) um objeto com distribuição não homogênea, utilizando radiação monocromática; (c) um objeto com distribuição não homogênea, utilizando radiação policromática [25].



3.4 TOMÓGRAFOS E MICROTOMÓGRAFOS

A tomografia computadorizada (TC), originalmente apelidada tomografia axial computadorizada (TAC), é um exame complementar de diagnóstico médico por imagem, não destrutivo, que consiste numa imagem que representa uma seção ou "fatia" do corpo. É obtida através do processamento de informações coletadas após expor o paciente a uma sucessão de raios X, a partir da translação de fonte e detector em torno do seu corpo [26].

A microtomografia computadorizada (μ -CT) é um método de inspeção que fornece imagens detalhadas da região interna de materiais através do mapeamento do coeficiente de atenuação linear da amostra em análise. Esta metodologia é uma versão

otimizada da TAC e é aplicada para amostras de pequenas dimensões e com alta resolução espacial ($\sim 1 \mu\text{m}$). Diferencia-se também pelo maior tempo de exposição das amostras, aumentando a dose, que neste caso é irrelevante, e das energias utilizadas na obtenção dos dados microtomográficos.

3.4.1 Trajetória Histórica

O tomógrafo computadorizado é um equipamento de tecnologia complexa e até hoje em constante evolução com o advento dos microtomógrafos e nanotomógrafos. Desde o início da prática da TC, tem sido dada ênfase ao aperfeiçoamento dos tomógrafos, buscando a melhoria de sua eficiência (obtenção das imagens) e eficácia (diagnóstico) nas investigações, de modo que a evolução da qualidade da prática da TC sempre esteve fortemente vinculada ao desenvolvimento tecnológico dos componentes dos tomógrafos, ou seja, do sistema elétrico-eletrônico e mecânico, dos tubos de raios X, dos computadores, dos programas de computadores e dos detectores [27]. Os grandes marcos da história da TC, na maioria das vezes, estiveram relacionados à redução do tempo de aquisição de dados.

A técnica de anulação da interferência das regiões adjacentes na imagem final divide historicamente essa evolução em duas fases, quais sejam: Tomografia convencional ou do plano focal e a Tomografia de Reconstrução, também chamada de tomografia computadorizada.

A tomografia convencional de raios X foi criada há mais de 50 anos e está há muito em desuso. Consiste em se mover a fonte e um filme fotográfico, posicionados opostamente em relação ao corpo, de maneira a se manter em foco (posição de projeção no filme constante) apenas o plano ou seção da qual se quer a imagem. Dessa maneira, as contribuições das outras seções são superpostas obtendo-se um caráter para a imagem final que supervaloriza a seção desejada sob um fundo mais ou menos homogêneo correspondente a essa superposição não coincidente das outras seções [28].

A tomografia computadorizada mudou a posição da fonte e detector em relação à seção de interesse que passou a ser coplanar. Com isso, eliminou-se o fundo ou interferência das outras seções na imagem, pois os raios detectados não passam mais através das regiões indesejadas.

A acumulação da atenuação de raios X deixa, então, de ser um ruído a ser eliminado para ser um dado somatório cujos fatores precisam ser obtidos. Isto aumentou muito a quantidade útil de informação obtida numa única detecção, diminuindo a necessidade

de potência e/ou a dose de radiação absorvida pelo corpo em estudo. Por outro lado, a detecção não podia ser feita simplesmente com um filme fotográfico, mas, ao contrário, deveria ser registrada sob a forma de sinais que pudessem ser quantificados e manipulados matematicamente de maneira a se desfazer sua somatória e, assim, reconstruir pontualmente a imagem.

Para se reconstruir a imagem de uma seção através de dados de acumulação de curvas (integrais de linhas e retas, neste caso) dessa seção, é necessário um número de curvas mínimo igual ao número de elementos da matriz de reconstrução e uma grande capacidade de armazenamento e de velocidade de processamento de dados.

A capacidade de armazenamento e rapidez de manipulação foram conseguidas com recursos da informática. O método de reconstrução partindo-se de integrais de linha surgiu na radioastronomia solar e na microscopia eletrônica de biomoléculas complexas na segunda metade da década de 50.

Vários métodos de reconstrução originais foram tentados na TC-X (Tomografia Computadorizada de Raios X), mas somente em 1972 (Tomógrafo da EMI Ltda.) construiu-se a primeira máquina de tomografia, na Inglaterra, pelo médico norte-americano Allan McLeod Cormack e pelo físico inglês Godfrey Newbold Hounsfield [4]. Uma grande parte da pesquisa foi suportada graças à contribuição da banda The Beatles, sendo considerado um dos seus maiores legados, a par com a sua música. A seguir, cada uma das gerações de tomógrafos é analisada e citam-se os detectores comumente utilizados em cada uma delas.

Primeira Geração de Tomógrafos: esta geração de tomógrafos tem uma aquisição de dados muito lenta, um único par fonte-detector (para cada seção) faz translações até varrer a amostra e depois rotaciona de um pequeno incremento. Este processo é repetido até que sejam produzidas informações suficientes. No equipamento de Hounsfield [29], para uma matriz típica de 160x180 mm, este processo demora em torno de cinco minutos (uma projeção). A colimação é alta e se mede linearmente: 2 x 13 mm (profundidade x espessura da seção). O feixe de raios X da primeira geração é chamado de "pencil beam" (feixe em forma de lápis).

Segunda geração de tomógrafos: a fonte deixa de ser altamente colimada (colimação angular de 3-10 graus) para produzir um feixe de raios X em leque de forma a sensibilizar ao mesmo tempo um número maior de detectores, que pode ser de 5 a 50 detectores. Assim, como os feixes que atingem os detectores não são paralelos, a translação divide o número de rotações necessárias por um número idêntico ao de detectores: na

realidade cada detector terá medido um perfil ao final de cada translação. A aquisição de dados dura cerca de 20 segundos.

Terceira geração de tomógrafos: visando, desta vez, eliminar o movimento de translação, alargou-se o feixe da fonte de maneira a cobrir toda a seção transversal. Foi necessário, então, o uso de centenas de detectores arranjados concentradamente, de forma a diminuir os vãos entre eles, aumentando-se o aproveitamento da potência da fonte (crítico no uso médico). Tempo médio de cada seção varia de 3 a 8 segundos.

Quarta geração de tomógrafos: é composto por uma circunferência de detectores, com a fonte de raios X colocada no seu interior. Assim, basta rotacionar a fonte ao redor do objeto para coletar os dados. A vantagem de empregar esse arranjo circular de detectores, em comparação com o arranjo da terceira geração de tomógrafos, é que, para cada posição da fonte, um conjunto diferente de detectores realizará a aquisição do feixe transmitido através do objeto. Desta forma, se um detector estiver em mau funcionamento ou não estiver funcionando sua contribuição não aparecerá na forma de um artefato nas imagens reconstruídas. Tempo médio para cada seção é de aproximadamente 1 segundo.

Quinta geração de tomógrafos: Neste sistema que foi proposto em 1985, não há mais partes móveis e a fonte de raios X foi substituída por quatro alvos em forma de anel ($\sim 210^\circ$), que são atingidos por um feixe de elétrons, colimado e posicionado por um campo eletromagnético, produzindo os raios X. O feixe colimado faz uma varredura e incide em um pequeno ponto de um anel de tungstênio. Os raios X são produzidos pela desaceleração do feixe no alvo de tungstênio e a atenuação dos raios X após atravessarem o paciente é registrada por um conjunto de detectores de estado sólido. Em relação aos sistemas convencionais, o Imatron, como é chamado, pode reduzir o tempo de exposição a 50 ms por fatia.

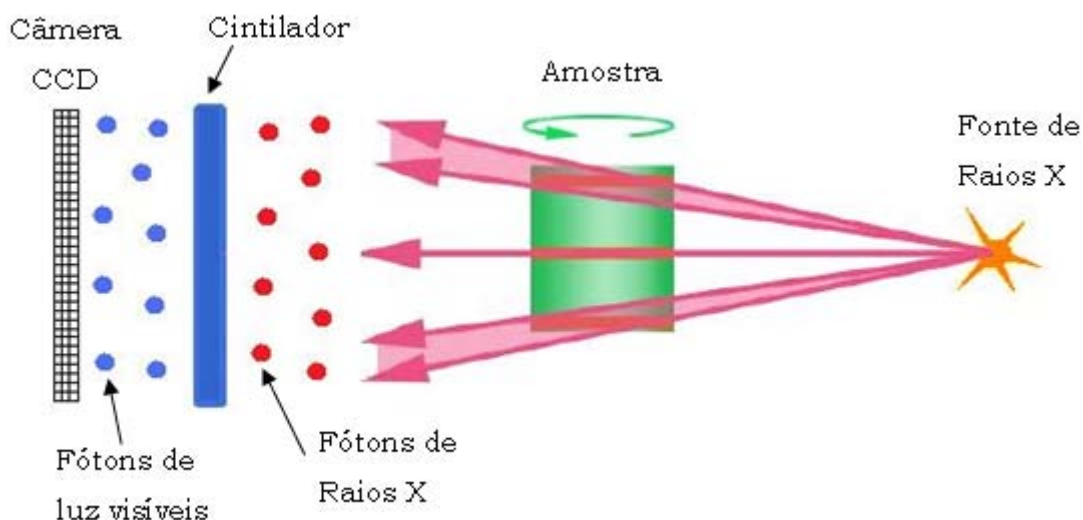
Sexta geração de tomógrafos: É um sistema helicoidal que permite obter imagens tridimensionais em um intervalo bastante reduzido em comparação às outras técnicas. A opinião que se faz em relação ao mais recente sistema tomográfico, é que o mesmo pode ser considerado de sexta geração por integrar as características das fontes e detectores dos sistemas de terceira a quinta geração com a nova geometria helicoidal, onde o paciente ou objeto a ser tomografado, translada enquanto o sistema tubo-detector o circula. Este procedimento requer que o algoritmo de reconstrução seja alterado para considerar o traçado helicoidal.

Existem diferentes formas de irradiação que provêm feixes de diferentes formatos, como o paralelo, que é pouco usado pela difícil operação e colimação do sistema, porém gera boas resoluções de imagens, e o feixe cônico, amplamente usado por não apresentar as dificuldades encontradas no sistema de feixe paralelo, mas que perde um pouco na resolução. O arranjo utilizado neste trabalho foi baseado no tomógrafo de terceira geração com feixe cônico, também conhecido como “cone beam”, porém, neste caso, o conjunto detector-fonte ficam fixos e a amostra é rotacionada.

3.4.2 Aquisição dos Dados

A aquisição dos dados microtomográficos é feita pela câmera CCD (Charge Coupled Device), que é formada por um conjunto de sensores, chamados fotocélulas, muito mais sensíveis à luz que os filmes convencionais, arranjados em uma matriz de linhas e colunas.

Algumas câmeras CCDs são sensíveis a luz visível, desta forma, é necessário a utilização de um intensificador de imagem (cintilador), que tem como principal função converter os raios X em luz visível. Posteriormente, esta luz visível chega aos sensores da câmera CCD (Figura 9), onde é convertida em uma corrente de elétrons que é proporcional a intensidade de luz incidente em cada sensor. Esta corrente produz um sinal analógico que será amplificado e convertido, pelo conversor analógico/digital, em um sinal digital. Este sinal digital é então lido e/ou gravado no computador em forma de uma imagem digital bidimensional de valores de níveis de cinza, variando de 0 a 255. Outras câmeras mais modernas são sensíveis aos raios X, o que elimina a necessidade de um intensificador de imagens.

Figura 9 – Representação esquemática do sistema de aquisição da Câmera CCD

3.4.3 Algoritmo de reconstrução

A imagem tomográfica ou microtomográfica, embora pareça ser a representação quase perfeita da estrutura interna da amostra, na realidade é um conjunto de números, transformados em tons de cinza, que informam o coeficiente de atenuação linear que é proporcional à densidade (dependendo da faixa de energia e do Z efetivo do material, poderá ser diretamente proporcional à densidade) de cada ponto da estrutura da amostra. Como as amostras podem ser constituídas de várias substâncias, possuem densidades distintas. A informação das densidades acaba formando imagens que desenham as várias estruturas internas da amostra.

Para descobrir o valor de densidade de cada ponto interior à amostra, o microtomógrafo realiza a medição da atenuação da radiação que a amostra provoca quando atravessada por um feixe de raios X. Como esta atenuação é realizada por toda a amostra, é necessário que se façam várias exposições em diferentes ângulos. Assim, se obtém uma grande quantidade de dados para que o computador possa definir, ponto a ponto da imagem, qual seu valor de atenuação, ou de densidade. A transformação desses valores nos vários níveis de cinza análogos cria uma imagem visual da seção transversal da área varrida.

Os valores de atenuação, para cada conjunto de projeção, são registrados no computador e a imagem microtomográfica computadorizada é reconstruída através de um algoritmo computacional.

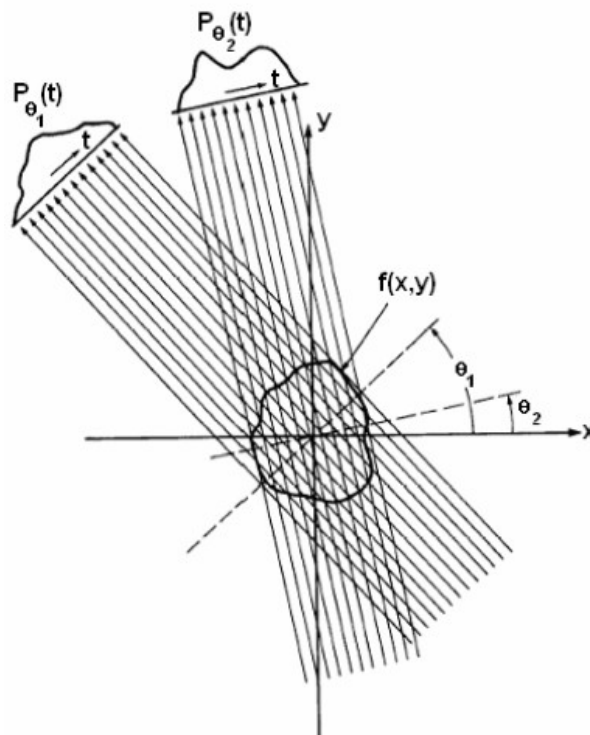
O método de reconstrução por retroprojeção filtrada é o mais conhecido e utilizado, por ser mais rápido que os demais métodos. Retroprojetar significa tomar o valor de um elemento adquirido em um ângulo θ e colocar este valor em todos os elementos ao longo de uma linha no ângulo θ da matriz da imagem. Todos os elementos na linha serão preenchidos com este mesmo valor, porque, neste estágio, a distribuição real da amostra ao longo da linha é desconhecida. Este processo será repetido para todos os elementos captados em todos os ângulos θ e os valores retroprojetados reforçarão uns aos outros em determinada localização [30].

Esse método consiste em aproximar uma solução, considerando que a atenuação do feixe é uniforme sobre todo o trajeto do raio no interior da amostra, de forma que a atenuação calculada é proporcional à atenuação medida.

Considerando o feixe como uma linha que atravessa a amostra, o objeto é modelado a partir de uma distribuição da atenuação dos raios X ao longo desta linha, a integral sobre ela representa a atenuação total sofrida pelo feixe que atravessa o objeto.

A projeção é formada pela combinação de um arranjo de integrais de linha de uma coleção de raios paralelos denotada por $P_{\theta}(t)$ para um θ constante, como se pode observar na Figura 10.

Figura 10 – Projeções paralelas dadas pelo arranjo de raios paralelos para diferentes ângulos.



Onde:

$$P_{\theta}(t) = \int_{(\theta,t)} f(x, y) ds \quad (13)$$

em que $f(x, y)$ representa uma função bidimensional em cada integral de linha dos parâmetros (θ, t) . A equação utilizada pelo algoritmo, adotada para rotações de 0° a 180° está relacionada abaixo:

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} Q_{\theta}(x \cos \theta + y \sin \theta) d\theta \quad (14)$$

onde,

$$Q_{\theta}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\theta}(w) |w| \exp(j 2\pi w t) dw \quad (15)$$

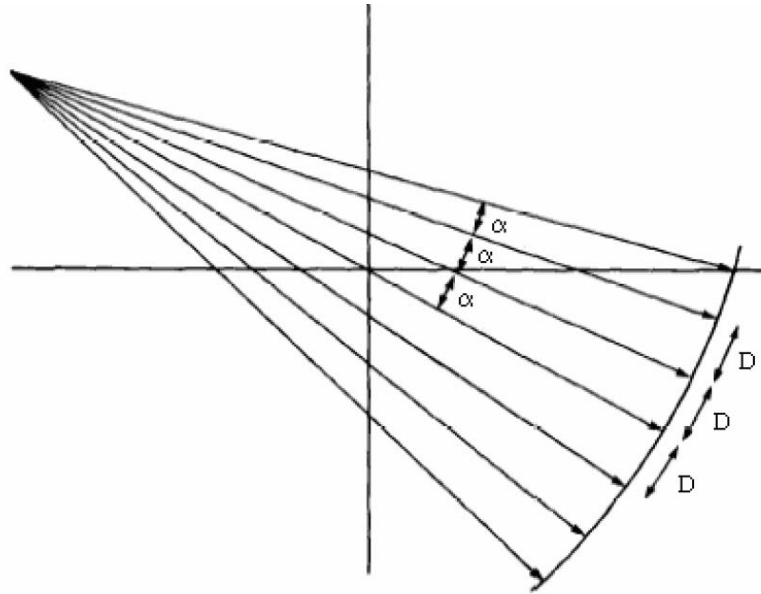
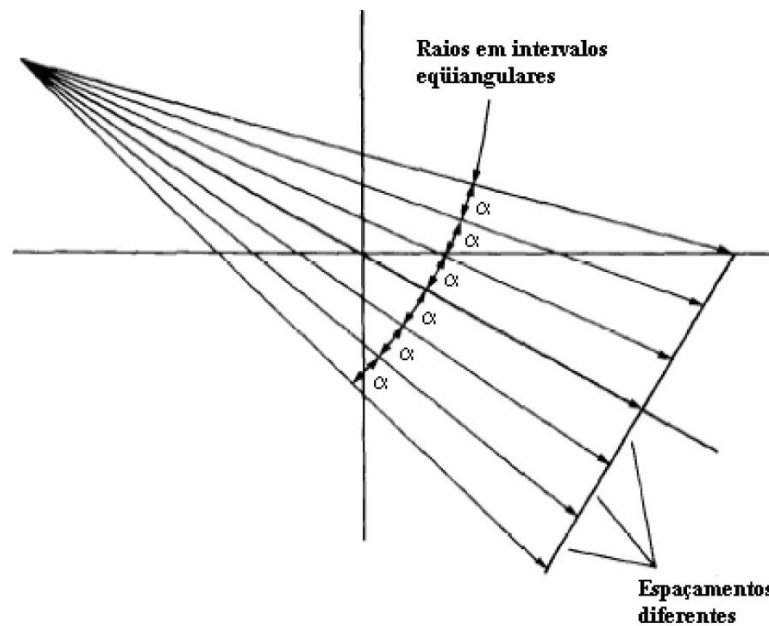
$S_{\theta}(w)$ é a transformada unidimensional de Fourier [31] da projeção $P_{\theta}(t)$, que é igual a uma transformada de uma fatia bidimensional do objeto original.

Para rotações de 0° a 360° , o limite inferior de integração da Equação (14) deve permanecer 0 e o superior deve ser alterado para 2π .

No caso em que sistemas microtomográficos empregam feixe cônico de radiação, como foi adotado neste trabalho, não se pode trabalhar com a função $f(x, y)$ como está descrita na Equação (14) que é usada para feixes paralelos. Uma modificação no seu formato deve ser realizada para se obter o algoritmo de projeção adequado.

Existem dois tipos de arranjos instrumentais para o feixe cônico, a diferença está no formato do detector e como neles incidem as linhas (feixe) de radiação.

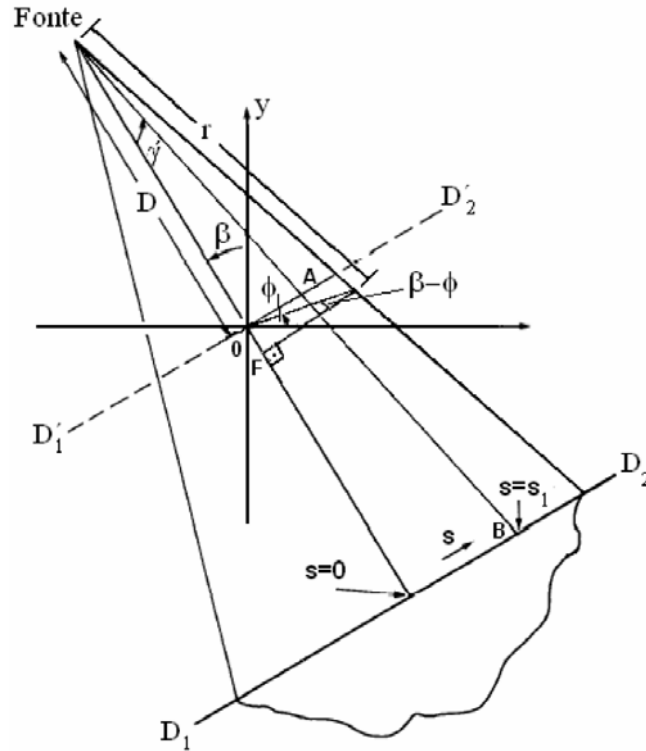
A Figura 11 mostra o exemplo em que o arranjo de detectores são montados formando um arco, as linhas de radiação incidem com espaçamentos D iguais. Pode-se notar no arranjo da Figura 12 que as linhas de radiação chegam aos detectores com espaçamentos diferentes devido ao seu arranjo em formato plano.

Figura 11 – Arranjo tomográfico com detectores alinhados na forma de um semicírculo.**Figura 12** – Arranjo tomográfico com mesmo ângulo entre as linhas de radiação incidente com espaçamentos diferentes de chegada nos detectores.

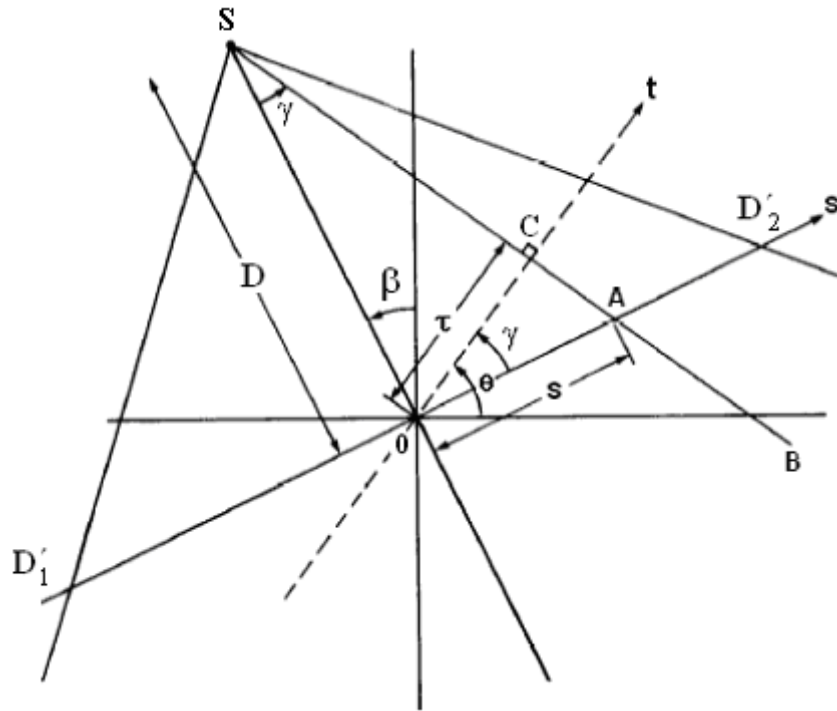
Para se obter projeções com feixe cônico a função $f(x,y)$ tem que ser dada em coordenadas polares $f(r,\phi)$, que de acordo com a Figura 13 sofre as seguintes transformações:

$$x = r \cos \phi \quad y = r \operatorname{sen} \phi \quad (16)$$

Figura 13 – Ilustração para auxílio na transformação das coordenadas cartesianas em polares.



Para simplificar e ter uma melhor visualização, vamos considerar na Figura 14 o detector imaginário D'_1 - D'_2 , que passa pela origem, e as seguintes transformações que se seguem:

Figura 14 – Parâmetros usados no algoritmo de reconstrução de imagem

$$\begin{aligned} t &= s \cos \gamma & \theta &= \beta + \gamma \\ t &= \frac{sD}{\sqrt{D^2 + s^2}} & \theta &= \beta + \tan^{-1} \frac{s}{D} \end{aligned} \quad (17)$$

Agora a função $f(r, \phi)$, com auxílio das relações descritas em (17) e com algumas equações matemáticas, pode ser escrita como

$$f(r, \phi) = \frac{1}{2} \int_{-\tan^{-1}(S_m/D)}^{2\pi - \tan^{-1}(S_m/D)} \int_{-S_m}^{S_m} P_{\beta+\gamma} \left(\frac{sD}{\sqrt{D^2 + s^2}} \right) \cdot h \left[r \cos \left(\beta + \tan^{-1} \left(\frac{s}{D} \right) - \phi \right) \right] \frac{D^3}{(D^2 + s^2)^2} ds d\beta \quad (18)$$

onde s_m é o maior valor de s em cada projeção que corresponde a t_m em projeções paralelas, e a expressão $P_{\beta+\gamma} \left(\frac{sD}{(D^2 + s^2)^{1/2}} \right)$ corresponde à integral do raio \overline{SA} na projeção paralela P_θ (t).

A Equação (18) está descrita para rotações de 0° a 360° , sua solução não é trivial e pode ser vista em detalhes no terceiro capítulo da referência [32].

O número finito de valores de atenuação correspondente ao objeto varrido é organizado na forma de uma matriz ou tabela. Devido a suas capacidades de absorção diferentes, estruturas internas diferentes serão identificáveis na imagem. O tamanho da matriz, ou tabela, influencia na qualidade da resolução da imagem. Matrizes maiores significam um número maior de pixels (menor elemento de área que compõe uma imagem digital), porém de menor área cada um, o que resulta em mais detalhes. No entanto, implica num esforço computacional maior pelo computador.

A operação de retroprojeção simples não é o inverso da operação de projeção. Portanto, simplesmente retroprojetar os valores das contagens das projeções não reconstituirá a função original $f(r, \phi)$ e sim uma $f(r, \phi)$ borrada. Isto se deve ao fato de que a localização exata da fonte não é conhecida. Uma primeira solução para eliminar o "borramento" é submeter o conjunto de projeções ao processo de filtragem. Neste processo, a imagem decomposta em um grande número de componentes de frequências será multiplicada por um filtro, que definirá o peso concedido a cada uma dessas componentes [33].

Um filtro é uma operação matemática efetuada em uma imagem capaz de atenuar ou enfatizar diferentes frequências, destacando diferentes características na imagem. Podem ser aplicados tanto no domínio espacial, através da convolução da função matemática que descreve o filtro com a da imagem, ou no domínio de Fourier, através da multiplicação das transformadas de Fourier do filtro e da imagem, e realizando a transformada inversa de Fourier do resultado. Computacionalmente, a filtragem no domínio da frequência é muito mais rápida do que a convolução no domínio espacial [34,35].

Cada projeção é filtrada e no processo, poderá receber valores negativos. O "borramento" é reduzido na retroprojeção, pois esses valores cancelar-se-ão com valores positivos nas vizinhanças das bordas das imagens.

Informações adicionais sobre algoritmos de reconstrução podem ser encontradas nas referências [32-36].

3.5 IMAGENS DIGITAIS

Uma imagem digital é caracterizada por elementos de área ou de volume, dependendo se a imagem é bidimensional (2-D) ou tridimensional (3-D). Um pixel (do inglês picture element) é o menor elemento de área que caracteriza uma imagem digital bidimensional. Em uma imagem microtomográfica ele é a representação, em tons de cinza, do coeficiente de atenuação das porções da amostra (dispostas em linha) por onde o feixe de

raios X passou. As dimensões de um pixel são definidas pela resolução espacial empregada. Por isso, quanto melhor a resolução, maior a quantidade e menor a área dos pixels que formam uma imagem. Um voxel, similarmente ao pixel, é o menor elemento de volume que caracteriza uma imagem digital tridimensional. Uma representação esquemática destes dois elementos é mostrada na Figura 15.

Uma imagem digital é uma função $f(x,y)$, onde (x,y) denotam as coordenadas espaciais discretas e o valor retornado é um valor discreto de cor ou tons de cinza. Assim, uma imagem digital é sempre do tipo discreta-discreta [37].

Pode-se representar uma imagem digital utilizando-se uma matriz $[A]_{N_x, N_y}$, onde cada elemento $A_{x,y}$ representa o valor da função imagem, ou seja, a informação de cor ou nível de cinza do pixel x, y . A Figura 16 apresenta a representação em forma de matriz de uma imagem de tamanho 10 x 10.

Figura 15 – (A) Imagem bidimensional formada por elementos de área e (B) Imagem tridimensional caracterizada por elementos de volume [17].

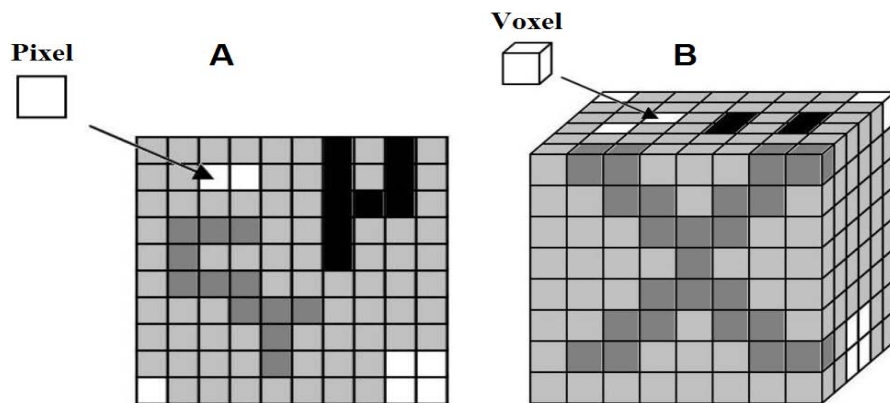
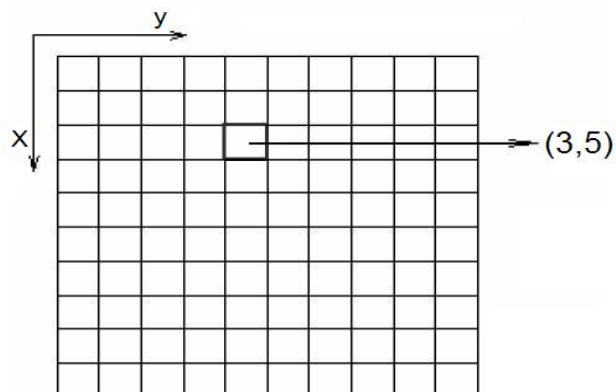


Figura 16 – Representação matricial de uma imagem



3.5.1 Imagens em Níveis de Cinza

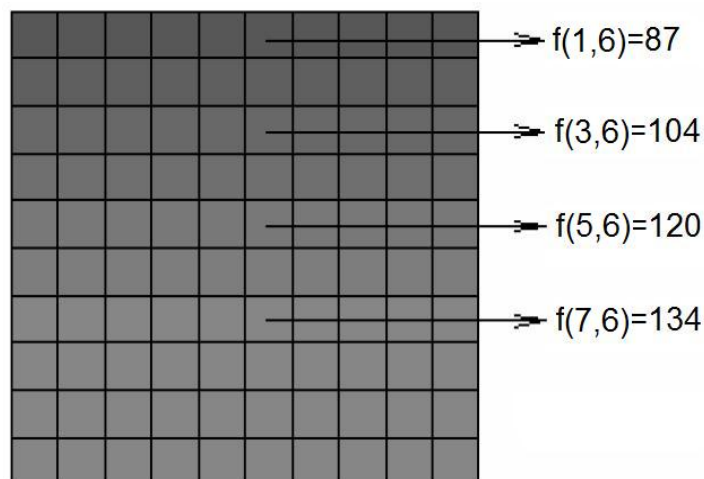
O processo de discretização da informação de cor em imagens é denominado de quantização. Após a quantização uma imagem é formada por um conjunto de cores.

Como cada cor será vista em uma imagem depende do número de bits utilizados para sua representação, assim, uma imagem com m bits, suporta 2^m níveis de cores. Uma imagem de dimensões N_x por N_y , com m número de bits requer para ser armazenada uma quantidade de $N_x \cdot N_y \cdot m$ bits.

Costuma-se trabalhar com 3 tipos de imagens: binária, em tons de cinza e colorida. Uma imagem binária ($m=1$) é uma imagem com 2 "cores", normalmente utiliza-se o preto (0) e o branco (1). Uma imagem em tons de cinza é geralmente uma imagem de 8 bits ($m=8$), que suporta $2^8=256$ cores, normalmente utilizam-se tons de cinza entre 0 (preto) e 255 (branco). Uma imagem colorida é geralmente uma imagem com 2^{24} níveis de cor (~16.7 milhões de cores) [37]. Neste trabalho utilizaremos apenas imagens em tons de cinza e binárias, para imagens coloridas consulte as referências [37,38].

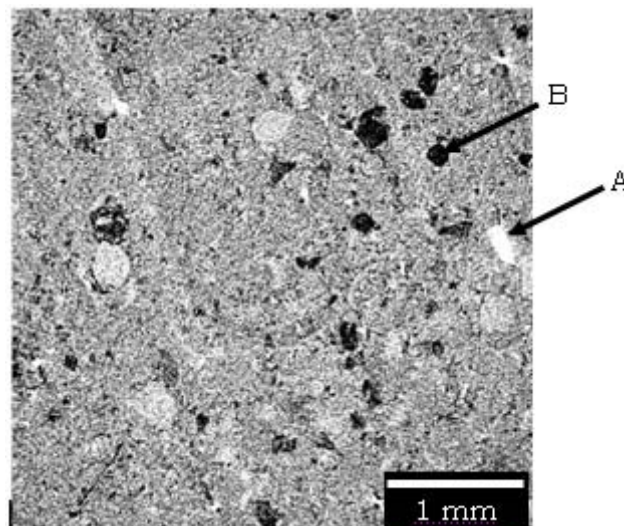
Em uma imagem monocromática, o valor $f(x,y)$ de cada pixel representa a intensidade luminosa do ponto (x,y) . Em uma imagem de 8 bits, por exemplo, o valor mínimo (0) corresponde à intensidade luminosa nula, ou preto total. Por outro lado, o valor máximo (255) representa a intensidade luminosa máxima, ou branco total [38,39]. A Figura 17 mostra um exemplo de uma imagem monocromática.

Figura 17 – Representação de uma imagem em tons de cinza.



Deve-se ressaltar, entretanto, que, em microtomografia de raios X, uma imagem monocromática representa a distribuição bidimensional do coeficiente de atenuação do material em cada ponto. Tradicionalmente regiões mais claras de uma imagem representam zonas com coeficientes de atenuação maiores (ou zonas mais densas) e regiões mais escuras correspondem a zonas de menor atenuação (ou zonas menos densas). Na Figura 18 pode ser observada uma região de maior atenuação (seta A) e uma região com menor atenuação (seta B), que neste caso é um poro, ou seja, ar. Os outros níveis de cinza compreendem regiões de atenuação intermediária.

Figura 18 – Imagem da amostra de siltito (PG6) da formação Rio do Sul em escala de cinza



3.5.2 Histograma de uma Imagem

O histograma de uma imagem representa, para cada nível de intensidade (cinza), o número de pixels com aquele nível. O histograma indica se a imagem está distribuída adequadamente dentro dos possíveis níveis. Se a imagem não está utilizando todos os níveis disponíveis, pode-se alterá-los, para melhor uso.

Seja uma imagem com L níveis de cinza $c = 0, 1, 2, \dots, L-1$, onde $c = 0$ corresponde ao preto e $c = L-1$ ao branco, sendo em geral L igual a 256, correspondendo a uma imagem 8 bits/pixel.

Vamos percorrer todos os pixels da imagem e computar o número de pixels com cada nível de cinza c , através da relação:

$$p_c(r_c) = \frac{n_c}{n} \quad (19)$$

onde n_c é o número de pixels da imagem com nível de cinza c , n é o número total de pixels da imagem, e $r_c = \frac{c}{L-1}$, $0 \leq r_c \leq 1$, é o nível de cinza normalizado entre 0 e 1. Assim, $p_c(r_c)$ indica a fração de pixels da imagem que apresentam o nível de cinza c .

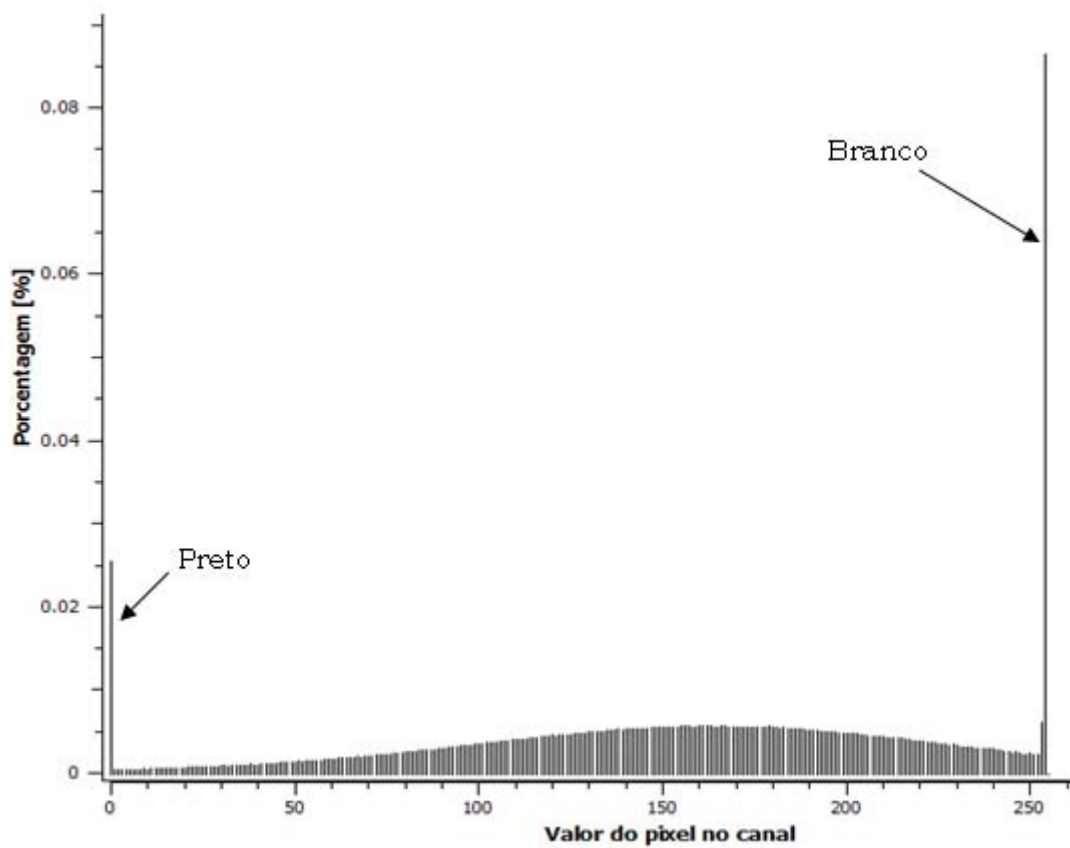
Se considerarmos a imagem como uma realização de um processo aleatório, $p_c(r_c)$ representa a probabilidade do nível de cinza c na imagem.

Com estas definições acima, têm-se as relações:

$$\sum_{c=0}^{L-1} n_c = n \quad \text{e} \quad \sum_{c=0}^{L-1} p_c(r_c) = 1 \quad (20)$$

Ao conjunto de valores $p_c(r_c)$ dá-se comumente o nome de histograma de níveis de cinza da imagem, o qual é frequentemente representado por um gráfico de barras. O histograma corresponde à função densidade de probabilidade da variável nível de cinza [40].

O histograma de uma imagem nos dá informações globais acerca do aspecto da imagem. Nos informa a frequência dos níveis de cinza na imagem, porém sem informar a localização espacial destes pixels na imagem. Dada uma imagem, seu histograma é único, contudo, a imagem para um mesmo histograma não é definida unicamente. Ainda que forneçam informações globais, a análise do histograma é extremamente útil para a aplicação de processamentos como, por exemplo, o de segmentação binária. A Figura 19 mostra o histograma de cinza da Figura 18 apresentada anteriormente.

Figura 19 – Histograma de cinza da imagem da Figura 18.

3.5.3 Processamento de Imagens

O processamento de imagens digitais é um processo computacional que procura transformar e analisar imagens de forma a extrair informações relevantes, realçando e identificando estruturas, padrões, defeitos e objetos, assim como melhorar a qualidade, de modo a otimizar a visualização. Dentre as inúmeras aplicações do processamento de imagens, alguns exemplos importantes são o sensoriamento remoto, a detecção de defeitos em componentes e o tratamento de imagens médicas e geológicas.

Existem muitas maneiras de realizar o processamento de imagens, porém serão mostradas apenas as utilizadas no trabalho, para maiores informações sobre processamento de imagens consulte as referências [37-41].

Em operações orientadas à vizinhança, o filtro é geralmente associado a uma máscara que operará em uma vizinhança de cada pixel da imagem. Na Figura 20, mostra-se uma máscara 3x3, com coeficientes (pesos) genéricos. Seja um pixel qualquer de uma imagem em níveis de cinza, onde o centro da máscara é posicionado. Denotando os níveis de

cinza do pixel em consideração e da sua vizinhança associada à máscara por $c_1, c_2, c_3, \dots, c_9$ a resposta, para o dado pixel, dada por um filtro linear será:

$$R = p_1c_1 + p_2c_2 + p_3c_3 + \dots + p_9c_9 \quad (21)$$

Figura 20 –Máscara para um filtro 3x3 com coeficientes genéricos. Os níveis de cinza c_1, \dots, c_9 , estão posicionados seguindo a mesma ordem dos coeficientes [40].

p_1	p_2	p_3
p_4	p_5	p_6
p_7	p_8	p_9

3.5.3.1 Segmentação de imagens (Binarização)

De um ponto de vista geral, podemos definir a segmentação como um processamento que consiste em realizar a divisão de uma imagem em regiões homogêneas, de acordo com um critério estabelecido. De acordo com o critério, as regiões obtidas diferem entre si mais ou menos significativamente. Por uma região, entende-se um agrupamento conexo de pixels com propriedades comuns, como intensidade de nível de cinza, textura, entre outros que a diferencia.

Os métodos de binarização são frequentemente classificados em métodos globais e locais. Os métodos globais são geralmente baseados no histograma de níveis de cinza onde, através da adoção de um único valor de nível de cinza de corte, que opera em toda a imagem em consideração, separa as regiões em pretos e brancos. Os métodos locais adotam parâmetros que operam em regiões limitadas da imagem, variando de região para região da imagem.

Além disso, os métodos de binarização podem ser manuais ou automáticos, se exigem ou não a interferência do usuário para a decisão de parâmetros no seu processamento.

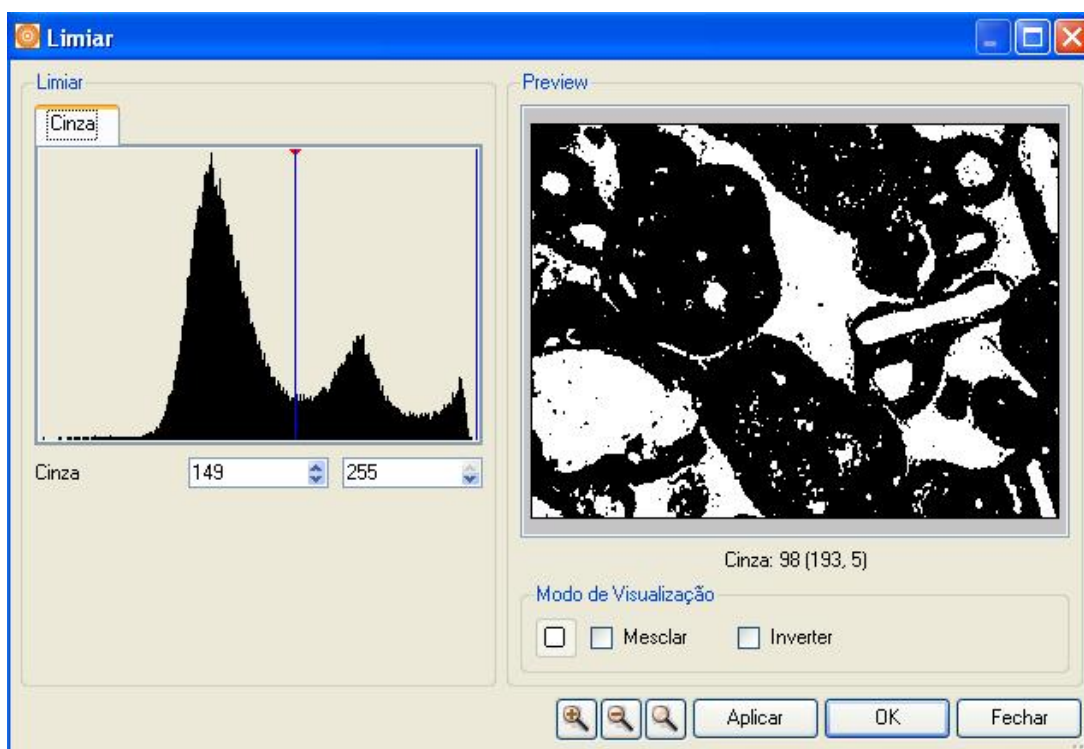
A binarização consiste em uma etapa fundamental na cadeia de processamento de imagens, uma vez que toda quantificação de parâmetros geométricos (por

exemplo, a porosidade e a distribuição de tamanhos de poros) dependerá da correta definição das regiões de pretos e brancos. Desta forma, a imagem binária obtida deve representar de forma mais honesta possível a imagem original. Esta é uma tarefa difícil, pois os métodos automáticos geralmente não são satisfatórios e o operador acaba tendo que escolher um limiar para a binarização, salientando a grande importância da experiência do operador para este procedimento.

Um exemplo de aplicação é a binarização de imagens de microestruturas porosas: para seu estudo, interessa a divisão da estrutura do material em dois tipos de regiões: as regiões associadas aos sólidos (não importando a sua composição química) e as regiões de vazios, os poros.

A Figura 21 apresenta a janela utilizada para a escolha do nível de cinza no processo de binarização pelo software Imago. Observe que exatamente onde está o cursor que define o nível de cinza (linha azul), existe uma seta vermelha na parte superior, esta marca é o que o Imago sugere automaticamente como nível de binarização, o que quase sempre não é utilizado. Neste trabalho a escolha do nível de cinza para a binarização foi feita de forma manual, ou seja, com a interferência do operador.

Figura 21 – Janela de níveis de cinza utilizada para binarização da imagem em escala de cinza.



As operações aritméticas com imagens, bem como alguns dos filtros utilizados em processamento de imagens são apresentados no Apêndice A.

3.5.4 Resolução Espacial

A resolução espacial de uma imagem expressa qual é a dimensão mínima de uma determinada região que pode ser investigada com clareza pelo software analisador, ou seja, se a resolução espacial de uma microtomografia for de 20 μm , por exemplo, então poros ou estrutura de matriz com tamanho menor que esta resolução não serão identificados claramente pelo sistema.

Quanto melhor for a resolução espacial atingida, mais acurados serão os dados que poderão ser obtidos da amostra. Sistemas microtomográficos modernos atingem resoluções que vão da ordem de micrometros (μm) até centenas de nanometros (nm), dependendo basicamente do tamanho da amostra e geometria/qualidade do sistema de irradiação/detecção [42].

A resolução (R) da imagem microtomográfica, que depende do tamanho do pixel no detector e do fator de magnificação (M), é descrita da seguinte maneira:

$$R = \frac{x}{M} \quad (22)$$

onde x é o tamanho de pixel em mm e M é dado por:

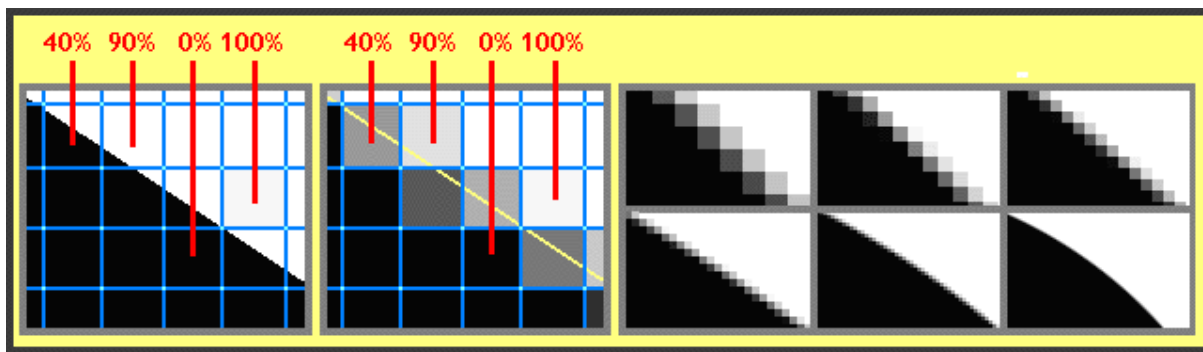
$$M = \frac{a+b}{a} \quad (23)$$

onde a é a distância fonte-amostra e b é distância amostra-câmera CCD, em mm.

Para CCDs com mesmo tamanho, a que tiver mais pixels terá maior resolução espacial, pois o tamanho de seus pixels será menor, conseguindo assim individualizar fragmentos menores da imagem e tornando com isso mais fiel a cópia eletrônica da imagem. A Figura 22 abaixo mostra porque o tamanho do pixel (decorrente de sua maior ou menor quantidade na CCD) influencia o detalhamento (e conseqüentemente a resolução) da imagem captada: não existe "meio" pixel, o pixel registra a luminosidade que atinge a sua área, de maneira uniforme. No desenho, no primeiro quadro à esquerda a imagem

de um círculo preto sobre fundo branco é projetada na superfície da CCD, as linhas azuis representam os pixels em um pequeno trecho da borda do círculo.

Figura 22 – Representação da resolução espacial para a borda de uma circunferência



O desenho mostra que os pixels recebem luz em diferentes proporções em sua superfície com 4 exemplos de pixels, um que recebe luz em 40 % de sua superfície, outro que recebe luz em 90 % de sua superfície, outro que não recebe nenhuma luz e um último que recebe 100 % de luz. Como o pixel é uma célula fotoelétrica em miniatura, cada um desses pixels mencionados vai gerar corrente elétrica, com exceção do localizado na parte escura da imagem. E de acordo com a intensidade luminosa que recebe, cada pixel gerará uma intensidade diferente de energia elétrica. Cada pixel possui um capacitor (acumulador de energia) associado ao mesmo. Assim, com o passar do tempo (milissegundos) a energia gerada em cada um deles vai sendo armazenada individualmente. O segundo desenho da figura mostra os pixels depois de alguns milissegundos de exposição à luz da imagem.

Os acumuladores de energia dos pixels são a seguir lidos pelo circuito eletrônico gerando um sinal elétrico de intensidade variável (conforme a carga acumulada para cada pixel) que, após ser lido por um conversor analógico digital será transformado em um sinal binário, podendo este ser armazenado em uma fita, disco, etc. No momento de reproduzir a imagem, a informação armazenada para cada pixel é recuperada. Para um dos pixels da borda do círculo, por exemplo, será "área com 40% de luminosidade", o que fará com que a área correspondente ao mesmo na tela do monitor fique cinza, idêntica à do segundo desenho da figura. A conclusão: perdeu-se o detalhe da curvatura do círculo.

Porém, como a CCD contém uma quantidade muito grande de pixels, o tamanho de cada pixel fica pequeno, da mesma forma como também fica pequena a imprecisão perdida no contorno do círculo, como mostram os desenhos seguintes da parte

direita da figura, onde o tamanho da imagem foi gradativamente sendo reduzido para mostrar isso. Na realidade, sempre que observarmos imagens digitais ampliadas será possível perceber essa característica, conhecida como pixelamento da imagem. Em outras palavras, quanto mais pixels, menores eles serão e menos perceptível será o efeito do pixelamento na imagem, as curvas serão mais perfeitas, os contornos mais suaves e, portanto, a imagem ficará mais nítida e fiel à realidade. Será possível "resolver" com mais precisão pequenos detalhes da imagem, por isso diz-se que a CCD terá maior resolução espacial. Maiores detalhes sobre resolução espacial e outros exemplos podem ser encontrados na referência [5].

Outro parâmetro importante a ser avaliado é a resolução de contraste das imagens. Este parâmetro está relacionado ao contraste mínimo (diferença mínima) entre coeficientes de atenuação linear de partes integrantes adjacentes na amostra, importante para quantificar pequenas variações na densidade da estrutura do material analisado. Este tipo de resolução depende diretamente da energia do feixe de raios X uma vez que um feixe demasiadamente energético pode tornar transparente algumas estruturas da matriz, o que diminuiria tal resolução. Mas ela também está relacionada com a intensidade do feixe. Quanto mais intenso o feixe, maior o número de fótons que constituirão a projeção e, conseqüentemente, melhor a resolução de contraste, devido à diminuição do desvio estatístico.

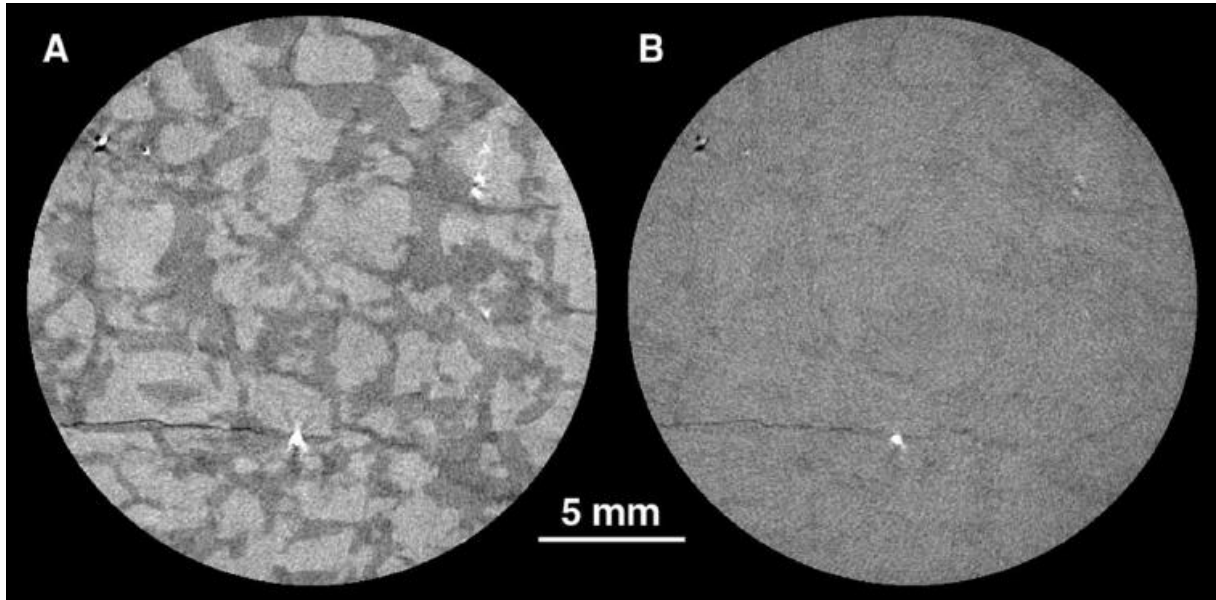
3.5.5 Resolução de Contraste

Na análise de imagens digitais a resolução de contraste está relacionada com a distinção de regiões com níveis de cinza (ou cores) semelhantes. Em microtomografia, é a habilidade do sistema em distinguir uma região vizinha da outra em relação à diferença de atenuação e, portanto, variações de densidade no objeto. Por isso, na literatura também é chamada de resolução de densidade. Quanto menor for a diferença de atenuação de uma região para outra que o sistema seja capaz de detectar, melhor será a resolução de contraste na imagem. Por exemplo, se um equipamento de microtomografia de raios X possui uma resolução de contraste de 2 %, isso significa que se entre duas regiões a diferença do coeficiente de atenuação (densidade) for de 2 % ou mais, elas serão distintas na imagem, do contrário as duas regiões aparecerão na imagem com o mesmo nível de cinza.

A Figura 23 mostra a mesma seção de uma imagem, porém com diferentes energias de raios X (100 e 200 keV) aplicadas na aquisição dos dados microtomográficos. Em (A) pode ser observado uma boa resolução de contraste entre as fases da amostra, já em (B),

onde a energia de aquisição foi de 200 keV, a resolução de contraste está comprometida, desta forma, não sendo possível distinguir todas as fases da amostra.

Figura 23 – Granito escaneado a energia de raios X de (A) 100 keV e (B) 200 keV [11].



Quando um objeto homogêneo é microtomografado, os pixels na imagem não têm os mesmos valores, como era de se esperar. No caso da água, por exemplo, esses valores deveriam ser os mesmos, porém há um desvio dos valores em torno de um valor médio. A flutuação desses valores em torno de um valor médio representa o desvio padrão que, para uma imagem microtomográfica, é chamado de ruído. O ruído em uma imagem é causado pela flutuação na contagem do número de fótons. Além da flutuação estatística na contagem dos fótons, outros fatores são responsáveis pela presença do ruído numa imagem, tais como, efeito de “beam hardening” (endurecimento do feixe que será visto posteriormente) e fatores relacionados com os algoritmos de reconstrução da imagem [43].

A Equação (24) mostra a maneira de calcular a resolução de contraste, em porcentagem, de um sistema microtomográfico.

$$\text{Resolução de contraste} = \left(\frac{\sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}}{\bar{x}} \right) \cdot 100 \quad (24)$$

onde, n representa a quantidade de pixels em uma determinada área da imagem; x_i é o valor individual do nível de cinza de um pixel e \bar{x} é o valor médio dos níveis de cinza na área analisada da imagem [5].

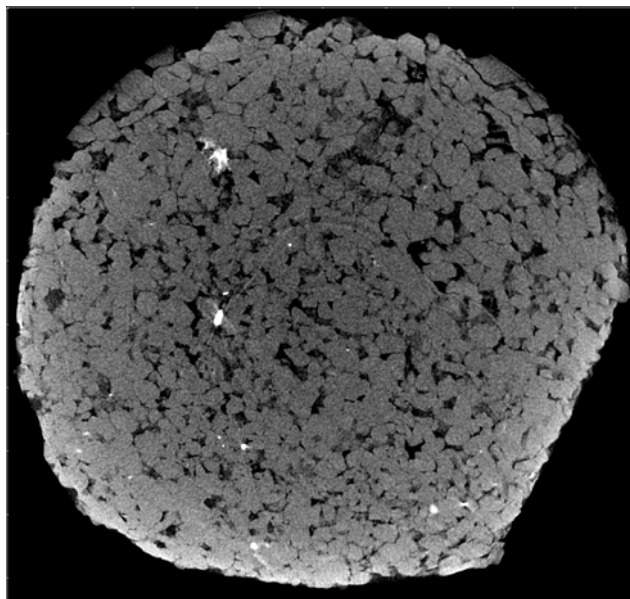
3.6 ARTEFATOS E EFEITOS NAS IMAGENS

Independentemente dos parâmetros de qualidade de imagem, como resolução espacial e contraste, que podem ser determinados quantitativamente, deve-se, acima de tudo, avaliar o quanto a imagem reconstruída é fiel ao corte real do objeto reconstruído. O processo de aquisição e reconstrução de imagens pode produzir estruturas artificiais que não existem no objeto real. A essas estruturas dá-se o nome de artefato.

Os artefatos são anomalias presentes nas imagens e que mascaram ou dificultam a análise das mesmas. Os artefatos são aspectos que não correspondem ao objeto real e são inteiramente indesejáveis. Podem aparecer várias formas de artefatos e serão melhores explicados nas subseções seguintes.

3.6.1 Efeito de “Beam Hardening”

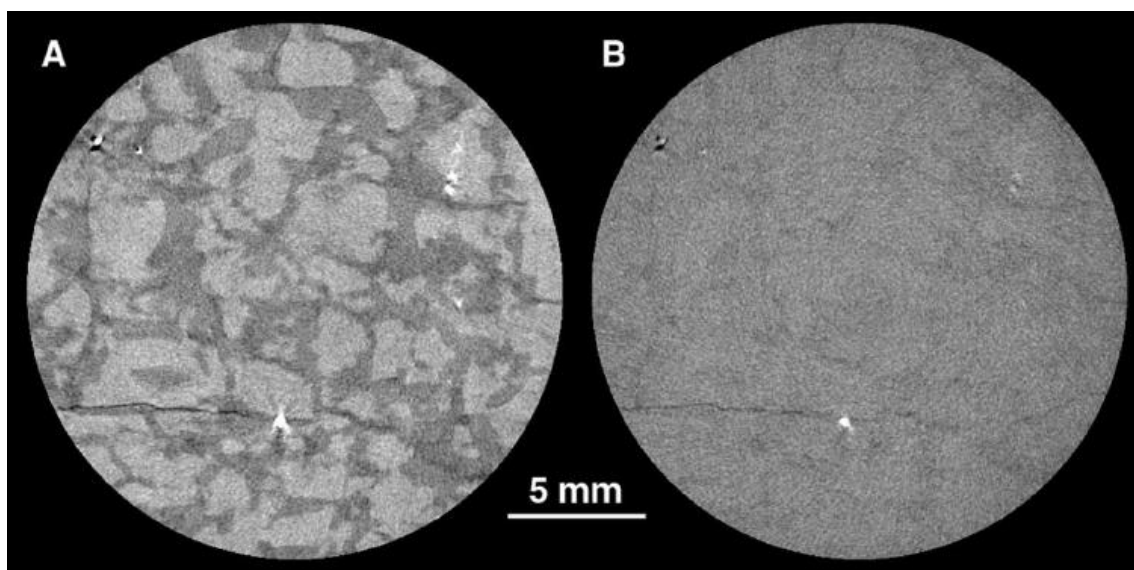
Um artefato frequentemente encontrado em imagens tomográficas é o chamado "beam hardening" ou endurecimento do feixe, que ocorre nas extremidades do material estudado tornando sua imagem mais clara que na região central, como pode ser observado na Figura 24. Este efeito resulta do fato de raios X menos energéticos serem mais facilmente absorvidos que os mais energéticos. Dessa forma, o emprego de uma fonte policromática favorece a ocorrência deste artefato. Os raios X desse tipo de fonte têm uma grande parte da energia mais baixa do espectro absorvida pelo material escaneado, resultando no endurecimento e consagrando o nome deste efeito. O resultado final é um feixe que, embora diminuída sua intensidade global, tem uma energia média mais alta que o feixe incidente. Isto também significa que, à medida que o feixe passa através do objeto, o seu coeficiente de atenuação efetivo diminui. Em imagens de tomografia de raios X de materiais fortemente atenuantes, este processo geralmente se manifesta como um escurecimento artificial no centro, ao longo do trajeto, e um clareamento correspondente perto das extremidades [11].

Figura 24 – Imagem do arenito PG8 sem a correção de "beam hardening"

O "beam hardening" pode ser um artefato danoso, pois ele altera o nível de cinza de um material (ou poro) dependendo de sua localização na imagem. Uma medida que pode ser adotada é remover as extremidades da imagem e analisar apenas o centro. Mas este procedimento soluciona apenas as regiões mais afetadas, já que este artefato é contínuo, e as regiões mais internas permanecerão com tal artefato, porém com menor intensidade. Além disso, se a área da seção transversal muda de fatia para fatia, o grau do artefato de "beam hardening" também mudará, tornando a metodologia propensa a erro.

Existem várias possibilidades de amenizar o efeito do "beam hardening", desde preparo da amostra e do escaneamento, até processamento dos dados. A mais simples aproximação é usar um feixe de raios X que é energético o suficiente para assegurar que o "beam hardening" seja desprezível. Infelizmente muitas amostras são muito atenuantes e o "beam hardening" estará presente, a menos que a amostra seja muito pequena. Além disso, o uso de um feixe muito energético causa problemas de contraste, tornando difícil distinguir os diferentes materiais contidos na amostra, fato que é observado na Figura 25.

Figura 25 – Granito escaneado à energia de raios X de (A) 100 keV; (B) 200 keV [11].



Outra maneira de diminuir os efeitos do "beam hardening" é empregar filtros físicos com o objetivo de pré ou pós absorver os raios X de menor energia. Os filtros são chapas ou placas de metal, como cobre ou alumínio, colocadas antes ou depois do feixe passar pelo objeto. A desvantagem em filtrar o feixe é a ocorrência de degradação do sinal de raios X para todas as energias, levando a maiores ruídos na imagem, a menos que tempos de aquisição mais longos sejam usados para compensar.

Outra estratégia é aplicar uma camada de um material com propriedades atenuantes similares sobre a superfície da amostra. Para ser efetivo, o material desta camada deve ser cilíndrico, e o objeto escaneado também deve ser cilíndrico ou enclausurado em um material atenuante (idealmente o material da camada) para obter, em geral, uma forma cilíndrica. Neste último caso, as imagens podem ter muito ruído devido à atenuação adicional causada pelo material enclausurador. O material da camada também interfere nas análises 3-D do objeto de interesse, em tais casos ele deve ser eliminado durante o processamento da imagem [11]. Maiores detalhes sobre "beam hardening" e outros exemplos podem ser encontrados na referência [5].

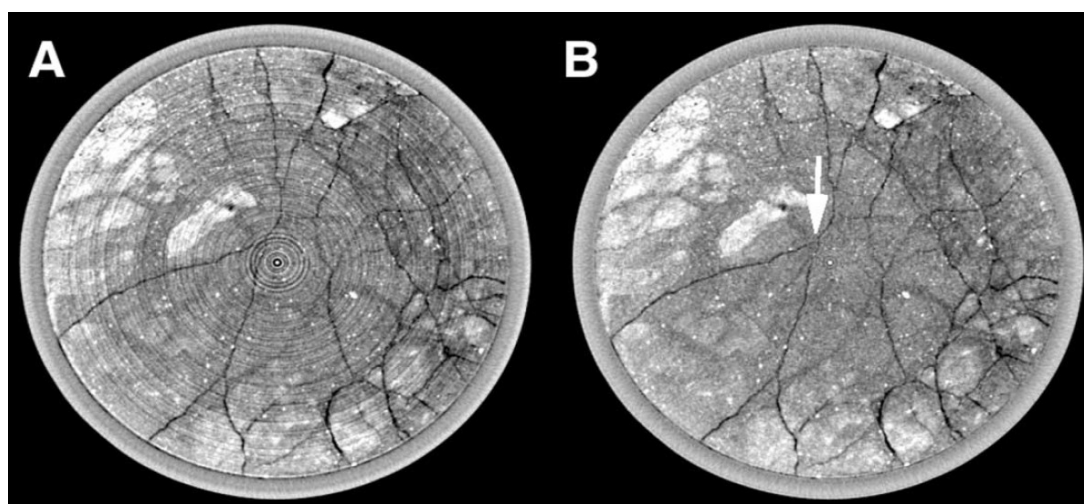
3.6.2 Efeito de "Ring artifact"

"Ring artifacts" ou artefatos em anel, ocorrem em escaneres de terceira geração e aparecem como círculos parciais ou completos centrados no eixo de rotação. Eles

são causados porque os vários detectores contidos na câmera CCD não fornecem sinais idênticos a um mesmo estímulo (shift), isto resulta em valores anômalos de atenuação. Como a posição de cada detector na CCD é a mesma, isto significa que o shift de um detector em particular ocorrerá sempre a uma mesma distância do centro de rotação. É por isso que este tipo de artefato assume formas circulares. Vários fatores podem causar tais problemas de resposta, todos têm base em detectores que respondem de modo diferente a mudanças nas condições de escaneamento. Alguns fatores, tais como mudança de temperatura ou na energia do feixe, podem ser superados por condições experimentais controladas cuidadosamente ou por recalibrações frequentes, quando possível. Uma fonte mais grave de divergência de detectores é a sensibilidade diferencial para diversas variações do feixe devido às dimensões do objeto. Se a calibração de resposta do detector é realizada através do ar, a resposta relativa dos detectores pode mudar se o feixe de raios X é suficientemente afetado pela passagem através do objeto escaneado. Se o objeto é desigual, projeções diferentes podem refletir graus diferentes de variações. Em tais casos podem ocorrer anéis parciais, pequenos o suficiente para obscurecer sua natureza como artefatos [11].

Devido à sua natureza relacionada com alterações do feixe de radiação, os "ring artifacts" podem ser eliminados, ou ao menos atenuados, através do emprego de filtros do software de reconstrução ou feixe de raios X suficientemente energético. A Figura 26a mostra os "ring artifacts" presentes em uma imagem microtomográfica e na Figura 26b a mesma imagem já com a correção do software de reconstrução. A seta branca indica o desaparecimento parcial de uma fissura existente na imagem (amostra), efeito indesejável que pode ocorrer após a correção dos "ring artifacts", infelizmente um "mal" muitas vezes necessário.

Figura 26 – Correção dos "ring artifacts" de uma imagem microtomográfica pelo software de reconstrução.

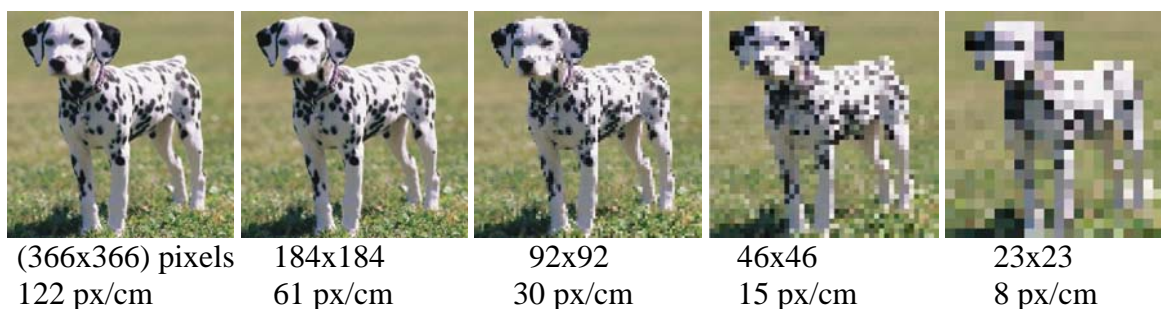


3.6.3 Efeito de Volume Parcial

Cada voxel em uma imagem tomográfica representa as propriedades de atenuação de um volume específico do material. Por isto, se este volume é composto por um número de substâncias diferentes, o nível de cinza resultante representa uma média de suas propriedades, é o chamado efeito de volume parcial. Além disso, devido aos limites de resolução, todos os contornos de uma microtomografia são “borrados” até certo ponto, e assim o material em algum voxel pode afetar os níveis de cinza de voxels vizinhos. Estes fatores podem tornar os dados mais difíceis de serem interpretados quantitativamente [11].

A Figura 27 mostra um exemplo de uma imagem com cinco resoluções caracterizando o efeito de volume parcial.

Figura 27 – Exemplo de cinco resoluções para a mesma imagem.



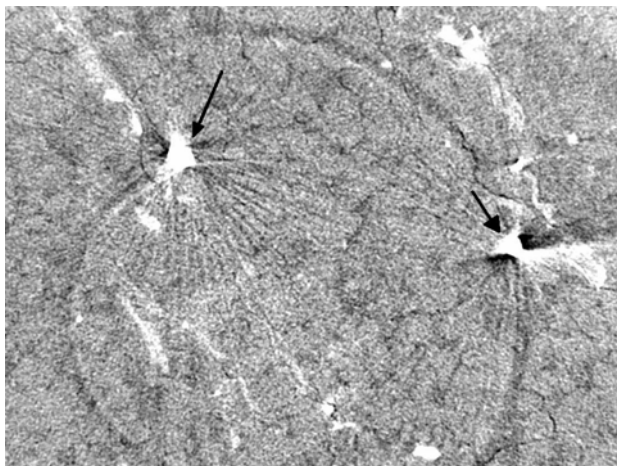
3.6.4 Outros Artefatos

Se na amostra existir um objeto altamente atenuante e de seção transversal não circular, podem ocorrer manchas escuras (sombra) ao lado do eixo mais longo desse objeto. Estes traços podem intensificar os "ring artifacts" em regiões onde eles se sobrepõem. Se o material escaneado inclui partes que são de densidade muito mais elevada que da matriz que as envolve, um "starburst" (explosão estelar) pode se formar como traços brilhantes emanados do objeto a uma curta distância do material. Estes traços podem camuflar a existência de possíveis poros.

A Figura 28 indica a presença do artefato "starburst", mencionado no parágrafo anterior. Os materiais mais densos que contribuíram para a ocorrência deste artefato estão indicados pelas setas pretas. Nesta mesma figura também pode ser observada uma

região preta que, neste caso, denota a fase porosa, ao lado do material com maior densidade. Este é outro tipo de artefato que ocasiona o aumento da porosidade na imagem.

Figura 28 – Arenito proveniente do Cânion Guartelá no Paraná escaneado com uma resolução de 5 μm com sinais de artefatos.



3.7 PARÂMETROS MICROESTRUTURAIS

Os procedimentos de caracterização objetivam medir, nas imagens segmentadas, um conjunto de parâmetros microestruturais. As propriedades caracterizadas são utilizadas então, para geração de representações tridimensionais do material e para análise da representatividade destas.

Costuma-se determinar a porosidade, a função autocorrelação, a função conectividade, a distribuição de tamanho de poros e a porosidade conectada, alguns destes parâmetros, que são de interesse para este trabalho, são brevemente descritos a seguir.

3.7.1 Porosidade (ϕ)

Porosidade é o espaço físico entre os grãos que constituem a rocha, não ocupado por componentes sólidos. Já a porosidade (ϕ) é uma propriedade relacionada à massa das rochas reservatório [44]. A porosidade pode ser geralmente de dois tipos:

- 1) primária ou original, é aquela herdada da deposição dos sedimentos;

2) secundária, é oriunda da dissolução dos grãos do arcabouço, cimento e matriz, ou formada por fraturamento, encolhimento de argilas devido à perda de água, ou ainda, pela substituição por argilominerais.

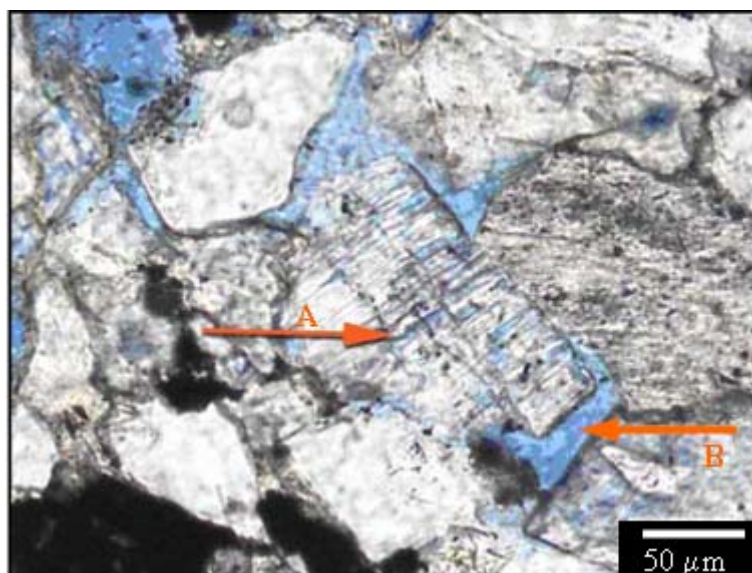
A porosidade também pode ser distinguida quanto à morfologia [45,46]: intergranular, intragranular, móldica, porosidade de encolhimento, fraturas e microporosidade.

Segundo Jonas e McBride [47], quantitativamente a porosidade nos arenitos pode variar de uma porosidade máxima de 55% até aproximadamente zero, para arenitos compactados e cimentados.

A porosidade intergranular primária ocorre entre os grãos do arcabouço e seu maior diâmetro deverá ser menor que o diâmetro dos grãos do arcabouço [48].

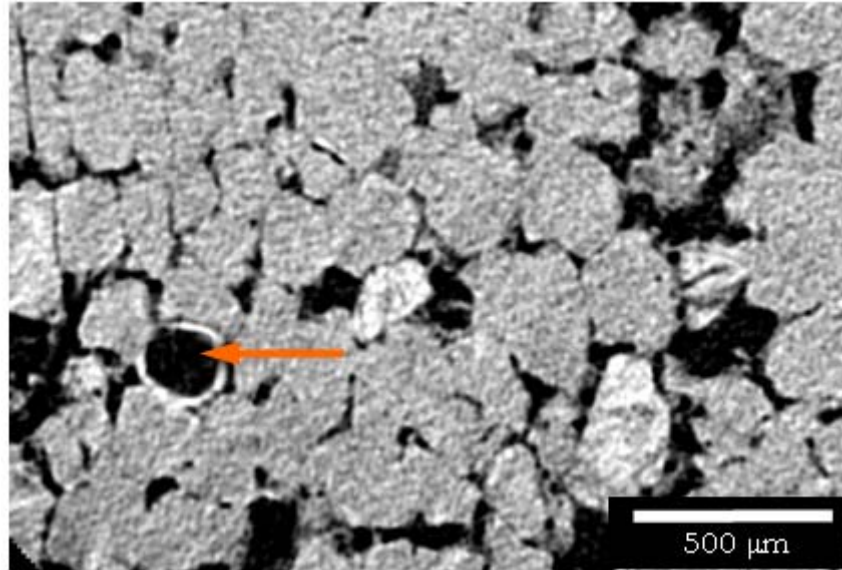
Poros intragranulares são originados a partir da dissolução parcial do grão, no caso de porosidade secundária. Na Figura 29 pode ser observado os poros intragranulares (seta A) e intergranulares (seta B). Em arenitos com bioclastos é comum encontrar porosidade intragranular primária, que seria a própria câmara de organismos, como os moluscos [49].

Figura 29 – Porosidade intragranular gerada a partir da dissolução parcial de um plagioclásio (seta A); Porosidade intergranular (seta B) [49].



A porosidade móldica também é comum nesses arenitos com bioclastos, principalmente devido à dissolução seletiva, tal como em feldspatos, e dissolução total de bioclastos, intraclastos carbonáticos e minerais pesados instáveis, um exemplo de poro móldico pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 – Microtomografia ilustrando poro móldico bem delimitado devido à presença de material residual (seta).



O meio poroso, representado em uma imagem microtomográfica 2-D binária, pode ser caracterizado pela função de fase de poro $Z(\mathbf{x})$ [41]:

$$Z(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \text{quando } \mathbf{x} \text{ pertence ao espaço poroso} \\ 0 & \text{quando não pertence} \end{cases} \quad (25)$$

onde \mathbf{x} é a posição em relação a uma origem arbitrária. A porosidade ϕ , a função de autocorrelação $C(\mathbf{u})$ e a função de autocorrelação normalizada $R(\mathbf{u})$ são definidas pelas médias estatísticas (denotadas por $\langle \rangle$), como apresentado abaixo:

$$\phi = \langle Z(\mathbf{x}) \rangle \quad (26)$$

$$C(\mathbf{u}) = \langle Z(\mathbf{x})Z(\mathbf{x} + \mathbf{u}) \rangle \quad (27)$$

$$R(\mathbf{u}) = \frac{\langle [Z(\mathbf{x}) - \phi][Z(\mathbf{x} + \mathbf{u}) - \phi] \rangle}{\phi - \phi^2} \quad (28)$$

onde \mathbf{u} é o deslocamento no plano da imagem.

Quando o meio é homogêneo os parâmetros estatísticos independem de \mathbf{x} , assim a porosidade é constante e $R(\mathbf{u})$ depende somente do vetor \mathbf{u} independente de \mathbf{x} . Além disso, se o meio poroso for isotrópico R_z é uma função somente de $u = |\mathbf{u}|$, independente da direção de \mathbf{u} .

Enquanto a porosidade dá a probabilidade de um pixel arbitrário pertencer à fase porosa, a função de autocorrelação $C(\mathbf{u})$ fornece a probabilidade de se encontrar dois pixels, separados por \mathbf{u} , pertencentes à fase porosa. Tais relações constituem as estatísticas de primeira e segunda ordem da imagem.

Basicamente a porosidade (ϕ) nada mais é do que a quantidade de "vazios" (poros) existentes em uma amostra qualquer e pode ser representada pela equação abaixo:

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} \quad (29)$$

onde V_p represente o volume poroso existente em uma amostra, V_s é o volume de sólido na amostra e V_t é o volume total da amostra.

A porosidade de rochas reservatório também pode ser dividida em porosidade absoluta (ou total) e porosidade efetiva. A absoluta leva em conta todos os poros, conectados ou não, já a porosidade efetiva mede apenas os poros que estão conectados entre si.

3.7.2 Permeabilidade (k)

A permeabilidade (k) é a propriedade de uma rocha, ou qualquer outro material, de permitir a passagem de água ou outro fluido, como petróleo, em maior ou menor vazão por unidade de área. É de grande importância na determinação das características de fluxo dos hidrocarbonetos em reservatórios de petróleo, gás e da água nos aquíferos. A unidade de permeabilidade é o Darcy ou, mais habitualmente, o mili-Darcy ou mD ($1 \text{ Darcy} = 1 \times 10^{-12} \cdot \text{m}^2$). A permeabilidade é usada para calcular taxas de fluxo através da lei de Darcy.

Para que uma rocha seja considerada um reservatório de hidrocarbonetos explorável, a sua permeabilidade deve ser maior que cerca de 100 mD (o valor exato depende da natureza do hidrocarboneto - reservatórios de gás com permeabilidades mais baixas ainda

são exploráveis devido à menor viscosidade do gás). Rochas com permeabilidades significativamente mais baixas que 100 mD podem formar selos eficientes. Areias não consolidadas podem ter permeabilidades de mais de 5000 mD [50].

A permeabilidade recebe três classificações; permeabilidade absoluta: é uma característica intrínseca do meio poroso em transmitir um dado fluido, ou seja, quando há apenas um fluido saturando a rocha; permeabilidade efetiva: é a capacidade de escoamento de uma fase fluída em presença de outras fases e é uma característica tanto do meio quanto da influência das demais fases no escoamento de um fluido; permeabilidade relativa: é a permeabilidade efetiva normalizada por um valor característico da permeabilidade, ou seja, é o valor da permeabilidade efetiva dividida por uma medida de permeabilidade, geralmente a permeabilidade absoluta. Neste trabalho enfocamos apenas a permeabilidade absoluta, pois as rochas analisadas não continham fluidos no seu interior.

Em 1856 Henry P. Darcy, após um estudo de filtragem de água em areias saturadas, determinou que a vazão de água através de um filtro de areia podia ser descrita pela equação [50]:

$$q = KA \frac{\Delta P}{L} \quad (30)$$

onde:

q – vazão volumétrica de água através do filtro de areia;

A – área da seção transversal do filtro;

L – comprimento da amostra;

ΔP – diferença de pressão na amostra;

K – constante de proporcionalidade.

A lei de Darcy, como ficou conhecida, foi mais tarde modificada para descrever o fluxo de outros fluidos além da água, e a constante K foi substituída por $\frac{k}{\mu}$, onde k é uma propriedade do material poroso (permeabilidade) e μ uma propriedade do fluido (viscosidade). A partir dessas modificações a lei de Darcy pode ser escrita por:

$$k = \frac{q \cdot \mu \cdot L}{A \cdot \Delta P} \quad (31)$$

3.7.3 Distribuição de Tamanho de Poros

As operações da morfologia matemática são usadas na determinação da distribuição de tamanho de poros de imagens de meios porosos. Para a determinação da distribuição dos tamanhos dos poros utiliza-se várias aberturas com uma sequência de elementos estruturantes (métrica D_{3-4} para este trabalho) com tamanho de raio crescente, $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{\max}$, onde δ_{\max} é tal que elimina todos os poros na operação de erosão. Mais detalhes sobre a morfologia matemática podem ser observados no Apêndice B. Tal processo de abertura é realizado sobre a fase branca de uma imagem binarizada, desta forma, muitas vezes as fases de uma imagem devem ser invertidas para a sua correta análise.

A função de distribuição acumulada normalizada $F(X, \delta)$ é dada por:

$$F(X, \delta) = \frac{\text{Mes}(X) - \text{Mes}(T_{\delta}(X))}{\text{Mes}(X)} \quad (32)$$

onde Mes designa a medida segundo a unidade escolhida e T_{δ} é o conjunto obtido após a operação de abertura, composto pelos objetos de tamanho superior a δ .

Para a determinação da distribuição de poros em imagens binárias 2-D, a unidade de medida consiste na área superficial dos poros. Desta forma, a distribuição de tamanho de poros será dada por:

$$F(r) = \frac{\phi - \phi(r)}{\phi} \quad (33)$$

onde ϕ é a porosidade total da imagem de partida e $\phi(r)$ é a porosidade da imagem após a operação de abertura com um disco (elemento estruturante) de raio r .

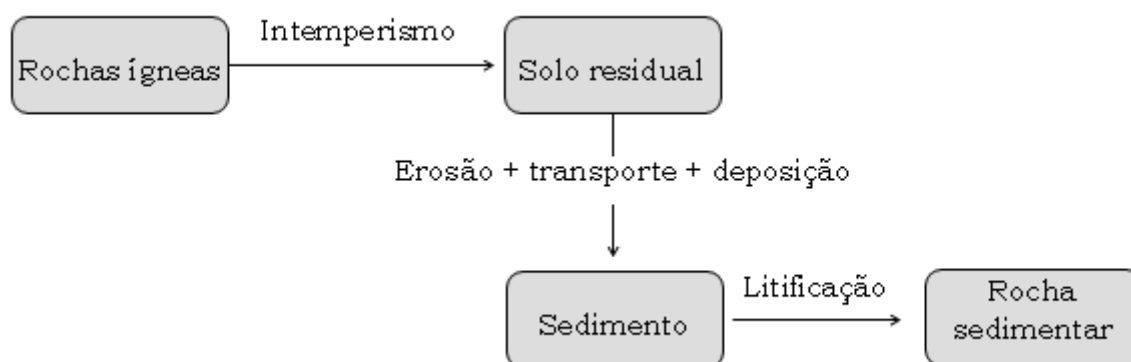
A porosidade da imagem de partida, ou seja, a imagem sem a realização de operações, pode ser obtida através da razão entre o número de pixels pertencente à fase de poro pelo número de pixels total da imagem. Já a porosidade $\phi(r)$ é obtida com esse mesmo procedimento, porém após realizar operações sucessivas de abertura, aumentando o valor de r até o ponto em que toda a porosidade foi eliminada por essa operação.

3.8 ROCHAS RESERVATÓRIO

Denomina-se de reservatório à rocha com porosidade e permeabilidade adequadas à acumulação de substâncias, tais como, água, gás, petróleo, etc.

A maior parte das reservas conhecidas encontra-se em arenitos e rochas carbonáticas, embora acumulações de petróleo também ocorrem em folhelhos, conglomerados ou mesmo em rochas ígneas e metamórficas.

As rochas reservatório são formadas por rochas sedimentares ou secundárias, são resultantes da consolidação de sedimentos, ou seja, partículas minerais provenientes da desagregação e transporte de rochas pré-existentes, bem como da deposição de qualquer material proveniente da atividade animal ou vegetal. O processo de formação destas rochas segue o fluxograma:



A litificação é a última fase para a formação da rocha reservatório, é definida por um conjunto complexo de processos que converte sedimentos em rocha consolidada. Dentre os processos destacam-se a compactação, cimentação e recristalização [51].

A compactação é uma das ações que mais afeta os sedimentos acumulados ao longo do tempo, o peso do material suprajacente comprime os sedimentos situados a maior profundidade. Os grãos são pressionados, juntando-se uns aos outros, havendo uma significativa redução dos espaços entre eles.

A cimentação tem um importante significado na litificação, na medida em que os sedimentos são convertidos em rochas sedimentares consolidadas. Os materiais de cimentação são arrastados em solução na água através dos espaços entre as partículas. O cimento, precipitando entre os grãos, preenche os espaços e liga as partículas. Os cimentos

mais comuns são a calcite, a sílica e óxidos de ferro. Muitas rochas sedimentares são litificadas por compactação, cimentação ou uma combinação dos dois processos.

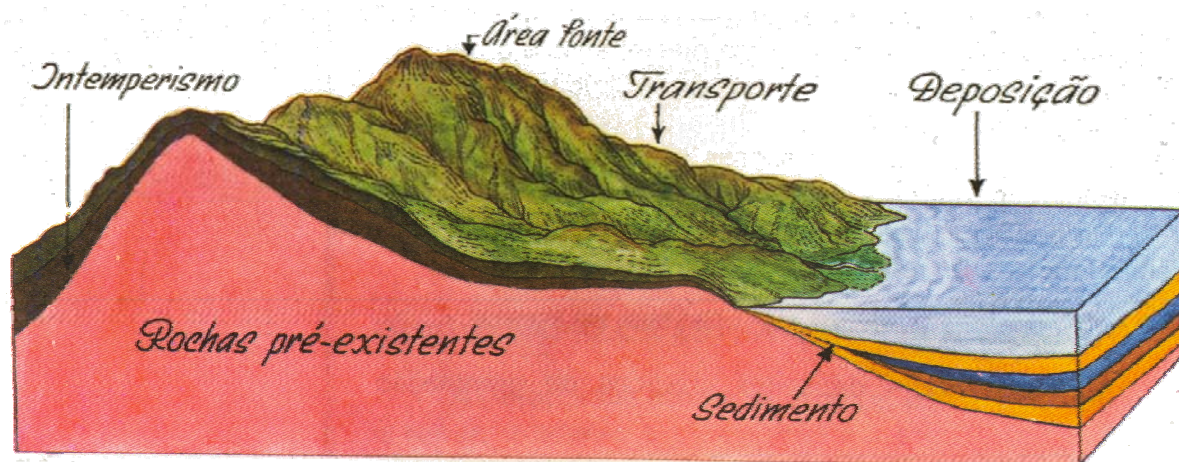
Na recristalização, sob condições de soterramento, ocorrem mudanças na mineralogia e na textura cristalina do material sedimentar. Dois exemplos são comuns. O primeiro é a transformação de aragonita em calcita, ambos compostos por carbonato de cálcio, porém de estruturas cristalinas distintas. Neste caso, também chamado de neomorfismo, há mudanças apenas no retículo cristalino, sendo mantida a composição original. O segundo é a mudança na composição química, denominada substituição, na qual ocorre a troca da calcita ou aragonita por sílica [52].

A Figura 31 mostra uma representação esquemática de uma área-fonte de ambiente de sedimentação marinha. Nesta figura também pode ser observado que os sedimentos vão depositando-se em camadas, os quais darão origem a uma rocha sedimentar com estrutura semelhante.

A composição de uma rocha reservatório (sedimentar) depende do modo que ela foi formada. Elas podem ser constituídas de [51]:

- 1) minerais que resistiram ao intemperismo;
- 2) minerais formados pelos processos de intemperismo;
- 3) produtos de precipitação química;
- 4) produtos biogênicos (ou biológicos).

Figura 31 – Representação esquemática de uma área-fonte de ambiente de sedimentação marinha [51].



No entanto, o mineral que mais está presente nas rochas sedimentares é o quartzo. Este mineral é praticamente inalterável, sofrendo apenas ligeiro desgaste e arredondamento pelo transporte. Já os feldspatos são mais frequentes em sedimentos com menor grau de transporte. Nos depósitos de origem química ou biogênica, merece destaque a presença de calcita.

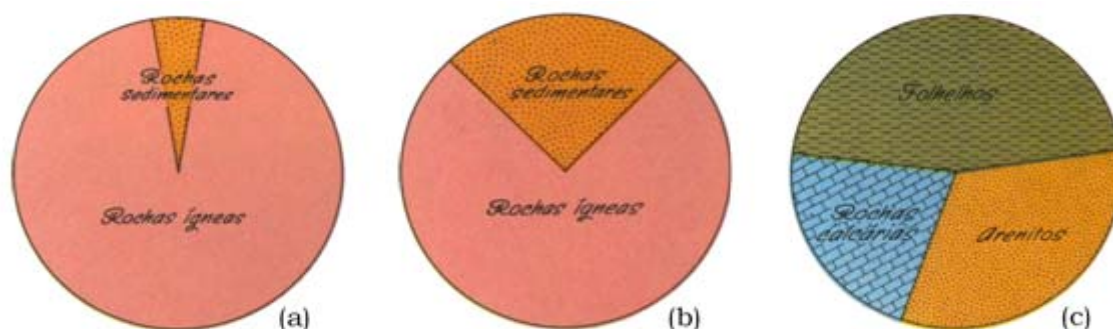
As rochas sedimentares podem ser classificadas obedecendo vários critérios, a Tabela 1 apresenta uma classificação resumida no que diz respeito a sua origem [53].

A Figura 32 apresenta a abundância relativa das rochas ígneas e sedimentares na crosta terrestre, bem como a frequência relativa dos tipos mais comuns de rochas sedimentares.

Tabela 1 – Classificação resumida das rochas sedimentares

Rocha de origem mecânica	Rocha de origem orgânica	Rocha de origem química
1. GROSSEIRAS: Conglomerados, Brechas	1. CALCÁRIAS: Calcários, Dolomitos	1. CALCÁRIAS: Estalactites e estalagmites, Mármore travertinos
2. ARENOSAS: Arenitos, Siltitos	2. SILICOSAS: Sílex	2. FERRUGINOSAS: Minérios de ferro
3. ARGILOSAS: Argilas, Argilitos, Folhelhos	3. FERRUGINOSAS: Depósitos ferruginosos	3. SALINAS: Cloretos, Nitratos, Sulfatos
—	4. CARBONOSAS: Turfas, Carvões	4. SILICOSAS: Sílex

Figura 32 – Abundância relativa das rochas ígneas e sedimentares na crosta terrestre. (a) em volume; (b) em área e (c) frequência relativa dos tipos mais comuns de rochas sedimentares [51].



3.8.1 Arenitos

O termo arenito corresponde à areia litificada. É composto por quartzo, feldspato (ou outros minerais de origem ígnea) e fragmentos líticos. Foi classificado com base em diagramas triangulares, considerando apenas as frações detríticas e os três componentes principais: quartzo, feldspato e fragmentos de rocha. Nessa classificação o critério mais importante é a composição mineralógica. Posteriormente, foi introduzido o tamanho dos grãos como critério, gradando de areias a argila.

Os arenitos formam-se em numerosos ambientes de sedimentação: marinho, lacustre, praial, estuarino, fluvial, eólico e periglacial. Quando, durante o transporte, as areias são bem lavadas e selecionadas pelas correntes, formam-se arenitos limpos. Por outro lado, quando as correntes são lamacentas e a deposição é rápida, não existem condições para seleção granulométrica e mineralógica, originando-se, então, um arenito impuro.

Os arenitos possuem coloração variada: geralmente são amarelados, avermelhados, cinzentos, castanhos ou brancos. A granulação média constitui textura comum [51]. Via de regra, são bem selecionados e apresentam-se bem estratificados, muitas vezes com estratificação cruzada, marcas de ondulação, concreções ou fósseis. Os grãos podem estar cimentados por uma matriz argilosa ou por sílica, calcita ou óxido de ferro. As rochas compostas quase que inteiramente de grãos de quartzo, com cimento silicoso, são conhecidas como arenitos puros ou ortoquartzitos. As partículas de areia apresentam um diâmetro que varia entre 62 μm até 1 a 2 mm.

A Figura 33 mostra a fotografia de um arenito avermelhado com granulação média e camadas estratificadas marcadas por micas, de fácil observação em afloramentos à beira de estradas.

Figura 33 – Arenito avermelhado com granulação média e camadas estratificadas marcadas por micas [51].



3.8.2 Siltitos

Os siltitos são rochas clásticas finas, com pelo menos 50 % de partículas de silte (partículas com diâmetro de 4 a 62 μm). Apresentam-se, em geral, finamente estratificados, porém os fenômenos de bioturbação podem obscurecer ou destruir a estratificação. Sua coloração pode ser cinza, negra, castanha ou amarela. Devido à sua granulação fina, os minerais são dificilmente percebidos. Os mais abundantes são o quartzo, feldspato, argila e a mica pode estar presente em alguns estratos. É comum, nos siltitos, a presença de nódulos, concreções ou fósseis.

Sua formação é detrítica, depositada por águas calmas fluviais ou marinhas, em estuários, planícies, lagos e lagoas. O nome silito refere-se tão somente à granulometria dos grãos que deram origem à rocha, nada dizendo sobre a real natureza dos mesmos. A Figura 34 mostra uma fotografia de um Silito amarelado com presença de nódulos.

Figura 34 – Siltito amarelado com presença de nódulos [51].

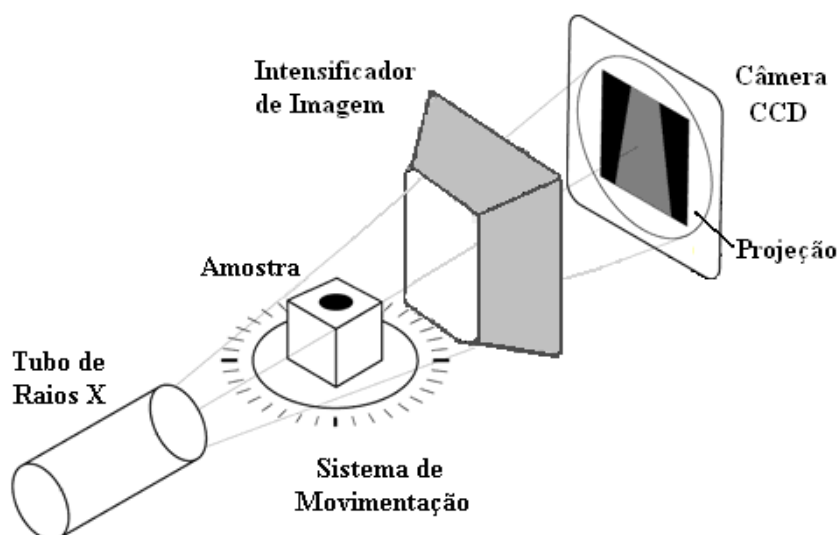


4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 SISTEMA MICRÓTOMO GRÁFICO SKYSCAN 1172

Neste trabalho foi utilizado um microtomógrafo, modelo 1172, fabricado pela empresa belga SkyScan [54], instalado em 2006 no Centro de Pesquisas da PETROBRAS (CENPES), Rio de Janeiro-RJ. Este equipamento é composto, basicamente, por uma fonte de raios X (que neste caso foi um tubo de raios X), um sistema de posicionamento e movimentação da amostra, um intensificador de imagens (cintilador) e um detector (câmera CCD). Um esquema desta configuração é apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Esquema básico de funcionamento de um microtomógrafo.



Também fazem parte do sistema microtomográfico 6 (seis) computadores dual core Intel Xeon 3.2 GHz, 320 GB de HD e 3 monitores LCD de 19", destes seis computadores, um, com 4 GB de memória RAM, é para aquisição dos dados microtomográficos, os outros cinco, um com 4 GB e os outros quatro com 2 GB de memória RAM, são utilizados para a reconstrução das imagens. Este microtomógrafo é considerado um equipamento de mesa, pois apesar do seu peso, cerca de 240 kg, possui dimensões compatíveis para ser utilizado em uma mesa de laboratório, como pode ser observado na Figura 36. Na Figura 37 pode-se observar o microtomógrafo com a porta de acesso ao movimentador de amostra aberta e em detalhe o porta amostras.

Figura 36 – Microtomógrafo da SkyScan modelo 1172 (adaptado de [54]).

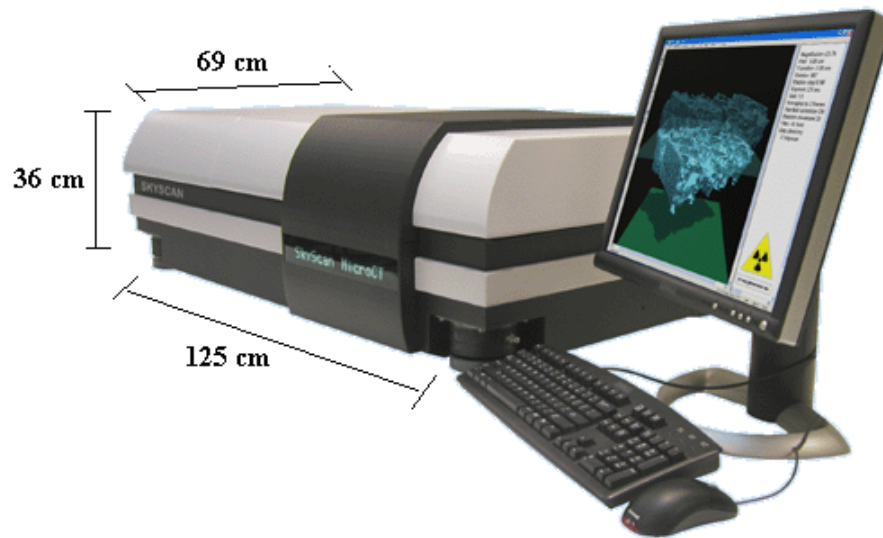


Figura 37 – Microtomógrafo da SkyScan modelo 1172, com detalhe do porta amostras.

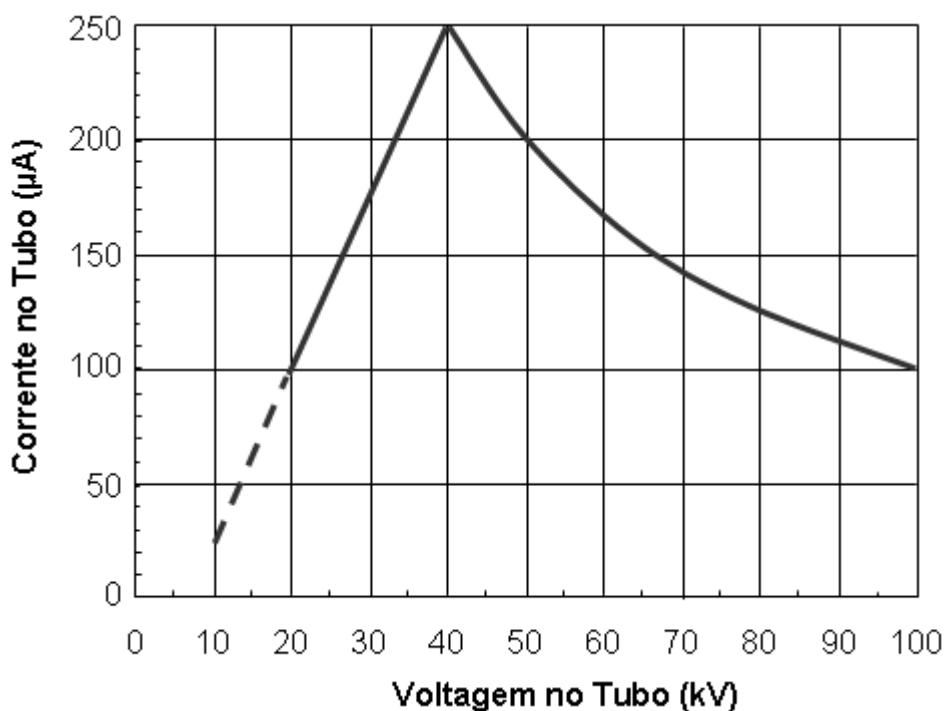


4.1.1 Tubo de Raios X

O microtomógrafo é composto por um tubo de raios X microfoco, modelo Hamamatsu L7901-01, refrigerado a ar, com uma tensão de operação de 20 a 100 kV,

variação de corrente elétrica de 0 a 250 μA e respeitando a potência máxima de 10 W. Possui “spot size” que varia de 5 a 7 μm , dependendo da potência utilizada. Seu anodo é de Tungstênio e possui uma janela de Berílio de 150 μm de espessura que facilita a passagem dos raios X de baixa energia [55]. A Figura 38 mostra a variação da corrente elétrica com a tensão aplicada no tubo de raios X.

Figura 38 – Curva característica da tensão versus corrente no tubo do Microtomógrafo da SkyScan modelo 1172 (adaptado de [55]).



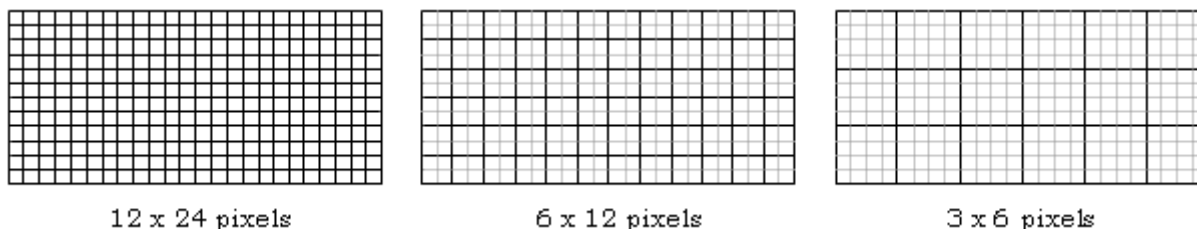
4.1.2 Câmera CCD

A detecção dos raios X é feita através de uma câmera CCD de 10 Mp (2624 x 4000) modelo Hamamatsu C4742-55-12HRF, 12 bit, refrigerada pelo efeito peltier e acoplada, através de um conjunto de fibras ópticas, a um cintilador cônico de fósforo, que tem a função de converter os raios X recebidos em luz visível. O tamanho de cada célula da CCD é de 5,9 x 5,9 μm , resultando em uma área efetiva de 15,5 x 23,6 mm.

Esta câmera possui um sistema que soma pixels adjacentes, desta forma, modifica virtualmente a quantidade de pixels da CCD, possibilitando que os arquivos das imagens adquiridas fiquem menores, consequentemente ocupando menos espaço ao serem salvos no computador ou discos de armazenamento, as custas da diminuição na resolução

espacial. Este sistema possibilita três configurações de câmera, 2624 x 4000, 1312 x 2000 e 656 x 1000 pixels. Na Figura 39 pode-se observar um sistema semelhante ao mencionado, porém com um menor número de pixels.

Figura 39 – Esquema do sistema de soma de pixels da câmera CCD.



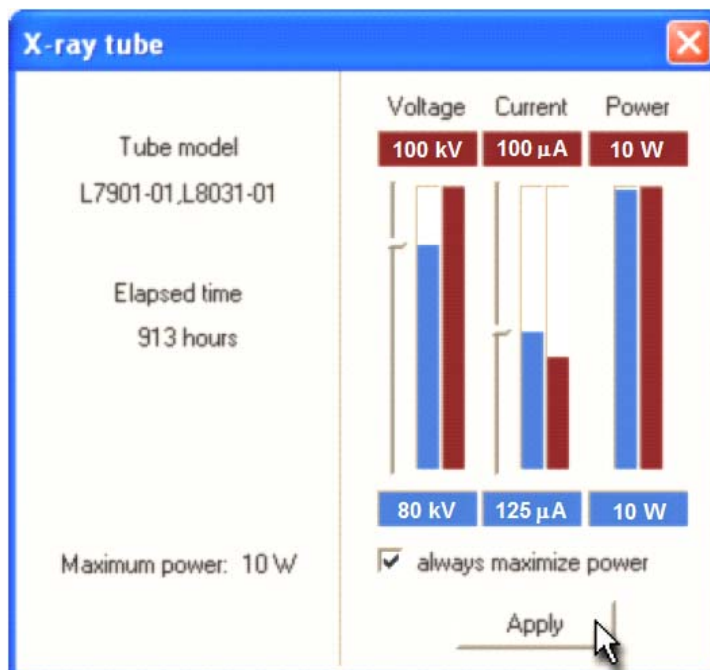
Esta câmara possibilita resoluções espaciais máximas de 0,6 μm , quando utilizado a configuração de 2624 x 4000 pixels, 1,2 μm para 1312 x 2000 pixels e 2,4 μm para a câmera com 656 x 1000 pixels [56].

4.1.3 Parâmetros de Aquisição

Vários são os parâmetros que podem ser alterados na microtomografia de raios X, com o objetivo de melhorar a qualidade das imagens microtomográficas, dentre eles podemos citar a tensão e a corrente no tubo de raios X, passo angular, "frames", resolução espacial e filtros físicos, os quais serão melhores explicados nas próximas subseções.

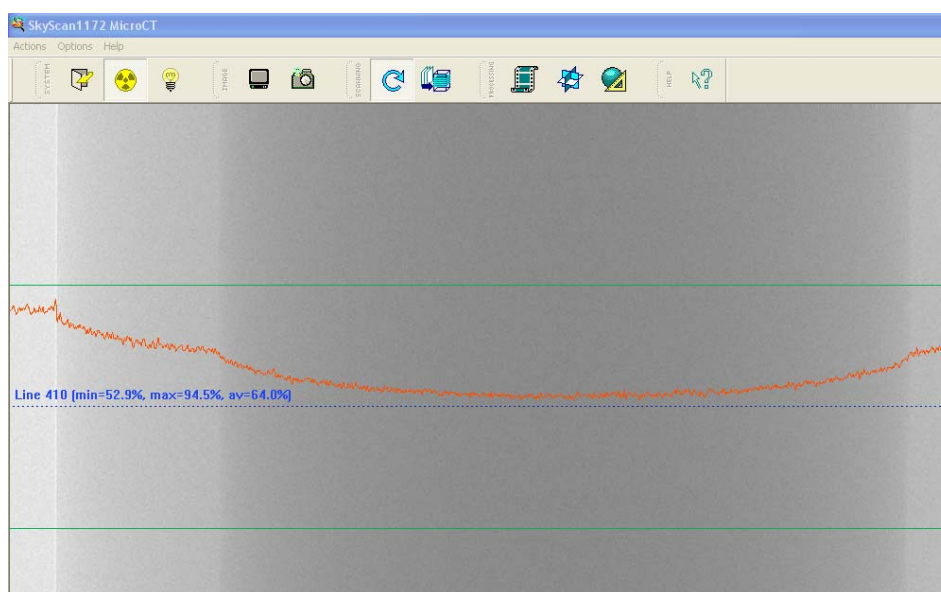
4.1.3.1 Tensão no tubo de raios X

Um dos fatores mais importantes na microtomografia é a escolha da tensão adequada para a aquisição dos dados, pois cada tensão a ser escolhida depende das características da amostra. Se a amostra contiver na sua composição, material com alta atenuação para os raios X, a tensão utilizada deve ser maior do que para uma amostra que seja menos atenuante. O mesmo ocorre para amostras que possuam as mesmas características, diferenciando apenas pela sua espessura, ou seja, uma amostra com diâmetro maior atenuará mais os raios X do que outra amostra com diâmetro menor. A Figura 40 mostra a tela de comando para alteração na tensão do tubo de raios X.

Figura 40 – Tela de comando da tensão no tubo de raios X.

Para verificar qual a melhor tensão para cada amostra neste trabalho, houve a necessidade da utilização do perfil de transmissão que o software de aquisição da SkyScan disponibiliza. Neste perfil é analisada a transmitância, ou seja, quanto dos raios X incidentes são transmitidos através da amostra. Para uma medida ideal este valor deve ficar próximo de 50 %.

A Figura 41 mostra a tela de aquisição do programa SkyScan 1172, onde a linha laranja representa o perfil de transmissão dos raios X através da amostra, a linha verde inferior indica 0 % de transmissão e a linha verde superior indica 100 % de transmissão, a linha azul indica a posição onde o perfil está sendo analisado.

Figura 41 – Tela do software de aquisição do SkyScan1172.

Os valores das tensões utilizadas para as amostras analisadas neste trabalho são apresentados na Tabela 2, juntamente com outros parâmetros descritos na sequência.

Tabela 2 – Valor dos parâmetros utilizados nas aquisições dos dados microtomográficos para as amostras analisadas

Amostra	Tensão (kV)	Corrente (µA)	Frames	Passo angular (°)	Resolução Espacial (µm)
107	70	142	5	0,25	2,9
108	70	142	4	0,25	2,9
403	70	142	5	0,5	3,9
MC16	70	142	5	0,25	2,5
PG8	80	125	5	0,25	5,0
PG19	70	142	5	0,25	5,0
PG6	70	142	5	0,25	2,9
Tumblagooda	50	200	5	0,5	2,9
Esferas	80	125	5	0,5	5,0
Linhas de nylon	70	142	5	0,25	5,0
Água destilada	30	170	2	0,25	3,1

4.1.3.2 Corrente no tubo de raios X

Este parâmetro possibilita uma melhor qualidade nos dados microtomográficos, pois através dele, é definida a estatística da medida, ou seja, quanto maior a corrente de elétrons, maior será a produção de raios X e conseqüentemente a transmitância, melhorando desta forma, a estatística da medida.

No entanto, este valor é limitado pela potência máxima do tubo (10 W), impossibilitando, para algumas tensões, o seu aumento, portanto, sua alteração está intimamente ligada com a tensão aplicada no tubo. Esta dependência pode ser observada na Figura 38, onde é mostrado a curva característica da tensão versus corrente no tubo.

Os valores das correntes utilizadas para as amostras analisadas neste trabalho são apresentados na Tabela 2, juntamente com outros parâmetros.

4.1.3.3 Passo angular

O passo angular nada mais é do que o incremento dado após a aquisição de cada projeção, ele garante uma melhor qualidade do contorno de grãos e poros existente nas amostras, quanto menor for o passo angular melhor a qualidade da imagem. No entanto, diminuir muito o passo angular não resolve, pois maior será a quantidade de imagens geradas e, conseqüentemente, o tamanho total dos arquivos, podendo chegar a mais de 15 GB por amostra. Outro fato importante é a limitação desta melhora, após realizar medidas com passo angular de 0,5°, 0,25° e 0,1°, verificamos que o passo angular de 0,25° era suficiente para nossas medidas, não prejudicando a qualidade dos contornos de grãos e poros.

Este fator também contribui para o aumento no tempo total da medida, por exemplo, as aquisições podem ser realizadas com rotação de 180° ou 360°, no caso de uma mesma medida ser realizada com rotação de 360° e com passo angular de 0,5° ou 0,25°, o último resultaria no dobro do tempo de aquisição, pois geraria o dobro de arquivos.

4.1.3.4 “Frames”

Os “frames” são uma espécie de média que o microtomógrafo faz para cada projeção. Ao escolher, por exemplo, 3 “frames”, o microtomógrafo fará 3 aquisições na mesma posição, tirará uma média das 3 e só então, criará a imagem para aquela posição.

Este fator auxilia na diminuição do ruído nas imagens, no entanto, também existe um limite para a sua utilização, após realizarmos testes com 2, 5, 10 e 15 “frames” constatamos que, acima de 5 “frames” os resultados eram praticamente os mesmos, resultando apenas em um acréscimo no tempo total da medida, o que não é desejável.

4.1.3.5 Resolução espacial

A escolha correta da resolução espacial garante uma melhor visualização da microestrutura das amostras. Para tanto, não há um método de escolha padrão, o que se faz é verificar a imagem obtida em uma pré-visualização da amostra com uma resolução definida pelo operador. Neste trabalho foram várias as resoluções utilizadas, as quais são apresentadas na Tabela 2.

4.1.3.6 Resolução de contraste

Na realidade, a resolução de contraste não é um parâmetro que pode ser modificado quando o operador desejar. A resolução de contraste depende da energia do feixe de raios X, da resolução espacial, da composição e espessura da amostra, entre outros fatores.

Para este trabalho calculamos a resolução de contraste, através da Equação (24) da subseção 3.5.5, para 4 materiais: água, ar, plástico e vidro, e duas tensões no tubo, como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores da resolução espacial e resolução de contraste para quatro materiais.

Material	Tensão (kV)	Resolução Espacial (μm)	Resolução de Contraste (%) *
Água	30	3,1	1,64
Ar	30	3,1	3,89
Plástico	30	3,1	2,38
Vidro	70	5,0	0,11
Ar	70	5,0	1,68

4.1.3.7 Filtros físicos

Com o objetivo de diminuir (ou eliminar) os raios X de baixa energia, o microtomógrafo conta com 3 configurações para utilização de filtros em frente a câmera CCD: filtro de 1 mm de alumínio, 1 mm de alumínio justaposto com cobre e a opção sem filtro. Neste trabalho, optou-se pela utilização do filtro de 1 mm de alumínio, pois se constatou que havia uma grande diminuição no efeito de "bean hardening" com a sua utilização.

4.2 AMOSTRAS

Com exceção da amostra da formação Tumblagooda, que foi retirada de um afloramento no Kalbari National Park na Austrália e cedido pelo CENPES/PETROBRAS, todas as outras amostras de rocha foram retiradas da Bacia do Rio Tibagi. Na Tabela 4 são apresentados as formações geológicas que compõem a Bacia do Rio Tibagi e na Figura 42 pode ser visualizado a localização da Bacia no Estado do Paraná [57].

Em detalhes na Figura 43 é apresentada uma região do mapa geológico na qual está inserida a bacia do Rio Tibagi, ao centro, em azul, aparece o Rio Tibagi, bem como a localização onde foram coletadas as amostras utilizadas neste trabalho. A coleta foi realizada por dois alunos, um de mestrado e outro de doutorado [58]. Na Tabela 5 é apresentado um resumo das amostras das rochas utilizadas, com seu local de coleta, grupo e formação. Tais rochas foram selecionadas para representar rochas de fácil análise (com poros maiores e sem argila) e rochas de difícil análise (poros menores e muitas vezes com argila).

Tabela 4 – Composição da Bacia do Rio Tibagi.

Grupo	Formação	% na área da Bacia
Grupo Açungui	Itaiacoca e Votuverava	0,28
	Suite Monzo Granitos e Granodioritos Porfiróides	4,56
Grupo Castro	--	3,04
Grupo Paraná	Furnas e Ponta Grossa	14,64
Grupo Itararé	Campo do Tenente, Mafra e Rio do Sul	23,79
Grupo Guatá	Rio Bonito e Palermo	9,86
Grupo Passa Dois	Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto	10,87
Grupo São Bento	Botucatu	0,79
	Serra Geral	29,14
Grupo Bauru	Caiuá	0,09
	Aluviões	2,94

Figura 42 – Mapa da localização da Bacia do Rio Tibagi [57].

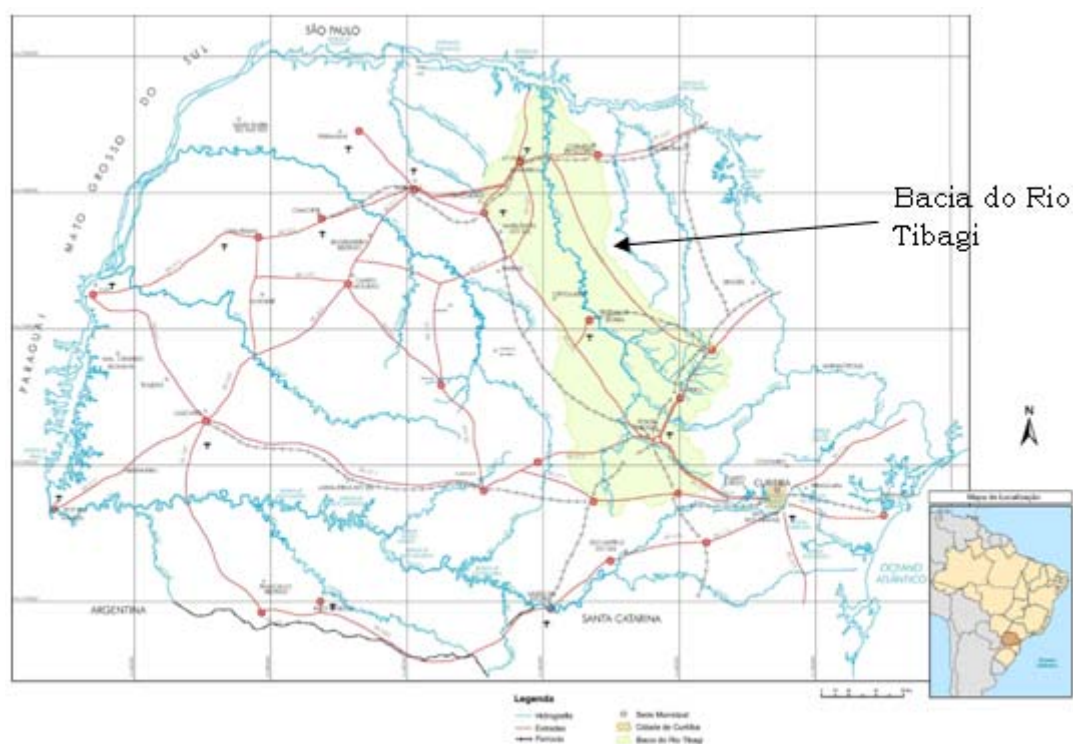


Figura 43 – Mapa geológico da Bacia do Rio Tibagi (adaptado de [58]).

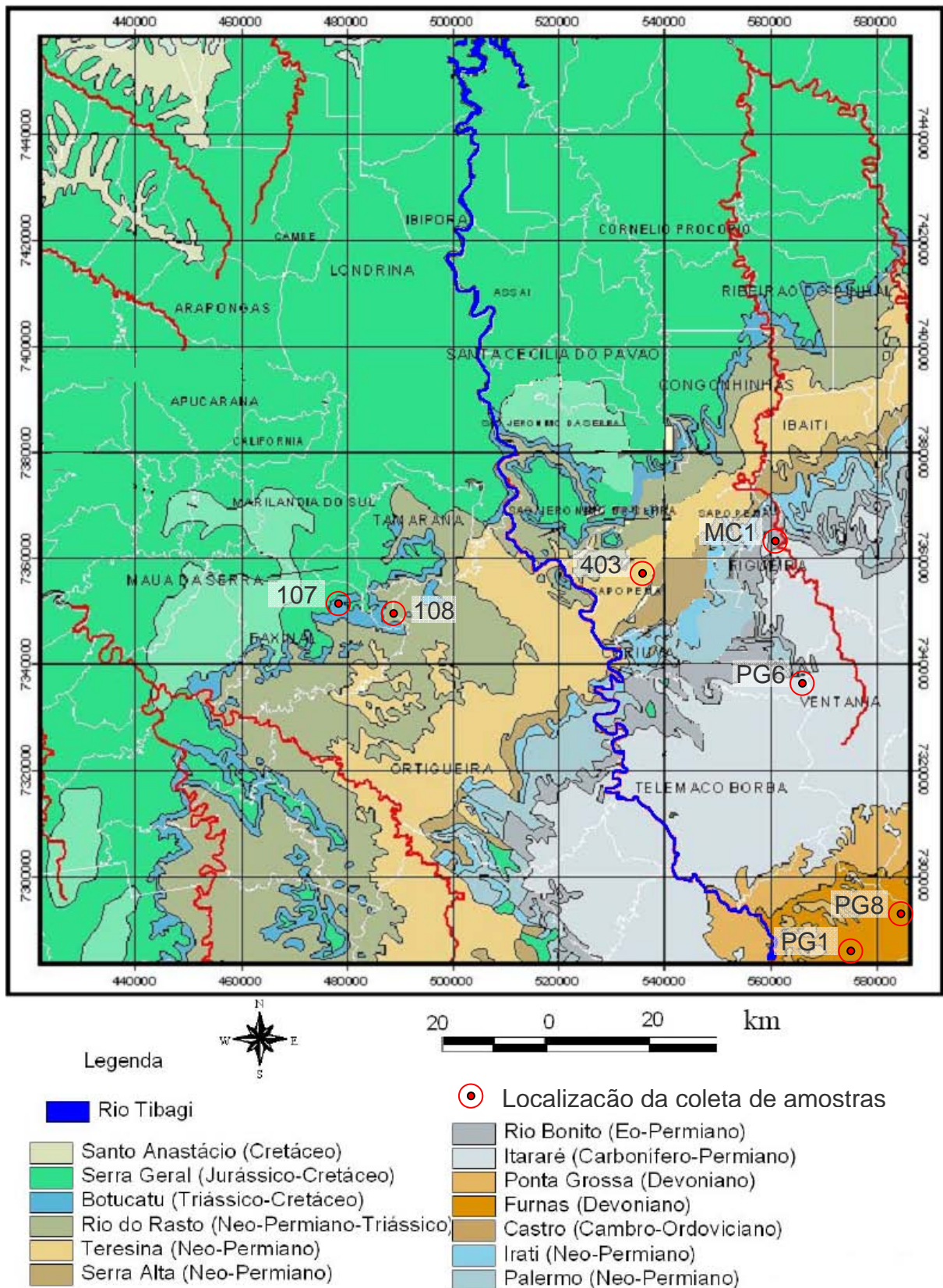


Tabela 5 – Características principais das amostras utilizadas.

Amostra	Grupo	Formação	Local de coleta	Descrição
107	São Bento	Botucatu	Faxinal-PR	Arenito silicificado.
108	Passa Dois	Rio do Rastro	Mauá da Serra-PR	Arenito siltoso.
403	Passa Dois	Teresina	Sapopema-PR	Arenito siltoso, laminação bem fina, cinza alaranjado.
MC16	Guatá	Rio Bonito	Figueira-PR	Siltito.
PG6	Itararé	Rio do Sul	Curiúva-PR	Siltito amarelo com seixos arredondados encravados.
PG8	Paraná	Furnas	Tibagi-PR	Arenito grosso com baixo grau de seleção granulométrica e presença de muscovita.
PG19	Paraná	Furnas	Tibagi-PR	Arenito grosso com baixo grau de seleção granulométrica.
Turnblagooda	Dirk Hartog	Turnblagooda	Austrália	Arenito grosso.

4.2.1 Arenito 107 (Formação Botucatu)

Pertence ao Grupo São Bento, que é marcado por ambiente de deposição desértico (Formação Botucatu) e por derrames basálticos (Formação Serra Geral). Este grupo é bastante marcante na porção inferior da bacia hidrográfica do rio Tibagi.

A Formação Botucatu, de idade jurássico-cretácea, aflora nos Estados de São Paulo e Paraná e raramente ultrapassa 100 m de espessura. Essa formação constitui-se quase que inteiramente de arenitos de granulação fina a média, homogêneos, com boa seleção de grãos foscos com alta esfericidade; são avermelhados e exibem estratificação cruzada tangencial de médio a grande porte, característica de duna caminhante.

A Formação Botucatu representa os diversos sub-ambientes de um grande deserto de aridez crescente, cuja existência se prolonga até a ocasião do vulcanismo basáltico.

O empilhamento de grandes dunas em vastas áreas foi a característica dominante desse deserto [58].

Para este trabalho foi utilizada uma amostra de arenito silicificado coletado de um afloramento no município de Faxinal-PR, de aproximadamente 5 x 5 mm de largura e 15 mm de altura, como pode ser visto na Figura 44 onde aparece uma fotografia da amostra.

Figura 44 – Arenito da Formação Botucatu (amostra 107).



4.2.2 Arenito 108 (Formação Rio do Rastro)

Pertence ao Grupo Passa Dois, que em sua porção no estado do Paraná e, mais especificamente, na bacia hidrográfica do rio Tibagi, aflora em faixas estreitas e constitui-se de quatro formações: Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rastro.

A Formação Rio do Rastro, de idade neo-permiana-triássica, apresenta espessura de até 400 m nos afloramentos da borda leste da Bacia Sedimentar do Paraná. A formação constitui-se de arenitos, siltitos e, secundariamente, argilitos. Os arenitos formam lentes relativamente curtas, em geral, com menos de 3 m de espessura, podendo chegar a 10 m. Nos afloramentos há predomínio das cores vermelhas, podendo ocorrer tonalidades de chocolate, púrpura e verde. A estratificação é predominantemente horizontal.

Segundo Schneider et al. [59], essa formação está dividida em dois membros: Serrinha e Morro Pelado. De acordo com esses autores, o Membro Serrinha é constituído de siltitos esverdeados a arroxeados, com intercalações de argilitos, arenitos finos

e bancos carbonáticos, por vezes oólitos, na base da formação, e sua deposição ocorreu em ambiente de planície de maré; o Membro Morro Pelado, constitui-se de argilitos e siltitos vermelhos, com intercalações de corpos lenticulares de arenitos finos situados na parte superior da formação.

Para este trabalho foi utilizada uma amostra de arenito siltoso, coletado de um afloramento no município de Mauá da Serra-PR, de aproximadamente 5 x 5 mm de largura e 15 mm de altura, como pode ser visto na Figura 45 onde aparece uma fotografia da amostra.

Figura 45 – Arenito da Formação Rio do Rastro (amostra 108).



4.2.3 Arenito 403 (Formação Teresina)

Também pertencente ao Grupo Passa Dois, a Formação Teresina [59] é constituída essencialmente por ritmitos alternados de argilitos e folhelhos cinza escuros, com siltitos e arenitos muito finos. Na parte superior ocorrem calcários, por vezes oolíticos, e leitos de coquina.

Características litológicas indicam uma bacia sob condições de águas rasas, agitadas, dominadas por marés. A presença de calcários oolíticos e laminações algálicas sugerem ambientes de inframaré, entremaré e até supramaré [59].

Para este trabalho foi utilizada uma amostra de arenito siltoso coletado de um afloramento no município de Sapopema-PR, com laminação bem fina e cor cinza alaranjado, de aproximadamente 7 x 7 mm de largura e 13 mm de altura, como pode ser visto na Figura 46 onde aparece uma fotografia da amostra

Figura 46 – Arenito da Formação Teresina (amostra 403).



4.2.4 Siltito MC16 (Formação Rio Bonito)

Pertence ao Grupo Guatá que, segundo Schneider et al. [59], constitui-se de siltitos cinza-esverdeados e arenitos, com intercalações de camadas de carvão e de folhelhos carbonosos.

A Formação Rio Bonito, de idade Eo-permiana, aflora nos estados de Santa Catarina e Paraná, contendo espessura máxima de 269 m. É constituída, nos terços inferior e superior, predominantemente por arenitos. No terço médio prevalecem siltitos e folhelhos contendo camadas de carvão e calcários com ocasionais intercalações de arenitos [58].

As associações litológicas e estruturais observadas, são típicas em um contexto de deposição flúvio-deltaica na base da formação, que posteriormente, evolui para um ambiente marinho transgressivo na porção média e culmina com um ambiente marinho litorâneo na porção superior da formação [59].

Para este trabalho foi utilizada uma amostra de siltito coletado de uma mina de carvão, explorada pela Companhia Carbonífera do Cambuí, localizada no município de Figueira-PR, cor cinza escuro, de aproximadamente 4 x 5 mm de largura e 16 mm de altura, como pode ser visto na Figura 47 onde aparece uma fotografia da amostra.

Figura 47 – Arenito da Formação Rio Bonito (amostra MC16).



4.2.5 Siltito PG6 (Formação Rio do Sul)

Pertence ao Grupo Itararé [59] que tem espessura máxima em torno de 1300 m, assinalada no centro-oeste do estado de São Paulo, a qual diminui gradativamente em direção às rochas da borda da bacia. Os litotipos mais comuns desse grupo são os argilitos, arenitos, diamictitos, siltitos e folhelhos.

A Formação Rio do Sul constitui a parte superior do Grupo Itararé, sendo a sua porção basal constituída por espesso pacote de folhelho negro (folhelho Lontras) que representa depósito marinho profundo ou prodeltaico. Segue-se um pacote de turbiditos areno-pelíticos que representam uma sedimentação de leques submarinos, associado a diamictitos e arenitos fluidizados [59].

Para este trabalho foi utilizada uma amostra de siltito amarelado, com seixos arredondados encravados, coletado de um afloramento localizado no município de Curiúva-PR, de aproximadamente 7 x 8 mm de largura e 17 mm de altura, como pode ser visto na Figura 48 onde aparece uma fotografia da amostra.

Figura 48 – Arenito da Formação Rio do Sul (amostra PG6)

4.2.6 Arenito PG8 (Formação Furnas)

Pertence ao Grupo Paraná [59], que se originou em um evento transgressivo marinho, possivelmente relacionado ao domínio andino. O Grupo Paraná é constituído de uma sequência arenosa basal e de uma sequência argilosa superior. São reconhecidas no grupo duas formações: Furnas e Ponta Grossa – ambas aflorantes nos domínios sul (curso superior) da bacia hidrográfica do rio Tibagi.

A Formação Furnas, do Devoniano Inferior, constitui um pacote com cerca de 200 m de espessura e sua litologia é composta de arenitos esbranquiçados, de granulação média a muito grossa, pobremente classificados e com matriz caulínica. Localmente, intercalam-se camadas delgadas de material argiloso a siltico micáceo ou de arenito fino. Na base, a formação pode apresentar conglomerados com até pouco mais de um metro de espessura, cujos seixos centimétricos de quartzo e quartzito são mal arredondados e dispersos em matriz arenosa grossa. Em vários níveis do pacote arenoso também podem ser encontrados pequenos seixos dispersos, de quartzo ou quartzito [60].

A Formação Furnas, com base em estudos desenvolvidos na sequência de topo, é geralmente considerada o registro de uma transgressão marinha desenvolvida sobre topografia de relevo suave. Contudo, a sequência de base demonstra estratificações cruzadas acanaladas típicas de ambiente continental fluvial. Existem inúmeras indicações de que o transporte e a deposição dos detritos ocorreram com interferência de correntes relativamente fortes, em águas rasas, quando a bacia sofria lenta subsidência.

Para este trabalho foi utilizada uma amostra de arenito amarelo-esbranquiçado de granulação grossa, com baixo grau de seleção granulométrica, com presença de muscovita, coletado de um afloramento localizado no município de Tibagi-PR, de aproximadamente 7 x 9 mm de largura e 23 mm de altura, como pode ser visto na Figura 49 onde aparece uma fotografia da amostra.

Figura 49 – Arenito da Formação Furnas (amostra PG8).



4.2.7 Arenito PG19 (Formação Furnas)

Da mesma forma que o arenito PG8, o arenito PG19 pertence ao Grupo Paraná citado acima. Para este trabalho foi utilizada uma amostra de arenito amarelo-esbranquiçado de granulação grossa, distante 12 km, aproximadamente, de onde foi coletada a amostra PG8 no município de Tibagi-PR, com baixo grau de seleção granulométrica, de aproximadamente 5 x 5 mm de largura e 22 mm de altura, como pode ser visto na Figura 50 onde aparece uma fotografia da amostra.

Figura 50 – Arenito da Formação Furnas (amostra PG19).



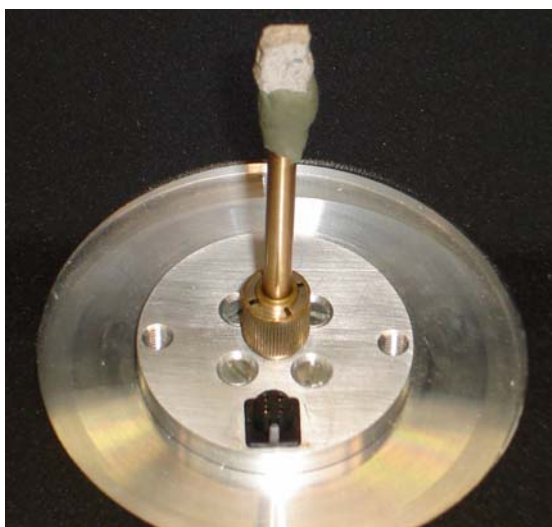
4.2.8 Arenito Tumblagooda

O arenito Tumblagooda vem de uma formação geológica depositada durante os períodos Silúrico ou Ordovícico (405 a 500 milhões de anos atrás) da Era Paleozóica, pertence ao grupo "Dirk Hartog", foi retirado de um afloramento no "Kalbari National Park", oeste da Austrália e cedido pelo CENPES/PETROBRAS.

A formação Tumblagooda possui uma espessura de aproximadamente 1400 metros de profundidade, até hoje nunca comprovado, apenas sugerido por dados sísmicos. Existem indícios de que o transporte e a deposição dos detritos ocorreram com interferência de correntes marítimas, com a presença de lagoas efêmeras [61].

Para este trabalho foi utilizada uma amostra de aproximadamente 6 x 6 mm de largura e 15 mm de altura, como pode ser visto na Figura 51 onde aparece uma fotografia da amostra sobre o porta amostras do microtomógrafo.

Figura 51 – Arenito da Formação Tumblagooda sobre o porta amostras do microtomógrafo.



4.2.9 Amostras para Avaliação da Acurácia da Metodologia

Para verificar a confiabilidade dos resultados obtidos com a metodologia da microtomografia de raios X, foram selecionadas amostras para serem medidas e os dados obtidos confrontados com valores confiáveis (conhecidos ou calculados).

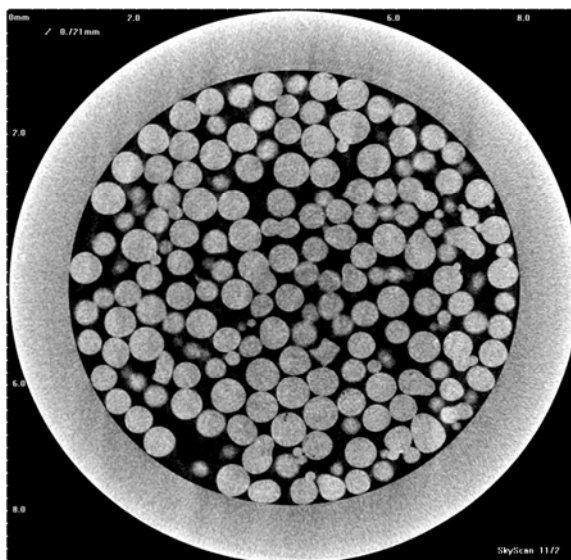
Inicialmente foi utilizado um tubo de vidro contendo esferas de vidro com diâmetro nominal de 600 μm (Figura 52), no entanto, como a obtenção da porosidade é

realizada com base nas seções 2-D (ou no volume 3-D), obtidas no processo de reconstrução, e a idéia inicial de utilizar as esferas era calcular geometricamente a porosidade e compará-la com as seções microtomografadas, tal intuito não foi possível. As esferas ficaram arranjadas aleatoriamente no interior do tubo, fato que dificultou o cálculo geométrico da porosidade, pois as seções microtomografadas apresentaram círculos com diferentes raios para esferas com diâmetro nominal teoricamente igual, como pode ser visto na Figura 53.

Figura 52 – Tubo de vidro contendo esferas de vidro com 600 μm de diâmetro.



Figura 53 – Seção 2-D das esferas de vidro com diâmetro de 600 μm .



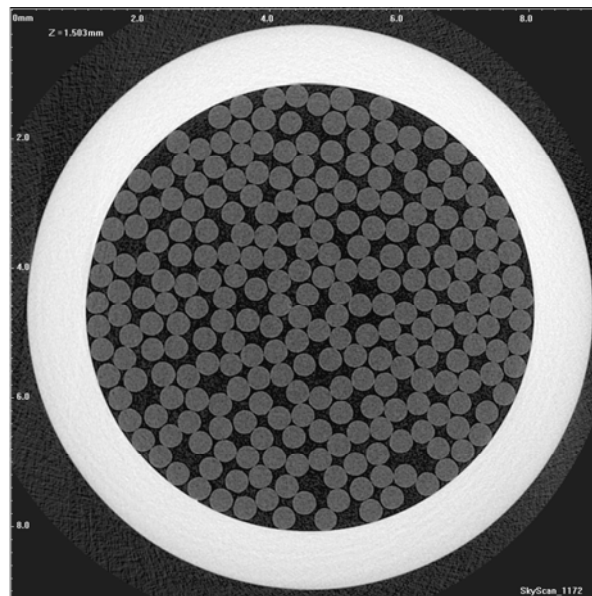
Outro ponto importante foi que após verificar as seções transversais das esferas, constatamos que as mesmas não eram perfeitamente esféricas e sim elípticas em sua maior parte, o que dificultaria a comparação com a distribuição de tamanho de poros encontrada pela metodologia microtomográfica. Para tanto, resolvemos também utilizar um tubo de vidro contendo linhas de nylon com diâmetro nominal de $355 \pm 8 \mu\text{m}$ (Figura 54),

onde, neste caso, sua seção transversal seria homogênea, possibilitando a comparação da porosidade calculada geometricamente com os valores encontrados com a metodologia microtomográfica. Na Figura 55 pode-se observar a homogeneidade de uma seção 2-D das linhas de nylon, desta forma, sabendo o diâmetro do tubo de vidro e das linhas de nylon, pode-se calcular a porosidade geométrica com facilidade.

Figura 54 – Tubo de vidro contendo linhas de nylon com $355 \pm 8 \mu\text{m}$ de diâmetro.



Figura 55 – Seção 2-D das linhas de nylon com diâmetro de $355 \pm 8 \mu\text{m}$.



4.3 SOFTWARES ESPECÍFICOS UTILIZADOS

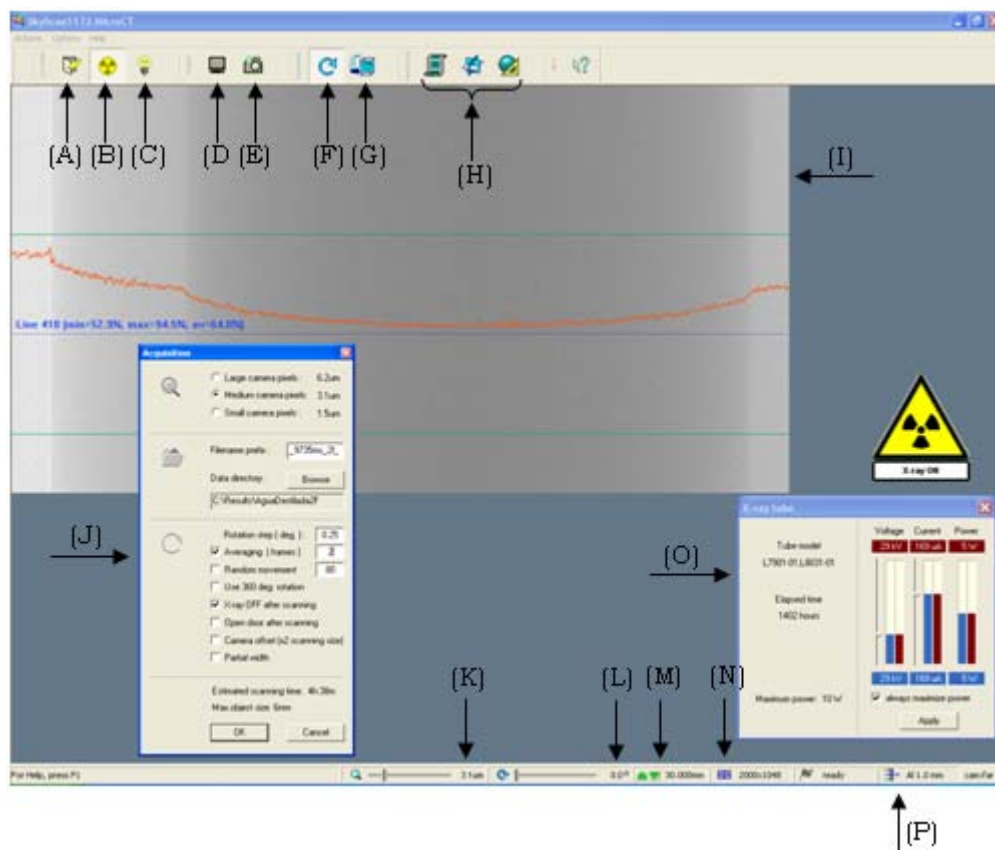
Trabalhos envolvendo microtomografia requerem a utilização de softwares específicos, tanto para a aquisição dos dados microtomográficos e reconstrução das imagens 2-D e 3-D, quanto para a análise microestrutural das imagens. Nas subseções seguintes são apresentados tais softwares com suas aplicações e funcionamento.

4.3.1 Software SkyScan1172

O software SkyScan1172 [54] faz o gerenciamento do microtomógrafo, é encarregado pela aquisição dos dados microtomográficos, salvando no computador arquivos no formato tif, em escala de cinza.

A Figura 56 mostra a tela de apresentação do software, onde também pode ser observado algumas setas indicando alguns comandos disponíveis, como discriminado abaixo:

Figura 56 – Tela do software SkyScan1172



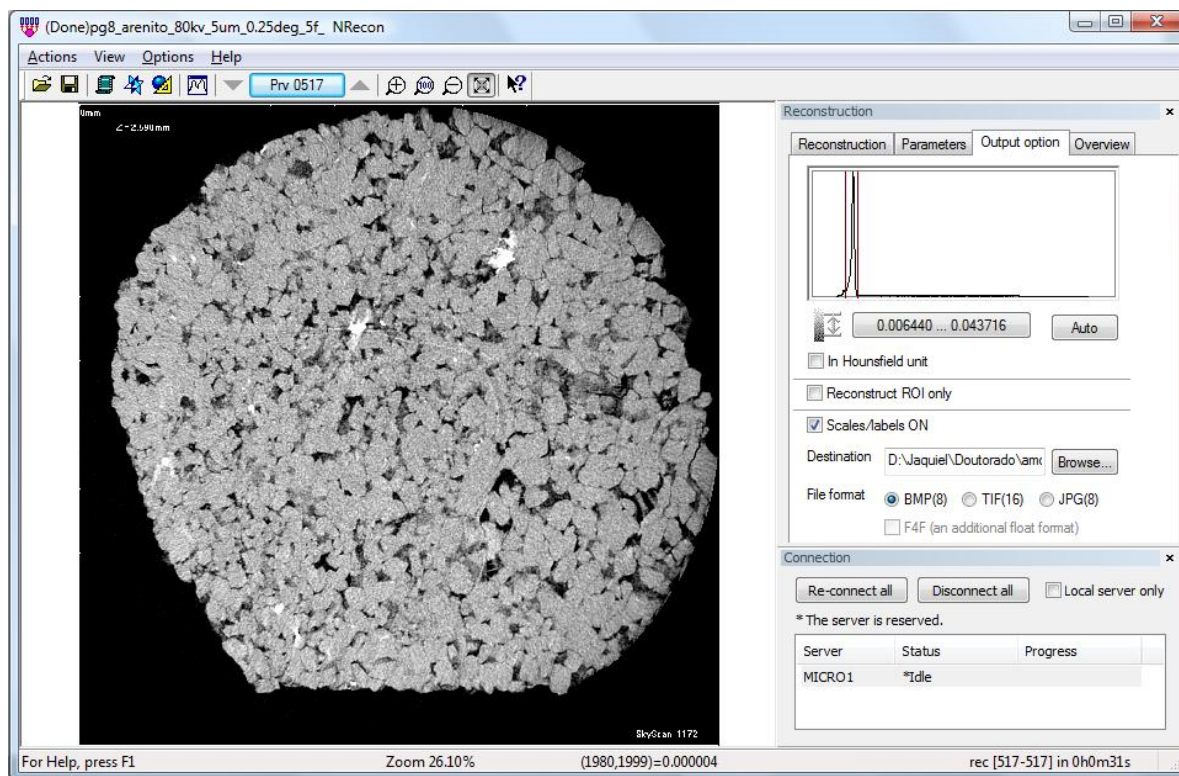
- Seta (A) – abre e fecha o compartimento no microtomógrafo que contém o porta amostras.
- Seta (B) – liga e desliga o tubo de raios X.
- Seta (C) – aciona uma câmera que fica dentro do compartimento que contém o porta amostras, tem a função de visualizar a amostra, para o caso de amostras maiores, para que não toque na CCD ou no tubo de raios X.
- Seta (D) – aciona a geração de projeções contínuas na tela da CCD.
- Seta (E) – adquire uma projeção na tela da CCD (como se fosse uma radiografia).
- Seta (F) – aciona o comando de aquisição indicado pela seta (J), que quando acionado o comando "ok" inicia a aquisição dos dados microtomográficos.
- Seta (G) – após o término da aquisição dos dados microtomográficos este comando inicia a reconstrução das seções 2-D.
- Seta (H) – ícones de atalho para programas de visualização e análise de imagens.
- Seta (I) – tela da câmera CCD.
- Seta (J) – comando para início da aquisição dos dados, onde também podem ser alterados alguns dos parâmetros de aquisição, tais como: passo angular, "frames", tamanho do pixel, entre outros.
- Seta (K) – comando para a escolha da resolução pretendida na medida.
- Seta (L) – rotaciona a amostra.
- Seta (M) – sobe ou desce a amostra em frente a CCD.
- Seta (N) – escolhe a grade de pixels na câmera CCD.
- Seta (O) – comando para alteração da tensão e corrente no tubo de raios X.
- Seta (P) – seleciona o filtro a ser utilizado (ou sem filtro).

4.3.2 Software NRecon

Após a aquisição dos dados microtomográficos as projeções são carregadas pelo software NRecon [62], que faz a reconstrução, através de um algoritmo de retroprojeção filtrada, das seções 2-D da amostra, tendo como entrada as projeções adquiridas no

microtomógrafo (formato tif) e gerando imagens no formato bmp, tif ou jpg em escala de cinza. A Figura 57 mostra a tela do software NRecon.

Figura 57 – Tela do software NRecon.



Neste software, através do comando "preview" que fornece uma pré-visualização de como a imagem 2-D ficará depois de reconstruída, o operador define alguns parâmetros importantes para a reconstrução das imagens, tais como:

- "Smoothing" - uma espécie de filtro mediano que tem como função diminuir o ruído nas imagens.
- Alinhamento - possibilita a correção de eventuais variações na posição da amostra durante a aquisição dos dados.
- Redução de "ring artifact" - reduz os efeitos dos artefatos de anel, provenientes da diferença entre as respostas de cada sensor da câmera CCD.
- "Beam hardening" - serve para amenizar os efeitos de endurecimento do feixe causados pelos raios X de baixa energia.

4.3.3 Software CTan

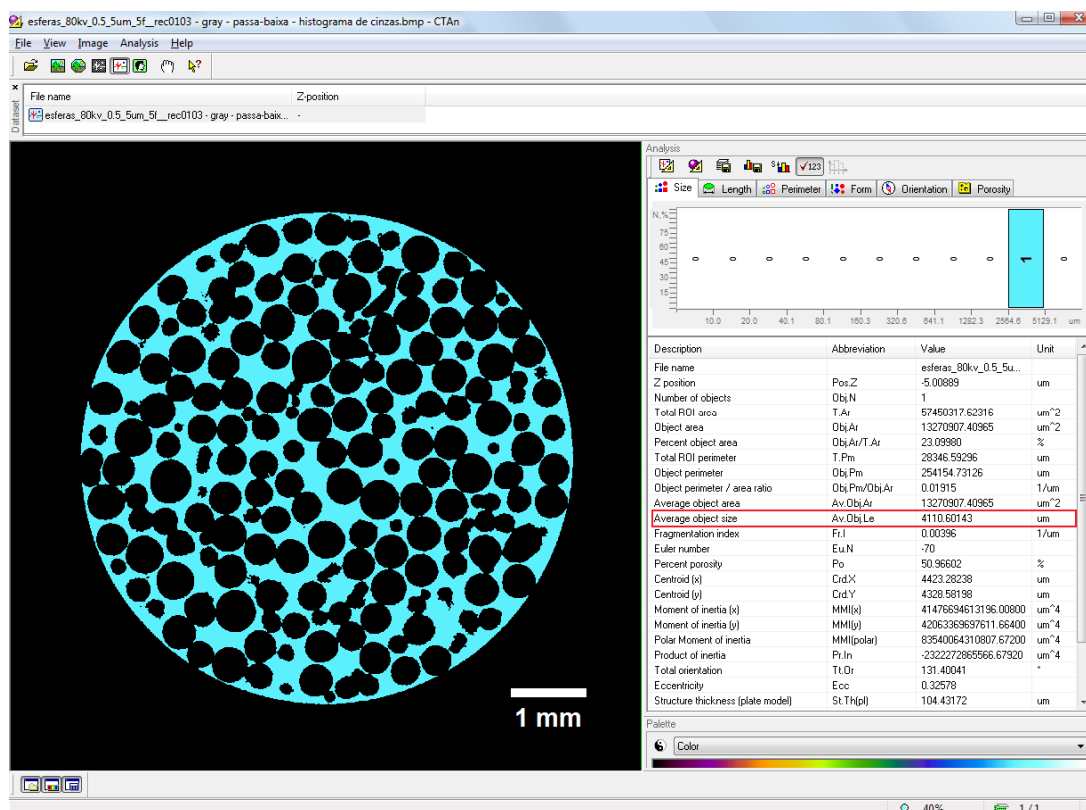
Com este software são realizadas as análises das imagens 2-D e 3-D, e a reconstrução de imagens 3-D. No que diz respeito a análise de imagens, o CTan [62] disponibiliza várias ferramentas, tais como: binarização (segmentação), porosidade, distribuição de tamanho de poros, área e diâmetro de objetos, número total de objetos, entre outros.

Com relação à distribuição de tamanho de poros do CTan, constatamos que para realizar tal distribuição o software (versão 1.6.1.1) realiza o cálculo da área de cada objeto (poro) e calcula um círculo que contenha aquela área, deste círculo é retirado o raio que irá representar o referido poro, o que no caso da análise de imagens microtomográficas não é desejável.

Na maioria dos casos os poros estão interligados, formando uma rede de poros, conseqüentemente, na óptica do software CTan, existe apenas uma área contínua, ou seja, se todos os poros estiverem interligados entre si em uma imagem, o software irá apresentar uma distribuição de tamanho de poros com apenas um poro, com diâmetro referente a área total, o que na realidade não é verdade.

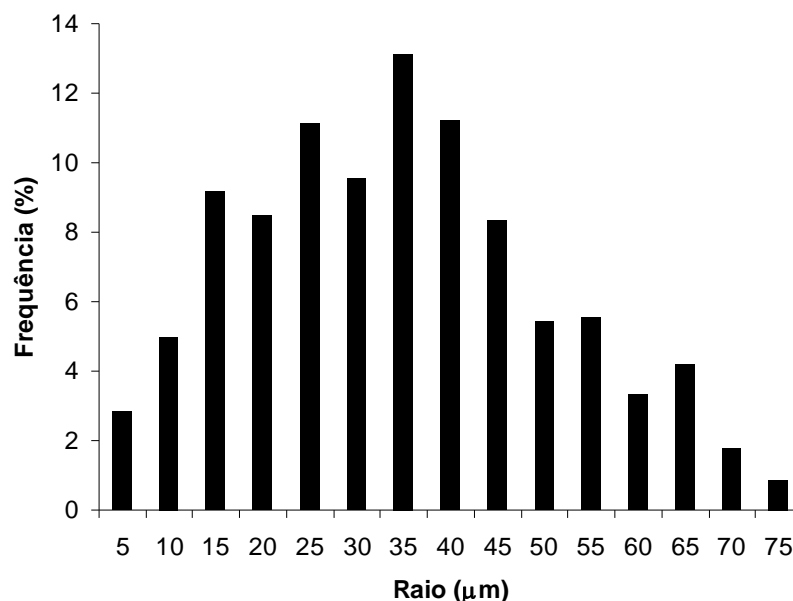
A Figura 58 apresenta a tela do software CTan, onde está sendo analisado um tubo de vidro contendo esferas de vidro. Este é um exemplo da distribuição de tamanho de poros "incorreta" que o CTan fornece. Como todos os poros (fase azul) estão conectados, o CTan reconhece como apenas um poro, com 4,1 mm de diâmetro (retângulo vermelho na Figura 58).

Figura 58 – Tela do software CTan.



Na presente versão do software CTan este “problema” poderia ser contornado para algumas situações, desde que fosse utilizado outros softwares para esqueletonização das regiões diferenciadas que o CTan normalmente aglutinaria. No entanto em alguns casos esse procedimento não funcionaria e o “problema” persistiria.

Portando, devido a esta análise, optamos por utilizar o software Imago para a determinação da distribuição de tamanho de poros das amostras analisadas. A Figura 59 apresenta a distribuição de tamanho de poros para a mesma imagem do tubo de vidro contendo esferas de vidro, porém analisada com o software Imago. Neste gráfico pode ser observado uma distribuição mais adequada para a amostra em questão.

Figura 59 – Distribuição de tamanho de poros para as esferas de vidro com o software Imago.

No que diz respeito a binarização e porosidade, o software CTan se mostrou adequado para o nosso trabalho, pois quando comparado com o software Imago, seus resultados foram equivalentes.

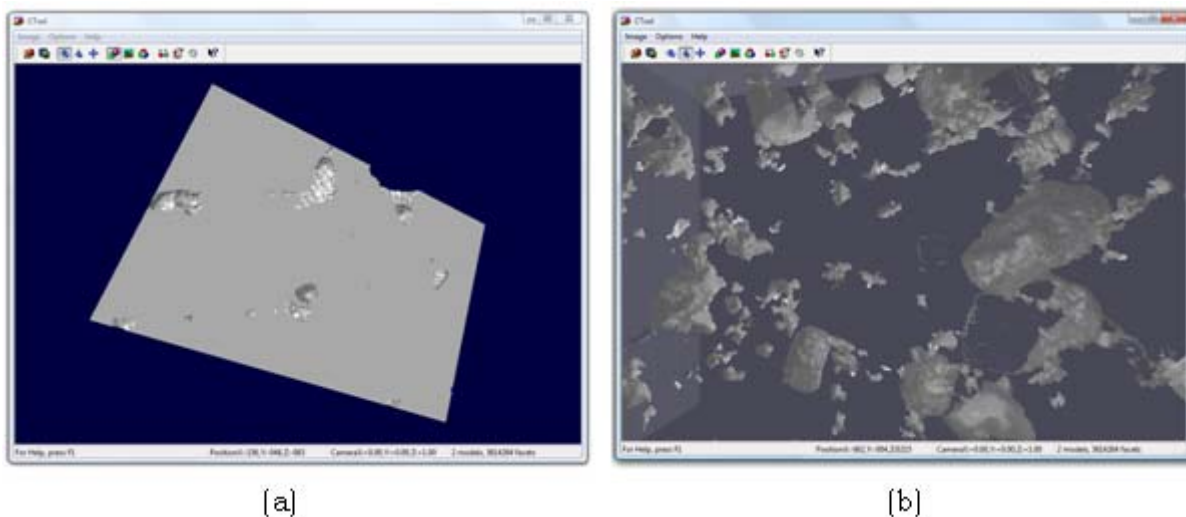
4.3.4 Softwares de Visualização 3-D

Vários são os softwares de visualização 3-D utilizados na literatura, neste trabalho foram utilizados os softwares DataViever, ANT e CTvol [62], que constituem o pacote de softwares de análise da SkyScan. Todos estes softwares são destinados à visualização de imagens 3-D, possibilitando uma excelente visualização interna dos poros e grãos. Estes softwares possibilitam ao usuário "entrar" na amostra, podendo percorrer o caminho da rede porosa e visualizar toda a estrutura interna, como se estivesse dentro da amostra. Desta forma, o usuário pode, por exemplo, verificar se os poros são conectados ou não dentro da amostra.

Como exemplo, pode ser observado na Figura 60 a tela de apresentação do software CTvol, onde, na imagem da esquerda, pode ser visto uma sub amostra do arenito silicificado da formação Botucatu. Na imagem da direita a mesma sub amostra, porém após "entrar" em sua estrutura, o que nos permite visualizar poros isolados dentro da amostra, o que se explica pelo fato do arenito ser silicificado, ou seja, a maior parte da rede porosa que

ligava os poros foi preenchida por sílica, o que resultou no isolamento dos poros maiores e que resistiram a este preenchimento.

Figura 60 – Tela de visualização com o software CTvol; (a) arenito silicificado da formação Botucatu; (b) a mesma imagem porém agora "entrando" na amostra.



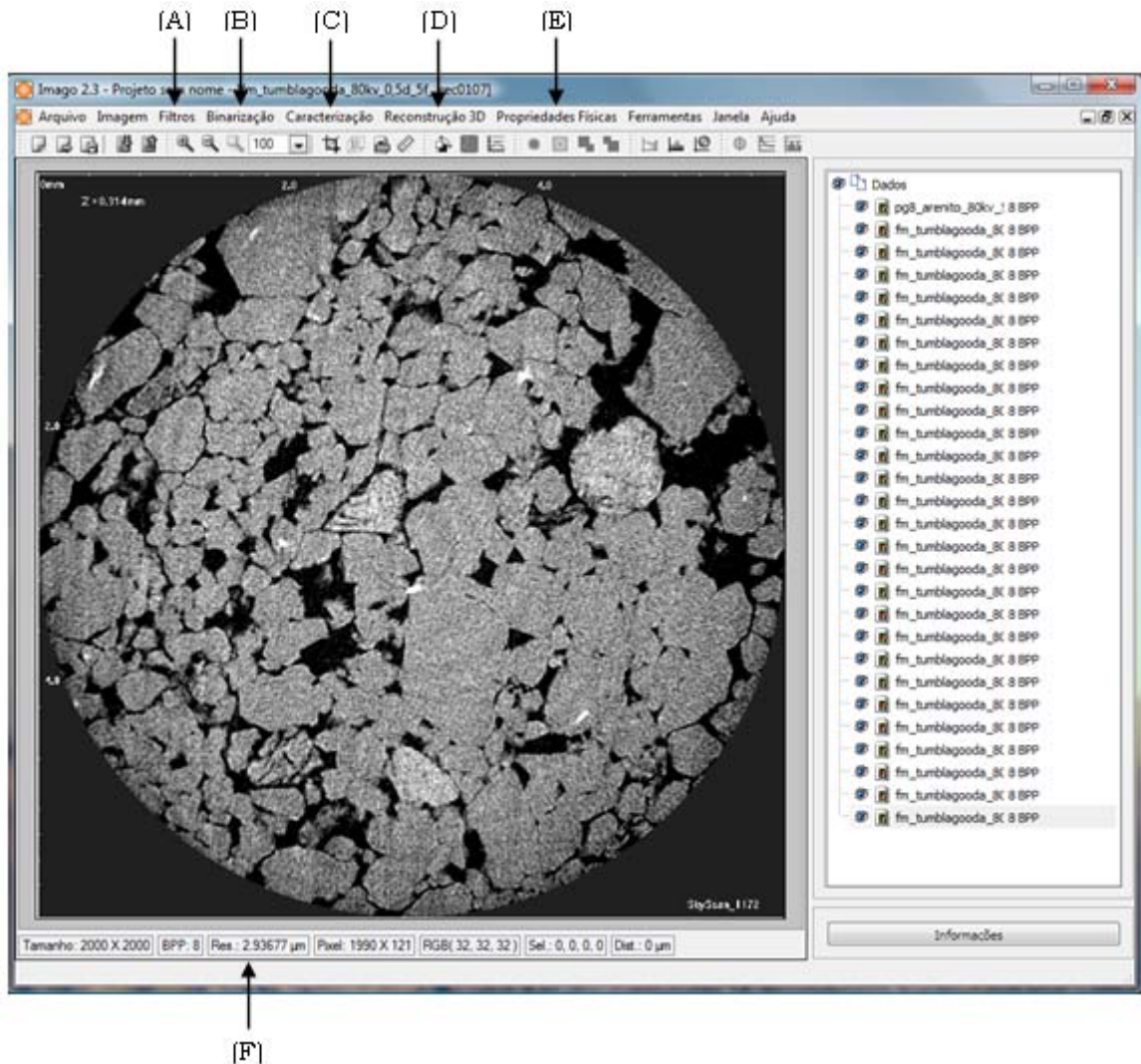
4.3.5 Software Imago

O software IMAGO[®] (Image Analysis System) foi desenvolvido pelo Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT) da Universidade Federal de Santa Catarina, em colaboração com a ESSS (Engineering Simulation and Scientific Software) e CENPES/Petrobras.

Este software foi empregado na análise das seções 2-D obtidas a partir da reconstrução das projeções provenientes da aquisição microtomográfica. É um programa destinado ao processamento e análise de imagens, tais como porosidade, distribuição de tamanho de poros, permeabilidade e respectivos desvios. Também possibilita, através das imagens 2-D, a criação de um modelo 3-D, que tem como objetivo reproduzir, o mais fielmente possível, todas as características microestruturais da amostra.

A Figura 61 mostra a tela de apresentação do software, onde também pode ser observado algumas setas indicando alguns dos comandos disponíveis, como discriminado abaixo:

Figura 61 – Visualização da tela de apresentação do software Imago com uma seção 2-D da amostra de um arenito da formação Tumblagooda.



Seta (A) – disponibiliza vários filtros, incluindo operações de morfologia matemática citadas anteriormente.

Seta (B) – ferramenta para a realização da binarização (segmentação) das seções 2-D.

Seta (C) – determina parâmetros quantitativos, tais como: porosidade, distribuição de tamanho de poros, correlação espacial e frequencial, entre outros.

Seta (D) – ferramenta para a reconstrução do modelo 3-D, sempre preservando as propriedades da amostra.

Seta (E) – ferramenta para a determinação da permeabilidade, pressão capilar, índice de resistividade e fator de formação.

Seta (F) – mostra a resolução que a imagem ativa possui.

4.4 IMAGENS MICROTOMOGRÁFICAS

4.4.1 Aquisição dos Dados

Os dados microtomográficos foram coletados em um microtomógrafo da SkyScan modelo 1172, e para a realização destas medidas foram necessárias viagens bimestrais, e esporadicamente mensais, ao Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES) no Rio de Janeiro, graças a projetos envolvendo o Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Estadual de Londrina, o Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas da Universidade Federal de Santa Catarina e a Petrobras.

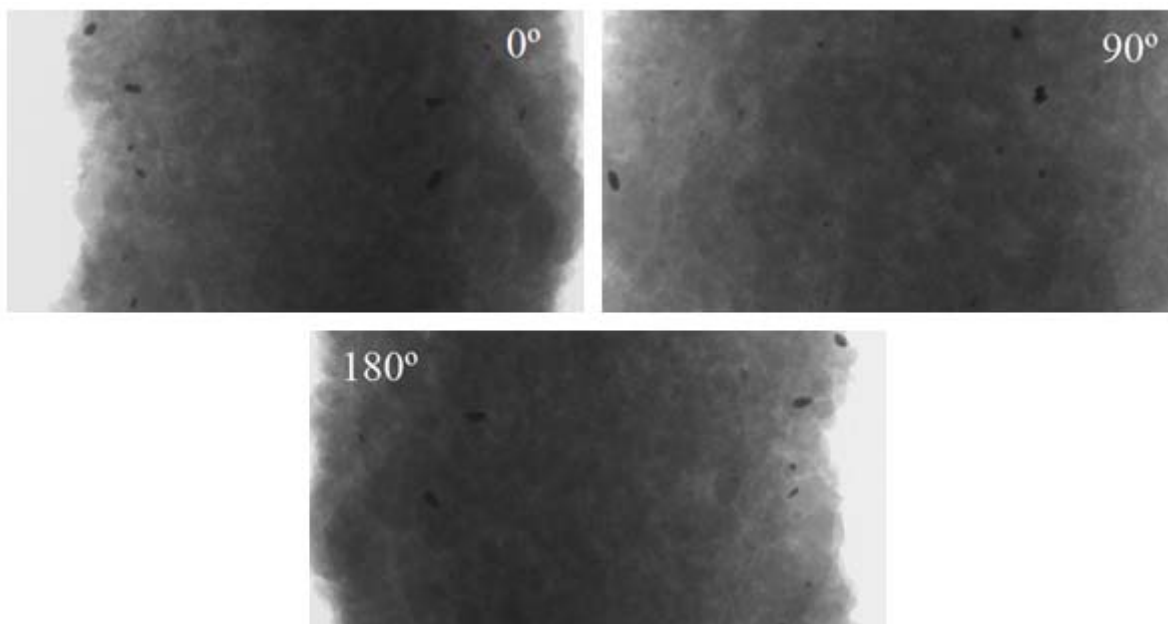
As amostras de rochas analisadas variaram em suas dimensões de 4 mm a 9 mm de largura e 13 mm a 23 mm de altura. Em todas as amostras o objetivo inicial foi deixá-las com um formato de lados iguais, o que nem sempre foi alcançado, como pode ser observado na seção “amostras”.

Estas amostras foram acondicionadas no porta amostras do microtomógrafo, uma de cada vez, e medidas com passo angular de $0,5^\circ$ (amostra 403) e $0,25^\circ$ (demais amostras), com rotação de 360° (amostra 107) e 180° (demais amostras), 5 “frames” e tensão no tubo de raios X variando de 50 a 80 kV, sendo a tensão mais utilizada de 70 kV.

A resolução espacial para cada amostra também variou devido a necessidade que cada rocha possuía, no que diz respeito ao tamanho de seus poros, o que era analisado previamente pelo software SkyScan1172 em projeções variando-se a resolução espacial. Tais valores podem ser observados na Tabela 2 da subseção 4.1.3.1.

Em todas as medidas foi utilizado um filtro de alumínio de 1 mm de espessura, a fim de diminuir a região de baixa energia do espectro de raios X e desta forma, diminuindo o efeito de “beam hardening”.

Em média cada aquisição gera de 750 a 1440 projeções, isso vai depender do passo angular e de quanto a amostra irá rotacionar (180° ou 360°). Na Figura 62 pode-se observar três destas projeções nos ângulos de 0° , 90° e 180° da amostra PG8 da Formação Furnas.

Figura 62 – Projeções da amostra PG8 com angulações de 0°, 90° e 180°.

Com todos estes parâmetros e outros já citados, o tempo total de cada aquisição variou de aproximadamente 55 minutos, para a amostra 403, a 8 horas para a amostra 108. Essa grande variação deve-se ao aumento no tempo de exposição para a amostra 108, no entanto, como poderá ser observado na seção de resultados, a maioria das medidas tiveram um tempo de aquisição total entre 1,5 a 2,5 horas. Contando as amostras de rocha, as amostras para avaliação da acurácia da metodologia e amostras para a medida da resolução de contraste, o tempo total de aquisição com o microtomógrafo foi de aproximadamente 39 horas. No entanto, se também fosse computado as amostras da Petrobras que foram medidas e que não podem ser divulgadas, o tempo total de aquisição com o microtomógrafo passa de 270 horas.

4.4.2 Reconstrução das Seções 2-D

A última etapa do processo microtomográfico consiste na reconstrução das imagens a partir das projeções adquiridas. A reconstrução das seções 2-D das amostras é feita pelo software NRecon, onde as projeções adquiridas pelo SkyScan1172 são carregadas. A partir deste ponto o operador realiza alterações criteriosas em alguns parâmetros importantes para a reconstrução, estes parâmetros irão diminuir ou eliminar alguns artefatos que apareceriam na imagem, tais como: “beam hardening” e “ring artifact”.

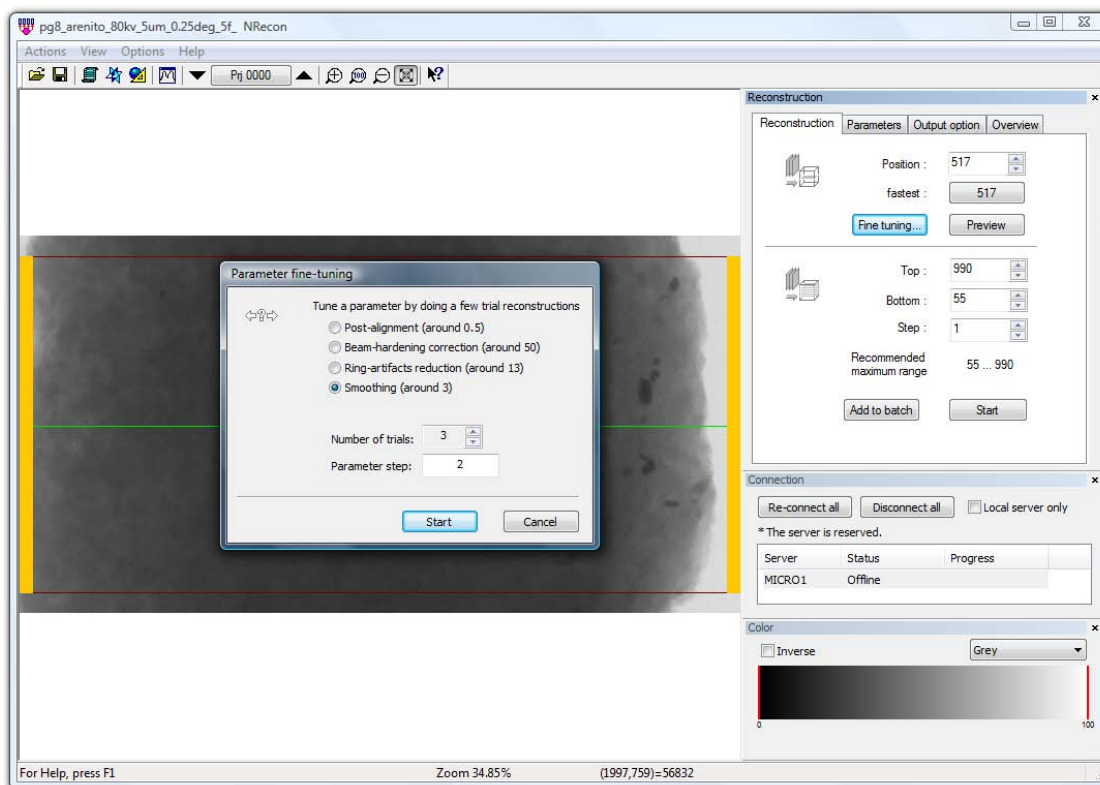
Dentre os parâmetros ajustáveis também está a quantidade de seções que serão reconstruídas (seta (A) na Figura 63), neste trabalho, após alguns testes, optou-se por reconstruir 800 seções das 1000 disponíveis. Ao final do ajuste dos parâmetros é dado início ao processo de reconstrução, onde será obtido como resultado imagens com 8 bits em escala de cinza, com tons variando de 0 a 255 níveis.

O Tempo de reconstrução de cada seção 2-D foi de, em média, 2 segundos com 5 computadores e de 11 segundos com apenas 1 computador, o que resulta em um tempo total de 27 minutos e 2,5 horas, respectivamente, para as 800 seções reconstruídas.

4.4.2.1 Correção de artefatos

Como mencionado anteriormente, o NRecon possibilita a remoção de alguns artefatos existentes nas imagens microtomográficas no momento da reconstrução. Para isso o operador conta com a ferramenta “fine tuning” que é uma espécie de ajuste fino dos parâmetros. O “fine tuning” abre a janela indicada pela seta (B) na Figura 63, onde é possível escolher qual parâmetro será ajustado (alinhamento, ring artifact, beam hardening e smooting).

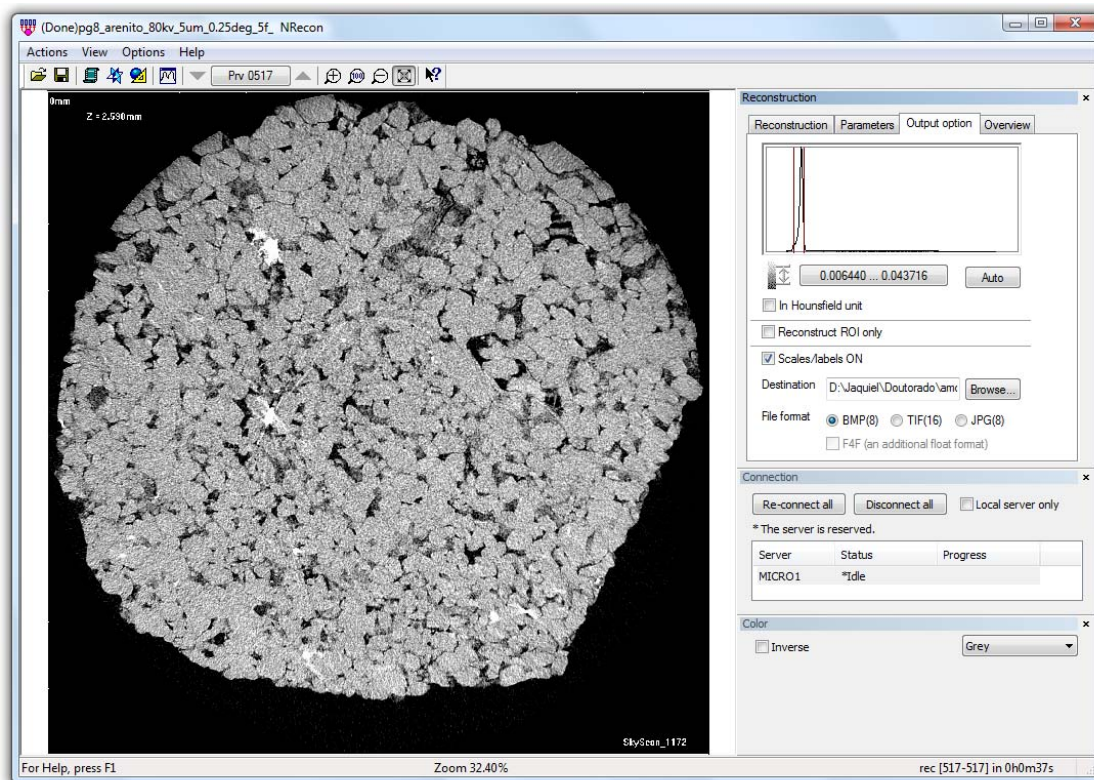
Após escolher um destes parâmetros é definido qual será o incremento dado em torno de um valor pré-definido pelo software, e quantos testes (incrementos) serão utilizados. Por exemplo, ao se escolher o parâmetro “smooting” com valor pré-definido em 3, o operador poderá optar por incrementos de 2 (Parameter step na Figura 63), e 3 testes (Number of trials na Figura 63). Neste caso, o NRecon reconstruirá a mesma imagem três vezes, uma com “smooting” 1, outra com “smooting” 3 (pré-definida) e a última com “smooting” 5. Com estas três imagens em mãos o operador pode compará-las e definir qual o valor mais adequado para resolver o artefato em questão.

Figura 63 – Tela do software NRecon com as projeções da amostra PG8 carregadas.

Os mesmos procedimentos descritos no exemplo, com incrementos de escolha do operador, são realizados aos outros parâmetros até a otimização da imagem. Em média este processo demora em torno de 10 a 15 minutos, e após isso pode ser dado início a reconstrução de todas as seções 2-D.

A Figura 64 mostra uma das seções 2-D da amostra PG8, Formação Furnas, reconstruída pelo software NRecon após a otimização dos parâmetros através do comando "fine tuning".

Figura 64 – Tela do software NRecon com uma seção 2-D da amostra PG8 da Formação Furnas.



4.4.3 Reconstrução das Imagens 3-D

Após a reconstrução das seções 2-D, estas seções podem ser analisadas ou utilizadas para a reconstrução da imagem 3-D da estrutura real da amostra. As imagens 3-D foram reconstruídas pelo software CTan, onde ocorre basicamente o empilhamento das seções 2-D. Este processo exige grande capacidade computacional, desta forma, o volume reconstruído não pode ser muito grande, pois corre o risco do computador travar e o trabalho ser perdido.

Para determinarmos qual seria o volume das amostras que seriam reconstruídas, foram realizados testes para verificar o Volume Elementar Representativo (VER) destas amostras, ou seja, quanto do volume da nossa amostra era necessário reconstruir para se obter as mesmas propriedades microestruturais que a amostra toda possuía.

4.4.4 Reconstrução dos Modelos 3-D

A reconstrução dos modelos 3-D consiste em, a partir de parâmetros obtidos em uma ou mais imagens 2-D, gerar um modelo 3-D que possua características microestruturais semelhantes às seções 2-D de entrada.

O método utilizado para a reconstrução dos modelos 3-D foi o da Gaussiana Truncada [63], que considera a função de autocorrelação da imagem bidimensional e a porosidade como dados de entrada. Essa função fornece o grau de correlação das fases da imagem.

Esta reconstrução é realizada pelo software Imago, onde, das 800 seções 2-D das imagens e devido a limitações computacionais, pacotes de 200 imagens são carregadas. Com os quatro pacotes de 200 imagens e após a binarização, finalmente são geradas as curvas de autocorrelação que serão utilizadas na criação do modelo 3-D.

Com o aparecimento dos microtomógrafos e a possibilidade da reconstrução das imagens 3-D, que fornecem a real microestrutura da amostra, estes modelos estão, aos poucos, sendo deixados de lado, uma vez que é melhor utilizar a própria imagem 3-D da amostra do que um modelo aproximado.

As curvas de autocorrelação, bem como os modelos gerados a partir destas, são apresentadas no Apêndice C.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DO MÉTODO

Para avaliar a acurácia dos resultados encontrados com a microtomografia de raios X foi utilizado um tubo de vidro contendo esferas de vidro com diâmetro nominal de 600 μm , o objetivo inicial era utilizar essas esferas para determinar a distribuição de tamanho de poros e a porosidade, e posteriormente compará-los com valores calculados, uma vez que era conhecido o diâmetro de cada esfera.

No entanto, devido aos problemas relatados anteriormente em relação às seções transversais das esferas, não foi possível realizar tal comparação. Mas de toda forma as medidas com o microtomógrafo foram realizadas e como em todas as outras medidas deste trabalho, foi utilizado um filtro de alumínio de 1 mm na saída do tubo de raios X, para diminuir a intensidade das baixas energias do feixe. Outras informações sobre alguns dos parâmetros mais importantes para comparação são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra de esferas de vidro

Tensão (kV)	Rotação total (°)	Passo angular (°)	Resolução Espacial (μm)	Tempo de Exposição para cada projeção (ms)	"Frames"	Tempo total de aquisição
80	0 a 180	0,5	5,0	1180	5	45 min

Para contornar o problema das seções transversais foi utilizado um tubo de vidro contendo linhas de nylon, com diâmetro nominal de $355 \pm 8 \mu\text{m}$, onde, neste caso, sua seção transversal é homogênea, possibilitando a comparação dos valores calculados com os valores encontrados com a metodologia microtomográfica. Algumas informações sobre alguns dos parâmetros mais importantes para comparação são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 –Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra de linhas de nylon

Tensão (kV)	Rotação total (°)	Passo angular (°)	Resolução Espacial (μm)	Tempo de Exposição para cada projeção (ms)	“Frames”	Tempo total de aquisição
70	0 a 180	0,25	5,0	2360	5	2,5 horas

5.1.1 Binarização

O processo de binarização (segmentação), ou seja, a escolha do nível de cinza que caracterizará a fase sólida e a fase porosa nas imagens, foi realizado no software Imago. Esta etapa inicia-se com a escolha de uma região de interesse (ROI - region of interest) nas seções 2-D da amostra. Esta região deve ser escolhida pelo operador, de preferência selecionando a máxima região disponível da imagem.

O software Imago apresenta uma classe específica de ferramentas, bastante usuais em análise de imagens, que são as ferramentas de segmentação binária, denominadas simplesmente de ferramentas de binarização. No Imago a ROI só pode ser retangular ou quadrada devido a limitações do software.

Na Figura 65 é possível visualizar o processo de binarização, onde na Figura 65a aparece a imagem da amostra com esferas de vidro, com aplicação do filtro mediano, em escala de cinza, já com uma região selecionada pelo retângulo branco. Na Figura 65b aparece a janela de binarização do software Imago onde foi escolhido o nível de cinza 76 para a região selecionada, onde o preto representa a fase sólida (esferas) e o branco a fase porosa (ar).

Ainda na Figura 65 pode ser observado que as “esferas” na realidade são ovais, algumas nem isso são, como mostram as setas brancas na Figura 65a, fato que também se repetiu em todas as seções.

Da mesma forma que para as esferas de vidro, na Figura 66 pode ser observado o processo de binarização para as linhas de nylon, onde, na Figura 66a, pode-se ver claramente as seções transversais das linhas (cinza escuro) e do tubo de vidro (cinza claro), também com aplicação do filtro mediano, e na Figura 66b aparece a janela de binarização onde foi escolhido o nível de cinza 20 para a região selecionada, onde o preto representa a fase sólida (linhas) e o branco a fase porosa (ar).

Figura 65 – Processo de binarização para as imagens das esferas de vidro. (a) seção 144 com aplicação do filtro mediano; (b) ROI da mesma seção binarizado, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.

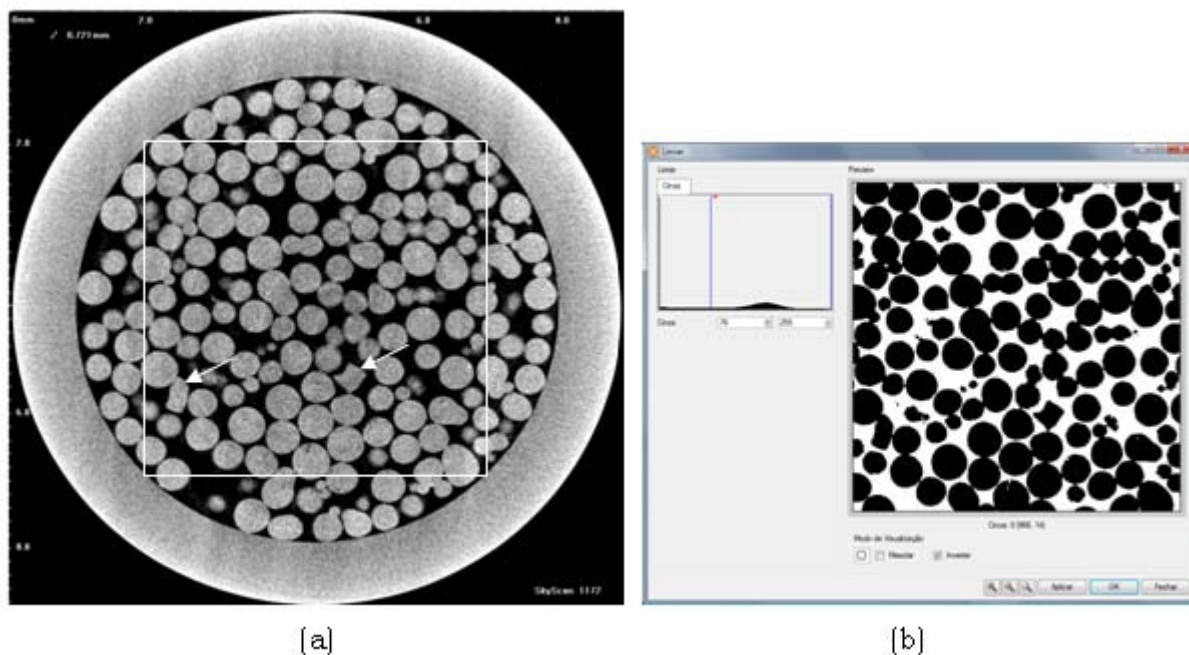
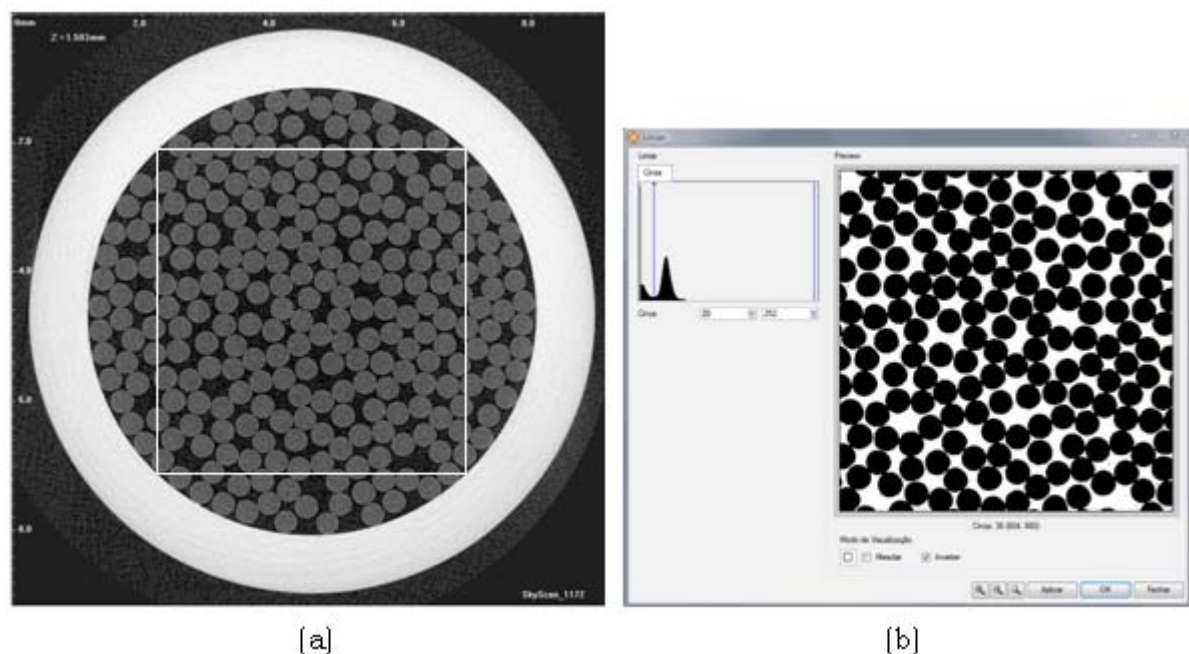
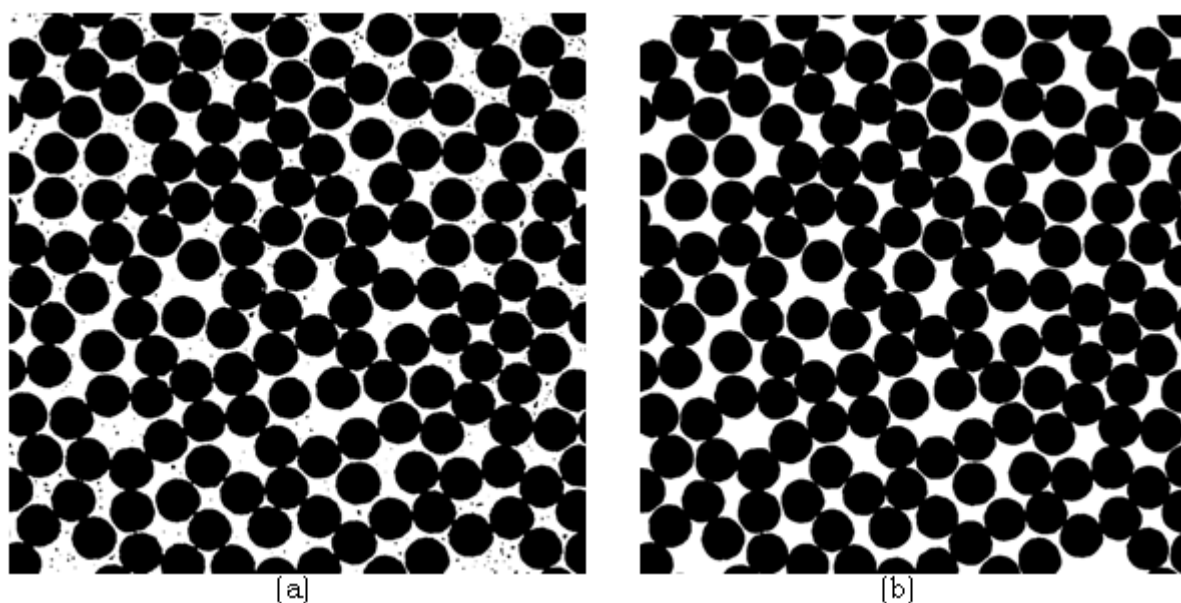


Figura 66 – Processo de binarização para as imagens das linhas de nylon. (a) seção 300 com aplicação do filtro mediano; (b) ROI da mesma seção binarizado, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.



Em todas as seções binarizadas das esferas de vidro e linhas de nylon foi aplicado o filtro passa baixa, seguido pelo processo de erosão, tal procedimento foi julgado necessário pelos ruídos existentes nas imagens, como pode ser visto na Figura 67. Na Figura 67b, além da diminuição do ruído existente na imagem original, pode-se observar uma diminuição nas gargantas (conexão entre as seções transversais das linhas), e um melhor contorno das seções transversais das linhas de nylon. Além do procedimento adotado para melhorar as imagens, também poderia ser utilizado o filtro “Feature And” [41], no entanto foi observado que o procedimento adotado era mais rápido e prático de ser aplicado, e surtindo o mesmo efeito.

Figura 67 – Seção 301 binarizada da amostra de linhas de nylon; (a) imagem binarizada após a utilização do filtro mediano; (b) a mesma imagem após a utilização do filtro passa baixa e processo de erosão.



5.1.2 Porosidade

Para a determinação da porosidade são utilizadas as imagens binarizadas como dado de entrada, que pode ser determinada tanto pelo software Imago quanto pelo software CTan, no entanto, optamos por utilizar o CTan pela facilidade no transporte dos resultados da porosidade à softwares específicos para a criação dos gráficos.

A Tabela 8 mostra os resultados da porosidade média obtidos para conjuntos de 100 seções das esferas de vidro. Os desvios apresentados são estatísticos e são mostrados

com 95 % de confiança. Pode-se notar que os resultados encontrados para os diversos conjuntos são compatíveis, fornecendo valores médios de porosidade excelentes, o que se explica devido às esferas possuírem diâmetro razoavelmente homogêneo e conseqüentemente o valor da porosidade no decorrer do perfil não deveria variar muito.

Desta forma, mesmo não podendo comparar os valores da porosidade encontrados pela metodologia da microtomografia de raios X com valores calculados geometricamente, estes valores se mostraram uniformes, dando indícios de que a técnica é um método confiável para a determinação de tal parâmetro.

Tabela 8 – Valores da porosidade média encontrados para conjuntos de 100 seções da amostra de esferas de vidro.

Seções	Porosidade Média* (%)
101 – 200	35,37 ± 0,53
201 – 300	35,51 ± 0,53
301 – 400	34,76 ± 0,52
401 – 500	35,23 ± 0,52
501 – 600	36,10 ± 0,54
601 – 700	35,36 ± 0,53
701 – 800	35,38 ± 0,53
801 – 900	35,73 ± 0,53

* Intervalo de 95 % de confiança.

Para o caso da amostra de linhas de nylon, onde o valor da porosidade pode ser calculado e, desta forma, comparado com os valores obtidos pela metodologia microtomográfica, um cálculo geométrico foi realizado para essa determinação.

Para tanto, o diâmetro das linhas de nylon foi medido, com o auxílio de um micrômetro, 40 vezes, chegando-se a um valor médio de $355 \pm 8 \mu\text{m}$. Da mesma forma o diâmetro do tubo de vidro foi medido e o valor encontrado foi de $6920 \pm 9 \mu\text{m}$. De posse destes valores e sabendo que no interior do tubo de vidro foram colocadas 253 linhas, a porosidade geométrica calculada foi de $33,4 \pm 3,4 \%$, todos estes valores com intervalo de 95 % de confiança.

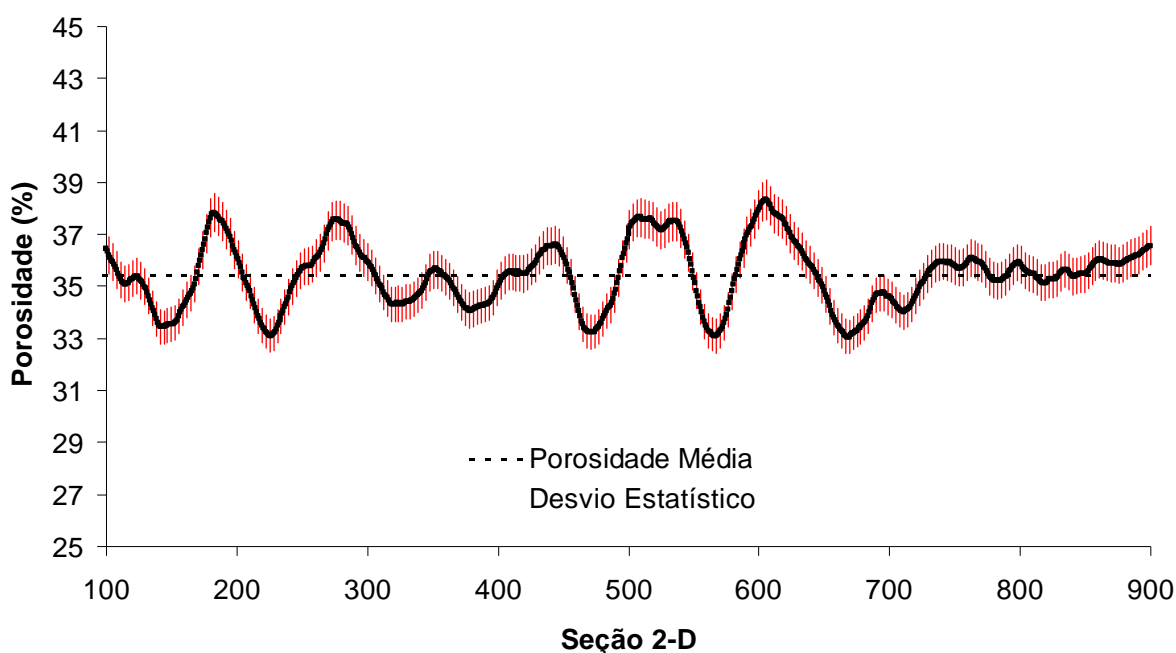
Da mesma forma que as esferas de vidro, as imagens binarizadas na forma como representada na Figura 66b, foi possível determinar a porosidade para cada seção das linhas de nylon através do CTan. A porosidade total média medida para as 401 seções foi de $30,97 \pm 0,31$ %, intervalo de 95 % de confiança.

Este valor está de bom acordo com o valor encontrado pelo cálculo geométrico, portanto podemos reafirmar que a metodologia microtomográfica é confiável na obtenção da porosidade para o material empregado no teste.

Nas Figuras 68 e 69 são apresentados os gráficos do perfil de porosidade para as esferas de vidro e linhas de nylon, respectivamente. Em vermelho está a barra do desvio estatístico para cada seção, com 95 % de confiança.

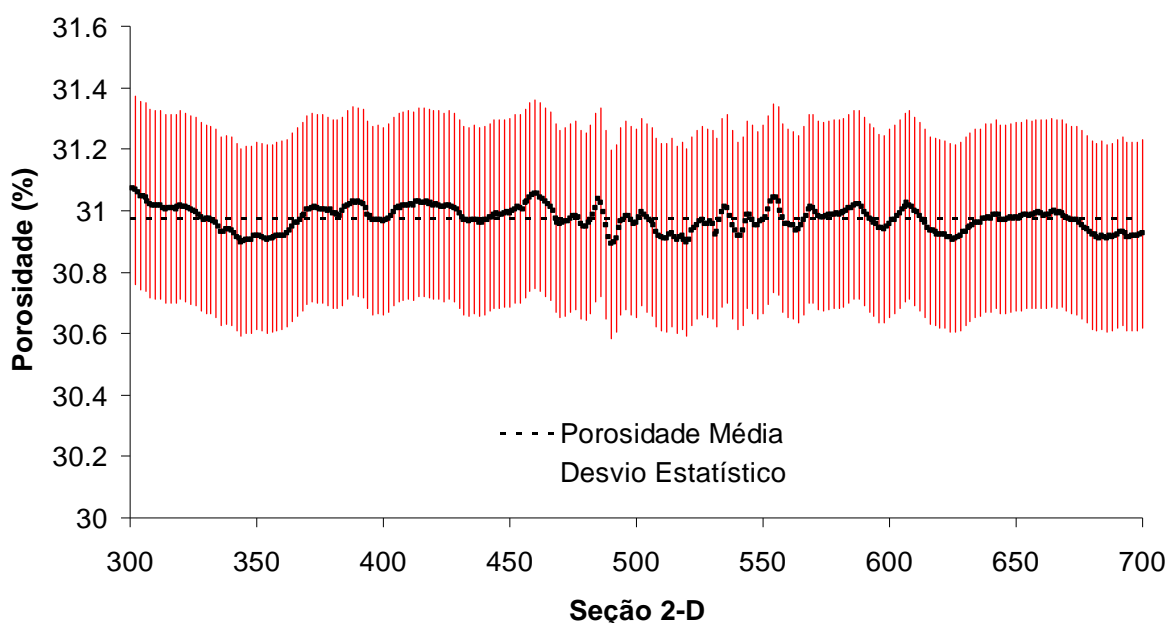
Na Figura 68 pode ser observado que os picos de porosidade máximo e mínimo possuem uma distância relativamente homogênea entre eles (entre 45 e 55 seções), isto pode ser explicado se imaginarmos as esferas alinhadas lado a lado, neste caso a distância entre estes picos deveria fornecer exatamente o raio da esfera. Como no nosso caso as esferas estão dispostas aleatoriamente e seus formatos não são perfeitamente circulares, este valor é apenas aproximado e varia de 225 a 275 μm . A porosidade média total para as esferas foi de $35,43 \pm 0,53$ %.

Figura 68 – Perfil de porosidade da amostra de esferas de vidro.



A homogeneidade na porosidade encontrada para as diversas seções das linhas de nylon pode ser observada através do gráfico da Figura 69. Outro fato que mostra essa homogeneidade são o menor e o maior valor de porosidade obtidos, 30,9 % e 31,1 %, respectivamente.

Figura 69 – Perfil de porosidade da amostra de linhas de nylon.



5.1.3 Distribuição de Tamanho de fase

Outra análise que o Imago pode realizar utilizando as imagens binarizadas é a distribuição de tamanho de fase. Esta distribuição é apresentada na forma de um histograma de frequência (%) versus raio da fase analisada (μm).

Para que houvesse uma comparação da distribuição de tamanho de poros obtida pela metodologia microtomográfica, calculamos a distribuição de tamanho de fase para as seções 2-D das esferas e das linhas de nylon, uma vez que seus diâmetros eram conhecidos. Como o processo de abertura para a distribuição de tamanho de fase é realizado sobre a fase branca em imagens binarizadas, foi necessário inverter as imagens microtomográficas das amostras, ou seja, o que era preto inicialmente virou branco e vice-versa. Estas inversões

podem ser observadas nas Figuras 70 e 71, que são as mesmas seções das Figuras 65 e 66, porém invertidas.

Figura 70 –Imagem das Esferas de vidro binarizada com inversão de fase, onde o preto representa os poros e o branco o sólido.

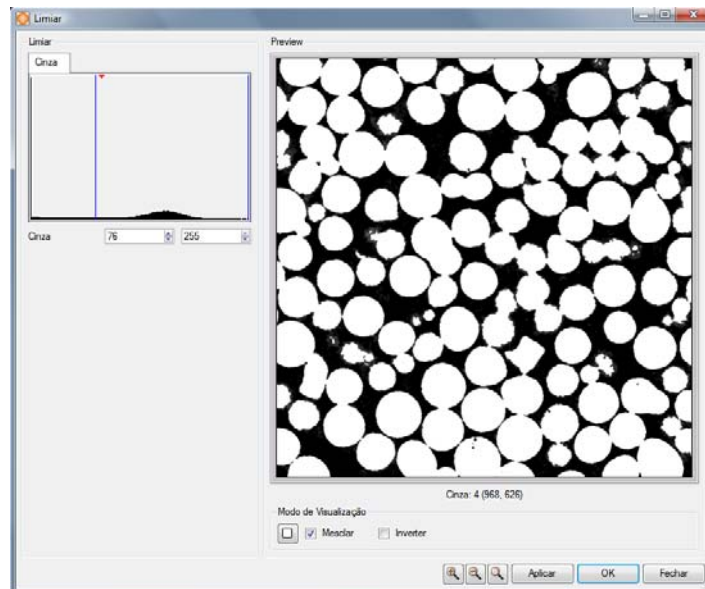
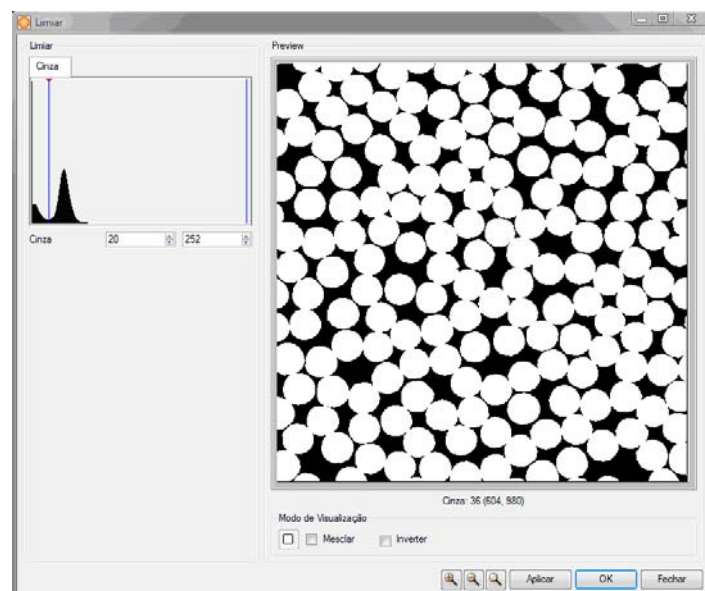
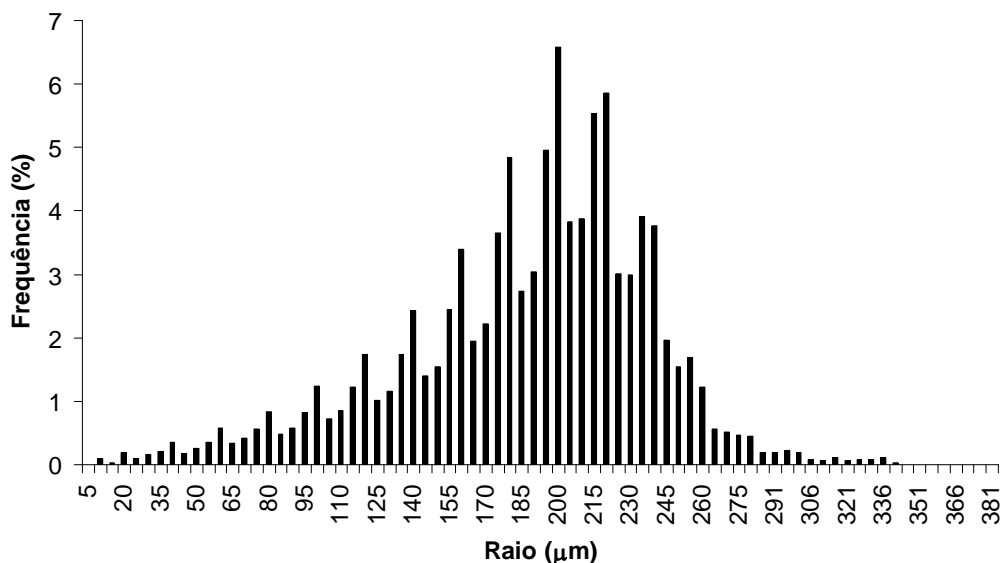


Figura 71 –Imagem das linhas de nylon binarizada com inversão de fase, onde o preto representa os poros e o branco o sólido.



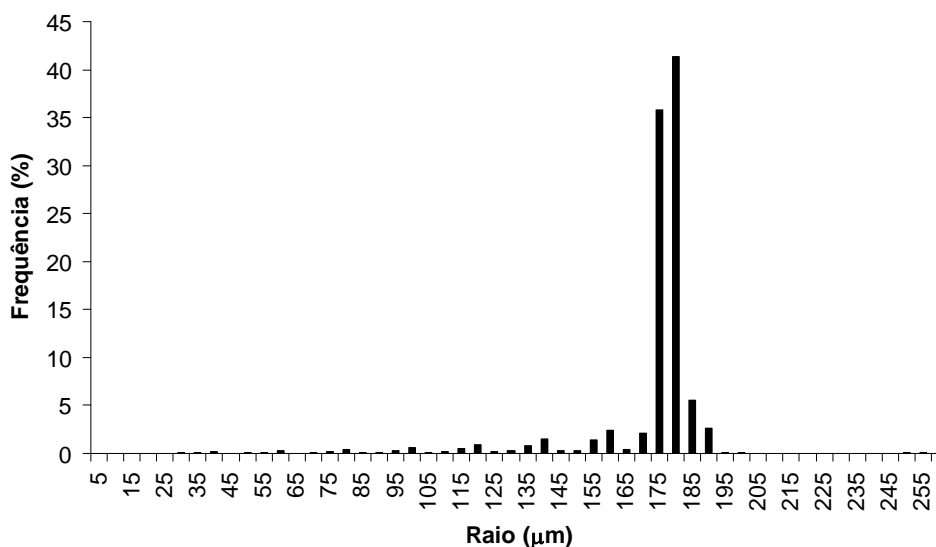
A Figura 72 mostra o histograma da distribuição de tamanho de fase média para as esferas de vidro, com diâmetro nominal de 600 μm . A maior frequência em torno do raio 205 μm , que não é o raio nominal das esferas, se explica pelo fato da maioria das esferas serem menores que o nominal, o que pode ser melhor observado na imagem 3-D da Figura 74.

Figura 72 – Distribuição de tamanho de fase média para a amostra de esferas de vidro com diâmetro nominal de 600 μm .



Na Figura 73 pode ser visto o histograma da distribuição de tamanho de fase média para as linhas de nylon, com diâmetro de $355 \pm 8 \mu\text{m}$. Para este caso, onde as seções transversais são aproximadamente iguais, a distribuição se restringe ao valor 175 e 180 μm , e levando em consideração o desvio do raio das linhas, o valor é idêntico ao raio geométrico calculado ($177,5 \pm 4 \mu\text{m}$). A frequência para os raios menores se explica pela junção entre as linhas e possíveis ruídos existentes nas imagens, o que impossibilita a utilização do elemento estruturante de raio adequado, fazendo com que o software utilize um elemento estruturante de raio menor.

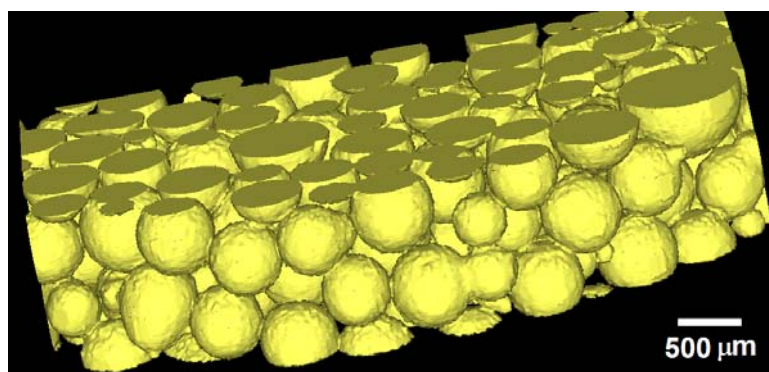
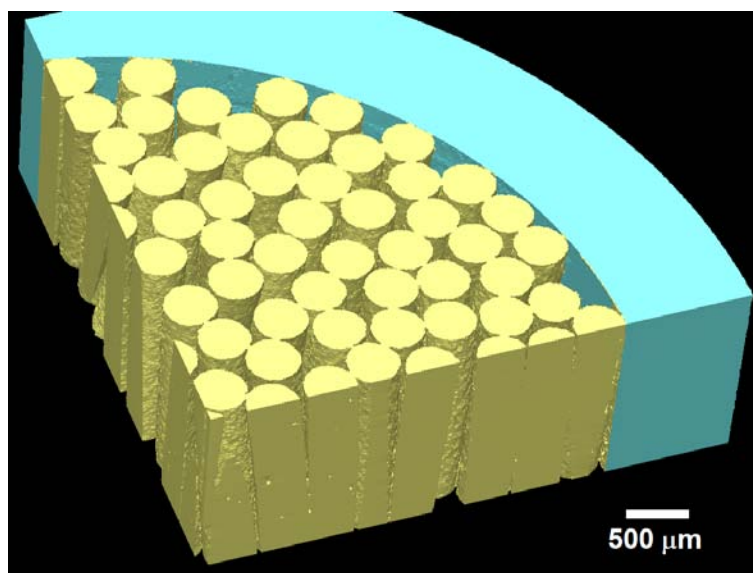
Figura 73 – Distribuição de tamanho de fase média para a amostra de linhas de nylon com diâmetro de $355 \pm 8 \mu\text{m}$.



5.1.4 Imagem 3-D

Como já citado anteriormente, o objetivo principal das amostras de esferas de vidro e linhas de nylon foi avaliar os resultados encontrados através da metodologia de microtomografia de raios X, e como o método permite a reconstrução de volumes 3-D, também foi reconstruído o volume 3-D para estas amostras.

Não foram feitas comparações quantitativas dos resultados, apenas qualitativas, o que pode ser comprovado na Figura 74, onde pode ser observado claramente o arranjo de algumas esferas de vidro no volume de $4,6 \times 1,0 \times 0,7 \text{ mm}^3$ reconstruído pelo software CTan. Da mesma forma, na Figura 75, pode ser observado a imagem 3-D de algumas linhas de nylon e parte do tubo de vidro parcialmente reconstruídos ($4,1 \times 3,3 \times 1,1 \text{ mm}^3$).

Figura 74 – Imagem 3-D reconstruída das esferas de vidro ($4,6 \times 1,0 \times 0,7 \text{ mm}^3$).**Figura 75** – Imagem 3-D reconstruída das linhas de nylon e tubo de vidro ($4,1 \times 3,3 \times 1,1 \text{ mm}^3$).

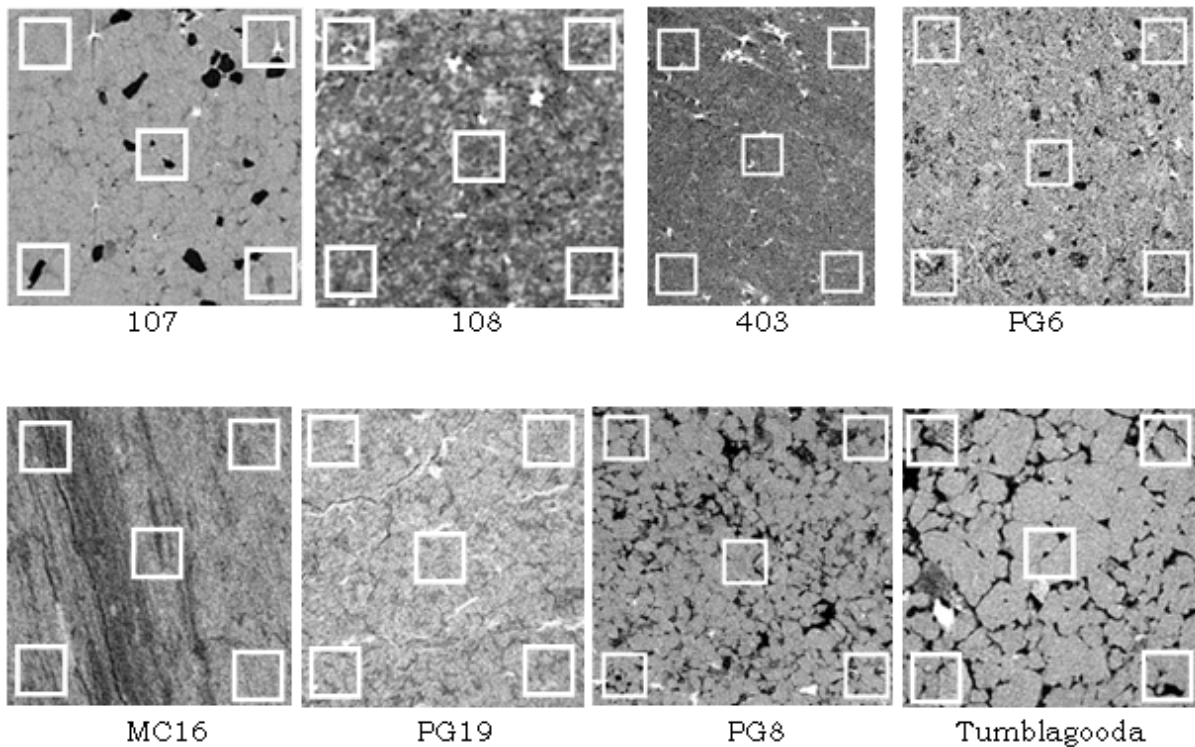
5.2 VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO (VER)

Como o processo de reconstrução 3-D exige uma grande capacidade computacional e é muito limitado, foi necessário verificar qual seria o volume elementar representativo (VER) destas amostras, que tem que ser grande o bastante para representar as características da amostra e o menor possível quando comparado ao seu volume total. Neste trabalho o VER foi determinado apenas para a porosidade.

Para tanto, realizamos testes com vários subvolumes cúbicos de lado: 250 μm, 400 μm, 500 μm, 600 μm, 750 μm, 900 μm, 1000 μm, daí para frente aumentando de

100 em 100 μm até chegar a um cubo de 2000 μm de lado. Este procedimento se repetiu para cinco regiões diferentes da amostra: canto superior esquerdo, canto superior direito, canto inferior esquerdo, canto inferior direito e centro da amostra, como pode ser visto na Figura 76 que apresenta seções transversais das amostras analisadas com a localização aproximada dos respectivos subvolumes.

Figura 76 –Localização dos subvolumes criados para a determinação do VER em seção 2-D das amostras.



De posse dos subvolumes e tomando como base para comparação a porosidade total de cada amostra, determinada pela análise de todas as imagens 2-D com ROI máximo, foi calculada a porosidade individual para cada um dos subvolumes e os resultados plotados em gráficos como pode ser visto nas Figuras 77 a 84.

Figura 77 –Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra 107 (1 x 1 x 1).

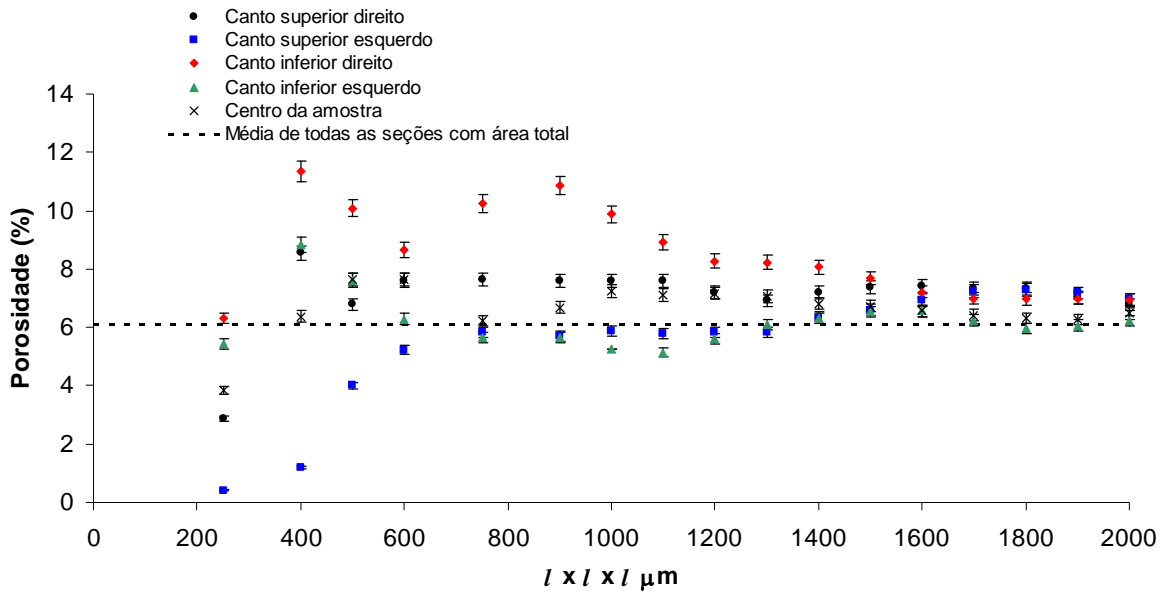


Figura 78 –Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra 108 (1 x 1 x 1).

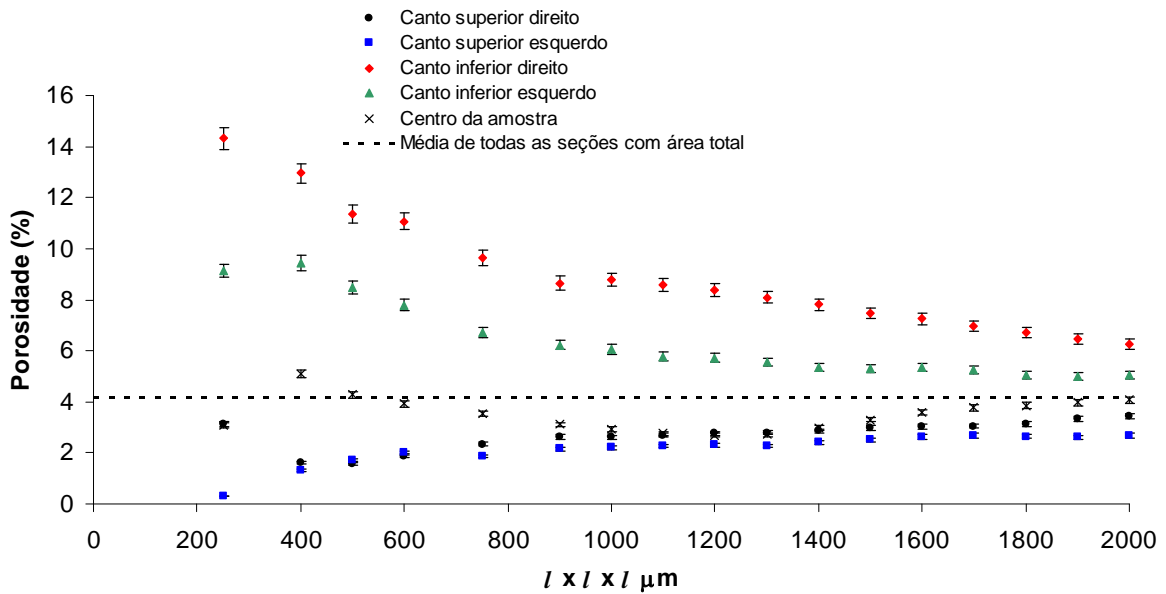


Figura 79 –Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra 403 (1 x 1 x 1).

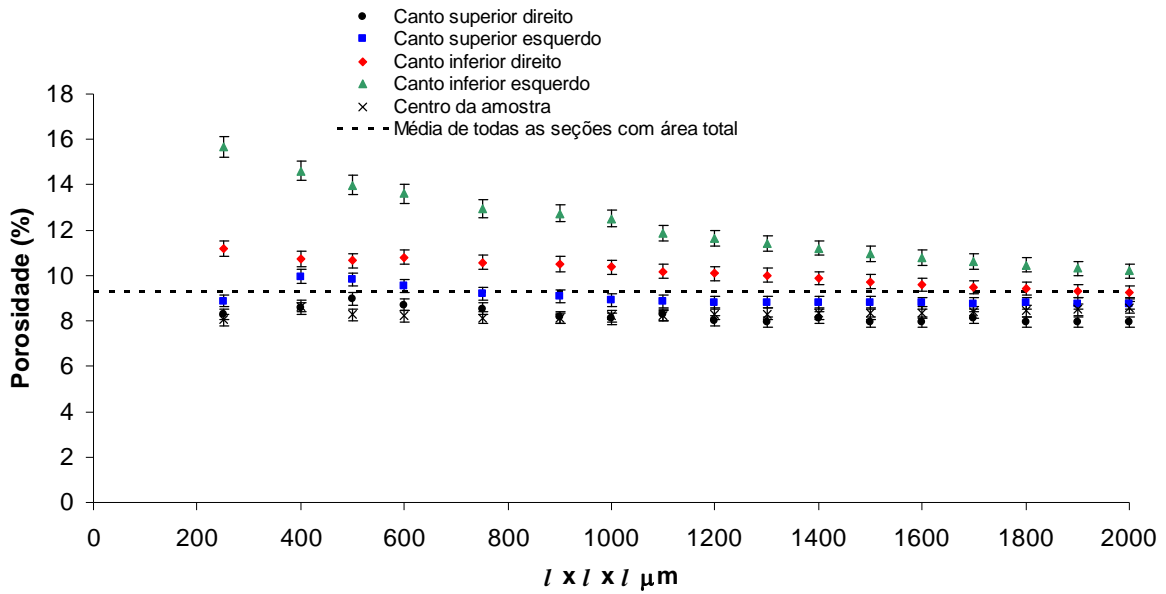


Figura 80 –Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra MC16 (1 x 1 x 1).

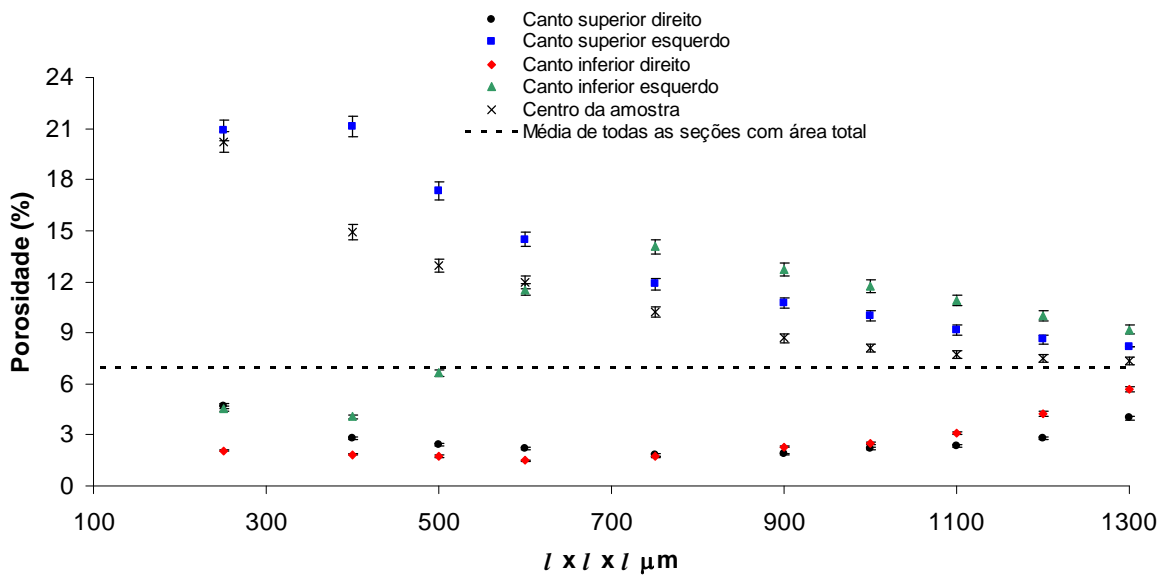


Figura 81 –Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra PG6 (l x l x l).

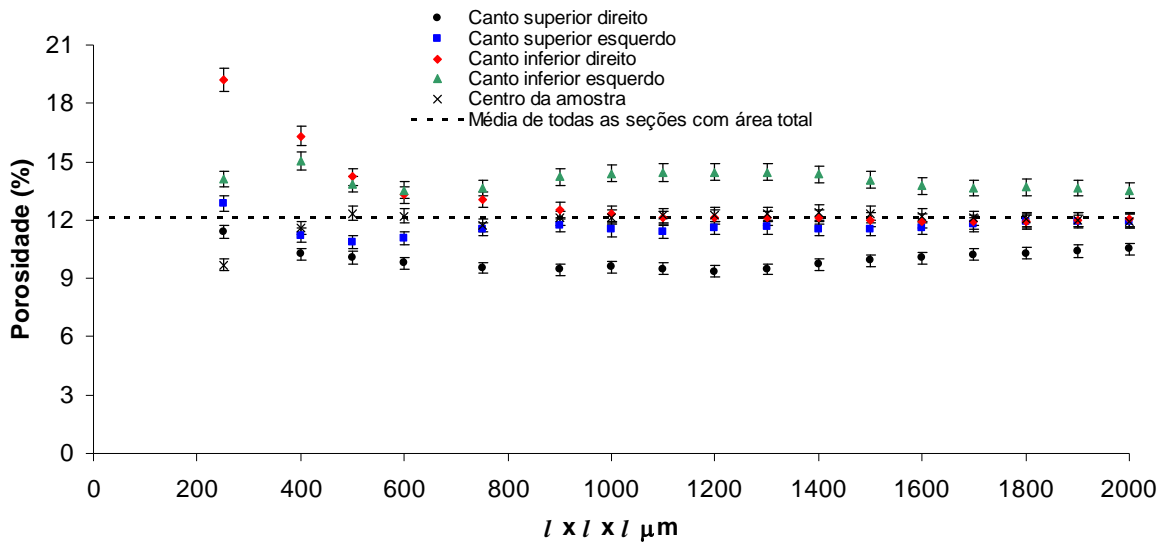


Figura 82 –Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra PG8 (l x l x l).

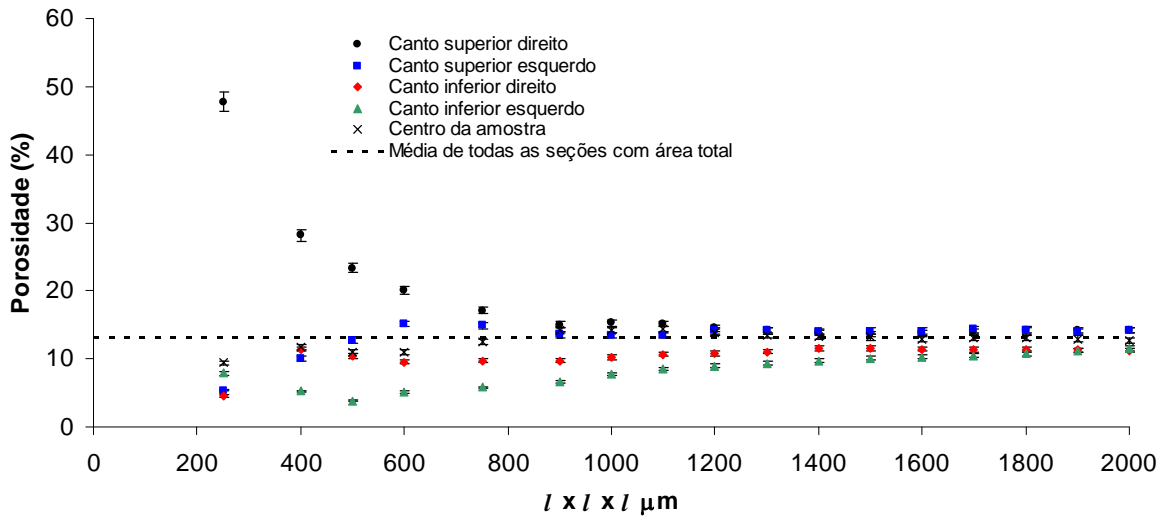


Figura 83 –Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra PG19 (l x l x l).

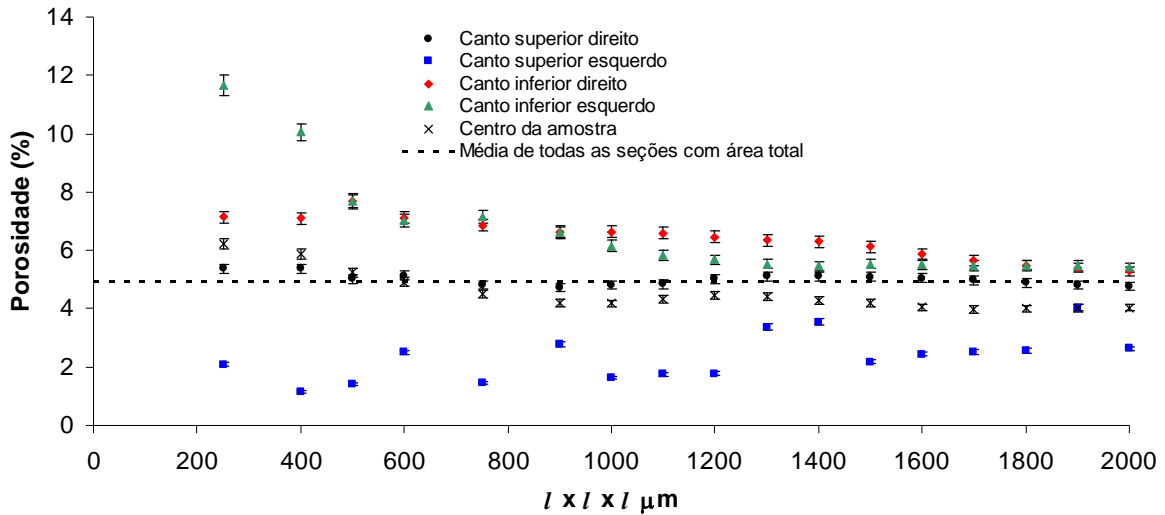
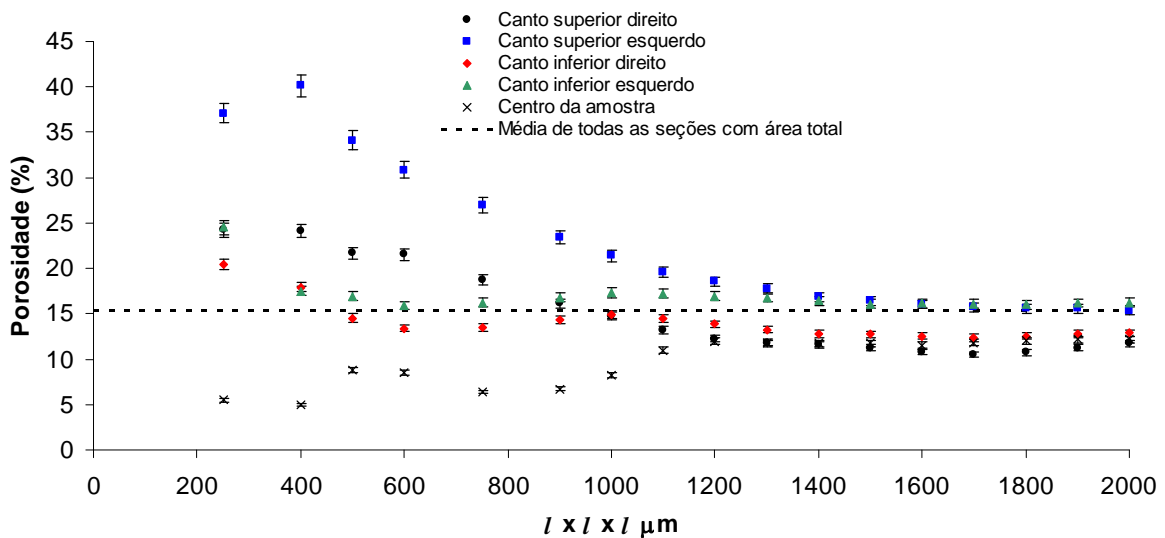


Figura 84 –Estudo da estabilidade da porosidade com a variação do comprimento l do cubo em diferentes regiões da amostra Tumblagooda (l x l x l).



Para algumas amostras foi necessária a exclusão de algumas seções 2-D da análise do VER, pois como pode ser observado na Figura 85 e Figura 86, tais seções apresentavam alguns artefatos causados por materiais com alta densidade que estavam presentes nas amostras. A Figura 85 mostra uma seção da amostra 403 com estes artefatos,

uma espécie de sombra, que gera um falso poro ao lado dos materiais de alta densidade, superestimando a porosidade da amostra. Desta forma, para a amostra 403 foram utilizadas apenas 200 seções, sendo, a partir do subvolume 900 μm de lado, os subvolumes posteriores contaram com apenas os lados indicados no gráfico, ficando a altura fixa em 200 seções, ou seja, 780 μm , portanto deixaram de ser cubos e passaram a ser paralelepípedos.

Na Figura 86 pode ser observado uma seção da amostra PG19 com o artefato de sombra somado com o artefato de anel. Para esta amostra foram retiradas apenas 20 seções distribuídas pela amostra.

Figura 85 – Imagem da amostra 403 com artefatos ocasionando uma falsa porosidade na amostra.

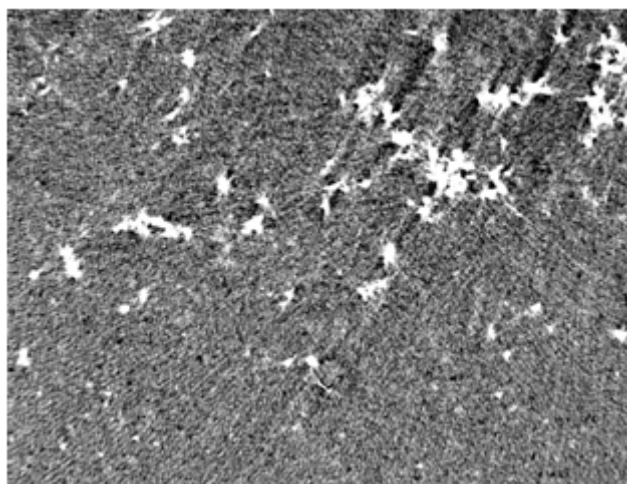
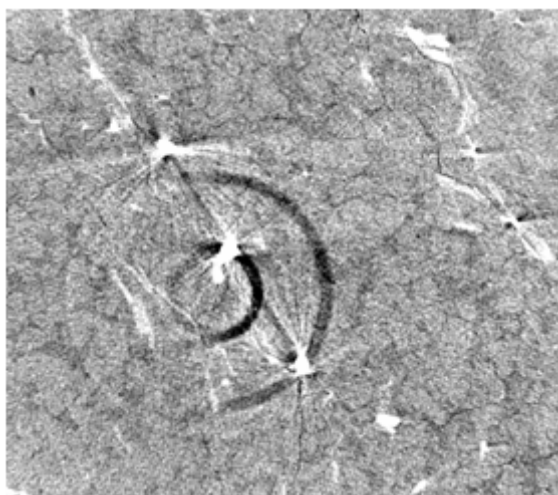


Figura 86 – Imagem da amostra PG19 com artefatos ocasionando uma falsa porosidade na amostra.



A maior dispersão dos resultados da porosidade encontrados para o silito MC16 (Figura 80), deve-se à aparente heterogeneidade da amostra, fato que pode ser observado na sua imagem 2-D apresentada na Figura 76. Para esta amostra não foi possível criar os subvolumes até 2000 μm , uma vez que a área de sua seção 2-D era de apenas 2500 μm , portanto os subvolumes ficariam sobrepostos.

Após a análise dos gráficos do VER verificamos que, para a maioria das amostras, a porosidade não sofre maiores alterações para cubos com lados maiores que 1000 μm , desta forma, todas as imagens 3-D reconstruídas neste estudo possuem volumes maiores que 1000 μm de lado.

5.3 ARENITO 107 (FORMAÇÃO BOTUCATU)

Algumas informações sobre alguns dos parâmetros mais importantes para comparação são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra 107 da Formação Botucatu.

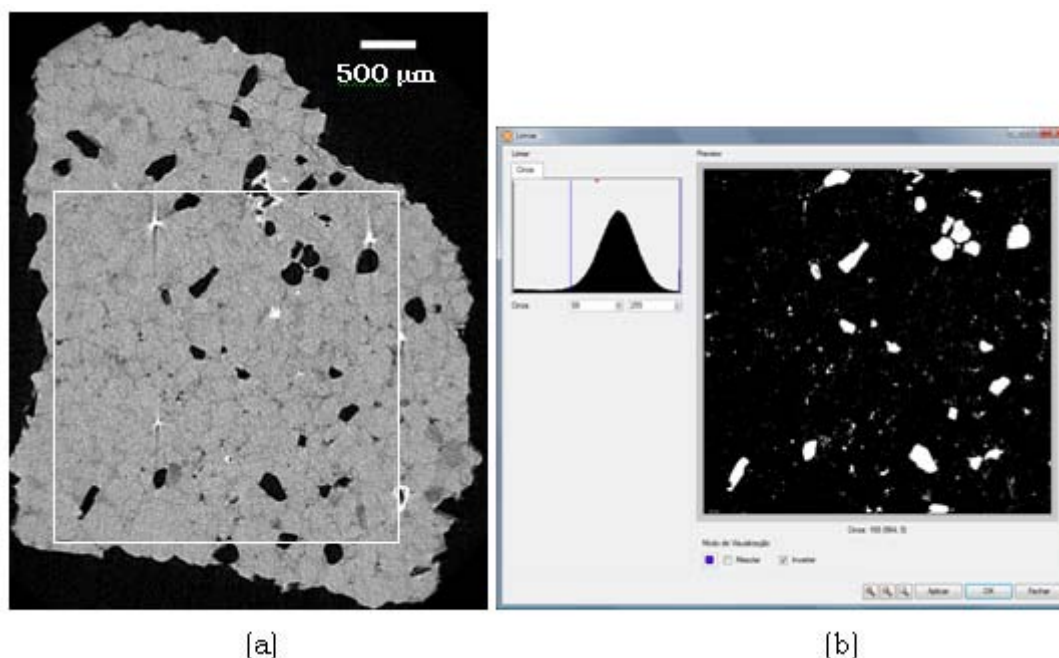
Tensão (kV)	Rotação total (°)	Passo angular (°)	Resolução Espacial (μm)	Tempo de Exposição para cada projeção (ms)	"Frames"	Tempo total de aquisição
70	0 a 360	0,25	2,9	3245	5	6 horas e 28 min

Utilizando estes parâmetros foram adquiridas 1440 projeções, que serviram como dados de entrada no software NRecon para a reconstrução de 801 seções 2-D, sendo uma destas imagens apresentada na Figura 87a. Destas 801 seções, apenas 560 foram utilizadas para as análises de porosidade e distribuição de tamanho de poros, divididas em conjuntos de 180 imagens aproximadamente. A análise parcial das seções deve-se pela diminuição da área de algumas seções da amostra, por se tratar do topo da mesma, fato que pode ser melhor observado na reconstrução de sua imagem 3-D posteriormente.

5.3.1 Binarização

Na Figura 87 é possível visualizar o processo de binarização, onde na Figura 87a aparece a imagem de uma seção da amostra 107, com aplicação do filtro passa baixa, em escala de cinza, já com uma região selecionada pelo retângulo branco. Na Figura 87b aparece a janela de binarização do software Imago onde foi escolhido o nível de cinza 88 para a região selecionada, sendo a região em preto representando a fase sólida e a branca a fase porosa.

Figura 87 – Processo de binarização para as imagens da amostra 107; (a) seção 100 com aplicação do filtro passa baixa; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.

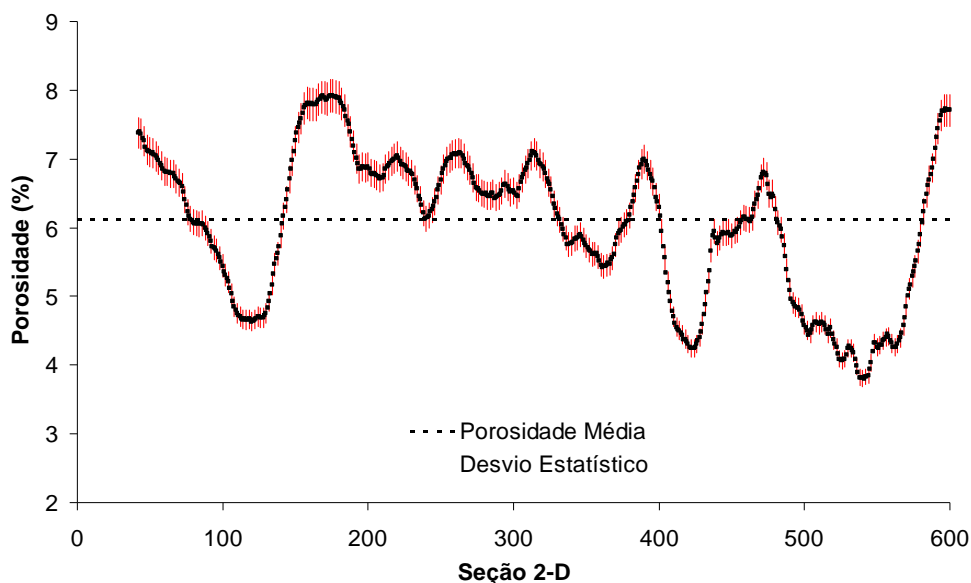


5.3.2 Porosidade

A porosidade média total encontrada para a amostra 107 foi de $6,1 \pm 0,2$ %, com 95 % de confiança. Analisando as seções individualmente encontramos os valores mínimo e máximo da porosidade, respectivamente, $3,8 \pm 0,1$ % (seção 544) e $7,9 \pm 0,2$ % (seção 175). Um gráfico representando todos os valores de porosidade encontrados para as diversas seções analisadas pode ser observado na Figura 88. Em vermelho está a barra do desvio estatístico para cada seção, com 95 % de confiança.

Apesar de uma grande parte dos poros desta amostra apresentar diâmetro relativamente grande, da ordem de 100 μm , a porosidade é relativamente baixa, isso é devido ao pequeno número de poros existentes na amostra, pois trata-se de um arenito silicificado, onde, devido a vários processos, estes poros ficaram aprisionados dentro da amostra como se fossem bolhas de ar suspensas (Figura 60b e Figura 90) e a maioria dos poros menores foram preenchidos por sílica.

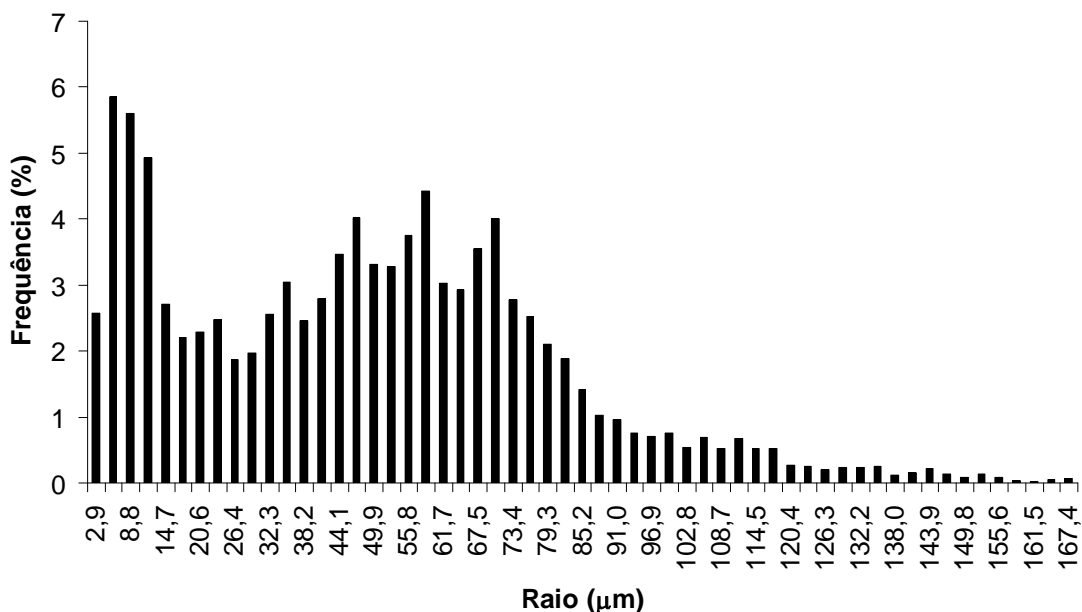
Figura 88 – Perfil de porosidade da amostra 107.



5.3.3 Distribuição de Tamanho de Poros

A Figura 89 mostra a distribuição de tamanho de poros média para a amostra 107. Esta distribuição é apresentada na forma de um histograma de frequência (%) versus o raio de poro (μm).

Neste histograma pode-se notar que há duas distribuições, uma em torno dos poros com raio de 5,8 μm e outra para poros de raio 58,7 μm , e que 95 % dos poros desta amostra estão compreendidos entre 2,9 e 108 μm .

Figura 89 – Distribuição de tamanho de poros média para a amostra 107.

5.3.4 Permeabilidade

Além da quantificação do volume poroso e da distribuição de tamanho de poros, é importante saber a vazão com a qual o fluido armazenado no meio poroso pode ser extraído. A permeabilidade é a propriedade que se refere à medida da capacidade de um meio poroso permitir o fluxo de fluidos. Quando apenas um fluido preenche totalmente o espaço poroso, tem-se a permeabilidade intrínseca, ou permeabilidade absoluta, como é mais conhecida na indústria do petróleo.

Experimentalmente, no CENPES/Petrobras, as medidas de permeabilidade de rochas reservatório são feitas em amostras cilíndricas (plugues). Estas amostras passam por uma etapa de limpeza para a retirada dos hidrocarbonetos e dos sais presentes nos poros. Durante a realização do experimento é colocado, normalmente, um gás para escoar no espaço poroso, onde se faz necessário a utilização de uma correção para k [64]. Como a amostra tem um formato cilíndrico, a área transversal e o comprimento são medidos facilmente. Aplicando-se uma diferença de pressão e medindo-se a vazão do gás, cuja viscosidade é conhecida, a permeabilidade é determinada com a Equação (31) descrita na subseção 3.7.2, para uma amostra na horizontal [65].

O método computacional adotado para o cálculo da permeabilidade é apresentado por SANTOS, et al. [66,67]. Este método, baseado na discretização da equação de Boltzmann (Lattice-Boltzmann), é explicado com mais detalhes em [65].

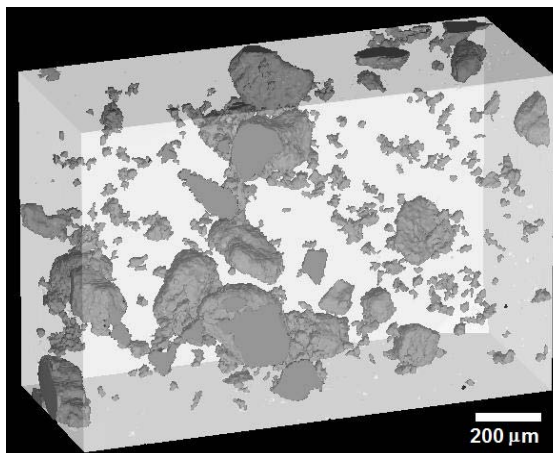
Para o cálculo da permeabilidade foi utilizado um “cluster” com 16 computadores Pentium IV e 1 GB de memória cada, destes apenas 12 foram utilizados para a simulação. A direção e o sentido da simulação não foram informados pelos fabricantes do software.

Para este procedimento foi utilizado como dado de entrada uma imagem ³-D da amostra (subvolume), com dimensões de 1176 x 1176 x 1176 μm^3 . Após um tempo de 8 horas de simulação a permeabilidade encontrada para a amostra 107 foi nula, o que já era esperado, uma vez que este subvolume apresentou porosidade conectada também nula. Lembrando que a porosidade média total para esta amostra é de 6,1 % e para o subvolume considerado a porosidade é de 7,1 %.

5.3.5 Imagem 3-D

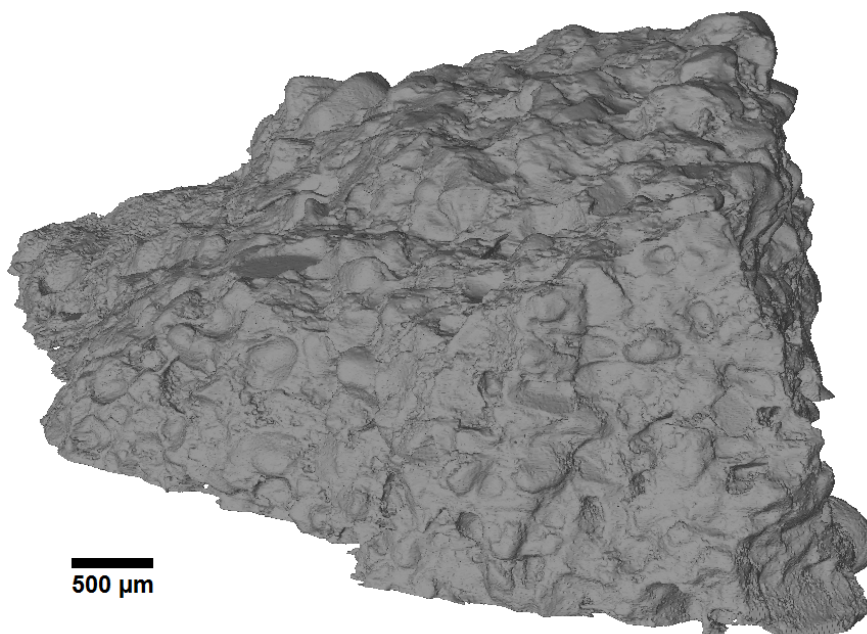
Para uma melhor visualização dos poros da amostra 107, foi reconstruída uma imagem 3-D de apenas 1500 x 1001 x 300 μm^3 . Desta forma, na Figura 90, é possível visualizar tais poros (cinza escuro) e observar claramente que os mesmos são isolados, não tendo conexão entre eles e impossibilitando o escoamento de qualquer fluido pela rocha, portanto, fornecendo uma permeabilidade nula. Nesta mesma figura, como citado anteriormente, pode ser observado que existem poros relativamente grandes, porém poucos, o que reflete na baixa porosidade da amostra. A porosidade para este subvolume é de $5,4 \pm 0,2$ %, e mesmo com um subvolume relativamente reduzido, este valor está bem próximo do valor médio da porosidade determinado a partir de todas as seções 2-D analisadas ($\phi = 6,1 \pm 0,2$ %).

Figura 90 – Imagem 3-D reconstruída da amostra 107 ($1500 \times 1001 \times 300 \mu\text{m}^3$), cinza escuro representa a fase porosa e o cinza claro a fase sólida.



Na Figura 91 pode ser observado a imagem 3-D de toda a amostra 107 microtomografada, onde visualizamos a irregularidade da sua área na seção transversal, o que justifica a utilização de apenas algumas seções para os cálculos da porosidade e distribuição de tamanho de poros

Figura 91 – Imagem 3-D reconstruída da fase sólida da amostra 107.



5.4 ARENITO 108 (FORMAÇÃO RIO DO RASTRO)

Algumas informações sobre alguns dos parâmetros mais importantes para comparação são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra 108 da Formação Rio do Rastro

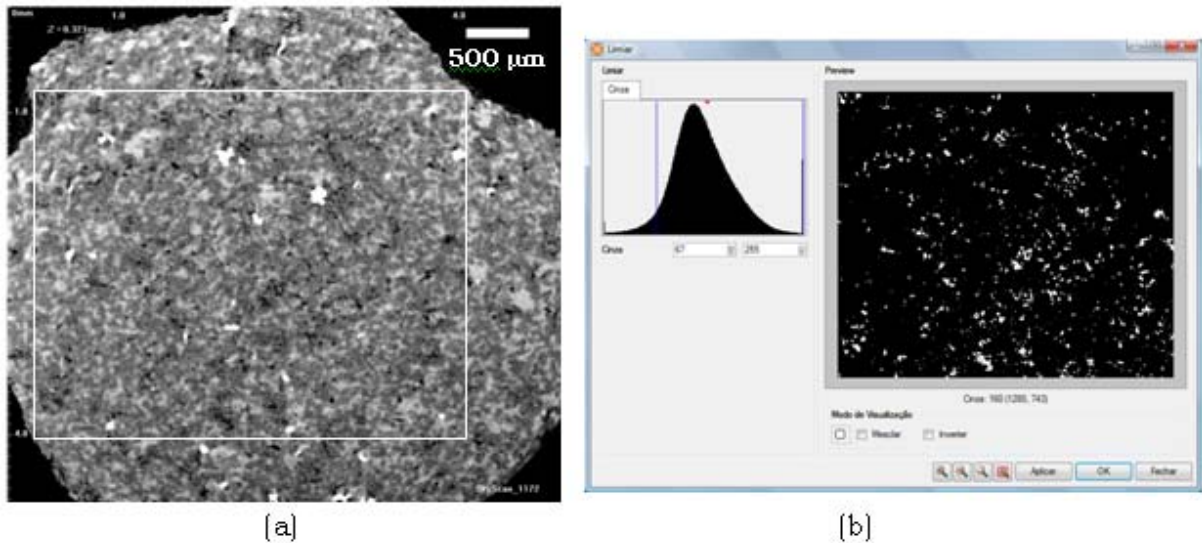
Tensão (kV)	Rotação total (°)	Passo angular (°)	Resolução Espacial (µm)	Tempo de Exposição para cada projeção (ms)	"Frames"	Tempo total de aquisição
70	0 a 180	0,25	2,9	9735	4	8 horas e 5 min

Utilizando estes parâmetros foram adquiridas 751 projeções, que serviram como dados de entrada no software NRecon para a reconstrução de 801 seções 2-D, sendo uma destas imagens apresentada na Figura 92a. Todas as 801 seções foram utilizadas para as análises de porosidade e distribuição de tamanho de poros, divididas em conjuntos de 200 imagens.

5.4.1 Binarização

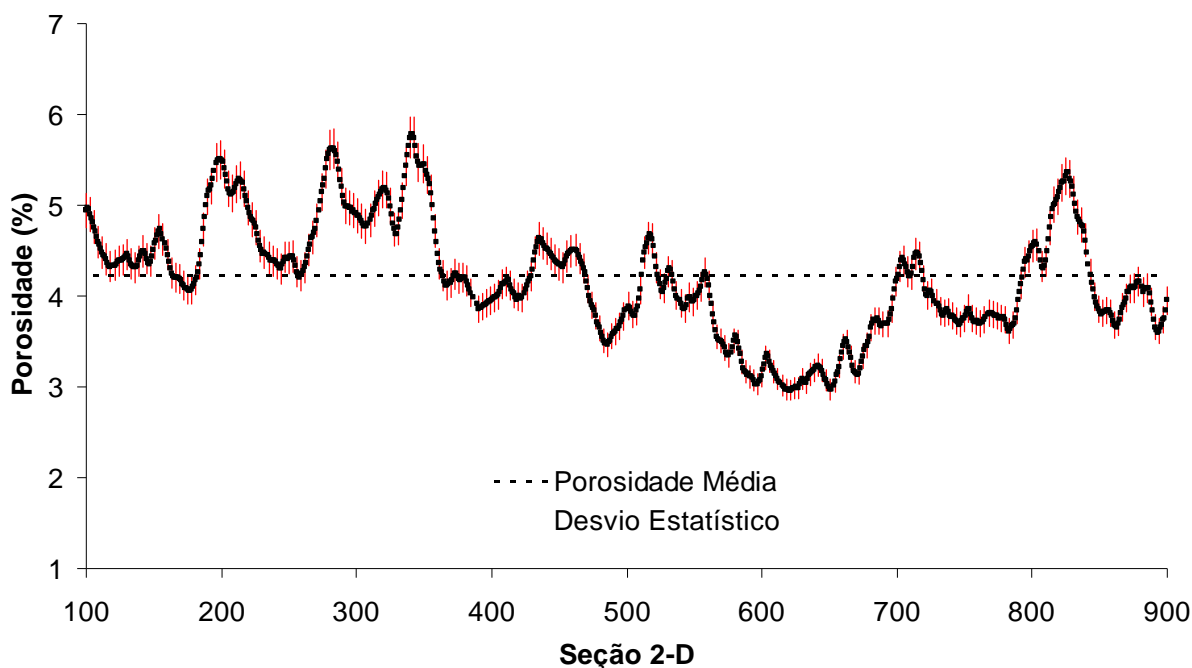
Na Figura 92 é possível visualizar o processo de binarização, onde na Figura 92a aparece a imagem de uma seção da amostra 108 em escala de cinza, já com uma região selecionada pelo retângulo branco. Na Figura 92b aparece a janela de binarização do software Imago, onde foi escolhido o nível de cinza 67 para a região selecionada, sendo a região em preto representando a fase sólida e a branca a fase porosa.

Figura 92 – Processo de binarização para as imagens da amostra 108; (a) seção 110 reconstruída; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.



5.4.2 Porosidade

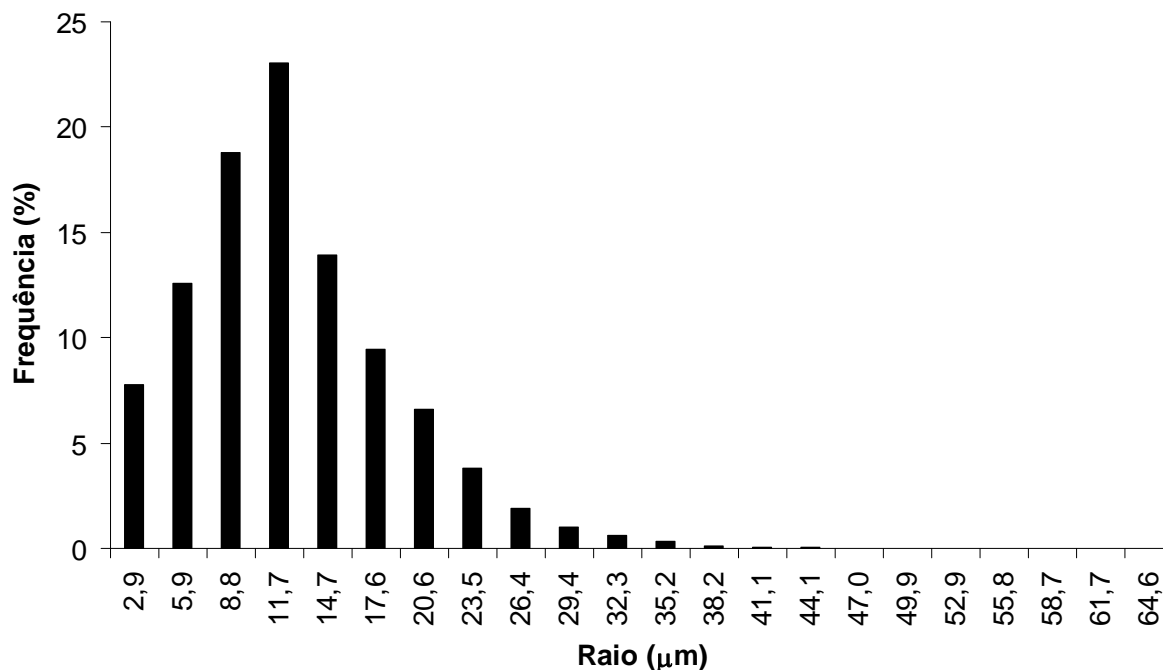
A porosidade média total encontrada para a amostra 108 foi de $4,2 \pm 0,1$ %, com 95 % de confiança. Analisando as seções individualmente, encontramos os valores mínimo e máximo da porosidade $\phi = 2,9 \pm 0,1$ % (seção 621) e $\phi = 5,8 \pm 0,2$ % (seção 341), respectivamente. Um gráfico representando todos os valores de porosidade encontrados para as diversas seções analisadas pode ser observado na Figura 93. Em vermelho está a barra do desvio estatístico para cada seção, com 95 % de confiança.

Figura 93 – Perfil de porosidade da amostra 108.

5.4.3 Distribuição de Tamanho de Poros

A Figura 94 mostra a distribuição de tamanho de poros média para a amostra 108. Esta distribuição é apresentada na forma de um histograma de frequência (%) versus o raio de poro (μm).

Neste histograma pode-se notar que aproximadamente 92 % da fase porosa refere-se a poros com raios entre 2,9 e 20,6 μm e há uma distribuição em torno do valor de 11,7 μm . A frequência dos poros de maior raio é relativamente pequena, porém pode ser melhor observada na região ampliada do gráfico da Figura 94, que compreende os poros com raios entre 41,1 e 64,6 μm .

Figura 94 – Distribuição de tamanho de poros média para a amostra 108.

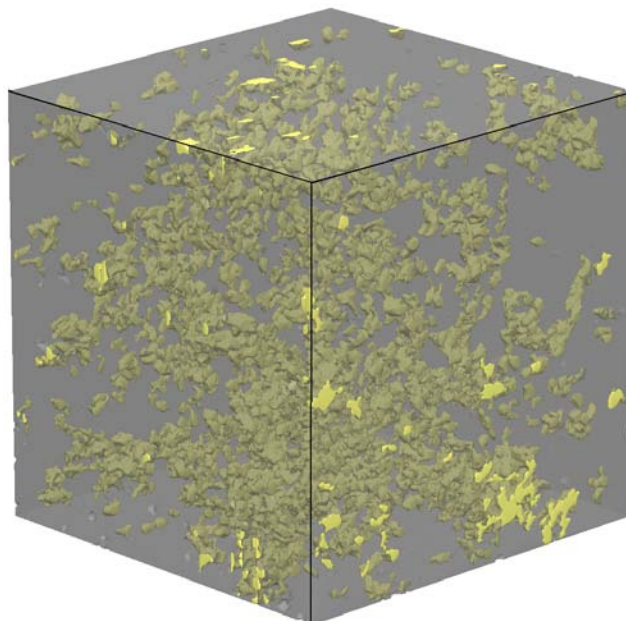
5.4.4 Permeabilidade

Para a determinação da permeabilidade da amostra 108 foi utilizada uma imagem 3-D da amostra (subvolume), com dimensões de $1176 \times 1176 \times 1176 \mu\text{m}^3$. Após um tempo de 15 horas de simulação, a permeabilidade encontrada para a amostra 108 foi de 2,28 mD. Este subvolume apresentou porosidade de 6,1 %, sendo apenas 4,0 % conectados, ou seja, 34 % dos poros são isolados e não contribuíram para o cálculo da permeabilidade.

5.4.5 Imagem 3-D

Para uma melhor visualização dos poros da amostra 108, foi reconstruída uma imagem 3-D de $1500 \times 1500 \times 1500 \mu\text{m}^3$. Desta forma, na Figura 95, é possível visualizar tais poros em amarelo e observar claramente que a maioria são pequenos e isolados. A porosidade para este subvolume é de $4,0 \pm 0,1 \%$, e mesmo com um subvolume relativamente reduzido, este valor está bem próximo do valor médio da porosidade determinado a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 4,2 \pm 0,1 \%$).

Figura 95 –Imagem 3-D reconstruída da amostra 108 ($1500 \times 1500 \times 1500 \mu\text{m}^3$), cinza representa a fase sólida e o amarelo a fase porosa.



5.5 ARENITO 403 (FORMAÇÃO TERESINA)

Algumas informações sobre alguns dos parâmetros mais importantes para comparação são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 –Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra 403 da Formação Teresina.

Tensão (kV)	Rotação total (°)	Passo angular (°)	Resolução Espacial (μm)	Tempo de Exposição para cada projeção (ms)	"Frames"	Tempo total de aquisição
70	0 a 180	0,5	3,9	1770	5	55 min
70	0 a 360	0,25	1,4	2655	3	3 horas

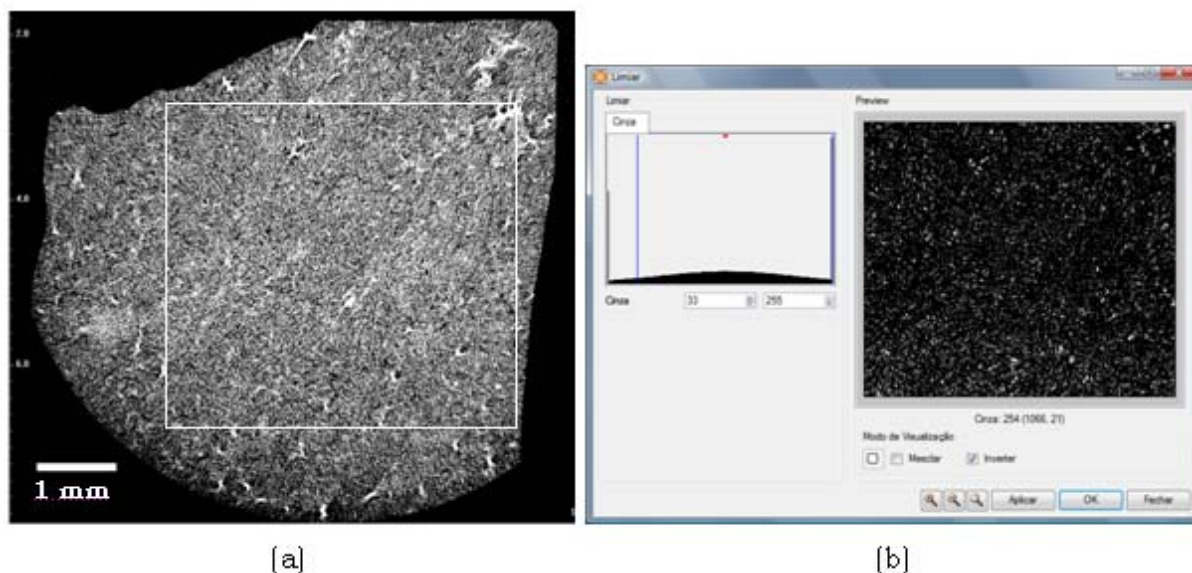
Utilizando estes parâmetros foram adquiridas 379 e 1440 projeções, respectivamente, para as resoluções de 3,9 e 1,4 μm , que serviram como dados de entrada no software NRecon para a reconstrução de 801 seções 2-D, sendo uma destas imagens apresentada na Figura 96a. Destas 801 seções (resolução 3,9 μm), apenas 260 foram utilizadas

para as análises de porosidade e distribuição de tamanho de poros. A análise parcial das seções deve-se pela existência de materiais altamente atenuantes no interior da amostra, criando falsos poros e, desta forma, aumentando a porosidade média e distorcendo a distribuição de tamanho de poros. Mais detalhes podem ser observados na subseção "5.5.2 Porosidade".

5.5.1 Binarização

Na Figura 96 é possível visualizar o processo de binarização, onde na Figura 96a aparece a imagem de uma seção da amostra 403 em escala de cinza, já com uma região selecionada pelo retângulo branco. Na Figura 96b aparece a janela de binarização do software Imago, onde foi escolhido o nível de cinza 33 para a região selecionada, sendo a região em preto representando a fase sólida e a branca a fase porosa.

Figura 96 – Processo de binarização para as imagens da amostra 403; (a) seção 850 reconstruída; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.

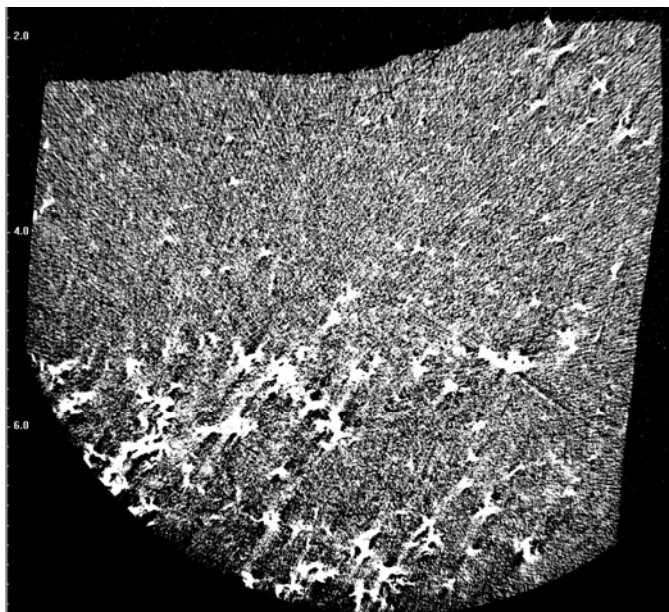


5.5.2 Porosidade

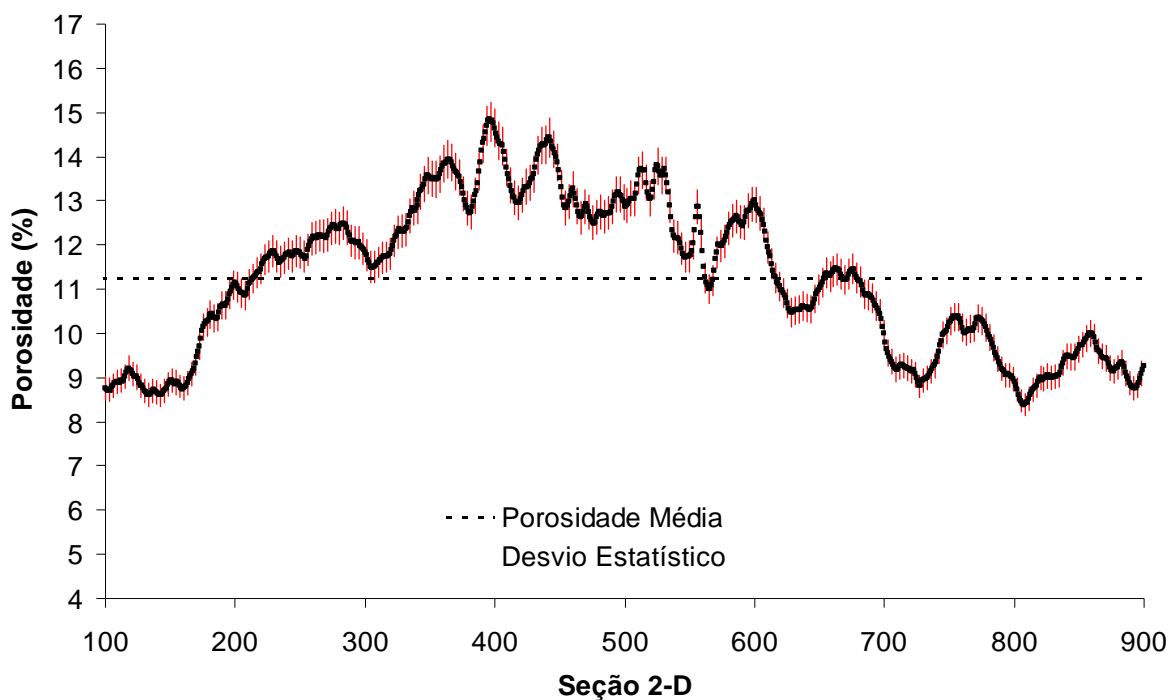
Analisando todas as 801 seções, a porosidade média total encontrada para a amostra 403 foi de $11,3 \pm 0,3$ %, com 95 % de confiança. No entanto, como mencionado anteriormente, na maior parte destas seções existem artefatos criados por materiais altamente

atenuantes, os quais causam um aumento na porosidade. Portanto, esta porosidade está superestimada. Tais materiais atenuantes (em branco) podem ser observados na seção 396 apresentada na Figura 97

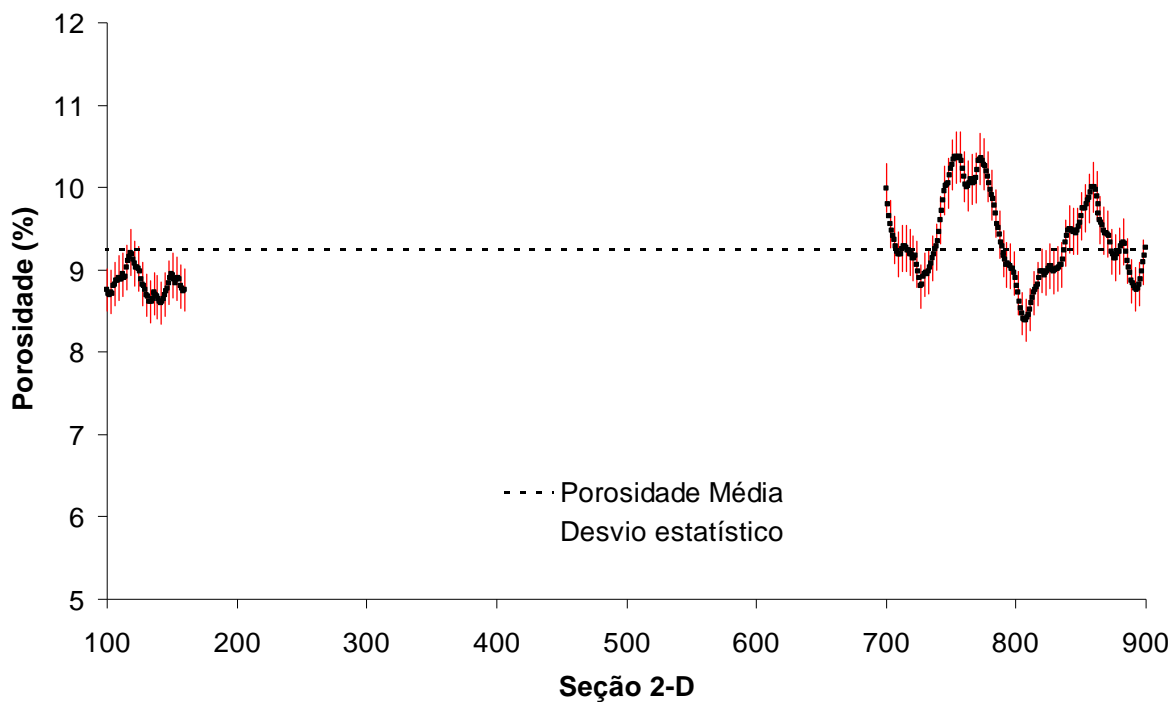
Figura 97 – Seção 396 da amostra 403 com artefatos que aumentam a porosidade.



Na Figura 98 pode ser observado o perfil de porosidade para as 801 seções, sendo da seção 161 até a 699 as que existiam tais artefatos, e como pode ser visto na figura, a porosidade sofre um aumento significativo. Em vermelho está a barra do desvio estatístico para cada seção, com 95 % de confiança.

Figura 98 – Perfil de porosidade da amostra 403.

Desta forma, analisamos apenas as seções que não continham tais artefatos, que eram apenas 260, a porosidade média total encontrada diminuiu para $9,3 \pm 0,2 \%$, com 95 % de confiança. Na Figura 99 é apresentado o perfil de porosidade sem as seções que continham os artefatos. Para estas seções encontramos os valores mínimo e máximo da porosidade $\phi = 8,4 \pm 0,2 \%$ (seção 806) e $\phi = 10,4 \pm 0,3 \%$ (seção 756), respectivamente.

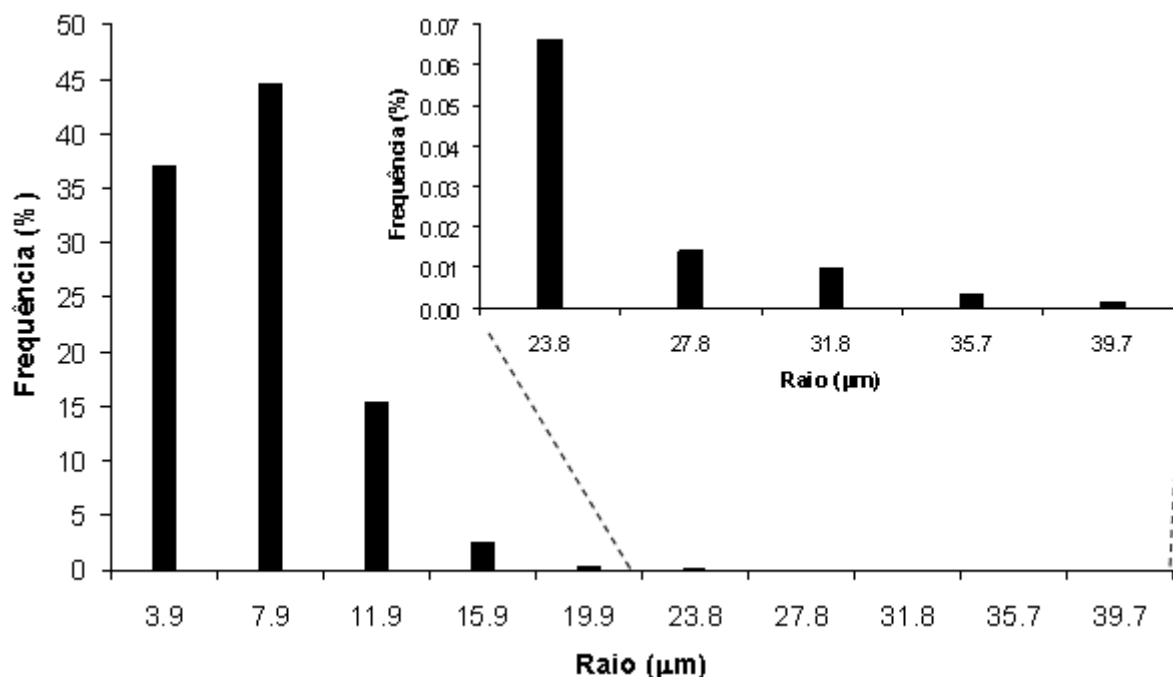
Figura 99 – Perfil de porosidade da amostra 403 para as seções 100 a 160 e 700 a 900.

5.5.3 Distribuição de Tamanho de Poros

A Figura 100 mostra a distribuição de tamanho de poros média para a amostra 403. Esta distribuição é apresentada na forma de um histograma de frequência (%) versus o raio de poro (μm).

Neste histograma pode-se notar que aproximadamente 97 % da fase porosa refere-se a poros com raios entre 3,9 e 11,9 μm . A frequência de 37,5 % para os poros com raio de 3,9 μm (resolução espacial utilizada) e considerada muito elevada, dando indícios de que existem poros com raios menores. Portanto, foi necessário microtomografar novamente esta amostra, porém com uma resolução espacial menor (1,4 μm). A frequência dos poros de maior raio é relativamente pequena, porém pode ser melhor observada na região ampliada do gráfico da Figura 100, que compreende os poros com raios entre 23,8 e 39,7 μm .

Figura 100 –Distribuição de tamanho de poros média para a amostra 403 com resolução espacial de 3,9 μm



A Figura 101 mostra a distribuição de tamanho de poros média para a amostra 403 com resolução espacial de 1,4 μm . Esta nova aquisição foi realizada no mesmo microtomógrafo da Skyscan 1172 e os parâmetros de aquisição utilizados foram apresentados na Tabela 11.

Neste histograma também ocorreu uma grande frequência de poros (25 %) com raios de 1,4 μm , ou seja, a resolução espacial utilizada. Fato que reforçou a nossa tese de que existiam poros menores que a resolução utilizada inicialmente (3,9 μm). No entanto, os 25 % encontrados ainda são considerados altos, porém como já chegamos próximo ao limite da resolução espacial alcançada pelo equipamento (1,0 μm), seria necessária a utilização de um nanotomógrafo para verificar a existência de poros menores. Na Figura 103 pode ser observada a seção 100 da amostra com resolução espacial de 1,4 μm .

Figura 101 – Distribuição de tamanho de poros média para a amostra 403 com resolução espacial de 1,4 μm

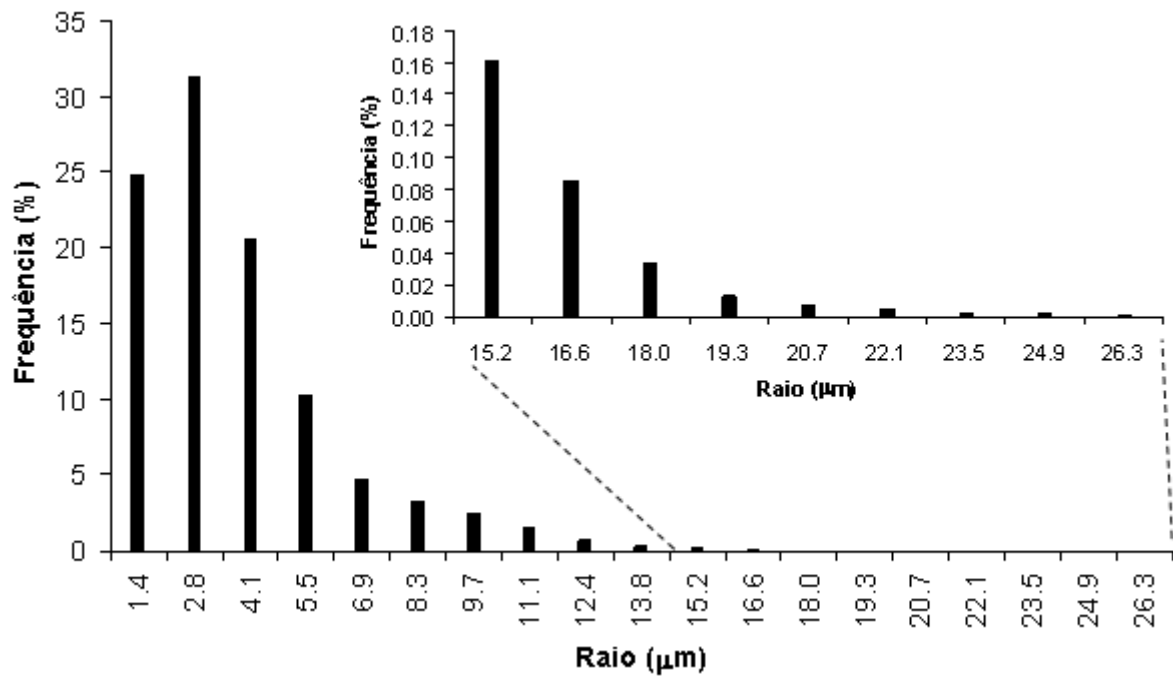
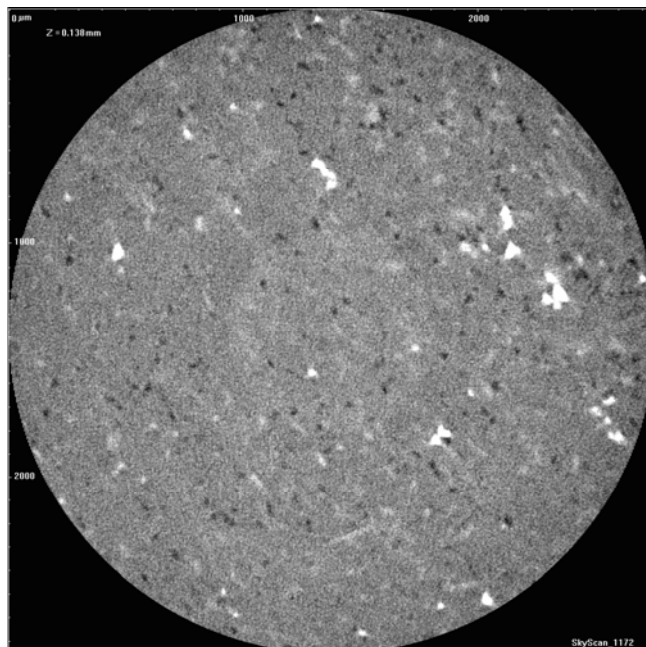


Figura 102 – Seção 100 da amostra 403 com resolução espacial de 1,4 μm .



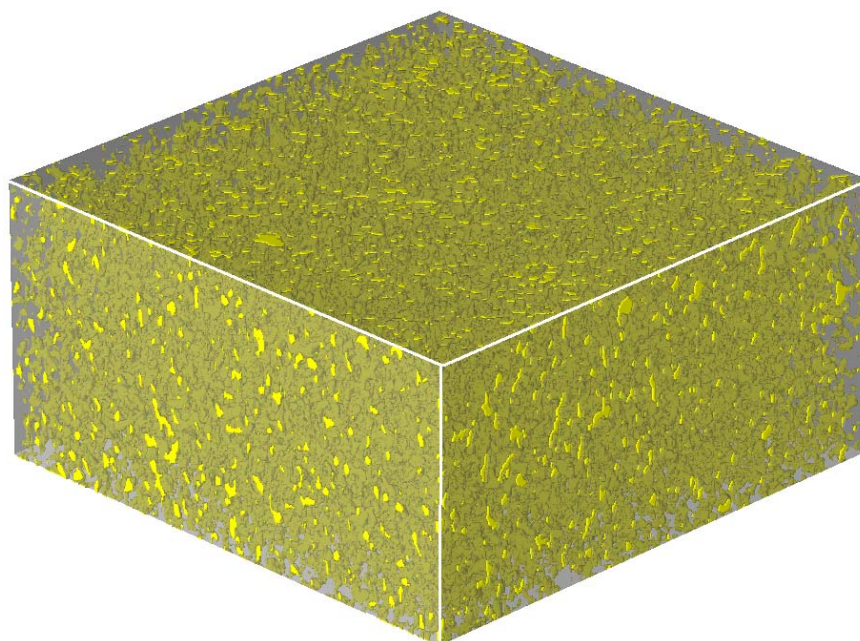
5.5.4 Permeabilidade

Para a determinação da permeabilidade da amostra 403 foi utilizada uma imagem 3-D da amostra (subvolume), com dimensões de $1560 \times 1560 \times 1560 \mu\text{m}^3$. Após um tempo de 8 horas de simulação, a permeabilidade encontrada para a amostra 403 foi de 76,35 mD. Este subvolume apresentou porosidade de 9,4 %, sendo todos os poros conectados.

5.5.5 Imagem 3-D

Para uma melhor visualização dos poros da amostra 403, foi reconstruída uma imagem 3-D de $1501 \times 1501 \times 800 \mu\text{m}^3$. Desta forma, na Figura 103, é possível visualizar tais poros em amarelo e observar claramente que a maioria são pequenos e isolados. A porosidade para este subvolume é de $7,6 \pm 0,2 \%$, e mesmo com um subvolume relativamente reduzido, este valor está razoavelmente próximo do valor médio da porosidade determinado a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 9,3 \pm 0,2 \%$).

Figura 103 – Imagem 3-D reconstruída da amostra 403 ($1501 \times 1501 \times 800 \mu\text{m}^3$), cinza representa a fase sólida e o amarelo a fase porosa.



5.6 SILTITO MC16 (FORMAÇÃO RIO BONITO)

Algumas informações sobre alguns dos parâmetros mais importantes para comparação são apresentadas na Tabela 12.

Utilizando estes parâmetros foram adquiridas 938 projeções, que serviram como dados de entrada no software NRecon para a reconstrução de 490 seções 2-D, sendo uma destas imagens apresentada na Figura 104a. Todas as 490 seções foram utilizadas para as análises de porosidade e distribuição de tamanho de poros, divididas em conjuntos de aproximadamente 160 imagens.

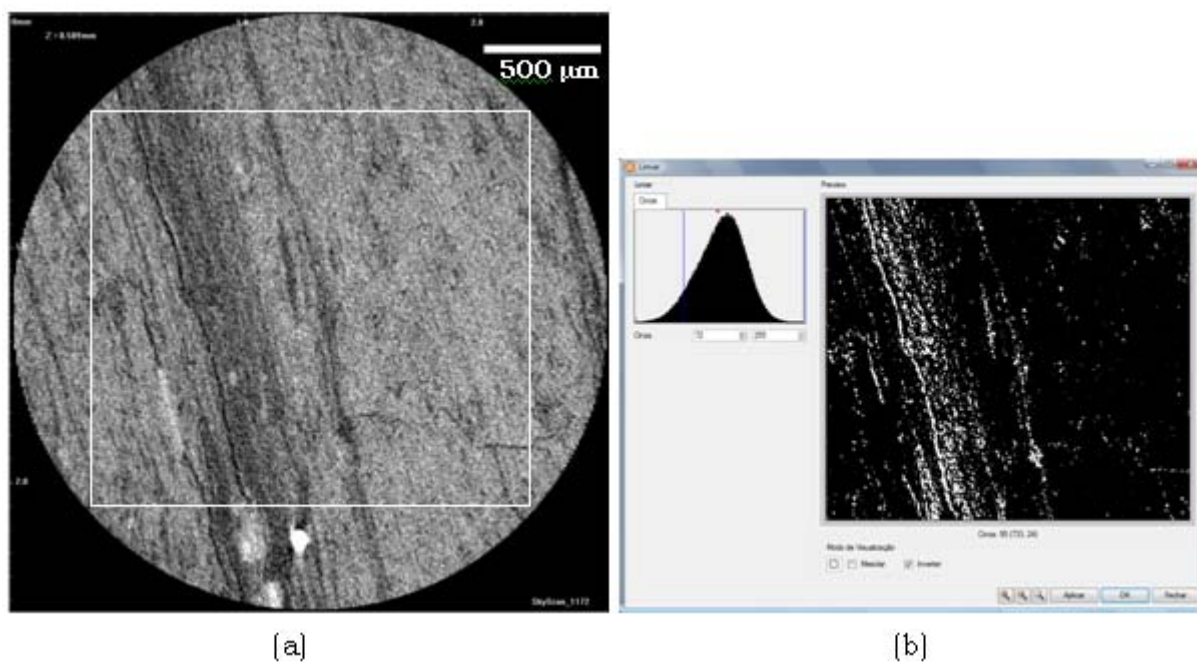
Tabela 12 – Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra MC16 da Formação Rio Bonito

Tensão (kV)	Rotação total (°)	Passo angular (°)	Resolução Espacial (µm)	Tempo de Exposição para cada projeção (ms)	"Frames"	Tempo total de aquisição
70	0 a 180	0,25	2,5	632	5	59 min

5.6.1 Binarização

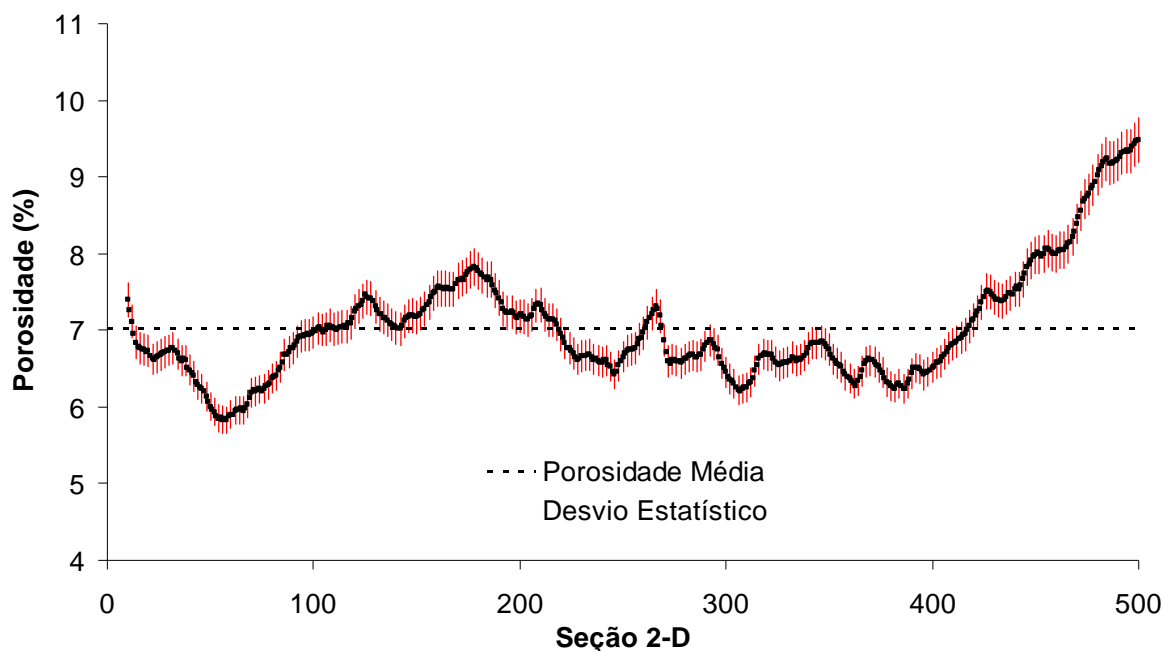
Na Figura 104 é possível visualizar o processo de binarização, onde na Figura 104a aparece a imagem de uma seção da amostra MC16 em escala de cinza, já com uma região selecionada pelo retângulo branco. Na Figura 104b aparece a janela de binarização do software Imago, onde foi escolhido o nível de cinza 72 para a região selecionada, sendo a região em preto representando a fase sólida e a branca a fase porosa.

Figura 104 – Processo de binarização para as imagens da amostra MC16; (a) seção 230 reconstruída; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida



5.6.2 Porosidade

A porosidade média total encontrada para a amostra MC16 foi de $7,0 \pm 0,2$ %, com 95 % de confiança. Analisando as seções individualmente encontramos os valores mínimo e máximo da porosidade $\phi = 5,8 \pm 0,1$ % (seção 55) e $\phi = 9,4 \pm 0,2$ % (seção 500), respectivamente. Um gráfico representando todos os valores de porosidade encontrados para as diversas seções analisadas pode ser observado na Figura 148. Em vermelho está a barra do desvio estatístico para cada seção, com 95 % de confiança.

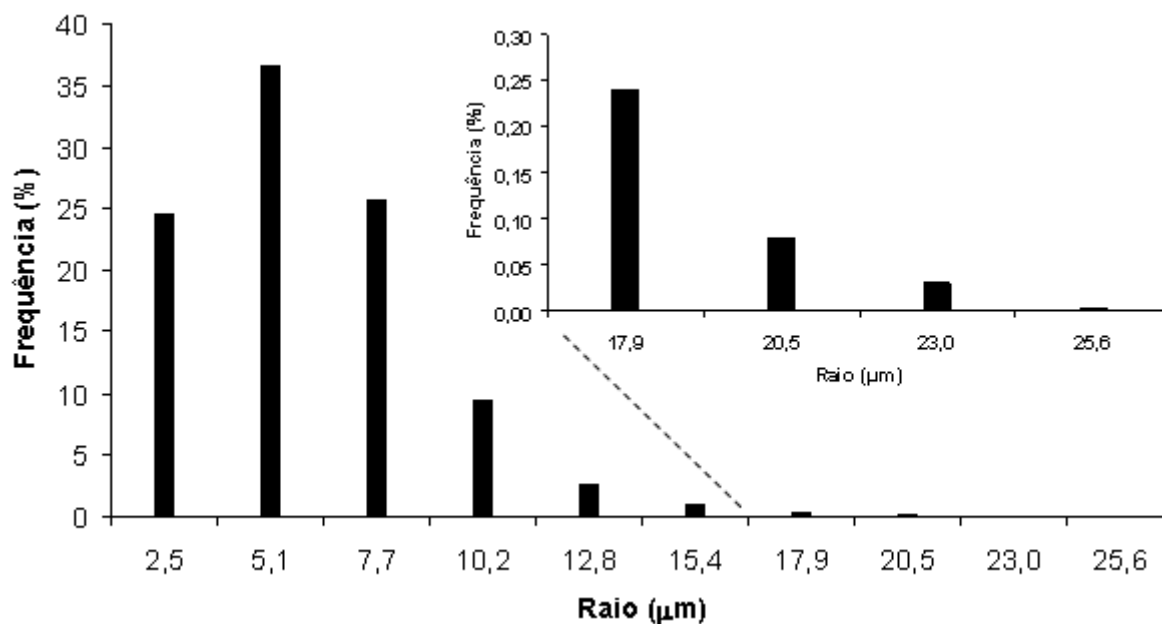
Figura 105 – Perfil de porosidade da amostra MC16.

5.6.3 Distribuição de Tamanho de Poros

A Figura 106 mostra a distribuição de tamanho de poros média para a amostra MC16. Esta distribuição é apresentada na forma de um histograma de frequência (%) versus o raio de poro (μm).

Neste histograma pode-se notar que aproximadamente 95 % da fase porosa refere-se a poros com raios entre 2,5 e 10,2 μm . Da mesma forma que para a amostra 403, a frequência de 25 % para os poros com raio de 2,5 μm (resolução espacial utilizada) é considerada muito elevada, dando indícios de que existem poros com raios menores. Portanto, também seria indicado microtomografar novamente esta amostra, porém com uma resolução espacial menor. No entanto, ao observar as imagens 2-D e 3-D desta amostra, verificamos a existência de "fissuras" com diâmetro de aproximadamente 5 a 10 μm , causadas pela parte folhada da amostra. Tais fissuras podem ser observadas na Figura 104. Como estas "fissuras" se repetem por toda a amostra, justificam, em parte, a grande frequência para poros com raios menores.

A frequência dos poros de maior raio é relativamente pequena, porém pode ser melhor observada na região ampliada do gráfico da Figura 106, que compreende os poros com raios entre 17,9 e 25,6 μm .

Figura 106 – Distribuição de tamanho de poros média para a amostra MC16.

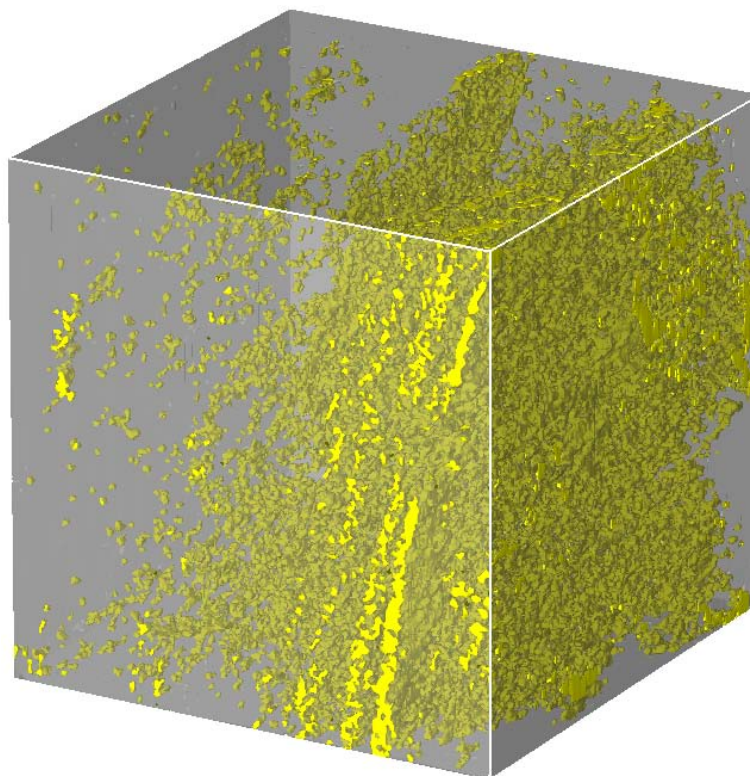
5.6.4 Permeabilidade

Para a determinação da permeabilidade da amostra MC16 foi utilizada uma imagem 3-D da amostra (subvolume), com dimensões de $1024 \times 1024 \times 1024 \mu\text{m}^3$. Após um tempo de 15 horas de simulação, a permeabilidade encontrada para a amostra MC16 foi de 1,73 mD. Este subvolume apresentou porosidade de 8,5 %, sendo 8,0 % conectados.

5.6.5 Imagem 3-D

Para uma melhor visualização dos poros da amostra MC16, foi reconstruída uma imagem 3-D de $1000 \times 1000 \times 1000 \mu\text{m}^3$. Desta forma, na Figura 107, é possível visualizar uma concentração maior de poros, em amarelo, em um lado da amostra na forma de folhelho. A porosidade para este subvolume é de $7,0 \pm 0,2 \%$, e mesmo com um subvolume relativamente reduzido, este valor é o mesmo valor médio da porosidade determinado a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 7,0 \pm 0,2 \%$).

Figura 107 – Imagem 3-D reconstruída da amostra MC16 ($1000 \times 1000 \times 1000 \mu\text{m}^3$) cinza representa a fase sólida e o amarelo a fase porosa.



5.7 SILTITO PG6 (FORMAÇÃO RIO DO SUL)

Algumas informações sobre alguns dos parâmetros mais importantes para comparação são apresentadas na Tabela 13.

Utilizando estes parâmetros foram adquiridas 751 projeções, que serviram como dados de entrada no software NRecon para a reconstrução de 801 seções 2-D, sendo uma destas imagens apresentada na Figura 108a. Todas as 801 seções foram utilizadas para as análises de porosidade e distribuição de tamanho de poros, divididas em conjuntos de 200 imagens.

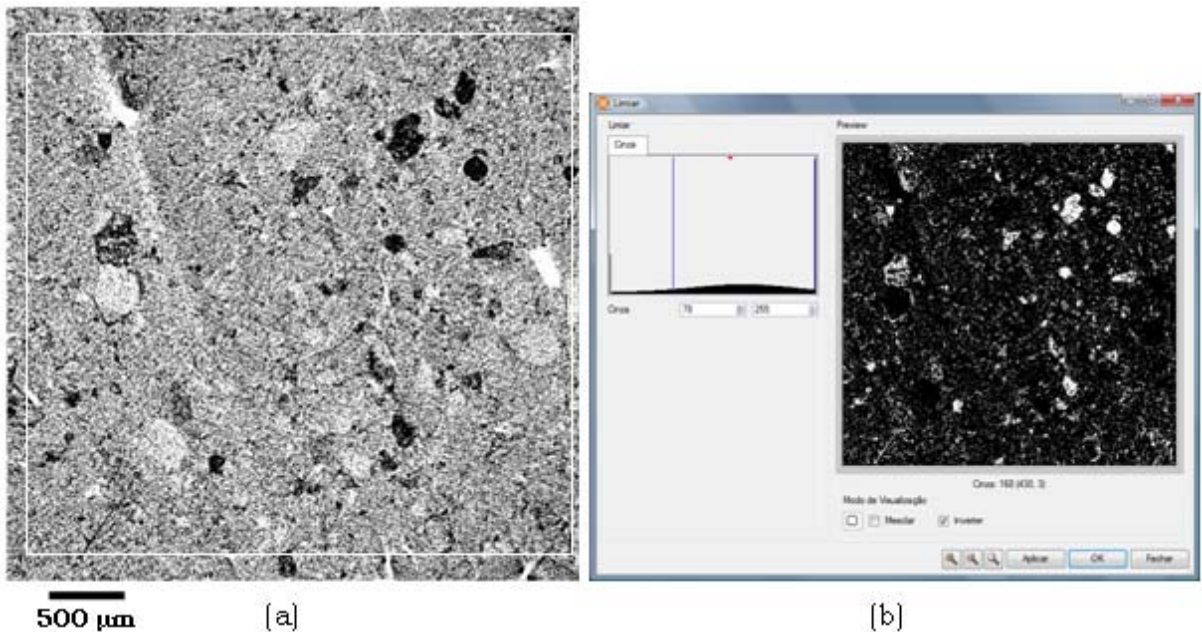
Tabela 13 –Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra PG6 da Formação Rio do Sul.

Tensão (kV)	Rotação total (°)	Passo angular (°)	Resolução Espacial (µm)	Tempo de Exposição para cada projeção (ms)	“Frames”	Tempo total de aquisição
70	0 a 180	0,25	2,9	2655	5	2 horas e 45 min

5.7.1 Binarização

Na Figura 108 é possível visualizar o processo de binarização, onde na Figura 108a aparece a imagem de uma seção da amostra PG6 em escala de cinza, já com uma região selecionada pelo retângulo branco. Na Figura 108b aparece a janela de binarização do software Imago, onde foi escolhido o nível de cinza 78 para a região selecionada, sendo a região em preto representando a fase sólida e a branca a fase porosa.

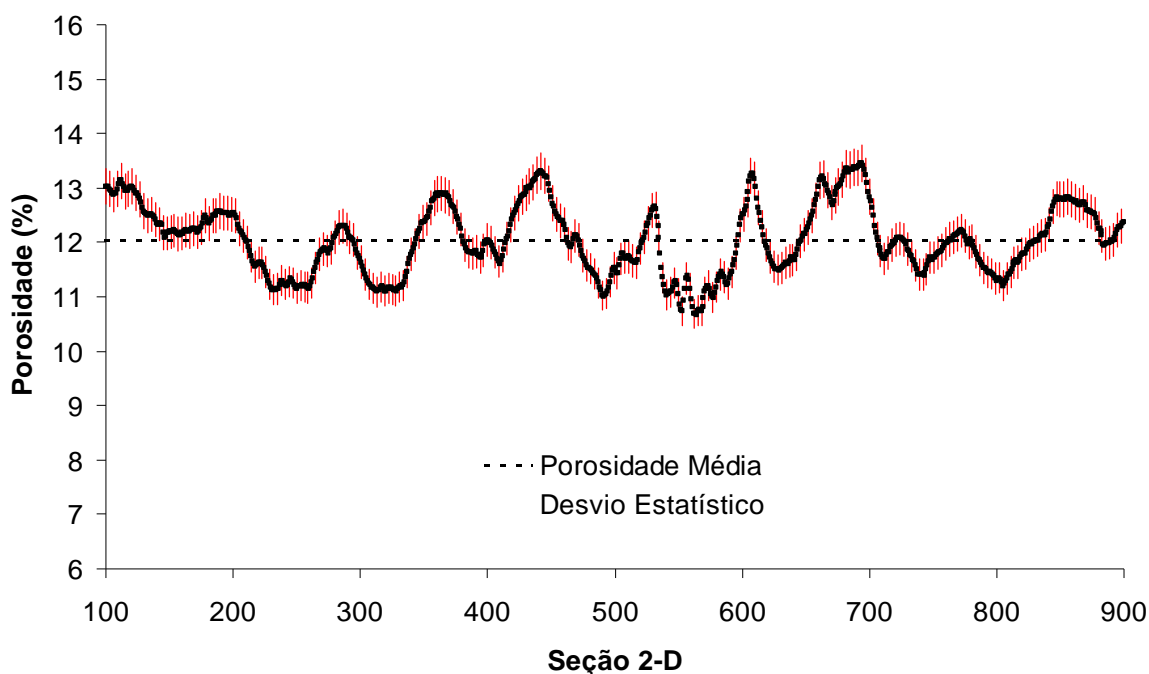
Figura 108 – Processo de binarização para as imagens da amostra PG6; (a) seção 100 reconstruída; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.



5.7.2 Porosidade

A porosidade média total encontrada para a amostra PG6 foi de $12,0 \pm 0,3$ %, com 95 % de confiança. Analisando as seções individualmente encontramos os valores mínimo e máximo da porosidade $\phi = 10,7 \pm 0,2$ % (seção 565) e $\phi = 13,4 \pm 0,3$ % (seção 694), respectivamente. Um gráfico representando todos os valores de porosidade encontrados para as diversas seções analisadas pode ser observado na Figura 109. Em vermelho está a barra do desvio estatístico para cada seção, com 95 % de confiança.

Figura 109 – Perfil de porosidade da amostra PG6.



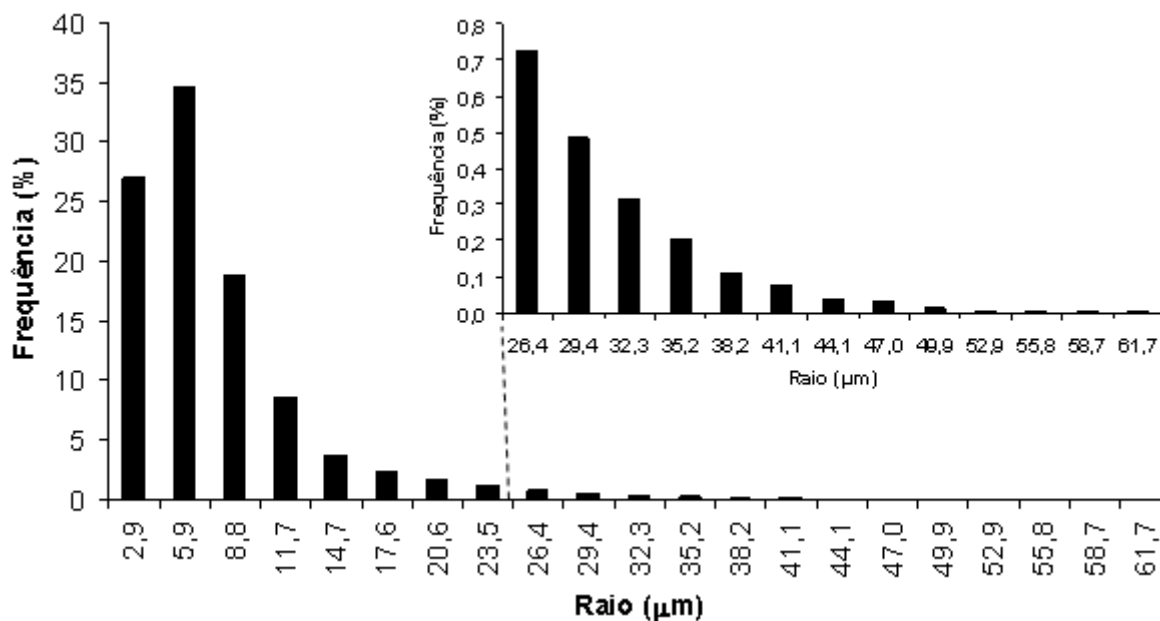
5.7.3 Distribuição de Tamanho de Poros

A Figura 110 mostra a distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG6 com resolução espacial de $2,9 \mu\text{m}$. Esta distribuição é apresentada na forma de um histograma de frequência (%) versus o raio de poro (μm).

Neste histograma pode-se notar que aproximadamente 90 % da fase porosa refere-se a poros com raios entre $2,9$ e $11,7 \mu\text{m}$. Da mesma forma que para a amostra 403 e MC16, a frequência de 27 % para os poros com raio de $2,9 \mu\text{m}$ (resolução espacial utilizada) e considerada muito elevada, dando indícios de que existem poros com raios menores. Portanto,

foi necessário microtomografar novamente esta amostra, porém com uma resolução espacial menor (1,2 μm). A frequência dos poros de maior raio é relativamente pequena, porém pode ser melhor observada na região ampliada do gráfico da Figura 110, que compreende os poros com raios entre 26,4 e 61,7 μm .

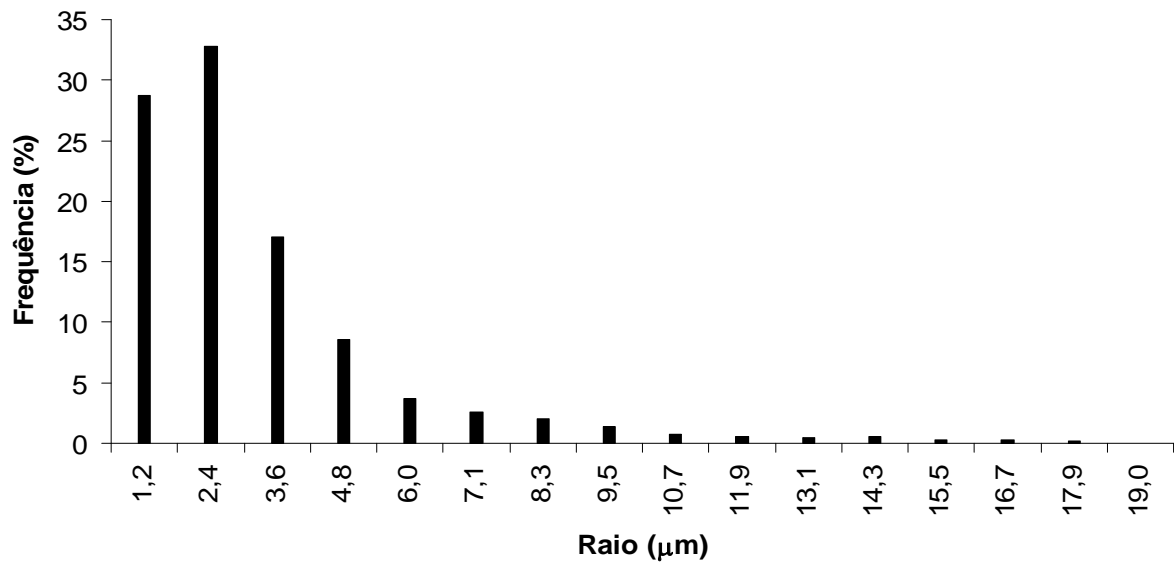
Figura 110 – Distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG6 com resolução espacial de 2,9 μm .



A Figura 111 mostra a distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG6 com resolução espacial de 1,2 μm . Esta nova aquisição foi realizada pelo coordenador do Laboratório de Física Nuclear Aplicada na sede da empresa XRadia nos Estados Unidos em 2008, onde foi testado um microtomógrafo e um nanotomógrafo. Para a realização desta medida foi utilizada uma subamostra de 0,7 x 0,7 x 2 mm. Neste histograma pode-se perceber que o raio máximo dos poros encontrados nesta subamostra foi de 19 μm . Já para a resolução de 2,9 μm os raios encontrados foram maiores, chegando a 61,7 μm .

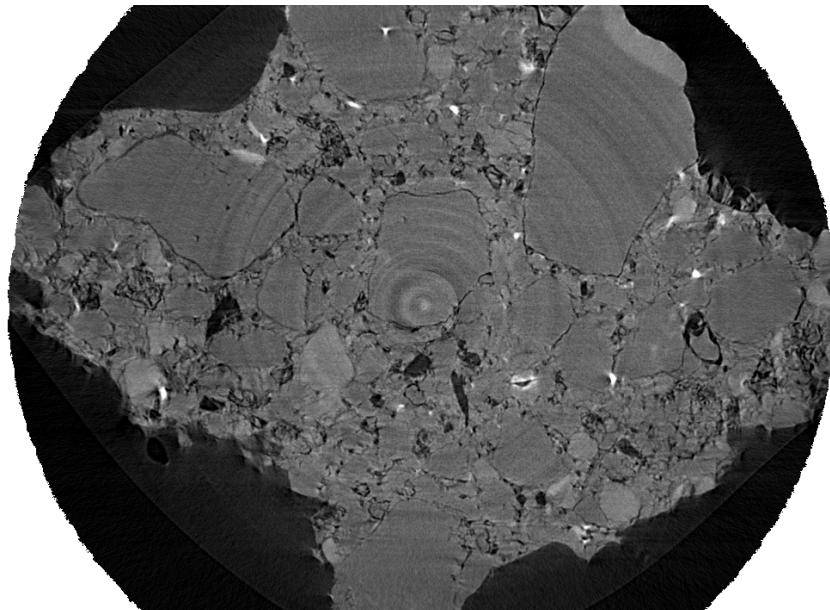
Esta variação deve-se pelo tamanho da amostra microtomografada, uma vez que para a resolução de 2,9 μm , o ROI utilizado foi de 3,8 x 3,8 mm e para a resolução de 1,2 μm o ROI foi de 0,5 x 0,5 mm, ou seja, os poros maiores encontrados na amostra com resolução de 2,9 μm não estavam presentes na amostra com resolução de 1,2 μm , possivelmente devido ao seu tamanho muito reduzido.

Figura 111 – Distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG6 com resolução espacial de 1,2 μm .



Neste histograma também ocorreu uma grande frequência de poros com raios de 1,2 μm , ou seja, a resolução espacial utilizada. No entanto, após observar as seções 2-D com esta resolução, verificamos a existência de "fissuras" com 2,5 μm aproximadamente, que na realidade são as junções dos grãos existentes na amostra, e que podem ser observadas na Figura 112. Como estas "fissuras" se repetem por toda a amostra, justificam, em parte, a grande frequência para poros com raio de 1,2 μm .

Figura 112 – Seção 17 da amostra PG6 com resolução espacial de 1,2 μm .



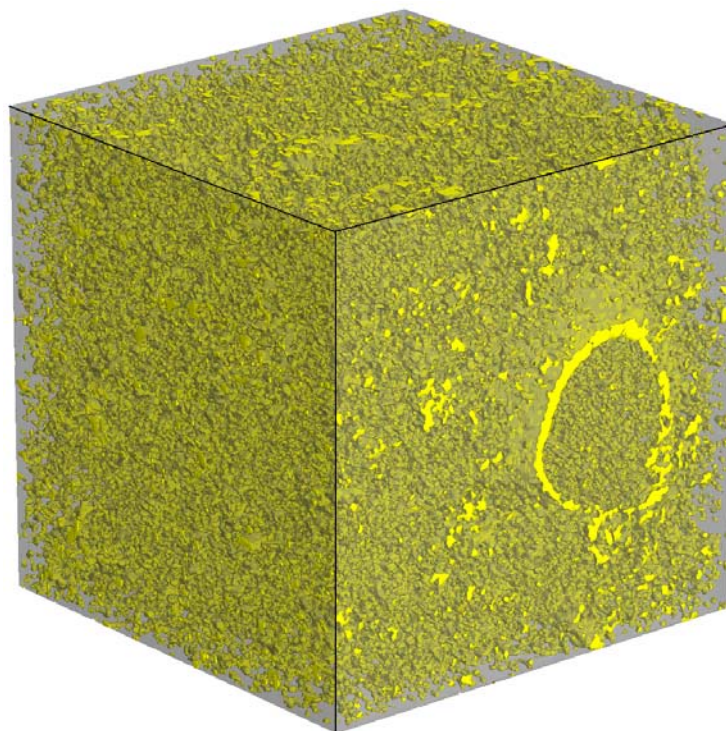
5.7.4 Permeabilidade

Para a determinação da permeabilidade da amostra PG6 foi utilizada uma imagem 3-D da amostra (subvolume), com dimensões de $1176 \times 1176 \times 1176 \mu\text{m}^3$. Após um tempo de 8 horas de simulação, a permeabilidade encontrada para a amostra PG6 foi de 23,48 mD. Este subvolume apresentou porosidade de 10,7 %, sendo 10,2 % conectados.

5.7.5 Imagem 3-D

Para uma melhor visualização dos poros da amostra PG6 com resolução de $2,9 \mu\text{m}$, foi reconstruída uma imagem 3-D de $1201 \times 1201 \times 1201 \mu\text{m}^3$. Desta forma, na Figura 113, é possível visualizar, em amarelo, um grande número de poros pequenos distribuídos pelo volume e, indicado pela seta, um poro envolvendo um "grão" da rocha, possivelmente um seixo arredondado. A porosidade para este subvolume é de $11,5 \pm 0,3 \%$, e mesmo com um subvolume relativamente reduzido, este valor está razoavelmente próximo do valor médio da porosidade determinado a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 12,0 \pm 0,3 \%$).

Figura 113 – Imagem 3-D reconstruída da amostra PG6 ($1201 \times 1201 \times 1201 \mu\text{m}^3$) cinza representa a fase sólida e o amarelo a fase porosa.



5.8 ARENITO PG8 (FORMAÇÃO FURNAS)

Algumas informações sobre alguns dos parâmetros mais importantes para comparação são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra PG8 da Formação Furnas

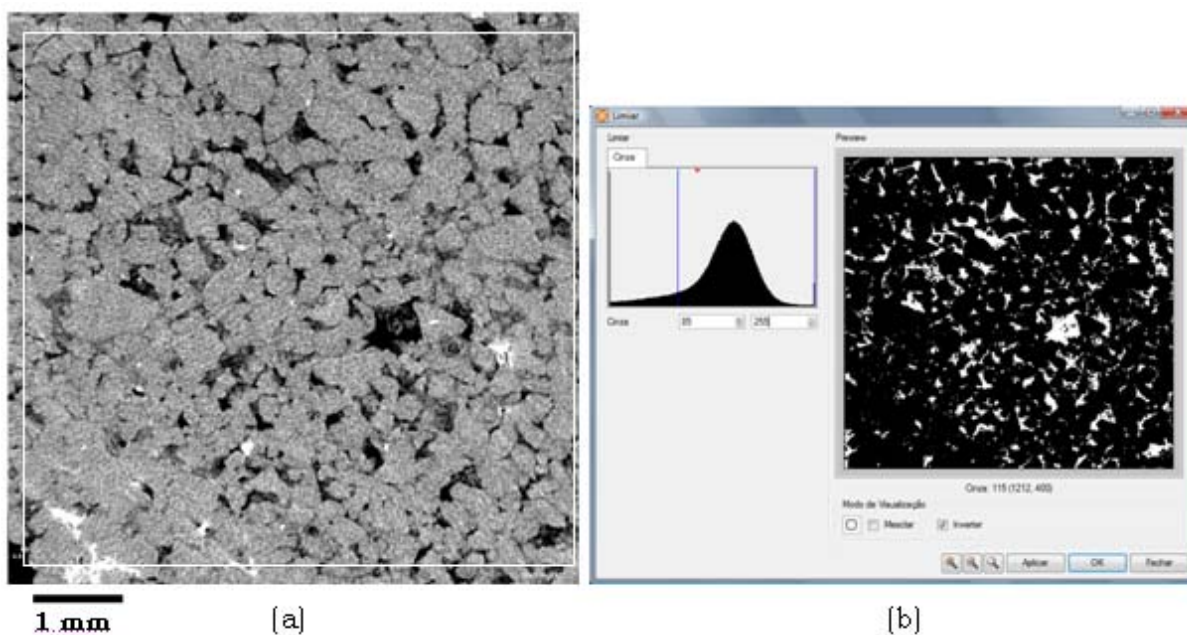
Tensão (kV)	Rotação total (°)	Passo angular (°)	Resolução Espacial (μm)	Tempo de Exposição para cada projeção (ms)	"Frames"	Tempo total de aquisição
80	0 a 180	0,25	5,0	1180	5	1 hora e 30 min

Utilizando estes parâmetros foram adquiridas 769 projeções, que serviram como dados de entrada no software NRecon para a reconstrução de 801 seções 2-D, sendo uma destas imagens apresentada na Figura 114a. Todas as 801 seções foram utilizadas para as análises de porosidade e distribuição de tamanho de poros, divididas em conjuntos de aproximadamente 200 imagens.

5.8.1 Binarização

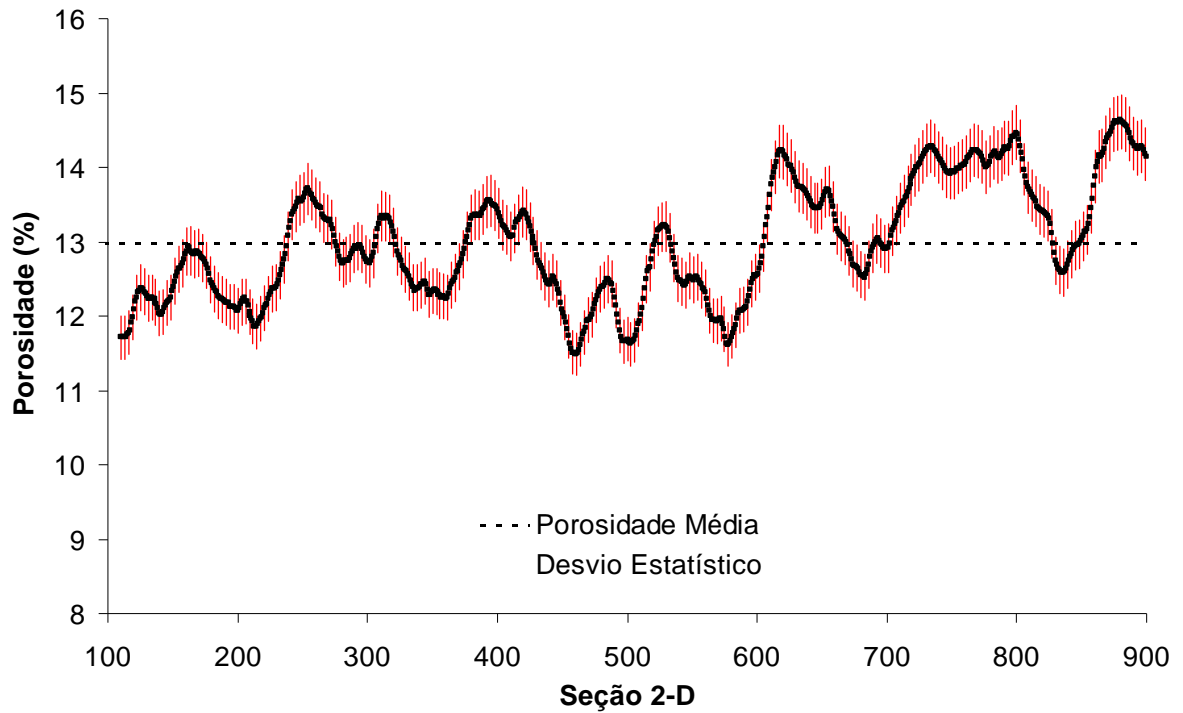
Na Figura 114 é possível visualizar o processo de binarização, onde na Figura 114a aparece a imagem de uma seção da amostra PG8 em escala de cinza, já com uma região selecionada pelo retângulo branco. Na Figura 114b aparece a janela de binarização do software Imago, onde foi escolhido o nível de cinza 85 para a região selecionada, sendo a região em preto representando a fase sólida e a branca a fase porosa.

Figura 114 – Processo de binarização para as imagens da amostra PG8; (a) seção 110 reconstruída; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.



5.8.2 Porosidade

A porosidade média total encontrada para a amostra PG8 foi de $13,0 \pm 0,2$ %, com 95 % de confiança. Analisando as seções individualmente encontramos os valores mínimo e máximo da porosidade $\phi = 11,5 \pm 0,2$ % (seção 463) e $\phi = 14,6 \pm 0,3$ % (seção 880), respectivamente. Um gráfico representando todos os valores de porosidade encontrados para as diversas seções analisadas pode ser observado na Figura 115. Em vermelho está a barra do desvio estatístico para cada seção, com 95 % de confiança.

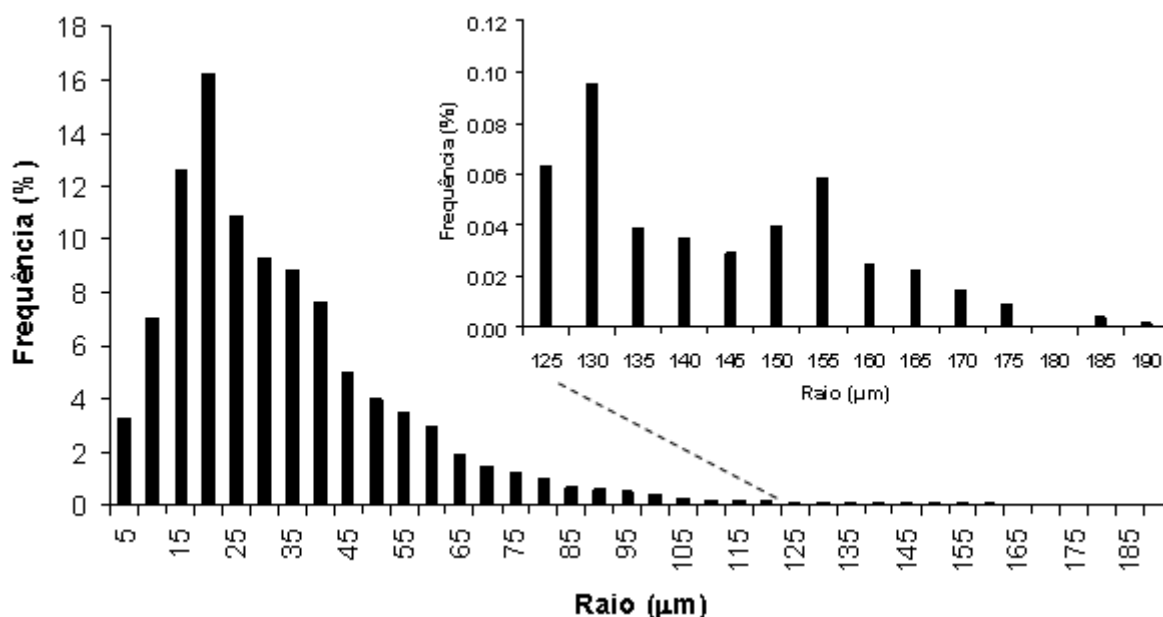
Figura 115 – Perfil de porosidade da amostra PG8.

5.8.3 Distribuição de Tamanho de Poros

A Figura 116 mostra a distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG8. Esta distribuição é apresentada na forma de um histograma de frequência (%) versus o raio de poro (μm).

Neste histograma pode-se notar que aproximadamente 91 % da fase porosa refere-se a poros com raios entre 5 e 60 μm . A frequência dos poros de maior raio é relativamente pequena, porém pode ser melhor observada na região ampliada do gráfico da Figura 116, que compreende os poros com raios entre 125 e 190 μm .

Figura 116 – Distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG8.



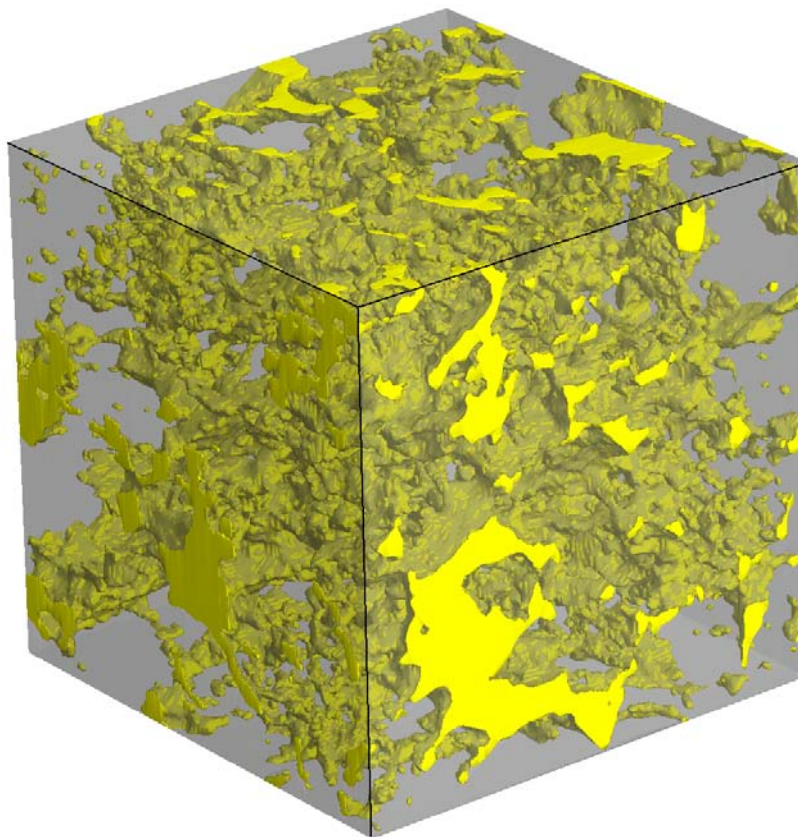
5.8.4 Permeabilidade

Para a determinação da permeabilidade da amostra PG8 foi utilizada uma imagem 3-D da amostra (subvolume), com dimensões de 2004 x 2004 x 2004 μm³. Após um tempo de 6,5 horas de simulação, a permeabilidade encontrada para a amostra PG8 foi de 17,31 mD. Este subvolume apresentou porosidade de 13,8 %, sendo 13,1 % conectados.

5.8.5 Imagem 3-D

Para uma melhor visualização dos poros da amostra PG8, foi reconstruída uma imagem 3-D de 1503 x 1503 x 1503 μm³. Desta forma, na Figura 117, é possível visualizar, em amarelo, redes porosas com diâmetros relativamente grandes e poucos poros isolados. A porosidade para este subvolume é de 12,6 ± 0,2 %, e mesmo com um subvolume relativamente reduzido, este valor é o mesmo valor médio da porosidade determinado a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 13,0 \pm 0,2 \%$).

Figura 117 –Imagem 3-D reconstruída da amostra PG8 (1503 x 1503 x 1503 μm^3) cinza representa a fase sólida e o amarelo a fase porosa.



5.9 ARENITO PG19 (FORMAÇÃO FURNAS)

Algumas informações sobre alguns dos parâmetros mais importantes para comparação são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 –Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra PG19 da Formação Furnas.

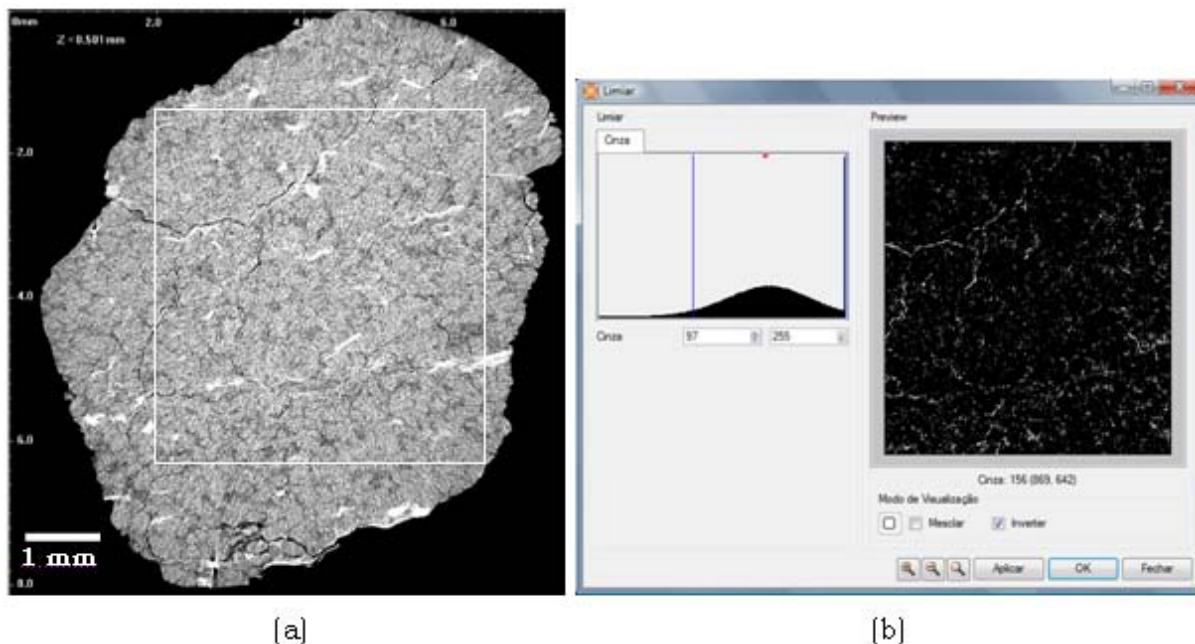
Tensão (kV)	Rotação total (°)	Passo angular (°)	Resolução Espacial (μm)	Tempo de Exposição para cada projeção (ms)	"Frames"	Tempo total de aquisição
70	0 a 180	0,25	5,0	1180	5	1 hora e 30 min
70	0 a 180	0,25	1,4	8260	2	3 horas e 30 min

Utilizando estes parâmetros foram adquiridas 769 projeções para ambas as resoluções, que serviram como dados de entrada no software NRecon para a reconstrução de 801 seções 2-D, sendo uma destas imagens apresentada na Figura 118a. Todas as 801 seções foram utilizadas para as análises de porosidade e distribuição de tamanho de poros, divididas em conjuntos de aproximadamente 200 imagens.

5.9.1 Binarização

Na Figura 118 é possível visualizar o processo de binarização, onde na Figura 118a aparece a imagem de uma seção da amostra PG19 em escala de cinza, já com uma região selecionada pelo retângulo branco. Na Figura 118b aparece a janela de binarização do software Imago, onde foi escolhido o nível de cinza 97 para a região selecionada, sendo a região em preto representando a fase sólida e a branca a fase porosa

Figura 118 – Processo de binarização para as imagens da amostra PG19; (a) seção 100 reconstruída; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.

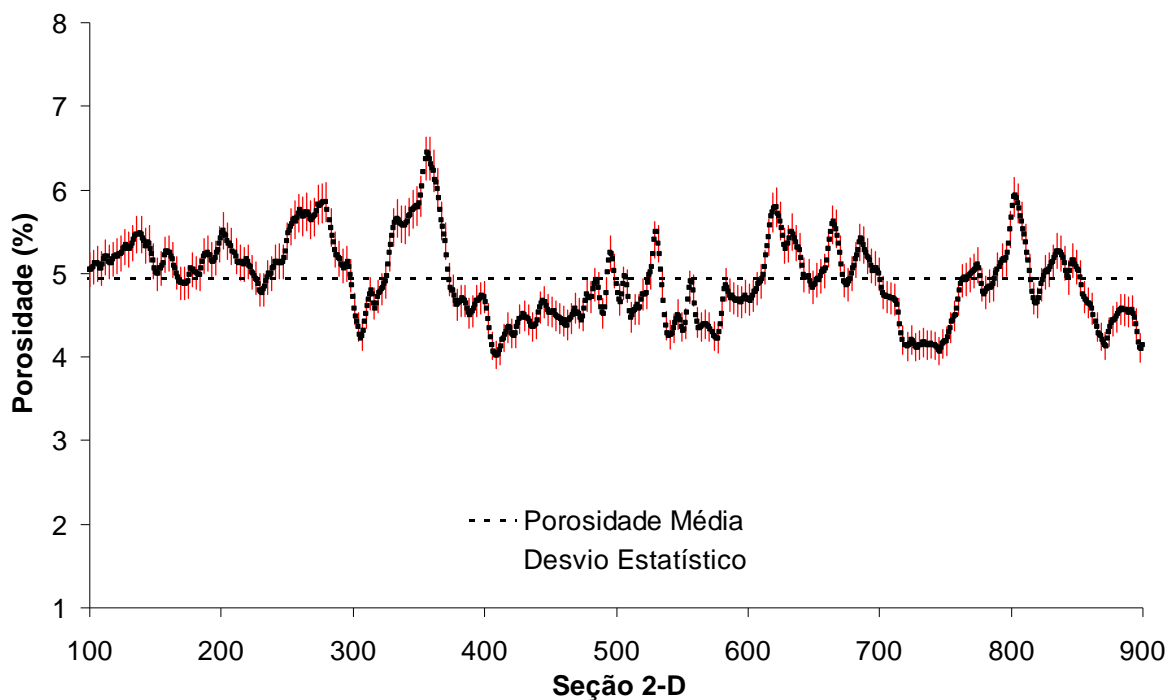


5.9.2 Porosidade

A porosidade média total encontrada para a amostra PG19 foi de $4,9 \pm 0,1$ %, com 95 % de confiança. Analisando as seções individualmente encontramos os valores

mínimo e máximo da porosidade $\phi = 4,1 \pm 0,1$ % (seção 412) e $\phi = 6,4 \pm 0,2$ % (seção 357), respectivamente. Um gráfico representando todos os valores de porosidade encontrados para as diversas seções analisadas pode ser observado na Figura 119. Em vermelho está a barra do desvio estatístico para cada seção, com 95 % de confiança.

Figura 119 – Perfil de porosidade da amostra PG19.

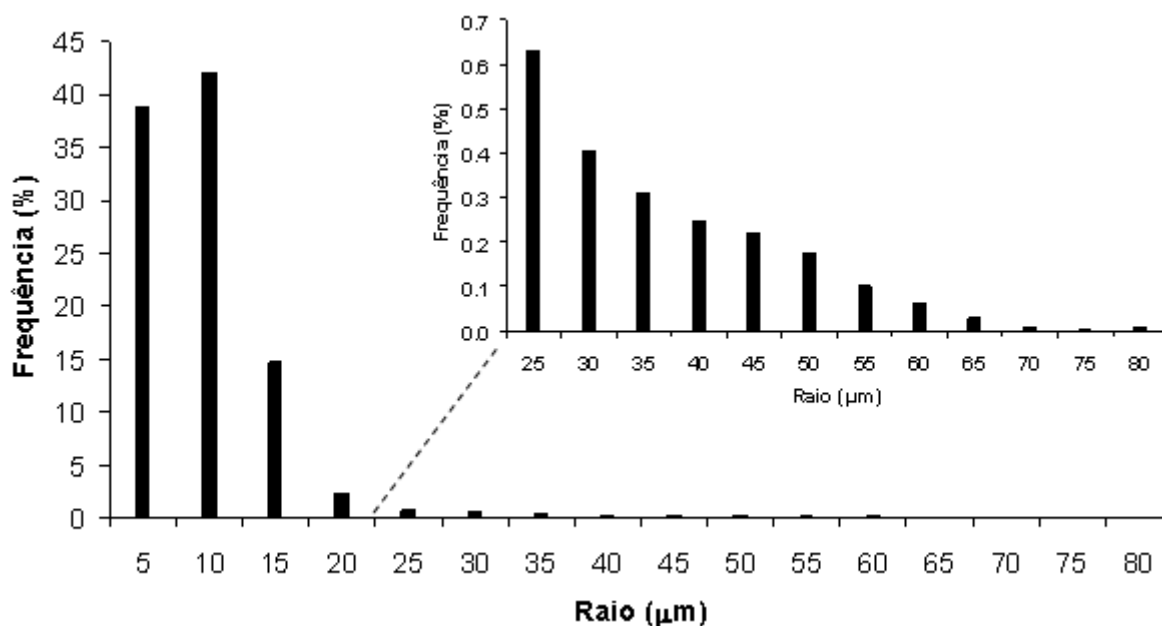


5.9.3 Distribuição de Tamanho de Poros

A Figura 120 mostra a distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG19. Esta distribuição é apresentada na forma de um histograma de frequência (%) versus o raio de poro (μm).

Neste histograma pode-se notar que aproximadamente 95 % da fase porosa refere-se a poros com raios entre 5 e 15 μm . A frequência de 38 % para os poros com raio de 5 μm (resolução espacial utilizada) é considerada muito elevada, dando indícios de que existem poros com raios menores. Portanto, foi necessário microtomografar novamente esta amostra, porém com uma resolução espacial menor (1,4 μm). A frequência dos poros de maior raio é relativamente pequena, porém pode ser melhor observada na região ampliada do gráfico da Figura 120, que compreende os poros com raios entre 25 e 80 μm .

Figura 120 –Distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG19 com resolução espacial de 5,0 μm .



A Figura 121 mostra a distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG19 com resolução espacial de 1,4 μm . Esta nova aquisição também foi realizada no microtomógrafo da Skyscan 1172 e os parâmetros de aquisição utilizados foram apresentados na Tabela 15.

Neste histograma a frequência de poros com raios de 1,4 μm (resolução utilizada) foi de apenas 9,2 %, valor este bem abaixo dos 38 % encontrados para a resolução espacial utilizada inicialmente (3,9 μm). Fato este que reforçou a nossa tese de que existiam poros menores que a resolução de 3,9 μm . Na Figura 122 pode ser observada a seção 100 da amostra com resolução espacial de 1,4 μm , onde podemos visualizar uma fissura, algumas com 3,0 μm de largura aproximadamente. Como estas fissuras se repetem por toda a amostra, justificam, em parte, a frequência de 9,2 % para poros com raio de 1,4 μm .

Figura 121 – Distribuição de tamanho de poros média para a amostra PG19 com resolução espacial de 1,4 μm .

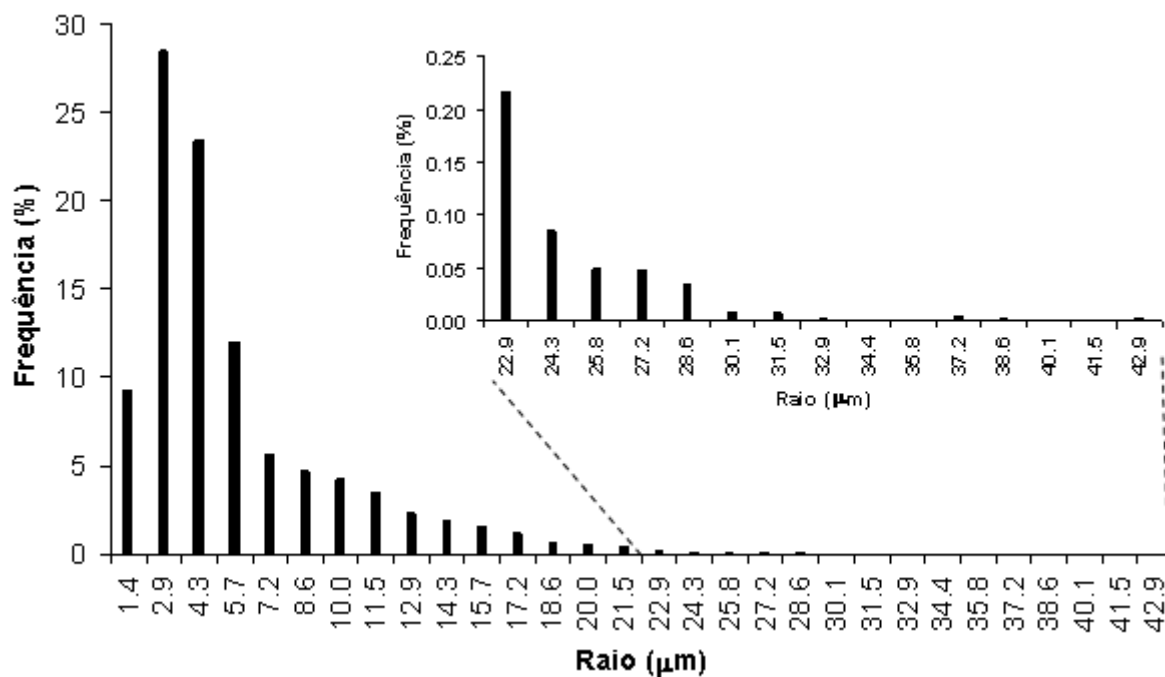


Figura 122 – Seção 100 da amostra PG19 com resolução espacial de 1,4 μm .



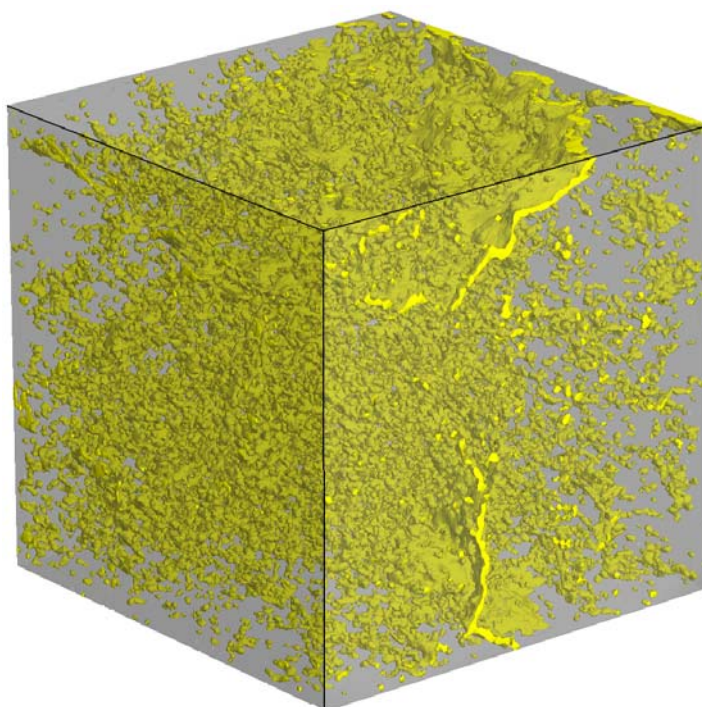
5.9.4 Permeabilidade

Para a determinação da permeabilidade da amostra PG19 foi utilizada uma imagem 3-D da amostra (subvolume), com dimensões de $2004 \times 2004 \times 2004 \mu\text{m}^3$. Após um tempo de 6 horas de simulação, a permeabilidade encontrada para a amostra PG19 foi de 0,14 mD. Este subvolume apresentou porosidade de 4,1 %, sendo 3,2 % conectados.

5.9.5 Imagem 3-D

Para uma melhor visualização dos poros da amostra PG19, foi reconstruída uma imagem 3-D de $1503 \times 1503 \times 1503 \mu\text{m}^3$. Desta forma, na Figura 123, é possível visualizar, em amarelo, um grande número de poros pequenos distribuídos pelo volume e, indicadas pelas setas, fissuras existentes na maior parte da amostra. Com o programa de visualização 3-D é possível "entrar" na amostra e visualizar com maiores detalhes tais fissuras. A porosidade para este subvolume é de $5,1 \pm 0,1 \%$, e mesmo com um subvolume relativamente reduzido, este valor está bem próximo do valor médio da porosidade determinado a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 4,9 \pm 0,1 \%$).

Figura 123 – Imagem 3-D reconstruída da amostra PG19 ($1503 \times 1503 \times 1503 \mu\text{m}^3$) cinza representa a fase sólida e o amarelo a fase porosa.



5.10 ARENITO TUMBLAGOODA

Algumas informações sobre alguns dos parâmetros mais importantes para comparação são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a amostra Tumblagooda.

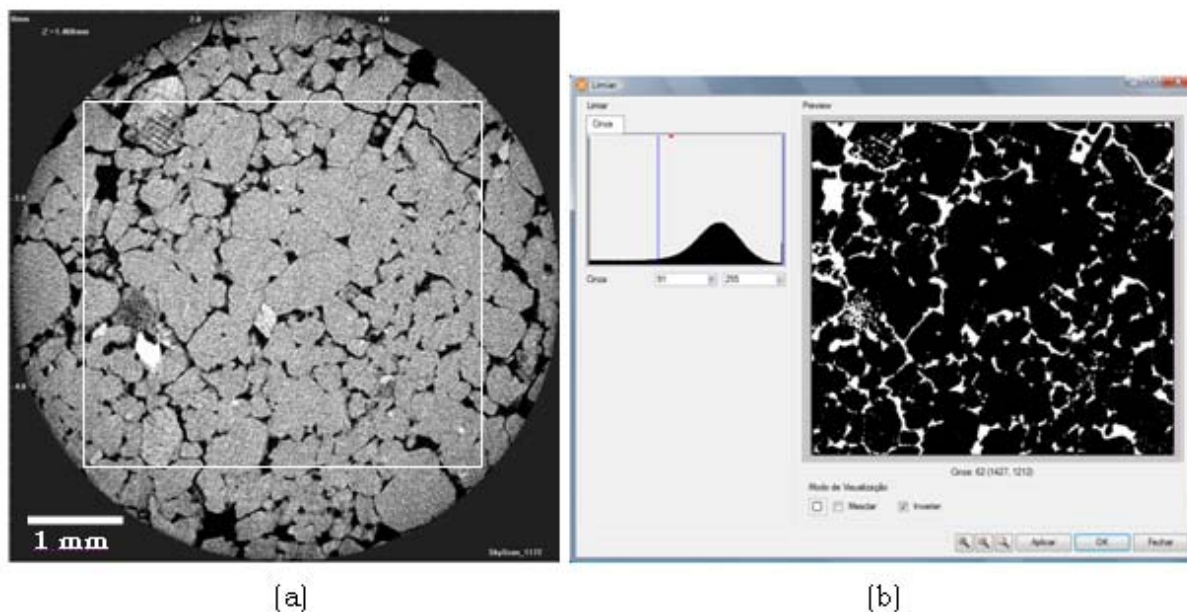
Tensão (kV)	Rotação total (°)	Passo angular (°)	Resolução Espacial (μm)	Tempo de Exposição para cada projeção (ms)	"Frames"	Tempo total de aquisição
50	0 a 180	0,5	2,9	4425	5	2 horas e 18 min

Utilizando estes parâmetros foram adquiridas 376 projeções, que serviram como dados de entrada no software NRecon para a reconstrução de 801 seções 2-D, sendo uma destas imagens apresentada na Figura 124a. Todas as 801 seções foram utilizadas para as análises de porosidade e distribuição de tamanho de poros, divididas em conjuntos de aproximadamente 200 imagens.

5.10.1 Binarização

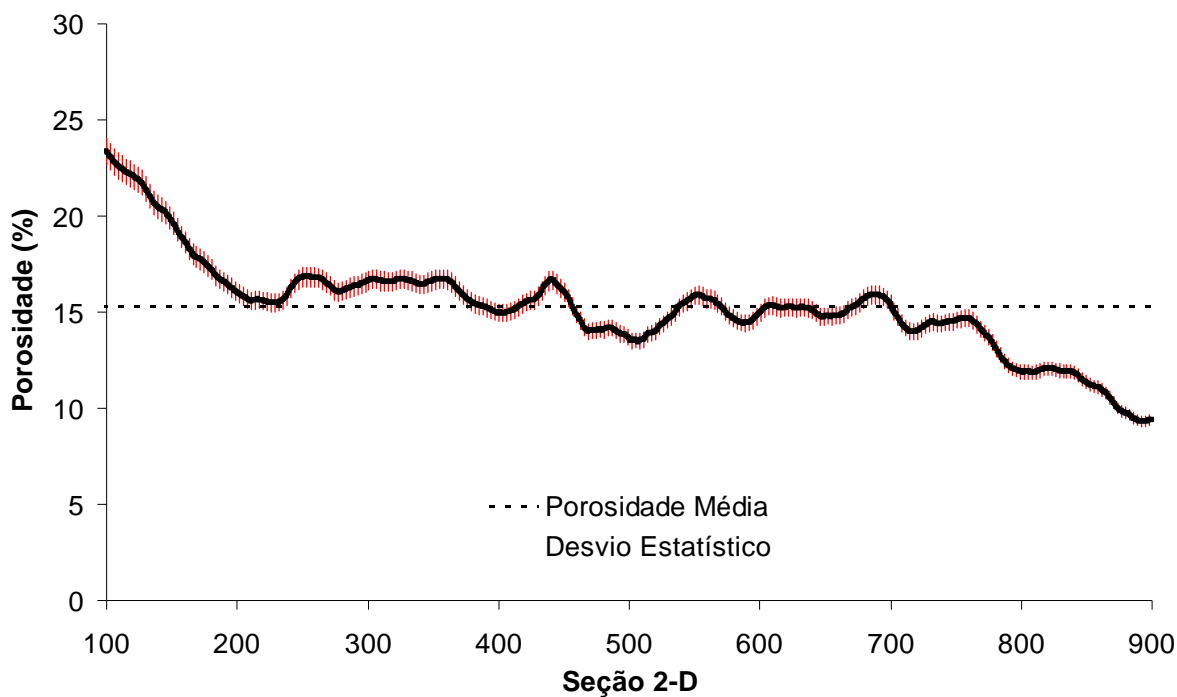
Na Figura 124 é possível visualizar o processo de binarização, onde na Figura 124a aparece a imagem de uma seção da amostra Tumblagooda em escala de cinza, já com uma região selecionada pelo retângulo branco. Na Figura 124b aparece a janela de binarização do software Imago, onde foi escolhido o nível de cinza 91 para a região selecionada, sendo a região em preto representando a fase sólida e a branca a fase porosa.

Figura 124 – Processo de binarização para as imagens da amostra Tumblagooda; (a) seção 500 reconstruída; (b) ROI da mesma seção binarizada, onde o branco representa a fase porosa e o preto representa a fase sólida.



5.10.2 Porosidade

A porosidade média total encontrada para a amostra Tumblagooda foi de $15,3 \pm 0,5 \%$, com 95 % de confiança. Analisando as seções individualmente encontramos os valores mínimo e máximo da porosidade $\phi = 9,3 \pm 0,3 \%$ (seção 892) e $\phi = 23,3 \pm 0,7 \%$ (seção 100), respectivamente. Os valores mínimo e máximo foram encontrados na primeira e na última seção, e após verificar as mesmas foi constatado que existem poros maiores nas primeiras seções e menores nas últimas seções em relação ao restante da amostra. Um gráfico representando todos os valores de porosidade encontrados para as diversas seções analisadas pode ser observado na Figura 125. Em vermelho está a barra do desvio estatístico para cada seção, com 95 % de confiança

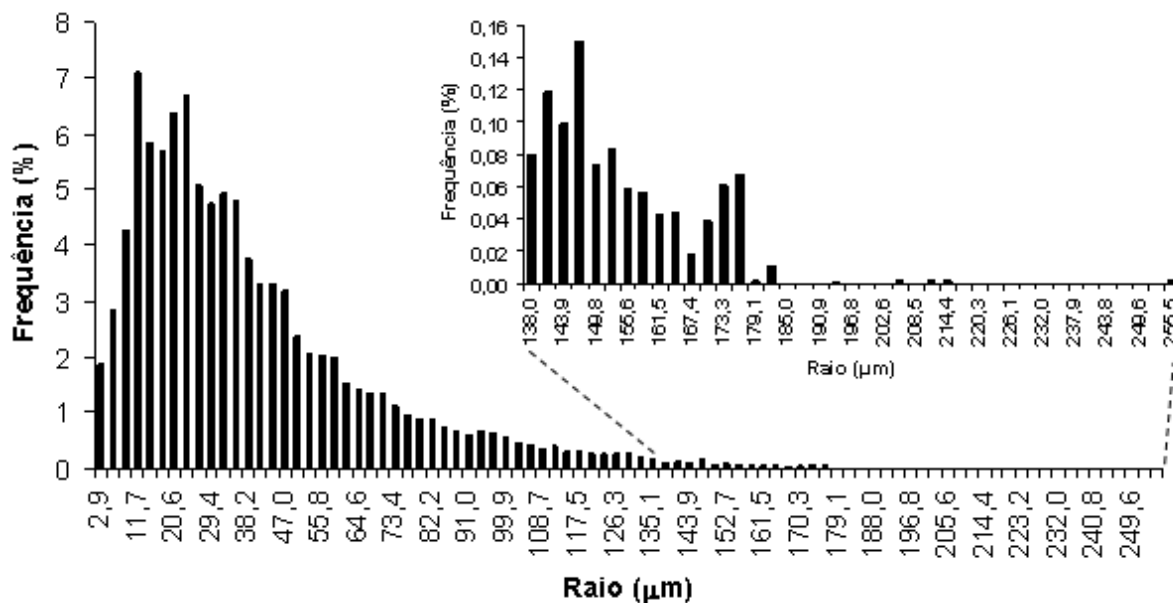
Figura 125 – Perfil de porosidade da amostra Tumblagooda.

5.10.3 Distribuição de Tamanho de Poros

A Figura 126 mostra a distribuição de tamanho de poros média para a amostra Tumblagooda. Esta distribuição é apresentada na forma de um histograma de frequência (%) versus o raio de poro (μm).

Neste histograma pode-se notar que aproximadamente 90 % da fase porosa refere-se a poros com raios entre 2,9 e 76,4 μm . A frequência dos poros de maior raio é relativamente pequena, porém pode ser melhor observada na região ampliada do gráfico da Figura 126, que compreende os poros com raios entre 138 e 255,5 μm .

Figura 126 – Distribuição de tamanho de poros média para a amostra Tumblagooda.



5.10.4 Permeabilidade

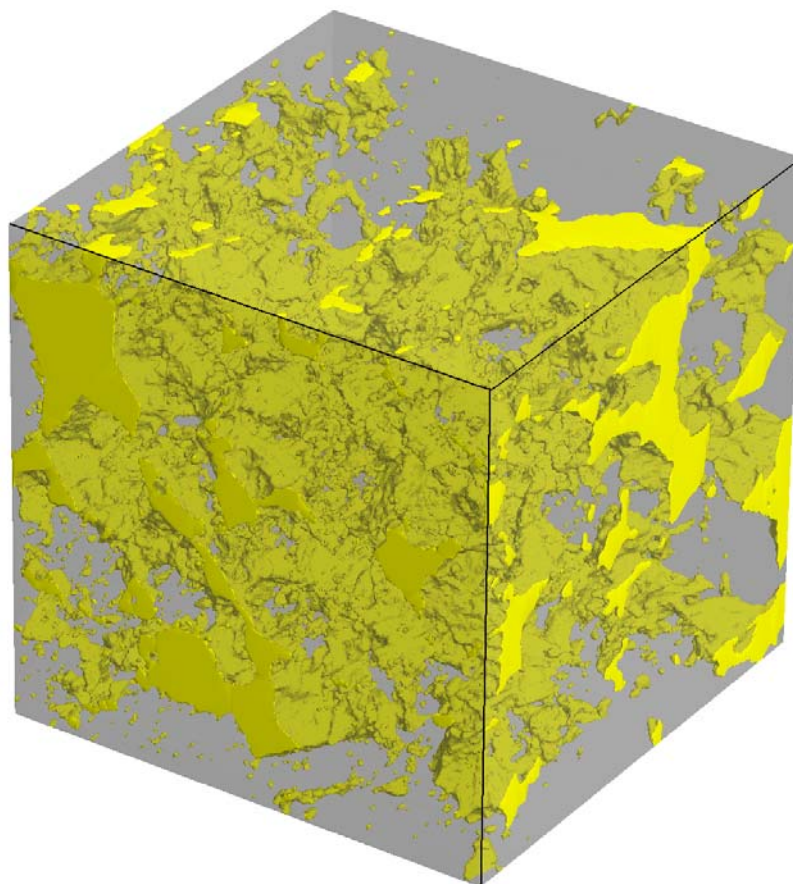
Para a determinação da permeabilidade da amostra Tumblagooda foi utilizada uma imagem 3-D da amostra (subvolume), com dimensões de 1470 x 1470 x 1470 μm^3 . Após um tempo de 6,5 horas de simulação, a permeabilidade encontrada para a amostra Tumblagooda foi de 90,71 mD. Este subvolume apresentou porosidade de 14,1 %, sendo 13,8 % conectados.

5.10.5 Imagem 3-D

Para uma melhor visualização dos poros da amostra Tumblagooda, foi reconstruída uma imagem 3-D de 1500 x 1500 x 1500 μm^3 . Desta forma, na

Figura 127, é possível visualizar, em amarelo, redes porosas com diâmetros relativamente grandes e poucos poros isolados. A porosidade para este subvolume é de $13,4 \pm 0,4$ %, e mesmo com um subvolume relativamente reduzido, da mesma forma que as outras imagens 3-D, este valor está razoavelmente próximo do valor médio da porosidade determinado a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 15,3 \pm 0,5$ %).

Figura 127 – Imagem 3-D reconstruída da amostra Tumblagooda ($1500 \times 1500 \times 1500 \mu\text{m}^3$) cinza representa a fase sólida e o amarelo a fase porosa.



5.11 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

Com a finalidade de comparar os dados da porosidade obtidos com a microtomografia de raios X, foi realizado, pelos integrantes do LMPT/UFSC, intrusão de mercúrio [68,69] nas mesmas amostras microtomografadas. No entanto, em algumas amostras não foi possível realizar a intrusão, pois apresentavam dimensões muito reduzidas, fato que impossibilitou a medida. Tais medidas foram realizadas em um porosímetro comercial PoreSizer modelo 9320 da marca Micromeritics.

A Tabela 17 mostra a comparação entre os resultados da porosidade obtidos pela porosimetria de mercúrio e pela análise das imagens microtomográficas 2-D, bem como a diferença percentual em relação à porosimetria de Mercúrio.

Tabela 17 – Valores da porosidade ϕ medido nas seções 2-D, na imagem 3-D e por porosimetria de mercúrio.

Amostra	ϕ^1 seções 2-D (%)	ϕ Porosimetria de Hg (%)	Diferença ² (%)
107	6,1 ± 0,2	3,1	96,7
108	4,2 ± 0,1	--	--
403	9,3 ± 0,2	12,9	-27,9
MC16	7,0 ± 0,2	13,4	-47,8
PG6	12,0 ± 0,3	18,5	-35,1
PG8	13,0 ± 0,2	15,8	-17,7
PG19	4,9 ± 0,1	8,4	-41,7
Tumblagooda	15,3 ± 0,5	--	--

¹ Porosidade média total com 95 % de confiança.

² Diferença em relação à porosimetria de Hg

Os resultados da Tabela 17 nos mostram que a porosidade encontrada pela metodologia da microtomografia de raios X é sistematicamente menor que os encontrados pela porosimetria de mercúrio, exceto pela amostra 107. Em relação a esta amostra, pode-se concluir que o mercúrio não preencheu totalmente os seus poros, fato que pode ser explicado pela análise das imagens microtomográficas, onde podemos perceber que os poros desta amostra são isolados, impossibilitando, desta forma, a infiltração do mercúrio em alguns de seus poros, dificultando uma boa performance desta metodologia para a determinação da porosidade absoluta das amostras.

Para as demais amostras, onde a porosidade obtida pela μ -CT foi menor, o que se conclui é que existem poros menores que a resolução utilizada pelo microtomógrafo, uma vez que o porosímetro é capaz de medir poros de até 6 nm de diâmetro. Portanto, uma parcela dos poros com diâmetros menores não foram detectados pelo microtomógrafo, resultando em uma porosidade menor para estas amostras.

6 CONCLUSÕES

Através dos resultados encontrados para avaliar a acurácia do método, podemos concluir que a microtomografia de raios X, além de não ser destrutiva, é uma poderosa ferramenta na análise microestrutural de materiais. Em relação à porosidade da amostra de esferas de vidro, os conjuntos apresentaram uma pequena variação, sendo para o valor mínimo e máximo de apenas 3,8 %. Para as linhas de nylon, onde a porosidade mínima e máxima foram 30,9 e 31,1 %, respectivamente, podemos confirmar a reprodutibilidade dos resultados do início ao fim das seções, e mesmo com o feixe de raios X sendo cônico, os resultados não sofrem alterações significativas, comprovando a eficiência do algoritmo de reconstrução.

Os resultados da avaliação da acurácia do método para a distribuição de tamanho de poros também foram satisfatórios, com um histograma excelente para as linhas de nylon, reproduzindo perfeitamente o seu diâmetro. Já para as esferas de vidro o histograma foi mais variado, mas também considerado satisfatório devido às circunstâncias, pois as esferas possuíam diâmetros diferentes e suas seções transversais variam de uma seção para a outra.

Entre as amostras analisadas pertencentes a bacia do rio Tibagi, percebemos que a grande maioria possui porosidade abaixo de 10 %, a não ser as amostras PG6 e PG8 que apresentaram 12 e 13 %, respectivamente. Se levarmos em conta o tamanho da bacia do rio Tibagi, o número de amostras analisadas é considerado pequeno, no entanto como todas as amostras apresentaram valor de porosidade em torno de 10 %, nos fornece embasamento para inferir que os arenitos e siltitos da bacia possuem baixa porosidade. No entanto, é indicado que se façam novas aquisições de outras amostras, das mesmas formações já medidas e também de outras formações, desta forma esta conclusão ficará mais fundamentada.

Em média o raio dos poros destas amostras ficou em torno de 10 μm , no entanto para a amostra 107 o raio médio ficou em 5,8 e 58,7 μm . Os poros maiores são facilmente identificados na Figura 90, no entanto, como mencionado anteriormente, tais poros aparentemente não são conectados devido ao processo de silicificação, impossibilitando, desta forma, a retirada de qualquer fluido do interior da rocha. Tal inexistência de conexão deve ser melhor investigada futuramente, uma vez que podem existir conexões com raios menores que a resolução utilizada (2,9 μm).

Uma das vantagens da metodologia microtomográfica é a geração de imagens 3-D, que além das imagens apresentadas neste trabalho, várias outras foram geradas para visualização, onde foi possível a navegação pelo interior das mesmas através dos

softwares específicos, o que possibilitou o acompanhamento da rede porosa com maiores detalhes, ou, como no caso da amostra 107, a constatação de que todos os poros da amostra são aparentemente isolados. Além disso, as imagens 3-D são muito importantes para a simulação de escoamento de fluidos e determinação da permeabilidade, uma vez que sem elas tal procedimento seria realizado com modelos criados a partir do método da Gaussiana Truncada, os quais não apresentam a real estrutura da amostra.

Ainda com relação as imagens 3-D, pode ser observado na Tabela 18 que os valores da porosidade encontrados para tais imagens estão em ótimo acordo com as determinadas para as seções 2-D. Isto em grande parte se deve as análises do Volume Elementar Representativo (VER), o qual determinou o volume ideal para que as imagens 3-D fossem representativas da amostra como um todo. Das amostras analisadas, apenas a 403 apresentou uma porosidade 18 % menor que a determinada para as seções 2-D. Possivelmente isso deve-se aos problemas apresentados com os artefatos existentes nas imagens desta amostra e ao volume reconstruído, o qual deveria ser de $(1501 \mu\text{m})^3$ e foi de apenas $1501 \times 1501 \times 800 \mu\text{m}^3$.

Tabela 18 – Resumo das propriedades microestruturais das amostras analisadas

Amostra	ϕ^1 seções 2-D (%)	ϕ^2 imagem 3-D (%)	ϕ Porosímetro Hg (%)	ϕ modelo 3-D (%)	k^3 (mD)	Raio do ⁴ poro (μm)
107	6,1 ± 0,2	5,4 ± 0,2	3,1	6,2 ± 0,2	0	5,8 e 58,7
108	4,2 ± 0,1	4,0 ± 0,1	--	4,3 ± 0,1	2,28	11,7
403	9,3 ± 0,2	7,6 ± 0,2	12,9	8,8 ± 0,2	76,35	7,9
MC16	7,0 ± 0,2	7,0 ± 0,2	13,4	6,8 ± 0,2	1,73	5,1
PG6	12,0 ± 0,3	11,5 ± 0,2	18,5	11,6 ± 0,3	23,48	2,4 e 5,9
PG8	13,0 ± 0,2	12,6 ± 0,2	15,8	12,3 ± 0,2	17,31	20
PG19	4,9 ± 0,1	5,1 ± 0,1	8,4	5,1 ± 0,1	0,14	10
Tumblagooda	15,3 ± 0,5	13,4 ± 0,4	--	15,9 ± 0,5	90,71	11,7 a 23,5

¹ Porosidade média total com 95 % de confiança.

² Porosidade para o VER com 95 % de confiança.

³ Permeabilidade para o volume considerado na simulação.

⁴ Valor com maior frequência.

Os resultados encontrados pela porosimetria de mercúrio indicam que a μ -CT está subestimando a porosidade das amostras, pois, devido à limitação da resolução

espacial do microtomógrafo, muitos poros deixam de ser medidos e, conseqüentemente, não contribuem para o cálculo da porosidade. Essa pode ser considerada uma desvantagem da μ -CT, no entanto, se levarmos em consideração a variabilidade na porosidade encontrada na maioria das formações de rochas reservatório, tal diferença pode não ser tão significativa. Contudo, quando se trata de amostras com porosidade fechada, a μ -CT se mostrou mais eficiente, pois, ao contrário da porosimetria de mercúrio, a μ -CT não depende da conexão entre os poros para determinar tal parâmetro, conseguindo resultados mais próximos da real porosidade absoluta da rocha. Porém vale ressaltar que a porosimetria de mercúrio é mais indicada para determinar a porosidade efetiva das amostras e não a absoluta.

Em relação à permeabilidade calculada (Tabela 18) para a amostra 107, podemos concluir que sua rede porosa é limitada, impossibilitando o fluxo de fluidos, uma vez que até o porosímetro encontrou dificuldade em determinar a sua porosidade absoluta, fato também observado na sua imagem 3-D. Para a amostra PG19 a permeabilidade pode ter sido subestimada, uma vez que a mesma foi determinada através de um volume com resolução espacial 5 μ m. Portanto, poros menores que 5 μ m não contribuíram para a rede porosa medida por μ -CT, resultando numa porosidade 41,7 % menor que a porosimetria de mercúrio. Para a amostra 108 o resultado encontrado não pode ser verificado, uma vez que não foi possível verificar a porosidade através da porosimetria de mercúrio.

Outra amostra que merece comentários é a MC16, pois visivelmente na sua imagem 3-D (Figura 107) podemos perceber que existem conexões em um sentido da amostra, devido ao folhelho, já no sentido contrário, as conexões não podem ser visualizadas. Como a simulação da permeabilidade é realizada em um sentido preferencial (não informado), a baixa permeabilidade para esta amostra deve estar relacionada à baixa conexão neste sentido. Para as demais amostras a permeabilidade parece razoável em relação à estrutura das suas imagens 3-D.

Ainda com relação aos resultados de permeabilidade obtidos através das imagens 3-D, é importante ressaltar que os mesmos são dependentes da resolução espacial da microtomografia, assim como da heterogeneidade da amostra. Desta forma, imagens obtidas com resolução menor poderão resultar em permeabilidade maior, em função de poros não observados anteriormente. Medidas realizadas em outros subvolumes, que não os considerados, poderão também resultar em diferentes valores para a permeabilidade.

Os modelos 3-D (Apêndice C) criados a partir do método da Gaussiana Truncada não se mostraram muito eficazes. Quando a curva de autocorrelação do modelo 3-D é comparada com a curva média de autocorrelação das seções 2-D da amostra, as mesmas que

geraram tal modelo, podemos perceber que na maioria dos casos as curvas não coincidem, portanto o modelo 3-D não está com as fases correlacionadas em comparação com a real estrutura da amostra.

Em relação à porosidade encontrada para os modelos 3-D, podemos perceber que os mesmos são muito semelhantes aos calculados para as seções 2-D. Tal semelhança já era esperada, pois a porosidade é um dos dados de entrada para a geração de tais modelos. Mesmo assim houve uma diferença de 5 % nos valores encontrados para a amostra PG8. Este e outros valores de porosidade podem ser observados na Tabela 18.

Além das propriedades microestruturais determinadas pela metodologia da microtomografia de raios X, este trabalho possibilitou um melhor entendimento da metodologia, no que diz respeito aos parâmetros físicos e matemáticos utilizados nas aquisições e no processo de reconstrução das seções 2-D.

Em relação à análise das imagens pode-se concluir que o operador é um fator importante na etapa de binarização, pois não há softwares eficientes que façam a escolha do nível de cinza automaticamente e que forneçam um bom resultado, desta forma o processo se torna muito criterioso e o operador deve possuir experiência suficiente para decidir qual deverá ser o nível de cinza a ser escolhido para a binarização [70].

Outro aspecto importante a ser mencionado é a capacitação de pessoal especializado para a operação do equipamento de microtomografia de raios X, uma vez que o operador do microtomógrafo é, sem dúvida alguma, fundamental na escolha dos parâmetros a serem utilizados na aquisição e posteriormente na reconstrução das seções 2-D, gerando, desta forma, uma imagem com melhor, ou pior, qualidade.

REFERÊNCIAS

- [1] APPOLONI, C. R.; FERNANDES, C. P.; INNOCENTINI, M. D. M.; MACEDO, A. **Ceramic foams porous microstructure characterization by X-ray microtomography**. *Materials Research*. v. 7, no 4, pp. 557-564, 2004.
- [2] CORMARK, A. M. **Representation of a Function by Its Line Integrals, With Some Radiological Applications - Part I and II**, *Journal Applied Physics*, v. 34 e 35, pp. 2722-2727 e 2908-2913, 1963 e 1964.
- [3] FLANNERY, B. P., et al. **Three Dimensional X-Ray Microtomography**. *Science* v. 237, pp. 1439-1444, 1987.
- [4] HOUNSFIELD, G. N. **Computerized Transverse Axial Scanning (Tomography), Description of System**. *British Journal of Radiology*, part I, n. 46, pp. 1016-1022, 1973.
- [5] Appoloni, C. R. e Cesareo, R. **Microscanning and Microtomography with X-Ray Tubes** - Università Degli Studi Di Roma - Centro Interdipartimentale Di Ricerca Per L'Analisi Dei Modelli E Dell'Informazione Nei Sistemi Biomedici (CISB) – Dezembro, 1994.
- [6] APPOLONI, C. R., RODRIGUES, C. R. O., FERNANDES, C. P. **Porous microstructure characterization of a sandstone reservoir using high-resolution x-ray microtomography**. *International Symposium of the Society of Core Analysts*. Toronto, Canada, pp. 21-25, 2005.
- [7] APPOLONI, C. R., FERNANDES, C. P., RODRIGUES, C. R. O. **X-ray microtomography study of a sandstone reservoir rock**. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. v. 580, pp. 629-632, 2007.
- [8] COLES, M. E.; et al. **Pore Level Imaging of Fluid Transport Using Synchrotron X-ray Microtomography**. *J.P.S.E.*, v. 19, pp. 55-63, 1998.
- [9] MILLER, J. D. e LIN, C. L. **Network Analysis of Filter Cake Pore Structure by High Resolution X-ray Microtomography**. *Chemical Engineering Journal*, n. 77 pp. 79-86, 2000.
- [10] FARBER, L., TARDOS, G. & MICHAELS, J. N. **Use of X-ray tomography to study the porosity and morphology of granules**. *Powder Technology*, v.132, pp.57-63, 2003.
- [11] KETCHAM, R. A. and CARLSON, W. D. **Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences**. *Computers & Geosciences*, v. 27, pp. 381-400, 2001.
- [12] ROSENBERG, E.; et al. **Microtomography Applications in Rock Analysis and Related Fields**. *Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology, DGZfP-Proceedings BB 67-CD*, Germany, pp. 9-18, 1999.
- [13] ROLLAND DU ROSCOAT, S.; et al. **Estimation of microstructural properties from synchrotron X-ray microtomography and determination of the REV in paper materials**. *Acta Materialia*, v. 55, pp. 2841-2850, 2007.

- [14] National Academy of Sciences Memorial Biography. (acesso em maio/2008)
<http://www.harvardsquarelibrary.org/unitarians/coolidge.html>.
- [15] OLIVEIRA, L. F. **Tomografia Computadorizada Tridimensional por Transmissão de Raios X na Análise e Caracterização de Objetos Volumétricos**. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE - Rio de Janeiro, RJ, 2002.
- [16] APPOLONI, C. R.; MELQUIADES, F. L. **Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria – Texto Experimental para a Disciplina de Física Nuclear**. Universidade Estadual de Londrina, PR, 1997.
- [17] MARQUES, L. C. **Estudo da Porosidade de Arenitos Sintéticos por Técnicas Nucleares não Destrutivas**. Dissertação de Mestrado, Dep. de Física, LFNA/UEL - Universidade Estadual de Londrina, PR, 127 p., 2008.
- [18] VINEGAR, H. J. & WELLINGTON, S. L. **Tomographic Imaging of Three-Phase Flow Experiments**. Rev. Sci. Instrum, v. 58, nº 1, pp. 96-107, 1987.
- [19] MUDAHAR, G. S., **Optimal thickness of soil between source and detector for different gamma-ray energies**. Journal of Hidrology, v. 80, pp. 265-269, 1985.
- [20] LEO, W. R. **Technique for nuclear and particle physics experiments**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2ª ed., 378 p., 1994.
- [21] KAPLAN, I. **Física nuclear**. Editora Guanabara Dois S.A., 2ª ed., Rio de Janeiro, RJ, 633 p., 1978.
- [22] HUBBELL, J. H.; GIMM., H. A.; & OVERBO, I. **Pair, triplet and total atomic cross sections (and mass attenuation coefficients) for 1MeV-100GeV photons in elements Z=1 to 100**. J. Phys. Chem. Ref. Data 9, pp. 1023-1147, 1980.
- [23] BURCHAM, W. E. **Física nuclear**. Editora Reverté S. A., 1ª ed., 833 p., 1974.
- [24] SIEGBAHN, K. **Alpha-, Beta- And Gamma-Ray Spectroscopy**. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, p. 37-76, 1979.
- [25] KALENDER, W. A. **Computed Tomography - Fundamentals, System Technology, Image Quality, Applications**. 2ª ed., Publicis Coporate Publishing, Alemanha, 2005.
- [26] TESEI, L.; et al. **Contrast-enhanced X-ray microtomography of the bone structure adjacent to oral implants**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, v. 548, pp. 257–263, 2005.
- [27] MODIC, M. T.; et al. **Lumbar herniated disc disease and canal stenosis: prospective evaluation by surface coil MR, CT, and myelography**. A. J. of Roentgenology, v. 146, pp. 757-765, 1986.
- [28] RODRIGUES, A. F.; VITRAL, R. W. F. **Aplicações da Tomografia Computadorizada na Odontologia**. Pesq Bras Odontoped Clin Integr, João Pessoa, v. 7, pp. 317-324, 2007.

- [29] MIRALDI, F.; WIESEN, E. J. **Computed Tomography of de Whole Body**. The C.V. Mosby Company, v. 1, 2^a ed., 1988.
- [30] GULLBERG, G. T.; et al. **An attenuated projector-backprojector for iterative SPECT reconstruction**. *Phys. Med. Biol.*, v. 30, pp. 799-816, 1986.
- [31] SODRE, U. **Transformadas de Fourier**. 2003.
<http://www.marcelosilva.pro.br/eqdif/pdf/tfourier.pdf> (acesso em março/2009).
- [32] KAK, A.; SLANEY, M. **Principles of computerized tomographic imaging**. IEEE Press. Electronic Copy (1999), <http://www.slaney.org/pct/pct-toc.html> (acesso em junho/2008).
- [33] GELFAND, M. J.; THOMAS, S. R. **Single Photon Emission Computed Tomography. In: Effective Use of Computers in Nuclear Medicine**. United States of América, McGraw-Hill Book Company, p. 31-74, 1988.
- [34] ARAÚJO, E. C. A. **Estudo e Aplicação do Algoritmo FDK para a Reconstrução de Imagens Tomográficas Multicortes**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Instituto de Física, USP, São Paulo, 152 p., 2008
- [35] MARQUES DA SILVA, A. M. **Reconstrução Quantitativa de SPECT: Avaliação de Correções**. Tese (Doutorado em Física), Instituto de Física, USP, São Paulo, 134 p., 1998.
- [36] FELDKAMP, L. A.; DAVIS, L. C.; KRESS, J. W. **Practical Cone Beam Algorithm**. *Journal of the Optical Society of America A*, v. 1, n. 6, pp. 612-619, 1984.
- [37] BUENO, A. D. **Curso de Análise de Imagens Aplicado ao Estudo de Materiais (apostila)**. Lab. de Engenharia de Exploração e Produção de Petróleo, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Macaé-RJ, 315 p., 2008.
- [38] GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [39] MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento digital de imagens**. Rio de Janeiro, Brasport Livros e Multimídia, 409 p., 1999.
- [40] FERNANDES, C. P. **Engenharia de Microestruturas: Análise Quantitativa de Imagens e Simulação de Processos Físicos**. Monografia (concurso de professor adjunto), Dep. de Engenharia Mecânica - UFSC, 128 p., 2002.
- [41] IMAGO[®] Manual do Usuário, Versão 2.1.4., ESSS – Engineering Simulation and Scientific Software Ltda. Copyright ©, 88 p., 2002.
- [42] MOREIRA, A. C. **Caracterização da Microestrutura de Materiais Porosos por Microtomografia de Raios X e Transmissão de Raios Gama**. Dissertação de Mestrado, Dep. de Física, LFNA/UEL - Universidade Estadual de Londrina, PR, 120 p., 2006.
- [43] VONTZ, T.; et al. **NDT for small defects by X-ray tomography**. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. v. 7A, pp. 389-397, 1988.

- [44] PIRSON, S. J. **Oil Reservoir Engineering**. New York: McGraw-Hill, 735 p., 1958.
- [45] HALLEY, R. B. **Estimating pore and cement volumes in thin section**. Journal of Sedimentology and Petrology, v. 48, pp.642-650, 1978.
- [46] SCHMIDT, V.; MCDONALD, D. A. **Pore geometry and reservoir aspects of secondary porosity in sandstones**. Bull. Canadian.Pet. Geology, v. 25, pp. 271-290, 1977.
- [47] JONAS, E. C.; MCBRIDE, E. F. **Diagenesis of sandstones and shales: Applications to exploration for hydrocarbons**. Univ. Texas, Continuing Education Program, Pub. No 1, 165 p., 1977.
- [48] SOUZA, R. S. **Integrated diagenetic modeling and reservoir quality assessment and prediction of Água Grande sandstones, Early Cretaceous, Recôncavo Basin, Northeast Brazil**. Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 385 p., 1999.
- [49] TATAGIBA, D. C. **Predição da qualidade de rochas reservatório siliciclásticas da formação Urucutuca (cretáceo superior), bacia de Almada**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- [50] ROSA, A.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D. **Engenharia de Reservatórios de Petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 808 p., 2006.
- [51] BIGARELLA, J. J.; LEPREVOST, A.; BOLSANELLO, A. **Rochas do Brasil**. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 310 p., 1985.
- [52] LEPREVOST, A. **Química analítica dos minerais**. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 393 p., 1975.
- [53] CHIOSSI, N. J. **Geologia aplicada à Engenharia**. Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, 2ª ed., 427 p., 1979.
- [54] SKYSCAN. Desktop X-ray microtomograph, Instruction manual – SkyScan 1172 N. V., Vluchtenburgstraat 3C, Belgium, 2005.
- [55] HAMAMATSU PHOTONICS K. K. 100 kV Microfocus X-ray Source - Instruction Manual (L7901-01). ver. 1.9E, 1999.
- [56] HAMAMATSU PHOTONICS K. K. Digital CCD Camera - Instruction Manual (C4742-55-12HRF). ver. 1.1, 2004.
- [57] EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Avaliação Ambiental Integrada dos Aproveitamentos Hidrelétricos da Bacia do Rio Tibagi. http://www.epe.gov.br/MeioAmbiente/Documents/MeioAmbiente_13/Seminários Públicos para Discussão do Termo de Referência AAI - parte 2 - 12-2008.pdf (acesso em 01/2009).
- [58] BASTOS, R. O. **Radioatividade de Rochas Provenientes das Formações Geológicas Pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi**. Tese de Doutorado, Dep. de Física, LFNA/UEL - Universidade Estadual de Londrina, PR, 197 p., 2008.

- [59] SCHNEIDER, R. L.; et al. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**. In: 28° CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1974, Anais. Porto Alegre: SBG, v. 1, pp. 41-65, 1974.
- [60] PETRI, S.; FULFARO, V. **Geologia do Brasil (Fanerozóico)**. Queiroz/Edusp. São Paulo, 632 p. 1983.
- [61] TREWIN, N. H.; MCNAMARA, K. J. **Arthropods invade the land: trace fossils and palaeoenvironments of the Tumblagooda Sandstone (late Silurian) of Kalbarri, Western Australia**. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, v. 85, pp. 177–210, 1995.
- [62] SKYSCAN. Software de reconstrução e análise de imagens - NRecon, CTan e ANT. <http://www.skyscan.be/products/downloads.htm> (acesso em 10/2007).
- [63] JOSHI, M. Y. **A Class of Stochastic Models for Porous Media**. Ph. D. thesis, University of Kansas, Lawrence, U.S.A., 1974.
- [64] KLINKENBERG, L. J. **The permeability of porous media to liquids and gases**, Drilling and Production Practice, American Petroleum Inst., pp. 200–213, 1941.
- [65] DIÓGENES, A. N. **Reconstrução Tridimensional de Meios Porosos através de técnicas de Simulated Annealing**. Tese de Doutorado, Dep. Engenharia Mecânica, LMPT/UFSC, Florianópolis, SC, 145 p., 2009.
- [66] SANTOS, L. O. E.; et al. **Reconstrução Tridimensional de Microestruturas Porosas com o Método de Esferas Sobrepostas**. In: Proceedings of the ENCIT 2002, Caxambu - MG, Brazil - Paper CIT02-0449, 2002.
- [67] SANTOS, L. O. E.; et al. **Prediction of Intrinsic Permeabilities with Lattice Boltzmann Method**. In: COBEM 2005 - 18th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto. Proceedings of COBEM, 2005.
- [68] WEBB, P. A. and ORR, C. **Analytical Methods in Fine Particle Technology**. Ed. Micromeritics Instrument Corporation, Norcross, USA, 301 p., 1997.
- [69] GOUVEIA, D. **Porosimetria ao Mercúrio**. (acesso em novembro de 2009). http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_7_Porosimetria_ao_Mercurio_PMI-2201.pdf
- [70] MOREIRA, A. C.; et al. **Effects of Manual Threshold Setting on Image Analysis Results of a Sandstone Sample Structural Characterization by X-Ray Microtomography**. In: International Nuclear Atlantic Conference / IX ENAN, Rio de Janeiro, 2009.
- [71] A Geometria Euclidiana. (acesso em fevereiro de 2009) http://www.on.br/site_edu_dist_2006/pdf/modulo3/a_geometria_euclidiana.pdf
- [72] THIEL, E. and MONTANVERT, A. **Approximation discrète de la distance euclidienne pour l'analyse d'images : étude et amélioration des distances du chanfrein**. RFA, Rec. des Formes et I.A, v. 2, pp. 829-839, Lyon, 1991.

-
- [73] MOSCHETTO, C. **Caractérisation de la structure poreuse des matériaux par analyse d'images: apport des distances discrètes à la morphologie mathématique.** Rapport de Stage, LTHE, Grenoble, 49 p., 1991.
- [75] SERRA J. **Image Analysis and Mathematical Morphology.** Academic Press Limited, v.1-2, San Diego, 1982.
- [76] FACON J. **Morfologia Matemática: Teoria e Exemplos.** Editora Universitária Champagnat da PUC/PR, Curitiba, 1996.
- [77] COSTER, M. and CHERMANT, J. L. **Precis D Analyse D Images.** Presses du CNRS, Paris, 1989.

APÊNDICES

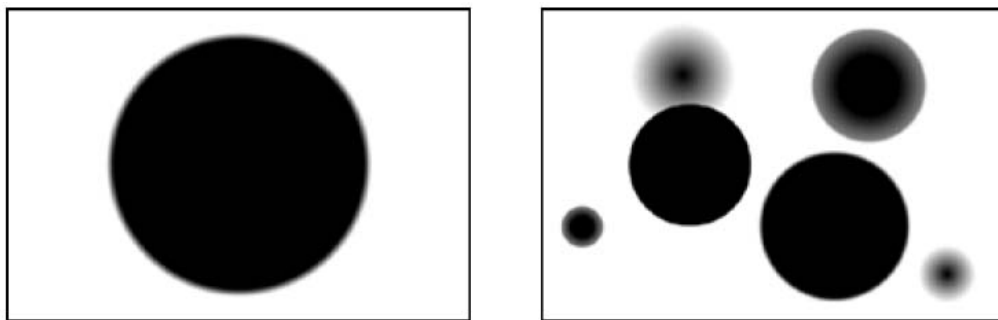
APÊNDICE A – Processamento de Imagens

A.1 Operações Aritméticas com Imagens

As imagens digitais estão associadas a matrizes de valores inteiros, podendo então ser definidas operações aritméticas. Operações aritméticas são operações "pixel" a "pixel" entre imagens, através de uma regra matemática definida, tendo como resultado uma imagem representando a combinação das imagens originais. As operações mais comuns são a soma, subtração, divisão e a multiplicação.

Para melhor compreender o funcionamento das operações aritméticas considere as imagens dispostas na Figura 128.

Figura 128 – Imagens para utilização nas operações aritméticas [41].



Veja na Tabela 19 abaixo exemplos de resultados das operações aritméticas utilizando as imagens dispostas na Figura 128:

Tabela 19 – Resultado das operações aritméticas para as imagens da Figura 128.

Operação	Imagem resultante
<p style="text-align: center;">Adição</p> <p>Sobrepondo as imagens, o que é preto na Imagem (A) e preto na Imagem (B) permanece na imagem resultante.</p>	

Subtração

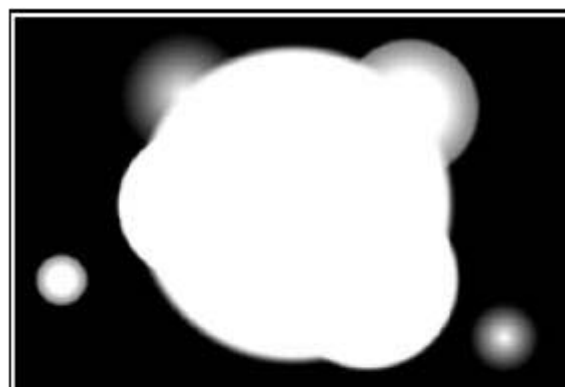
Sobrepondo as imagens, o que é preto na Imagem [A] ou preto na Imagem [B] permanece na imagem resultante.

**Diferenciação**

Sobrepondo as imagens, permanece o que é preto na imagem [A] e branco na imagem [B].

**Multiplicação**

Apenas permanece o que é branco na Imagem [B] e na imagem [A].

**Divisão**

Esta função multiplica a imagem [A] pelo inverso da imagem [B].



A.2 Filtro Passa Baixa

Um filtro passa baixa, como o próprio nome diz, deixa passar as baixas frequências e atenua as altas frequências do domínio frequencial. Basicamente um filtro passa baixa provoca um borramento da imagem e uma redução do contraste. Observar uma imagem de longe (ou olhar com o olho parcialmente fechado) equivale a aplicar um filtro de passa baixa, atenuando as altas frequências.

Componentes de alta frequência ocorrem quando se tem uma variação espacial brusca dos níveis de cinza como é o caso de ruídos e contornos entre fases distintas da imagem. O efeito de aplicação de um filtro de passa baixa é o de suavização (uniformização) dos níveis de cinza de uma imagem [41]. O filtro passa baixa tem como desvantagem a perda de definição nas interfaces e bordas.

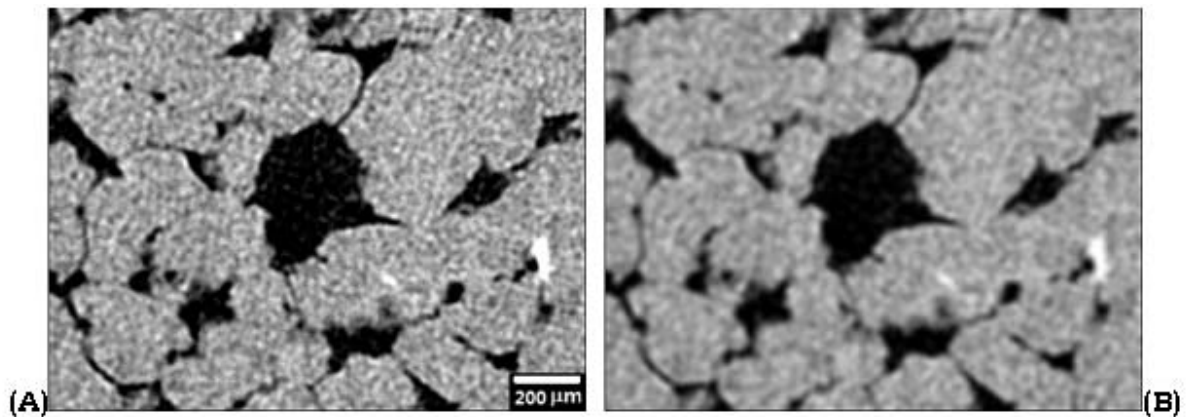
Um modelo de filtro de passa baixa consiste na função Gaussiana, contudo o aspecto fundamental de tal filtro é que todos os seus coeficientes sejam positivos [38]. Além disso, o mais simples é que todos os coeficientes sejam iguais a 1, por isso, é denominado filtro da média. Para que a resposta do filtro seja mantida na mesma escala de níveis de cinza que a da imagem original, o resultado de aplicação do filtro deve ser dividido por n^2 para uma máscara de tamanho $n \times n$. Na Figura 129 são mostrados exemplos de máscaras de tamanhos 3×3 e 5×5 .

Figura 129 – Máscaras para filtros passa baixa 3×3 e 5×5 .

$1/9 \times$	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	$1/25 \times$	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1																																			
1	1	1																																			
1	1	1																																			
1	1	1	1	1																																	
1	1	1	1	1																																	
1	1	1	1	1																																	
1	1	1	1	1																																	
1	1	1	1	1																																	

A Figura 130 mostra a aplicação de um filtro passa baixa em uma amostra de arenito da formação Tumblagooda, retirada na Austrália e fornecida pela PETROBRAS.

Figura 130 –(A) Imagem original da amostra de arenito da formação Tumblagooda; (B) imagem com aplicação de um filtro passa baixa.



A.3 Filtro Passa Alta

Um filtro passa alta é um filtro que objetiva amplificar os detalhes da imagem deixando passar as altas frequências e atenuando as baixas frequências.

Em uma imagem, as altas frequências ocorrem nos contornos dos objetos e nos detalhes, de forma que o filtro passa alta costuma ser utilizado na detecção de contorno ou na recuperação de detalhes da imagem, ou seja, o efeito prático da aplicação do filtro passa alta é a eliminação das regiões de baixa frequência, sobrando, ou evidenciando-se os contornos dos objetos. Adicionalmente ocorre uma redução do contraste da imagem.

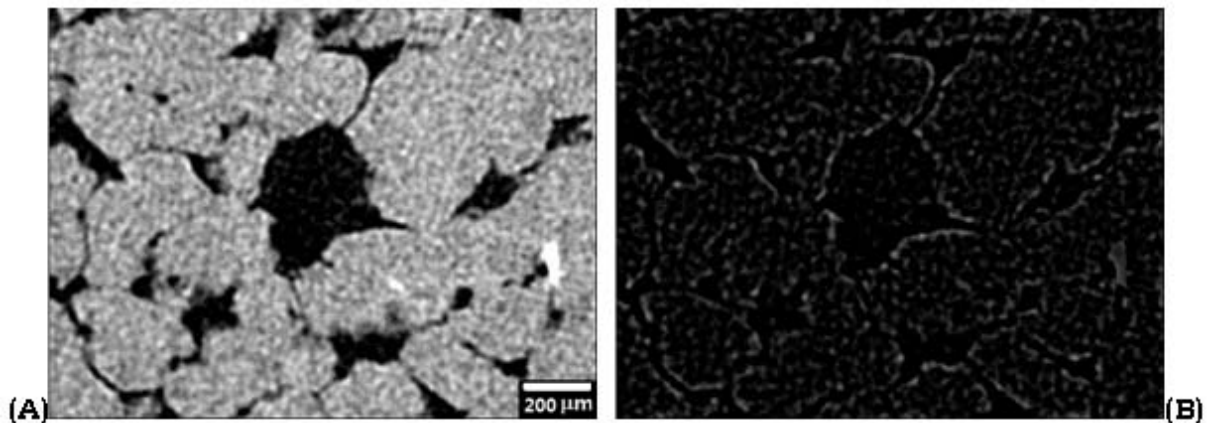
A discretização do filtro passa alta usual usando uma máscara 3x3 é dada pela Figura 131. O filtro passa alta tem coeficientes positivos no centro e negativos nas bordas. Nota-se que a soma algébrica dos seus coeficientes é nula e, desta forma, quando aplicado a regiões homogêneas da imagem responderá com valor nulo ou muito baixo, coerente com a filtragem passa alta. Portanto, se todos os pixels cobertos pela máscara tiverem a mesma cor, o pixel central fica com o valor 0 (eliminando as baixas frequências).

Figura 131 – Máscara 3x3 de um modelo usual de filtro passa alta.

$$\frac{1}{9} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline -1 & 8 & -1 \\ \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline \end{array}$$

Como a máscara do filtro passa alta possui valores negativos, podem ocorrer valores de cor negativos. Nestes casos, o procedimento usual é fazer um recorte nos níveis de cor, eliminando-se valores negativos, que passam a ser 0.

A Figura 132 mostra a imagem da amostra da formação Tumblagooda em tons de cinza e depois da etapa de processamento com o filtro passa alta. Observe que os pixels que fazem parte da borda ficam com a cor branca.

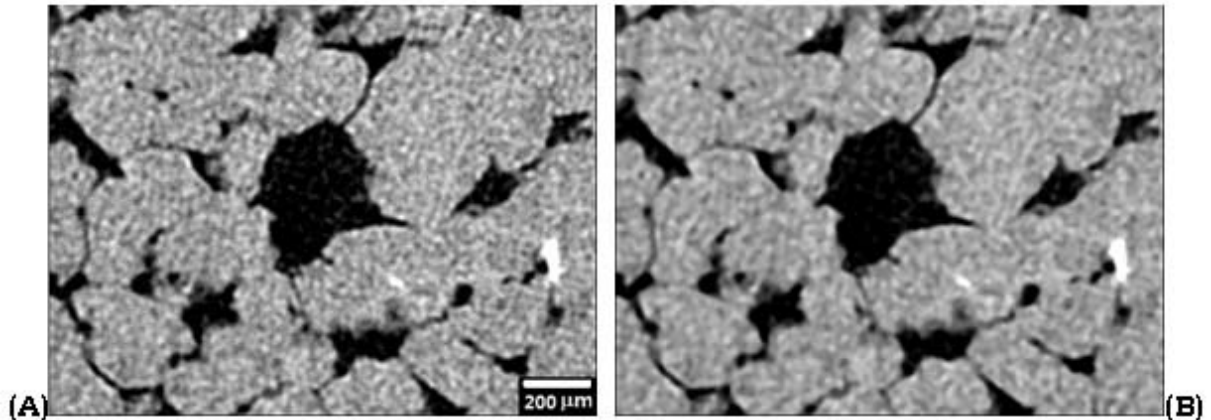
Figura 132 –(A) Imagem original da amostra de arenito da formação Tumblagooda; (B) imagem com aplicação de um filtro passa alta.

A.4 Filtro Mediano

O filtro mediano é usado para redução dos ruídos (como o filtro passa baixa), porém tem a característica de preservar os contornos da imagem. O filtro força os pixels com intensidade distinta a assumir uma “cor” próxima dos seus vizinhos, visto que a mediana é determinada ordenando-se os valores e obtendo-se o valor do meio.

É um filtro não linear, adequado para imagens com ruídos aleatórios. A Figura 133 mostra a aplicação do filtro da mediana na imagem da amostra de arenito da formação Tumblagooda, em (A) a imagem original, em (B) a imagem após aplicação do filtro da mediana.

Figura 133 –(A) Imagem original da amostra de arenito da formação Tumblagooda; (B) imagem com aplicação de um filtro mediana.



O funcionamento deste filtro é baseado no valor mediano de um vetor ordenado em ordem crescente. No exemplo a seguir, ilustrado na Figura 134, o valor do pixel analisado era 12 (teoricamente ruído, pois se diferencia muito dos pixels vizinhos) e, ordenando os valores dos pixels de sua vizinhança 3x3 em ordem crescente e pegando o valor mediano, o pixel é substituído pelo valor 140 [41].

Figura 134 – Funcionamento do filtro da mediana.

155	110	160		155	110	160
140	12	170	[12, 110, 117, 127, 140, 155, 160, 160, 170]	140	140	170
127	160	117		127	160	117

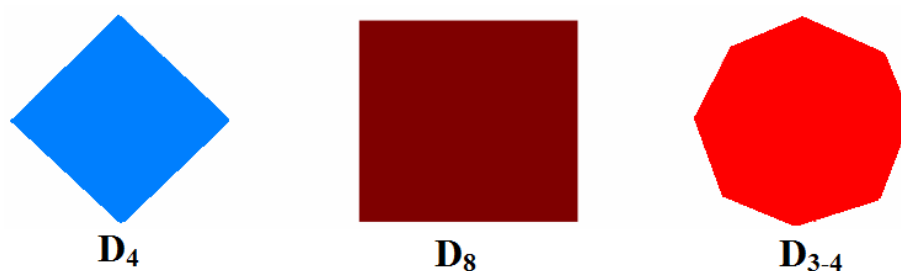
APÊNDICE B – Noções de Morfologia Matemática

A morfologia matemática objetiva descrever os diversos objetos que compõem uma imagem (poros ou grãos, por exemplo), através de um conjunto de padrões criados e utilizados para sua representação, ou seja, objetiva determinar as formas que tais objetos possuem. Estes padrões são denominados elementos estruturantes e sendo este elemento de forma e tamanho conhecidos, podemos testar e quantificar de que maneira ele está ou não está contido em subconjuntos da imagem.

Estes elementos possuem métricas diferentes da métrica Euclidiana [71], por exemplo, as métricas D_4 , D_8 ou D_{3-4} . As métricas citadas prescrevem a conexão entre um pixel aleatório de interesse e sua vizinhança. Dessas, a Métrica D_{3-4} foi utilizada para determinação da distribuição de tamanho de poros neste trabalho e é a que mais se aproxima da Métrica Euclidiana.

Na Figura 135 pode-se observar o formato que os elementos estruturantes assumem, cada qual relativo a sua métrica. Estes formatos assumidos são as formas relativas a discos euclidianos (ou em 3-D, bolas euclidianas) no espaço discreto [17]. Um estudo bastante completo sobre métricas pode ser encontrado nas referências [72,73].

Figura 135 – Forma que os elementos estruturantes assumem com o aumento do raio.



A morfologia matemática foi desenvolvida a partir da teoria dos conjuntos, por autores como Moschetto [73], Serra [74], Facon [75] e Coster [76]. É utilizada em diversas áreas do conhecimento, como exemplo, pode-se citar seu uso na análise de imagens bidimensionais e tridimensionais reconstruídas.

As operações de base da morfologia matemática são a erosão e a dilatação [38,39]. Além dessas, definem-se as operações combinadas de abertura, que consiste de uma erosão seguida por uma dilatação, e o fechamento que é uma dilatação seguida de uma erosão.

Neste trabalho, o objetivo é a utilização da operação de abertura para a determinação da distribuição de tamanhos de objetos, poros e sólidos, em imagens binárias. A seguir, são definidas as operações básicas de erosão e de dilatação.

B.1 Operação de Erosão

Considerando um objeto X contido no espaço R^2 e um elemento estruturante B , que sem perda de generalidade para a definição seja, por exemplo, um círculo. Define-se o erodido de X por B , como:

$E^B(X) = \{x \in R^2 : B_x \subset X\}$	(34)
--	------

onde B_x denota o elemento estruturante centrado em x .

Desta forma, para cada posição x em R^2 , o centro do elemento estruturante é implantado, e são considerados pertencentes ao objeto erodido os pontos x , tais que B_x fica completamente incluso em X . Esta mesma definição é utilizada em espaços discretos [40]. Basicamente a operação de erosão consiste em varrer toda a imagem com o pixel central de um elemento estruturante, e na fase em que o elemento estiver totalmente contido, o pixel central será conservado e, os demais, descartados. Na Figura 136a os pixels coloridos representam a fase a ser erodida, e o resultado pode ser visto na Figura 136b. A Figura 137 mostra a aplicação deste filtro em uma imagem binarizada de arenito, que obtém como resultado a diminuição dos "ruídos" da fase sólida da imagem (preto neste caso).

Figura 136 – Operação de erosão. (a) imagem original com pixels coloridos representando a fase porosa; (b) resultado da operação de erosão na imagem (a).

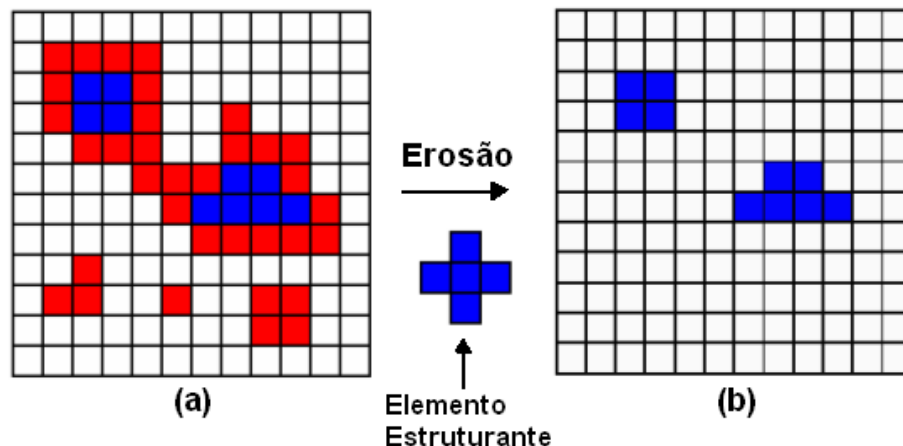
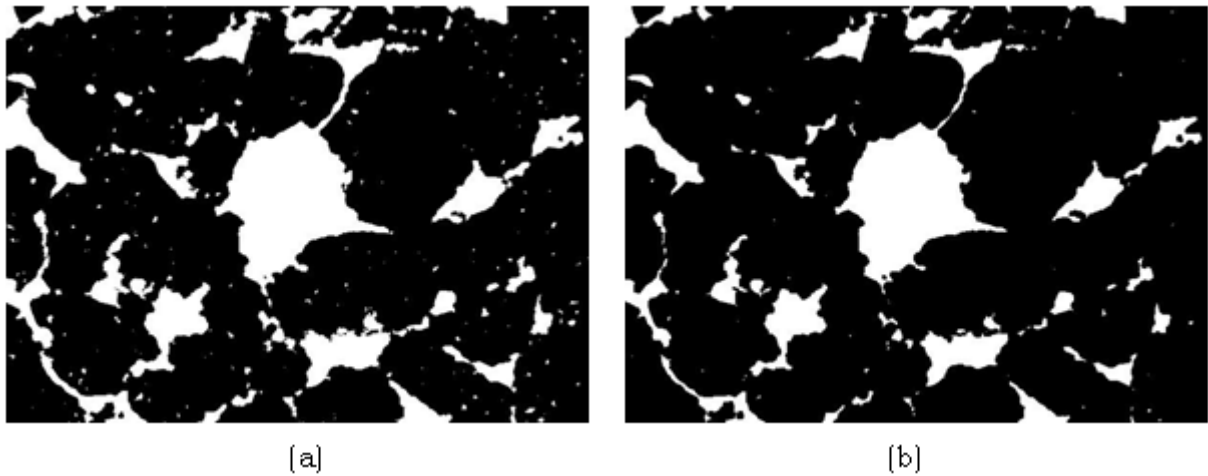


Figura 137 –Aplicação da operação de erosão em uma imagem binarizada do arenito da formação Tumblagooda (branco é o poro e preto o sólido). (a) imagem original; (b) imagem com aplicação da operação de erosão.



B.2 Operação de Dilatação

Na operação de dilatação, o dilatado de X por B , $D^B(X)$, é definido como:

$$D^B(X) = \{x \in R^2 : B_x \cap X \neq \emptyset\} \quad (35)$$

onde \emptyset representa o conjunto vazio.

Da mesma forma que a operação de erosão, a operação de dilatação é realizada também com a varredura de toda a imagem com o pixel central do elemento estruturante, e neste caso, quando o pixel central coincidir com um pixel da fase a ser dilatada, todos os pixels relativos ao elemento estruturante passam a ser também desta fase. Se esta operação for realizada sobre a Figura 138a (a mesma Figura 136b), os pixels acrescentados serão os demarcados em vermelho na imagem da Figura 138b, os pixels vermelhos e azuis da imagem resultante fazem parte da mesma fase. A Figura 139 mostra a aplicação deste filtro em uma imagem binarizada de arenito e que já havia sofrido a aplicação da operação de erosão, desta forma obtendo como resultado a eliminação dos possíveis "ruídos" da fase sólida da imagem original (Figura 137a).

Figura 138 – Operação de dilatação. (a) imagem oriunda da operação de erosão da Figura 136a; (b) resultado da operação de dilatação da imagem (a).

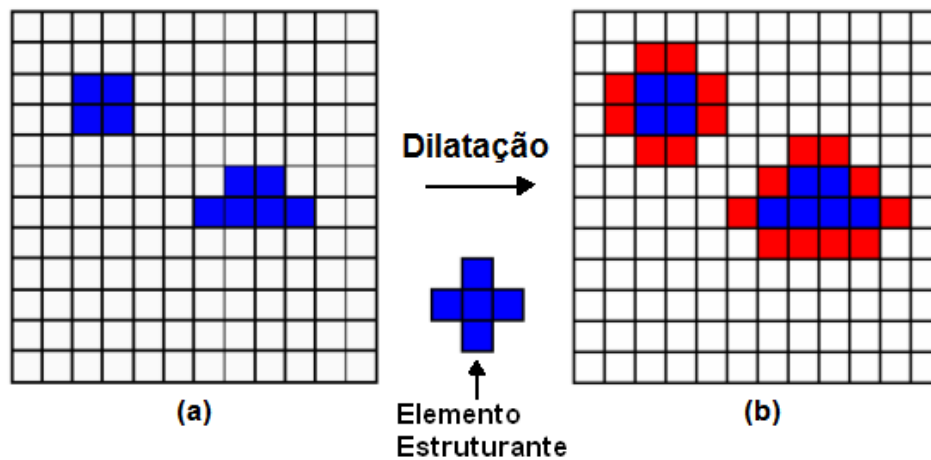


Figura 139 – Aplicação da operação de dilatação em uma imagem binarizada do arenito da formação Tumblagooda (branco é o poro e preto o sólido). (a) imagem oriunda da operação de erosão da Figura 137b; (b) imagem com aplicação da operação de dilatação.

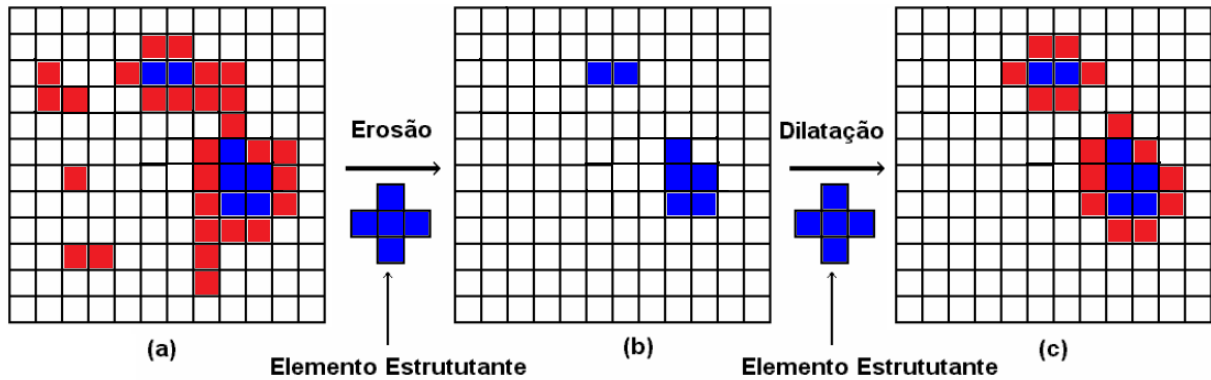


B.3 Operação de Abertura e Fechamento

A operação da abertura consiste de uma operação de erosão seguida da operação de dilatação. O objetivo inicial da operação da abertura é eliminar “ruídos” que seriam as partículas menores que o B (elemento estruturante), sem alterar os objetos maiores. Na Figura 140a podem ser observados pixels coloridos, representando uma fase porosa arbitrária, esta imagem passa pelo processo de erosão, gerando a Figura 140b, que

posteriormente passa pelo processo de dilatação, finalmente gerando a Figura 140c, caracterizando o processo de abertura

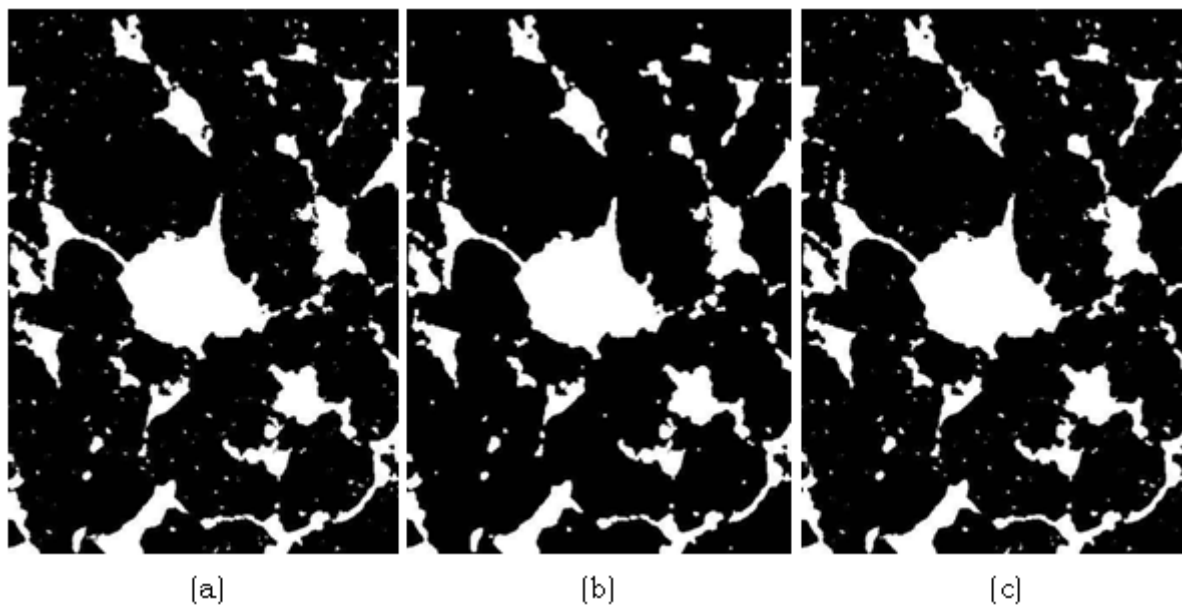
Figura 140 – Operação de abertura. (a) imagem original; (b) resultado da operação de erosão da imagem (a); e (c) imagem final após a operação de abertura.



A operação de fechamento consiste do mesmo princípio da operação de abertura, porém, primeiro a imagem é submetida ao processo de dilatação, seguida do processo de erosão. Alguns efeitos do fechamento são a suavização das fronteiras pelo exterior, o preenchimento dos buracos menores que o B no interior dos objetos, a conexão de partículas ou poros próximos. Após o fechamento a imagem é mais regular, porém ocorre perda de detalhes.

A Figura 29 mostra uma comparação entre a operação de abertura e a operação de fechamento em uma imagem binarizada do arenito da formação Tumblagooda.

Figura 141 – (a) imagem original; (b) operação de abertura da imagem (a); e (c) operação de fechamento da imagem (a).



APÊNDICE C – Modelos 3-D

Como já mencionado anteriormente, com o aparecimento dos microtomógrafos e a possibilidade da reconstrução das imagens 3-D, que fornecem a real microestrutura da amostra, estes modelos estão, aos poucos, sendo deixados de lado, uma vez que é melhor utilizar a própria imagem 3-D da amostra do que um modelo aproximado.

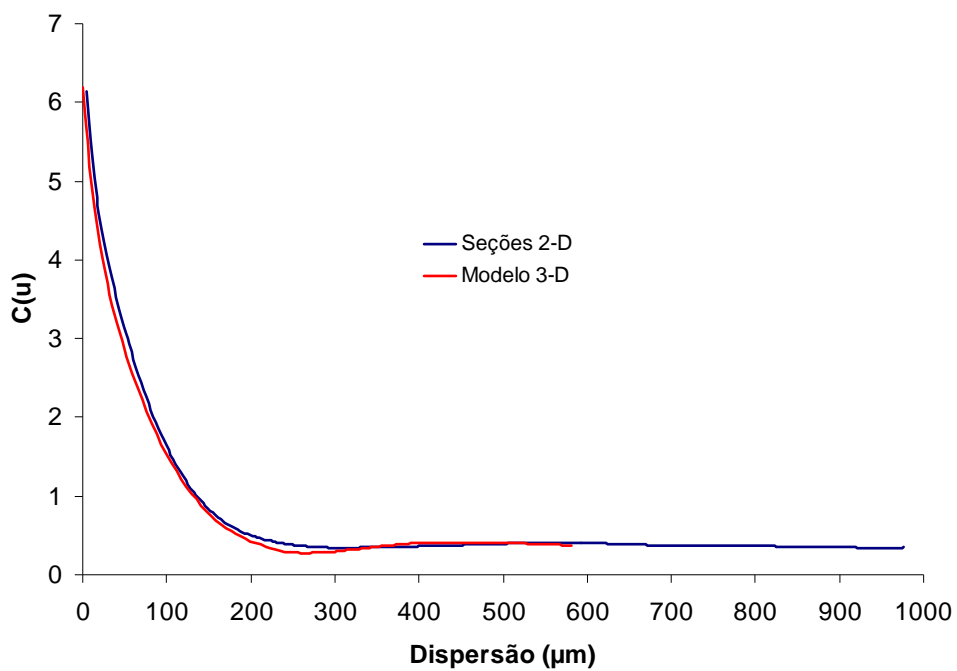
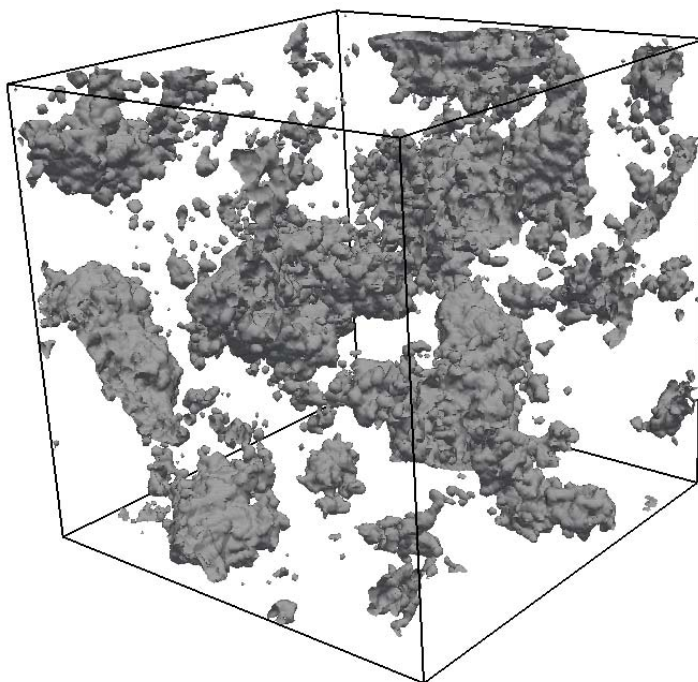
No entanto, como a metodologia microtomográfica é relativamente nova, e a maioria dos estudos sobre simulação de escoamento de fluidos continua sendo realizada através da análise de lâminas, a criação dos modelos ainda se faz necessário. Portanto, achamos interessante apresentar os modelos 3-D gerados através das curvas de autocorrelação das seções 2-D das amostras, para comparação.

Vale aqui lembrar que o método da Gaussiana Truncada foi projetado para trabalhar com meios isotrópicos e homogêneos, o que não é o caso das nossas amostras.

C.1 Arenito 107

A Figura 142 apresenta a curva média de autocorrelação das seções 2-D da amostra 107 que foi utilizada para a reconstrução do modelo, bem como a curva de autocorrelação do modelo 3-D. O modelo gerado é apresentado na Figura 143, com dimensões de 1168 x 1168 x 1168 μm^3 e fator de amplificação 2.

A porosidade calculada para o modelo 3-D da amostra 107 foi de $6,2 \pm 0,2$ %, valor este que está de bom acordo com o valor médio da porosidade determinada a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 6,1 \pm 0,2$ %), o que já era esperado, uma vez que a porosidade é um dado de entrada para a criação do modelo. Outro aspecto importante a ser observado é a distribuição dos poros no modelo reconstruído, alguns poros são grandes, porém poucos, e não há uma conexão contínua entre eles, impossibilitando o fluxo de qualquer fluido. Estas características se assemelham com as da imagem 3-D real da amostra, que pode ser observada na Figura 90.

Figura 142 – Curvas de autocorrelação da amostra 107.**Figura 143** – Modelo 3-D reconstruído da fase porosa da amostra 107 com fator de ampliação 2 ($1168 \times 1168 \times 1168 \mu\text{m}^3$).

C.2 Arenito 108

A Figura 144 apresenta a curva média de autocorrelação das seções 2-D da amostra 108 que foi utilizada para a reconstrução do modelo, bem como a curva de autocorrelação do modelo 3-D. O modelo gerado é apresentado na Figura 145, com dimensões de $1168 \times 1168 \times 1168 \mu\text{m}^3$ e fator de amplificação 2

Figura 144 – Curvas de autocorrelação da amostra 108.

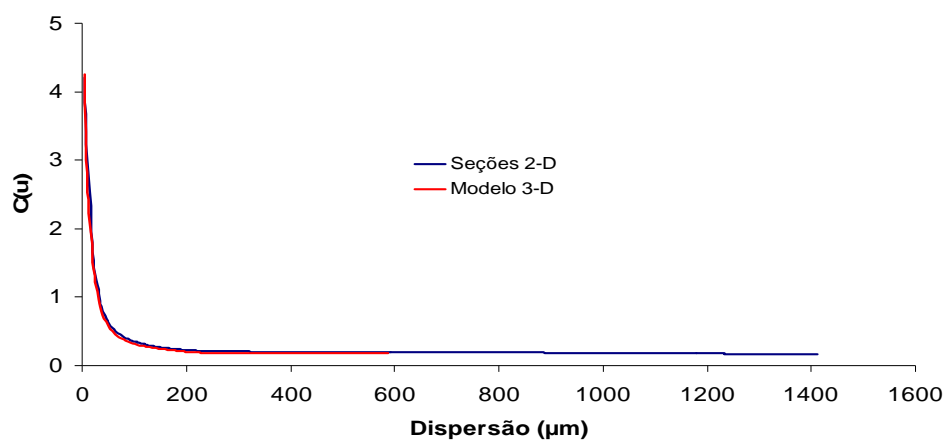
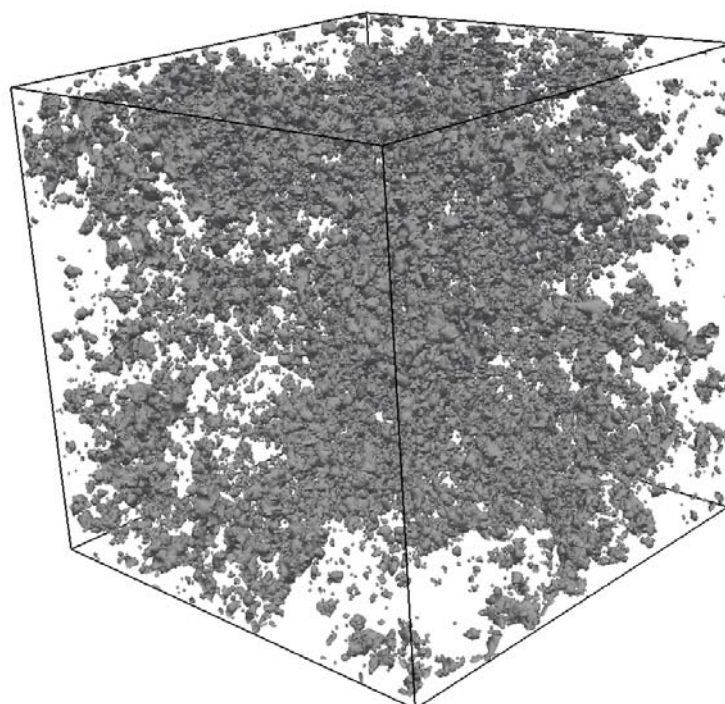


Figura 145 – Modelo 3-D reconstruído da fase porosa da amostra 108 com fator de ampliação 2 ($1168 \times 1168 \times 1168 \mu\text{m}^3$).

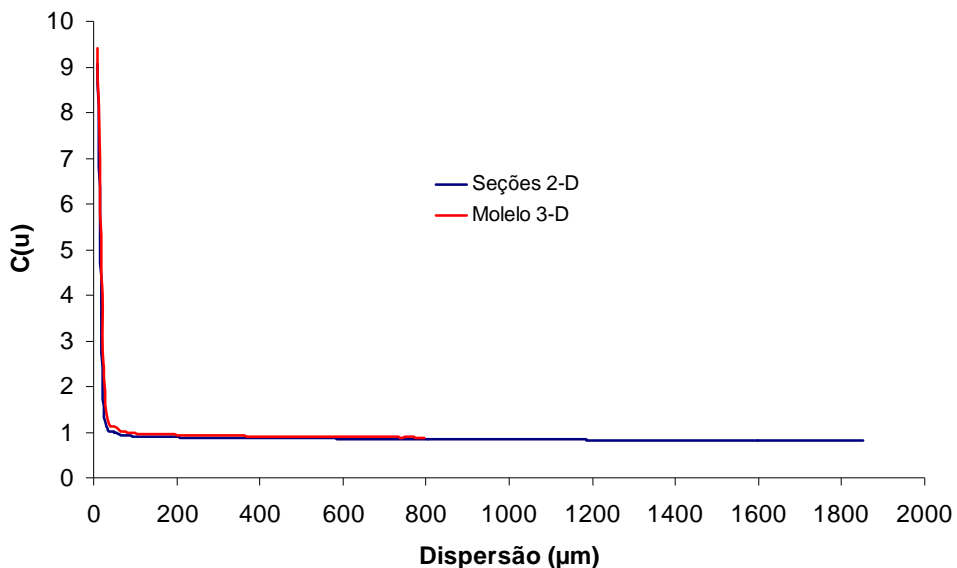


A porosidade calculada para o modelo 3-D da amostra 108 foi de $4,3 \pm 0,1$ %, valor este que está de bom acordo com o valor médio da porosidade determinada a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 4,2 \pm 0,1$ %).

C.3 Arenito 403

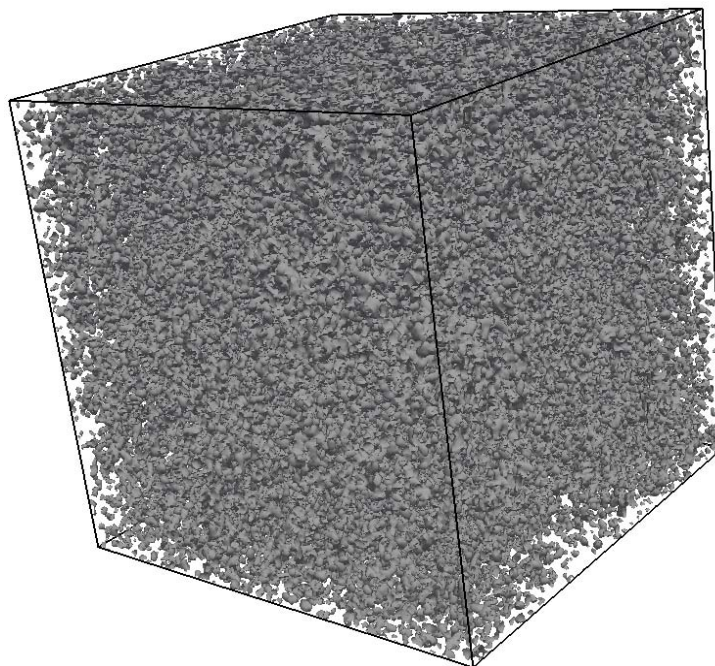
A Figura 146 apresenta a curva média de autocorrelação das seções 2-D da amostra 403 que foi utilizada para a reconstrução do modelo, bem como a curva de autocorrelação do modelo 3-D. O modelo gerado é apresentado na Figura 147, com dimensões de $1580 \times 1580 \times 1580 \mu\text{m}^3$ e fator de amplificação 2.

Figura 146 – Curvas de autocorrelação da amostra 403.



A porosidade calculada para o modelo 3-D da amostra 403 foi de $8,8 \pm 0,2$ %, valor este que está um pouco abaixo do valor médio da porosidade determinada a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 9,3 \pm 0,2$ %).

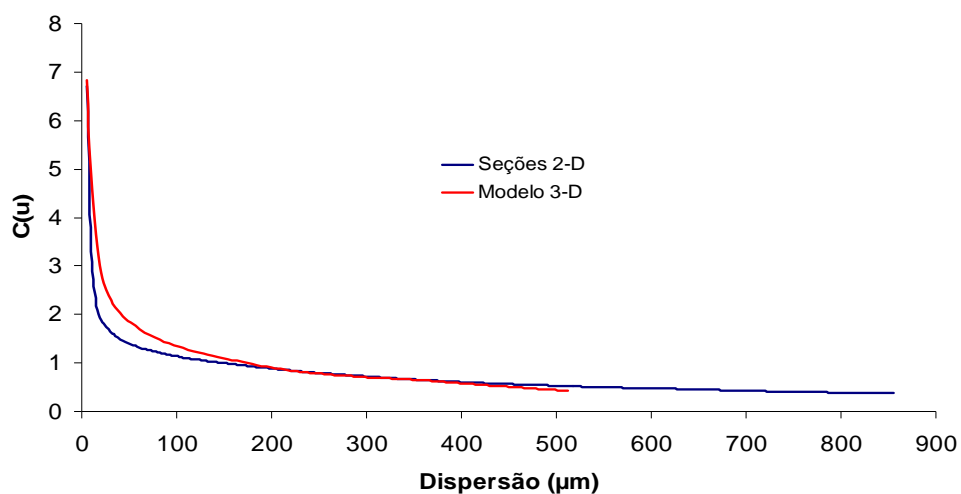
Figura 147 – Modelo 3-D reconstruído da fase porosa da amostra 403 com fator de ampliação 2 ($1580 \times 1580 \times 1580 \mu\text{m}^3$).



C.4 Siltito MC16

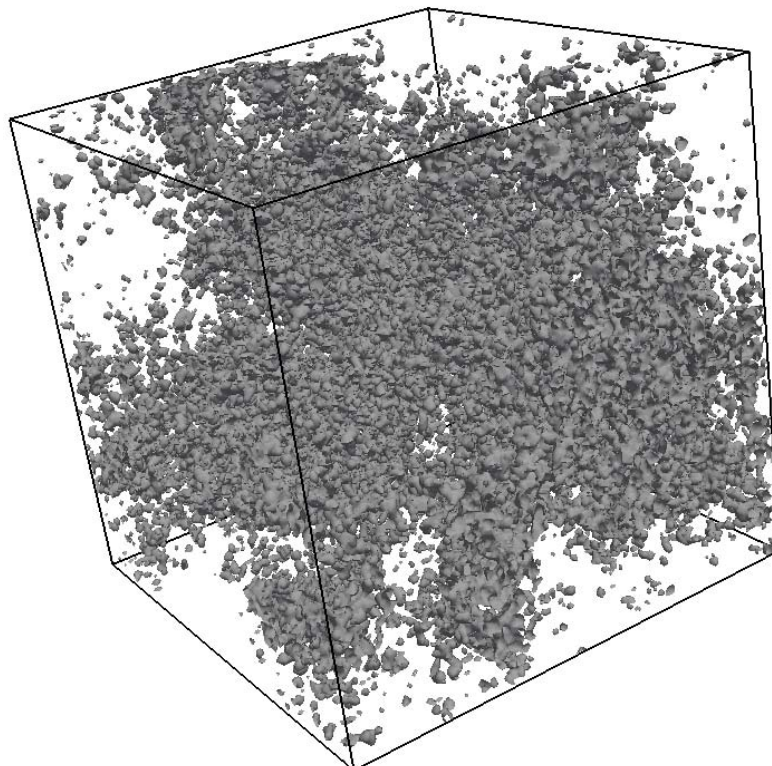
A Figura 148 apresenta a curva média de autocorrelação das seções 2-D da amostra MC16 que foi utilizada para a reconstrução do modelo, bem como a curva de autocorrelação do modelo 3-D. O modelo gerado é apresentado na Figura 149, com dimensões de $1020 \times 1020 \times 1020 \mu\text{m}^3$ e fator de ampliação 2.

Figura 148 – Curvas de autocorrelação da amostra MC16.



A porosidade calculada para o modelo 3-D da amostra MC16 foi de $6,8 \pm 0,2$ %, valor este que está de bom acordo com o valor médio da porosidade determinada a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 7,0 \pm 0,2$ %). Neste modelo pode ser visto claramente que a estrutura dos poros é totalmente diferente da real estrutura da amostra (Figura 107).

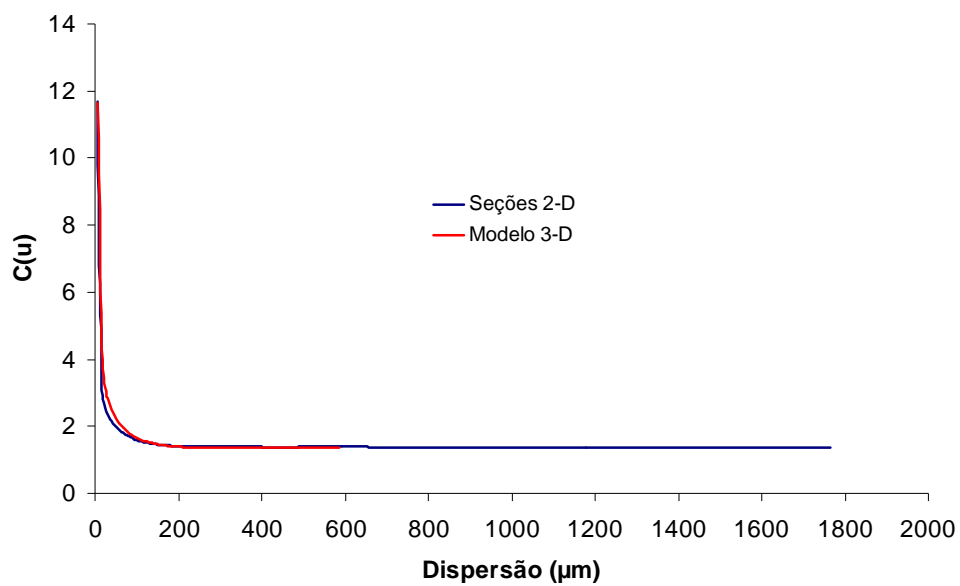
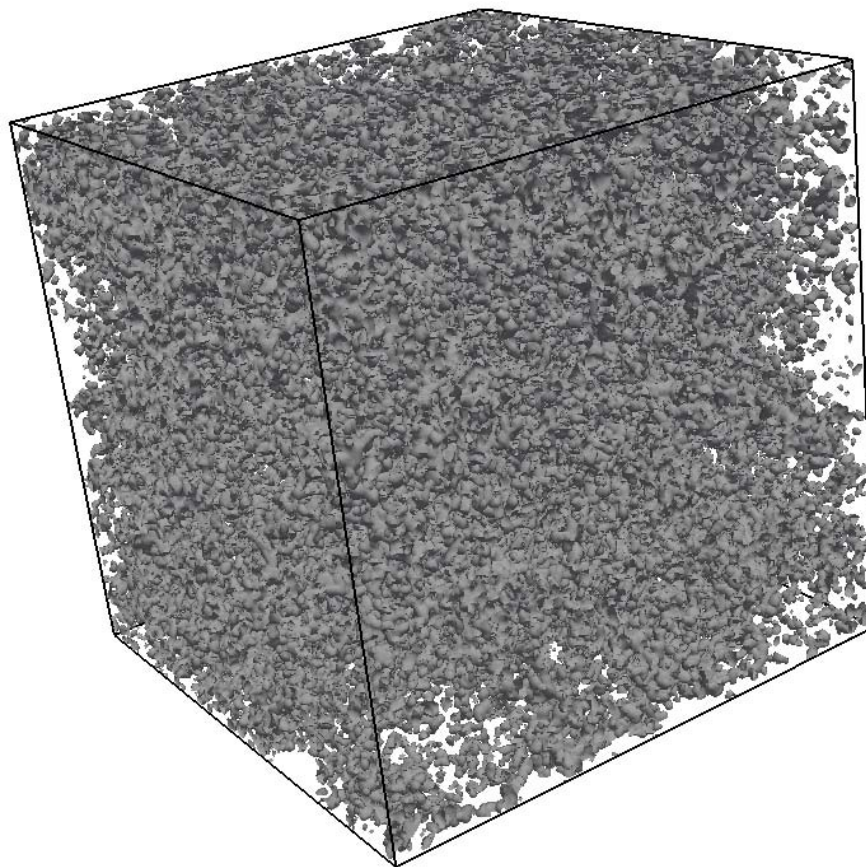
Figura 149 – Modelo 3-D reconstruído da fase porosa da amostra MC16 com fator de ampliação 2 ($1020 \times 1020 \times 1020 \mu\text{m}^3$).



C.5 Silito PG6

A Figura 150 apresenta a curva média de autocorrelação das seções 2-D da amostra PG6 com resolução de $2,9 \mu\text{m}$ que foi utilizada para a reconstrução do modelo, bem como a curva de autocorrelação do modelo 3-D. O modelo gerado é apresentado na Figura 151, com dimensões de $1168 \times 1168 \times 1168 \mu\text{m}^3$ e fator de ampliação 2.

A porosidade calculada para o modelo 3-D da amostra PG6 foi de $11,6 \pm 0,3$ %, valor este que está de bom acordo com o valor médio da porosidade determinada a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 12,0 \pm 0,3$ %).

Figura 150 – Curvas de autocorrelação da amostra PG6.**Figura 151** – Modelo 3-D reconstruído da fase porosa da amostra PG6 com fator de ampliação 2 ($1168 \times 1168 \times 1168 \mu\text{m}^3$).

C.6 Arenito PG8

A Figura 152 apresenta a curva média de autocorrelação das seções 2-D da amostra PG8 que foi utilizada para a reconstrução do modelo, bem como a curva de autocorrelação do modelo 3-D. O modelo gerado é apresentado na Figura 153, com dimensões de $1993 \times 1993 \times 1993 \mu\text{m}^3$ e fator de amplificação 2.

Figura 152 – Curvas de autocorrelação da amostra PG8

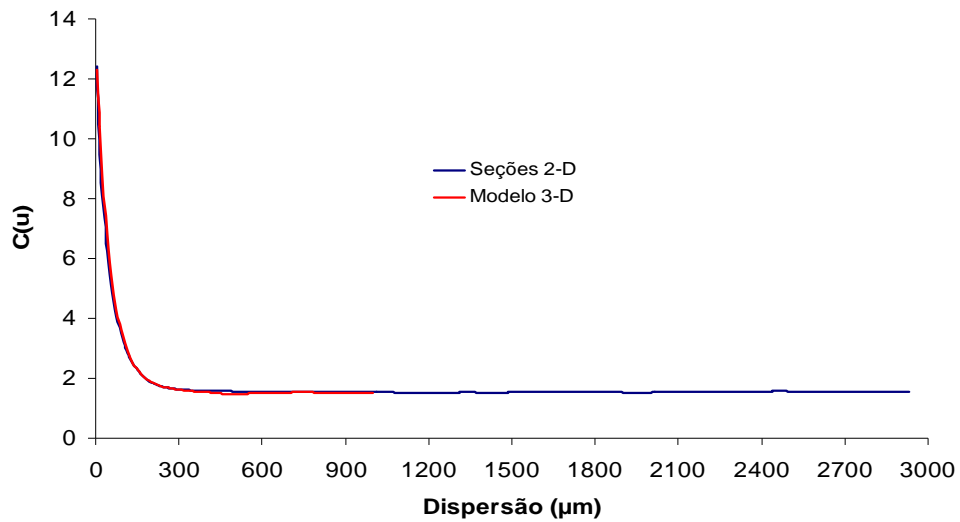
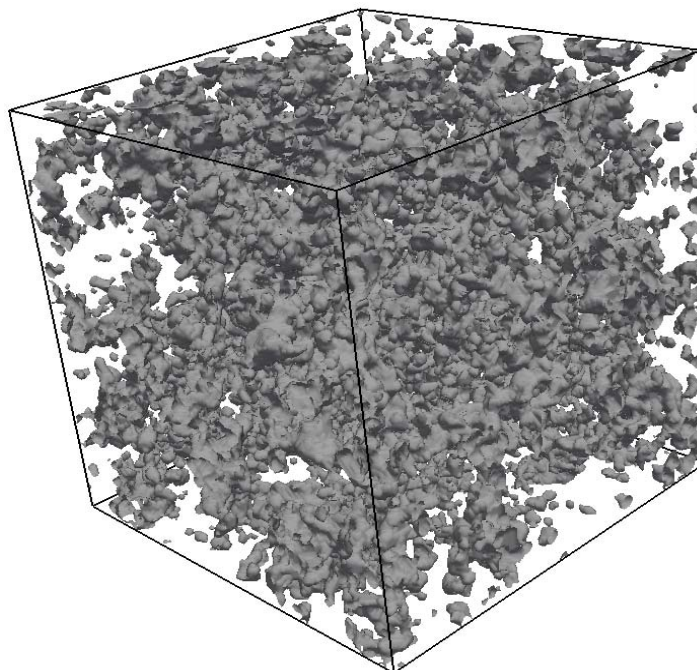


Figura 153 – Modelo 3-D reconstruído da fase porosa da amostra PG8 com fator de ampliação 2 ($1993 \times 1993 \times 1993 \mu\text{m}^3$).

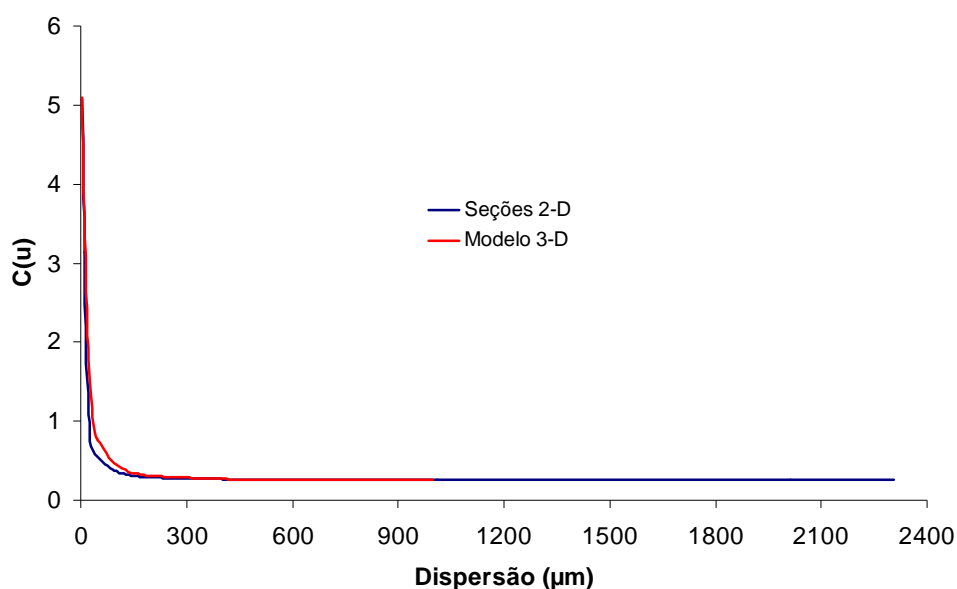


A porosidade calculada para o modelo 3-D da amostra PG8 foi de $12,3 \pm 0,2$ %, valor este que está um pouco abaixo do valor médio da porosidade determinada a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 13,0 \pm 0,2$ %).

C.7 Arenito PG19

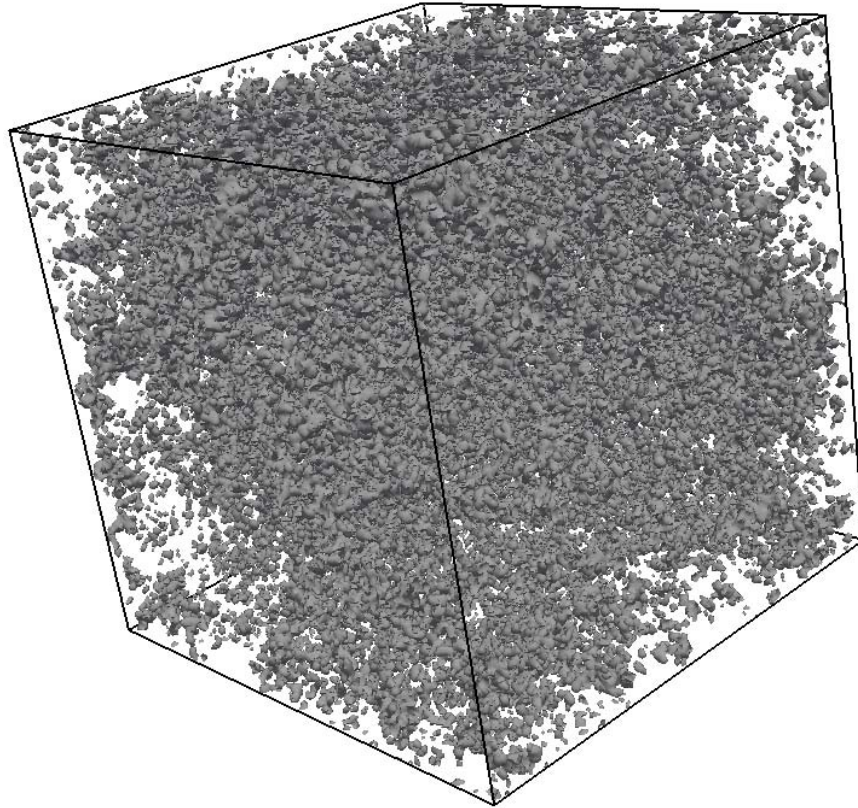
A Figura 154 apresenta a curva média de autocorrelação das seções 2-D da amostra PG19 que foi utilizada para a reconstrução do modelo, bem como a curva de autocorrelação do modelo 3-D. O modelo gerado é apresentado na Figura 155, com dimensões de $1993 \times 1993 \times 1993 \mu\text{m}^3$ e fator de amplificação 2.

Figura 154 – Curvas de autocorrelação da amostra PG19.



A porosidade calculada para o modelo 3-D da amostra PG19 foi de $5,1 \pm 0,1$ %, valor este que está de bom acordo com o valor médio da porosidade determinada a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 4,9 \pm 0,1$ %).

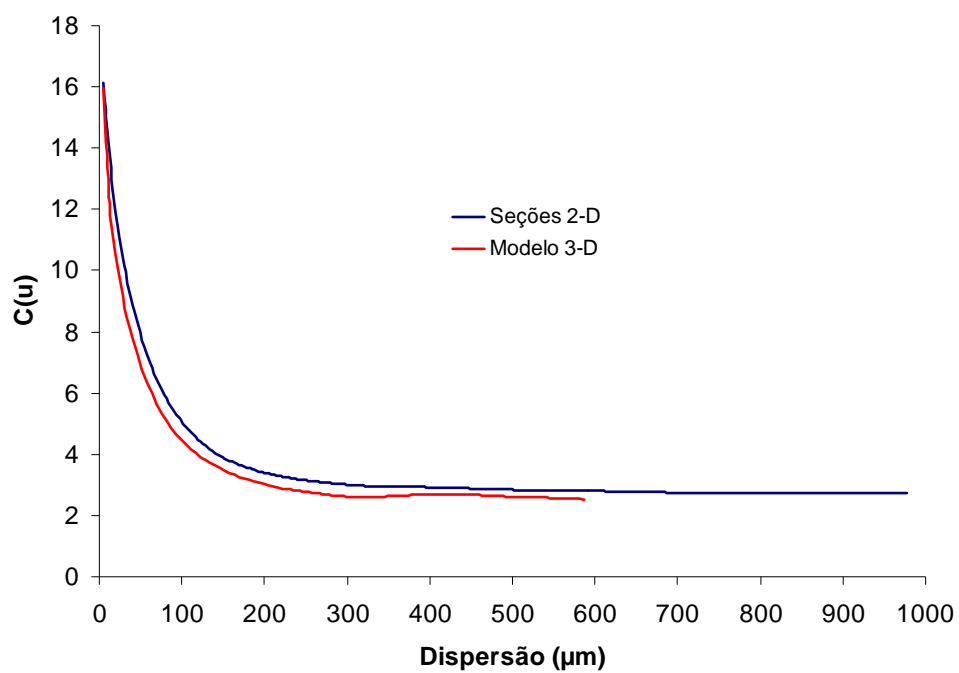
Figura 155 – Modelo 3-D reconstruído da fase porosa da amostra PG19 com fator de ampliação 2 ($1993 \times 1993 \times 1993 \mu\text{m}^3$).



C.8 Arenito Tumblagooda

A Figura 156 apresenta a curva média de autocorrelação das seções 2-D da amostra Tumblagooda que foi utilizada para a reconstrução do modelo, bem como a curva de autocorrelação do modelo 3-D. O modelo gerado é apresentado na Figura 157, com dimensões de $1168 \times 1168 \times 1168 \mu\text{m}^3$ e fator de ampliação 2.

A porosidade calculada para o modelo 3-D da amostra Tumblagooda foi de $15,9 \pm 0,5 \%$, valor este que está de bom acordo com o valor médio da porosidade determinada a partir das seções 2-D analisadas ($\phi = 15,3 \pm 0,5 \%$).

Figura 156 – Curvas de autocorrelação da amostra PG19**Figura 157** – Modelo 3-D reconstruído da fase porosa da amostra Tumblagooda com fator de ampliação 2 ($1168 \times 1168 \times 1168 \mu\text{m}^3$).