



Igor Nogueira Lima

**Modelagem da rede porosa de
aglomerados de minério de ferro:
Desenvolvimento de uma metodologia
baseada em microtomografia de raios-x**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, de Materiais e Processos Ambientais do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sidnei Paciornik

Coorientadora: Dra. Karen Soares Augusto

Rio de Janeiro
Agosto de 2023



Igor Nogueira Lima

**Modelagem da rede porosa de
aglomerados de minério de ferro:
Desenvolvimento de uma metodologia
baseada em microtomografia de raios-x**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, de Materiais e Processos Ambientais da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Sidnei Paciornik

Orientador

Departamento de Engenharia Química e de Materiais - PUC-Rio

Dra. Karen Soares Augusto

Coorientadora

Departamento de Engenharia Química e de Materiais - PUC-Rio

Prof. Roberto Ribeiro de Avillez

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Dra. Valdirene Gonzaga de Resende

Vale/SA

Rio de Janeiro, 30 de agosto de 2023

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Igor Nogueira Lima

Graduado em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Cariri – UFCA – em 2021. Principais áreas de interesse: Caracterização microestrutural e análises de imagens.

Ficha Catalográfica

Lima, Igor Nogueira

Modelagem da rede porosa de aglomerados de minério de ferro: Desenvolvimento de uma metodologia baseada em microtomografia de raios-x / Igor Nogueira Lima ; orientador: Sidnei Paciornik ; coorientadora: Karen Soares Augusto. – 2023.

96 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2023.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Química e de Materiais – Teses. 2. Microtomografia de raios X. 3. Modelagem de rede de poros. 4. Permeabilidade. 5. Aglomerados de minério de ferro. I. Paciornik, Sidnei. II. Augusto, Karen Soares. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Química e de Materiais. IV. Título.

CDD: 620.11

Agradecimentos

Gostaria de agradecer imensamente a minha mãe Lucia Nogueira da Silva e ao meu irmão Victor Nogueira Lima, por todo o apoio e incentivo em todas as jornadas da minha vida. Também a minha namorada Laura Nunes de Menezes pelo incentivo e motivação mesmo em momentos difíceis.

A minha família, por acreditar, confiar e por todo suporte durante toda a minha caminhada acadêmica.

Ao meu orientador Sidnei Paciornik, pelo incentivo à pesquisa, pelos ensinamentos compartilhados, cooperação, além de todas as oportunidades fornecidas. A minha coorientadora Karen Augusto, por todas as ideias, sugestões e explicações dadas, além de toda disponibilidade para me auxiliar no presente trabalho. Ao Dr. Marcos Henrique Maurício, que disponibilizou seu tempo para colaborar imensamente e tornar este trabalho possível.

Aos grandes amigos da PUC, cujo apoio foi fundamental durante todo o mestrado. Dentre os quais Bernardo, Bryan, Thalita, Francisco e Isabel que tornaram esse período cheio de boas recordações.

À Vale pela bolsa concedida, fornecimento das amostras e principalmente pela oportunidade de contribuir com o projeto que tornou o desenvolvimento deste trabalho possível. Ao Alei Domingues por todo o suporte e colaboração prestados durante todo o trabalho.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela contribuição financeira que possibilitou a dedicação integral ao programa de pós-graduação, e a PUC-Rio pela bolsa de isenção de mensalidade.

A Banca Examinadora pela preciosa disposição em contribuir para a melhoria deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Nogueira Lima, Igor; Paciornik, Sidnei (Orientador); **Modelagem da rede porosa de aglomerados de minério de ferro: Desenvolvimento de uma metodologia baseada em microtomografia de raios-x.** Rio de Janeiro, 2023. 96p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Uma das características mais relevantes nos aglomerados de minério de ferro é a sua porosidade, que impacta fortemente no desempenho desses materiais nos processos siderúrgicos. O desempenho é diretamente dependente da existência de uma rede porosa que permite o fluxo de gases pelo interior desses aglomerados sem comprometer sua integridade física. Neste trabalho, amostras de diferentes tipos de aglomerados de minério de ferro foram caracterizadas com o auxílio de técnicas de microtomografia computadorizada de raios X (microCT), processamento digital de imagens e modelagem de rede de poros (PNM). Com isso, a influência da microestrutura desses aglomerados na variação da sua porosidade e permeabilidade foi avaliada. O uso de microCT permitiu uma visualização 3D da estrutura dos aglomerados, permitindo realizar uma análise da estrutura interna das amostras para a discriminação do espaço poroso. O *pixel size* ideal foi estipulado por meio de diversas capturas com resoluções diferentes. A PNM foi utilizada para realizar a simulação da permeabilidade absoluta das amostras, correlacionando com a porosidade, conectividade dos poros e diâmetro de poros e conexões. Foi realizada uma variação de ± 5 tons de cinza nos limiares de segmentação para estipular a sensibilidade do impacto desse parâmetro nos resultados da modelagem. Os dois aglomerados apresentaram porosidade parecida, em torno de 20%. Os resultados para piores resoluções apresentaram uma inconsistência, em muitos casos não possuindo sequer permeabilidade. As imagens adquiridas com um *tamanho de voxel* de 2 μm resultaram em cálculos consistentes de permeabilidade, em torno de 0,4 a 2,4 mD para os briquetes e 0,03 a 1,6 mD para as pelotas, sugerindo que os briquetes são levemente mais permeáveis. A variação do limiar de segmentação dos poros teve forte impacto nos resultados das modelagens, influenciando diretamente no valor do cálculo da permeabilidade absoluta.

Palavras-Chave

Microtomografia de raios X; Modelagem de rede de poros; Permeabilidade; processamento digital de imagens; Aglomerados de minério de ferro.

Abstract

Nogueira Lima, Igor; Paciornik, Sidnei (Orientador); **Pore network modeling of iron ore agglomerates: Development of a methodology based on x-ray microtomography.** Rio de Janeiro, 2023. 96p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One of the most relevant features of iron ore agglomerates is their porosity, which strongly impacts the performance of these materials in steelmaking processes. Performance is directly dependent on the existence of a porous network that allows gas flow through the interior of these agglomerates without compromising their physical integrity. This study characterized samples of different iron ore agglomerates using X-ray microcomputed tomography (microCT), digital image processing, and pore network modeling (PNM). The influence of the microstructure of these agglomerates on the variation of their porosity and permeability was evaluated. MicroCT enabled a 3D visualization of the agglomerate structure, allowing for an analysis of the internal structure of the samples to discriminate the porous space. The ideal pixel size was determined through various captures at different resolutions. PNM was used to simulate the absolute permeability of the samples, correlating it with porosity, pore connectivity, and pore and connection diameter. A variation of ± 5 gray tones in the segmentation thresholds was performed to determine the sensitivity of this parameter's impact on the modeling results. The two agglomerates had similar porosity of around 20%. The results for lower resolutions showed inconsistency, with many cases lacking permeability altogether. Images acquired with a pixel size of 2 μm resulted in consistent permeability calculations, ranging from 0.4 to 2.4 mD for briquettes and 0.03 to 1.6 mD for pellets, indicating that briquettes are slightly more permeable. The variation of pore segmentation threshold had a strong impact on the modeling results, directly influencing the value of the absolute permeability calculation.

Keywords

X-Ray microcomputed tomography; Pore network modeling; Permeability; Digital image processing; Iron ore agglomerates.

Sumário

1	Introdução	16
2	Objetivos	18
2.1	Objetivos Gerais	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	Revisão de literatura	19
3.1	Aglomerados de minério de ferro	19
3.1.1	Pelotas e o processo de pelotização	20
3.1.2	Briquetes e o processo de briquetagem	21
3.2	Processo de redução direta	25
3.3	Porosidade	26
3.3.1	Porosidade em aglomerados de minério ferro	27
3.3.2	Características do espaço poroso (diâmetro, volume, conectividade)	29
3.4	Permeabilidade	30
3.5	Microtomografia	31
3.6	Processamento e análise digital de imagens	35
3.7	Modelagem de rede de poros (Pore Network Modeling)	36
3.7.1	Open Pore Network Modeling (OpenPNM)	37
3.7.2	Características das redes de poros	42
4	Metodologia	45

4.1	Amostras	46
4.2	Microtomografia de raios X	48
4.2.1	Preparação das amostras	48
4.2.2	Aquisição das imagens	48
4.2.3	Reconstrução das imagens	51
4.2.4	Definição da resolução	52
4.3	Processamento e análise digital de imagens	52
4.4	Modelagem da rede de poros	57
5	Resultados e discussão	63
5.1	Análise com diferentes tamanhos de voxel (2 μm , 6 μm e 16 μm)	63
5.1.1	Porosidade	63
5.1.2	Modelagem da Rede Porosa	65
5.1.3	Permeabilidade absoluta	67
5.2	Análise comparativa entre briquetes e pelotas	68
5.2.1	Porosidade	68
5.2.2	Modelagem da rede porosa	71
5.2.3	Permeabilidade absoluta	77
5.3	Análise da variação do limiar de segmentação	78
5.3.1	Porosidade	78
5.3.2	Modelagem da rede porosa	81
5.3.3	Permeabilidade absoluta	86
6	Conclusão e trabalhos futuros	88
7	Referências	90

Lista de Figuras

Figura 1 – (a) Tambor de pelotamento; (b) Discos de pelotamento	20
Figura 2 – (A) Pressão relativamente baixa aplicada na massa de partículas; (B) Início da alteração do tamanho e forma das partículas de entrada devido ao aumento da pressão; (C) Alteração drástica da estrutura do compactado tornando-se um sólido incompressível [17].	22
Figura 3 – Representação da briquetagem em uma prensa de rolos.	24
Figura 4 - Porosidades absoluta e efetiva [25].	27
Figura 5 - Representação da conectividade de uma rede de poros. O número inscrito corresponde ao número de conexões que um poro possui com outros poros.	30
Figura 6 - Processo de microtomografia de raios X. Adaptado de [41].	32
Figura 7 - Geometria cônica. Adaptado de [43].	34
Figura 8 - A transformação da representação de um volume em voxels para a representação em camadas por pixels. Adaptado de [45].	35
Figura 9 – Sequência padrão de processamento e análise digital de imagens.	35
Figura 10 - Vistas de um exemplo de uma amostra de arenito. (a) A visualização 3D de um sólido em amarelo e a rede extraída; (b) o mesmo que (a), mas com a parte do sólido retirada; (c) representação do volume dos poros e conexões [10].	37

Figura 11 – Ilustração do procedimento de segmentação de watershed baseado em marcadores em imagens simples de empacotamentos cúbicos de esferas. (a), (c) Transformação de distância do espaço vazio. (b), (d) Espaço de poros segmentados resultante da segmentação de watershed baseada em marcadores. (e) Resultados de segmentação em empacotamento cúbico de corpo centrado em 3D, mostrando em fatias das localizações das esferas [10]. 39

Figura 12 - Esquema geral da estrutura de extração da rede de poros com todas as principais partes de um algoritmo típico de segmentação watershed. Adaptado de [58]. 40

Figura 13 – Ilustração do algoritmo de segmentação do espaço poroso. (a) mostra os picos da transformação de distância, e (b) mostra a segmentação resultante do espaço poroso. 41

Figura 14 – Ilustração da determinação do tamanho de um poro e da formação das conexões. (a) As regiões de poro são rotuladas, por exemplo, com o poro 7 sendo o poro de interesse e os poros vizinhos 11, 64 e 67. As regiões de conexão são encontradas dilatando a região 6 e identificando as regiões sobrepostas. (b) A transformação de distância da imagem é utilizada para determinar as informações de tamanho do poro e garganta a partir dos valores máximos de intensidade indicados pelas caixas pretas. (c) Usando o mapa de distância global, o diâmetro do poro se estende para o poro vizinho. (d) Usando o mapa de distância obtido apenas dentro do poro, resulta no diâmetro inscrito do poro e em um centroide de poro mais geometricamente consistente [10]. 44

Figura 15 - Etapas de análises abordadas neste trabalho. 45

Figura 16 – Pelotas de minério de ferro. 46

Figura 17 - Representação dos cortes longitudinais (recortes da fatia

esquerda de cada imagem) e cortes transversais (recortes da fatia direita de cada imagem).	47
Figura 18 – Nomenclatura dos fragmentos das amostras.	47
Figura 19 – Suporte com um fragmento de briquete pronto para ser tomografado.	48
Figura 20 - Visão interna do microtomógrafo ZEISS Xradia Versa 510.	50
Figura 21 - Visão interna do MicroCT Zeiss XRadia Versa 510: (a) Fonte de raios X (esquerda), amostra de briquete (centro) e detector e conjunto de lentes (direita); (b) Imagem ampliada da fonte e amostra.	50
Figura 22 - Imagem de microtomografia de raios X com o seu respectivo histograma de intensidade do slice.	54
Figura 23 - Problema apresentado durante a segmentação dos poros.	55
Figura 24 – Processo realizado para a segmentação dos poros. (a) Segmentação da região sólida da amostra; (b) ROI da região sólida; (c) ROI proveniente do procedimento de preenchimento; (d) Resultado da subtração da ROI do sólido preenchido com a ROI da segmentação do sólido; (e) Resultado da segmentação dos poros.	56
Figura 25 - Fluxograma da modelagem da rede porosa das amostras de aglomerado de minério de ferro.	57
Figura 26 - Parte do código referente à importação da imagem para o ambiente.	58
Figura 27 - Fornecimento de informações da amostra e parâmetros utilizados na modelagem.	58
Figura 28 - Parte do código referente a criação da rede de poros totais	

(conectados e isolados).	59
Figura 29 - Propriedades e informações que podem ser extraídas depois do processo de criação da rede de poros.	59
Figura 30 - Parte do código que realiza a modelagem geométrica dos poros e conexões.	59
Figura 31 – Exclusão de poros desconectados.	59
Figura 32 - Parte do código referente a aplicação do algoritmo de Stokes.	60
Figura 33 - Cálculo da permeabilidade absoluta.	61
Figura 34 – Visualização da modelagem da rede de poros da amostra de Briquete-F12 com 2 μm de tamanho de voxel.	62
Figura 35 - Região das amostras que foram capturadas com tamanho de voxel de 2 μm . (a) Briquete-F12-TD; (b) Briquete-F33C-TA.	63
Figura 36 - Mesma região da amostra Briquete-F12-TD adquirida em diferentes tamanhos de voxel. (a) 2 μm ; (b) 6 μm ; (c) 16 μm .	64
Figura 37 – Regiões das amostras que foram capturadas com resolução espacial de 2 μm . (a) Briquete-F12-TD; (b) Briquete-F14; (c) Briquete-F33C-TA; (d) Briquete-F34B; (e) Pelota-RD1; (f) Pelota-RD2; (g) Pelota-RD3.	69
Figura 38 - Visualização da região segmentada de cada amostra. (a) Briquete-F12; (b) Briquete-F14; (c) Briquete-F33C; (d) Briquete-F34B; (e) Pelota-RD1; (f) Pelota-RD2; (g) Pelota-RD3.	70
Figura 39 – Gráficos da frequência relativa do diâmetro dos poros.	73

Figura 40 – Gráficos da frequência relativa da conectividade dos poros. 75

Figura 41 – Gráficos da frequência relativa do diâmetro das conexões. 76

Figura 42 - Intervalo de tons de cinza utilizados na segmentação dos poros. (a) Briquete-F14; (b) Pelota-RD3. 79

Figura 43 – Intervalos de tons de cinza utilizados nas segmentações dos poros. (a) Briquete-F12; (b) Pelota-RD1. 80

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Descrição das propriedades geométricas para poros e gargantas. Adaptado de [10]	43
Tabela 2 – Condições de aquisição no Micro-CT.	49
Tabela 3 - Parâmetros adotados para aplicação do filtro non local means denoising.	54
Tabela 4 – Limiares adotados e porosidade total da amostra Briquete-F12-TD e Briquete-F33C-TA em 2, 6 e 16 μm .	64
Tabela 5 – Propriedades extraídas das modelagens da amostra Briquete-F12-TD em diferentes resoluções.	65
Tabela 6 – Propriedades extraídas das modelagens da amostra Briquete-F33C-TA em diferentes resoluções.	66
Tabela 7 – Resultados da permeabilidade absoluta das diferentes resoluções do Briquete-F12-TD e Briquete-F33C-TA.	67
Tabela 8 – Limiares adotados e porosidade total para as amostras de briquete e pelota.	71
Tabela 9 - Propriedades extraídas das modelagens das amostras de briquetes e pelotas com resolução espacial de 2 μm .	72
Tabela 10 – Resultados de permeabilidade absoluta das amostras de briquete e pelota.	77
Tabela 11 – Resultados de porosidade para os diferentes intervalos adotados para as amostras (Briquete-F14 e Pelota-RD3).	79
Tabela 12 – Resultados de porosidade para os diferentes intervalos	

adotados para as amostras (Briquete-F14 e Pelota-RD3).	81
Tabela 13 – Resultados das modelagens dos diferentes limiares do Briquete-F14.	82
Tabela 14 – Resultados das modelagens com diferentes limiares da Pelota-RD3.	83
Tabela 15 – Resultados das modelagens com diferentes limiares do Briquete-F12.	84
Tabela 16 – Resultados das modelagens com diferentes limiares da Pelota-RD1	85
Tabela 17 – Resultados da permeabilidade absoluta com diferentes limiares.	86

1

Introdução

A falta de minério granulado de boa qualidade e a alta produção de minérios ultrafinos nas minas têm impulsionado a crescente importância da produção de aglomerados. Os métodos convencionais de sinterização e pelletização ainda dominam a produção de aglomerados de minério, especialmente de ferro, apesar de requererem instalações caras e apresentarem altos custos operacionais. Além dos desafios relacionados aos custos de produção e matérias-primas, as indústrias siderúrgicas enfrentam uma pressão crescente para reduzir as emissões de CO₂. Nesse contexto a técnica de aglomeração em estado sólido por compactação a frio tem sido adotada na fabricação de minério de ferro briquetado [1]

A produção tradicional de aço, envolvendo o uso de alto-forno, depende fortemente da redução do minério de ferro por meio do carbono como agente redutor. Essa dependência significativa de coque e recursos fósseis resulta em emissões consideráveis de CO₂, contribuindo com aproximadamente 6 a 7% das emissões globais de CO₂ [2], [3].

É conhecido que as propriedades dos aglomerados de minério de ferro estão intimamente relacionadas à sua composição e às suas propriedades físicas. Portanto, compreender essas características é de extrema importância para reduzir ainda mais o consumo de energia e minimizar a emissão de dióxido de carbono, aprimorando a eficiência de redução [4]. A qualidade dos aglomerados de minério de ferro pode ser determinada pela análise de sua composição química, microestrutura, propriedades físicas e metalúrgicas, bem como pelas propriedades da mistura e pelas condições de calor e queima, dependendo do tipo de aglomeração [5], [6].

Embora existam diversos métodos de caracterização estudados para avaliar a composição desses materiais, pouco se sabe sobre sua estrutura física, especialmente a porosidade e a permeabilidade. A redução da carga ferrífera ocorre por meio da passagem de gases redutores em contracorrente com a carga

descendente, e o desempenho desses materiais nos fornos de redução dependem diretamente da existência de uma rede porosa que permita o fluxo de gases pelo interior dos aglomerados, isso precisa acontecer sem comprometer sua integridade física [6]. Portanto, as estruturas porosas e a propriedade de permeabilidade desempenham um papel significativo na velocidade de redução, sendo que os padrões de temperatura são fatores-chave para determinar a eficiência, rendimento e qualidade do processo [7].

A técnica de microtomografia computadorizada (MicroCT), aplicada ao sinter de minério de ferro, foi utilizada pela primeira vez na década de 90 para caracterizar alguns parâmetros dos poros, como diâmetro, fator de forma e ramificações [8].

Uma parcela considerável dos parâmetros mencionados pode ser calculada por meio da técnica de *Pore Network Modeling* (PNM). Essa abordagem de modelagem possui uma perspectiva bem estabelecida e de longa data para mapear e simular o transporte em materiais porosos [9], [10]. Em vez de resolver equações diferenciais parciais de ordem superior, o espaço poroso é tratado como uma rede de “tubos”, permitindo que o transporte dentro dessa rede seja modelado por meio de esquemas de diferenças finitas para obter soluções analíticas unidimensionais das equações de transporte relevantes. Os tamanhos e a conectividade dos poros e gargantas são escolhidos para corresponder à estrutura física conhecida, incluindo a interação entre a estrutura e as características do fluxo [11].

2

Objetivos

2.1

Objetivos Gerais

O presente estudo tem como objetivo investigar e desenvolver metodologias para otimização da modelagem da rede porosa de aglomerados de minério de ferro. Além disso, busca avaliar e caracterizar os briquetes de minério de ferro, que foram pouco estudados, e compará-los com um material mais conhecido, como a pelota. O foco do trabalho é caracterizar a rede porosa e assim, obter propriedades relacionadas à permeabilidade gasosa no intuito de determinar a sua eficiência no processo de redução.

2.2

Objetivos Específicos

- Identificar poros nas imagens obtidas dos microaglomerados a frio;
- Modelar a rede dos poros identificados;
- Realizar medidas quantitativas da rede porosa;
- Calcular o valor de permeabilidade absoluta das amostras.

3

Revisão de literatura

3.1

Aglomerados de minério de ferro

Os finos de minério de ferro (tamanho inferior a 6mm) são criados como resultado da mineração, britagem e processamento de minérios, podendo representar cerca de 50% do minério total extraído (HE et al., 2015). Para muitos processos (por exemplo, a fabricação do ferro), minérios granulados (tamanho maior que 10 mm) são preferidos, pois os finos não apenas aumentam o custo de manuseio, mas também suprimem o fluxo de ar nos fornos de redução [12]. Portanto, os finos de minério de ferro precisam ser aglomerados para ficarem com uma granulometria maior, melhorando o manuseio, o transporte e aumentando a permeabilidade nos fornos.

Aglomeração é o termo que pode definir operações aplicadas a materiais de granulometria fina para transformá-los em corpos, ou fragmentos coesos por meio da consolidação de suas partículas através de processos físicos e ou químicos, conferindo-lhes tamanho, forma e propriedades adequadas para sua aplicação. As aplicações mais frequentes dos processos de aglomeração são no aproveitamento de minérios ou concentrados de granulação fina, sem causar prejuízos à permeabilidade da carga e às condições de reação gás-sólido nos fornos [13].

A pelotização, a sinterização e a briquetagem são processos de aglomeração de finos usados pela indústria mínero-metalúrgica [14]. A indústria de base tem aplicações clássicas, incluindo a pelotização de finos de minério e/ou concentrados de ferro pelas mineradoras, a sinterização desses materiais em usinas siderúrgicas integradas e a briquetagem de finos de carvão mineral [14].

Com a escassez de minério granulado de boa qualidade e maior quantidade de geração de finos nas minas de minério de ferro, minérios finos e ultrafinos estão se tomando mais significativos a cada dia. A sinterização e a pelotização

governaram e ainda dominam a tecnologia de aglomeração de minério fino. No entanto, esses processos exigem instalações caras e incorrem em altos custos operacionais [1].

3.1.1 Pelotas e o processo de pelotização

As pelotas de minério de ferro têm uma forma aproximadamente esférica e são constituídas por finos (conhecidos como pellet feed). Geralmente, possuem um tamanho que varia entre 8 e 18 mm, sendo produzidas através do processo de pelotização.

O processo de pelotização envolve a combinação úmida de finos de minério de ferro concentrados, com tamanho inferior a 0,149 mm, juntamente com quantidades definidas de aglomerante, óxidos básicos e agentes energéticos. Em seguida, essa mistura é submetida a rolagem em um disco ou tambor, aproveitando a tensão superficial das partículas. Posteriormente, as pelotas passam por um tratamento térmico específico, resultando em aglomerados com resistência mecânica adequada para o manuseio e propriedades metalúrgicas superiores quando sujeitas ao processo de redução.

Na trajetória do processo de produção das pelotas foram desenvolvidas duas formas de realizar a etapa de pelotamento (formação da pelota crua), os discos de pelotização e os tambores, como mostrado na Figura 1.

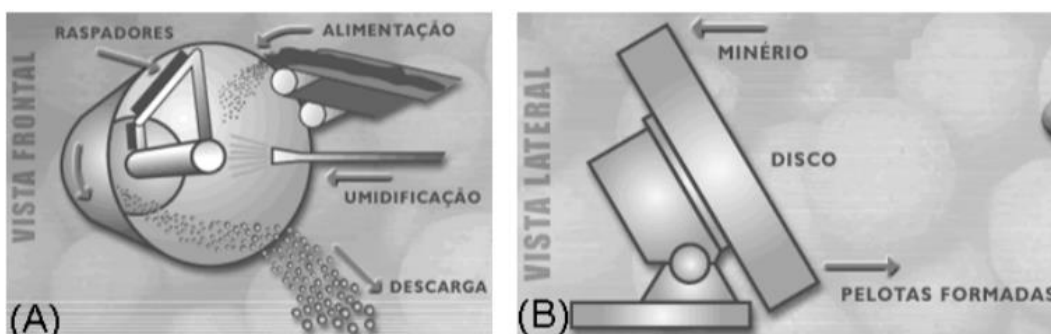


Figura 1 – (a) Tambor de pelotamento; (b) Discos de pelotamento

Neste ponto, as pelotas adquirem uma forma quase esférica, porém, ainda não exibem resistência física e mecânica adequada para suportar as operações de manuseio e transporte. Com o intuito de fortalecê-las, elas passam por um processo de endurecimento, durante o qual são submetidas a um tratamento

térmico em uma atmosfera controlada (controle de temperatura e pressão). O processo de tratamento térmico é composto por três etapas principais: secagem, queima e resfriamento.

- Secagem: as pelotas são expostas a correntes de gases a temperaturas moderadas, que normalmente se situam na faixa de 250 a 400°C.
- Queima: durante esta fase, as pelotas são expostas a temperaturas mais elevadas, geralmente entre 1250 e 1380 °C. Nesse processo, há uma fusão parcial de certos componentes e a formação de ligações cristalinas se inicia, resultando em um aumento da resistência mecânica.
- Resfriamento: consiste na etapa de redução de temperatura, a fim de possibilitar o transporte das pelotas.

3.1.2

Briquetes e o processo de briquetagem

A briquetagem é uma tecnologia de compactação contínua para consolidar pós em um bloco ou briquete [15]. Lee e Kim (2018) mostraram que a compactação é um método para comprimir finos de minérios de ferro em um material mais denso usando pressão com auxílio ou não de um aglutinante, permitindo a obtenção de um produto não só compacto, mas com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados. Um dos parâmetros mais importantes para a confecção de briquetes é a umidade da mistura. Assim, a água é adicionada como agente de ligação para aumentar a resistência do compactado. A adição de água só não é realizada quando a substância aglomerante se apresenta na forma de solução aquosa ou como um fluido [14], [16].

Durante a aglomeração sob pressão, forças externas atuam sobre uma massa de partículas pelo menos parcialmente confinada. Como mostrado na Figura 2, duas fases diferentes de densificação são concebíveis, influenciando a estrutura dos aglomerados obtidos por pressão.

Inicialmente, por meio da aplicação de uma força relativamente baixa, a adesão entre as partículas e o atrito entre elas são superados, resultando em uma certa densificação da massa de partículas. A quantidade de densificação depende da densidade aparente da massa de partículas de entrada. Em certos casos, a

densidade aparente pode ser muito baixa, o que significa um grande volume aparente. Isso pode acontecer devido às forças naturais de adesão serem elevadas e não permitirem um maior empacotamento das partículas, resultando na presença de partículas com formas irregulares e/ou com rugosidade significativa. Durante essa fase inicial de densificação, os tamanhos e formas das partículas de entrada não são ou são pouco alterados, talvez apenas quebrando algumas protuberâncias da rugosidade. Algumas técnicas de aglomeração por pressão que fazem o uso de aglutinantes ou mecanismos de ligação não aplicam forças que densifiquem até ou muito além deste ponto [17].

Uma vez alcançado um maior empacotamento das partículas no espaço confinado e as forças externas continuarem a aumentar, as partículas se deformam e/ou quebram. Durante esta fase de compactação, a estrutura é alterada drasticamente e o espaço vazio é reduzido até que o estado “hidrostático” seja alcançado, no qual não ocorre mais densificação e o compacto responde como um sólido incompressível [17].

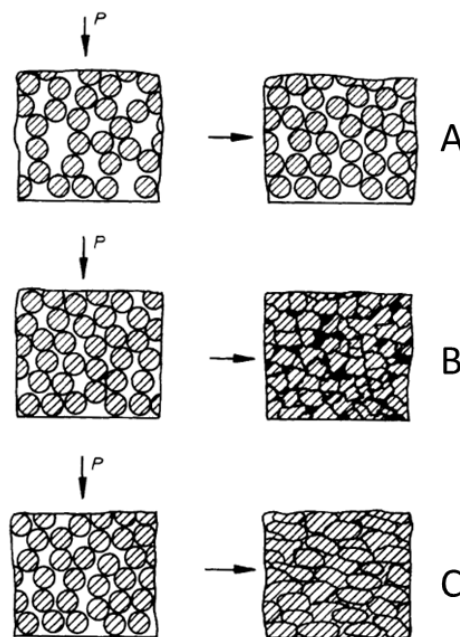


Figura 2 – (A) Pressão relativamente baixa aplicada na massa de partículas; (B) Início da alteração do tamanho e forma das partículas de entrada devido ao aumento da pressão; (C) Alteração drástica da estrutura do compactado tornando-se um sólido incompressível [17].

A porosidade dos aglomerados que são produzidos a alta pressão está na faixa de 10 a 20% ou pode ser tão baixa quanto 5%, gerando o desenvolvimento de muitos poros fechados [17].

Em comparação com outros métodos de aumento de tamanho, como pelotização e sinterização a compactação é um processo de colagem a frio e, conseqüentemente, menos intensivo em capital [18].

A resistência mecânica de um briquete é fundamental para manter a integridade geométrica e mecânica nas suas devidas operações [19], [20]. Essa resistência é fortemente afetada pela ligação interpartícula e pela estrutura interna [20]. Com o intuito de obter-se uma resistência mecânica adequada, depois de fabricados, os briquetes são submetidos a um tratamento de endurecimento que pode ser realizado à temperatura ambiente, em estufas e secadores (por volta de 400 °C) ou em fornos (acima de 1000 °C) [1], [14].

Os briquetes cujo processo de endurecimento é realizado a temperatura ambiente apresentam menor resistência mecânica, quando comparados com os briquetes que passam pelo processo com outras temperaturas. Entretanto, existem algumas vantagens, como a maior simplicidade e como a menor quantidade de etapas no processo e menos emissões de CO₂ [21].

Enquanto isso, os briquetes endurecidos a temperaturas acima da temperatura ambiente, possuem maior resistência mecânica. Isso acontece devido à maior ligação entre seus constituintes que acontecem por meio de processos de [14]:

- Fusão incipiente do constituinte principal;
- Difusão e recristalização do constituinte principal;
- Escorificação (não ocorre em baixa temperatura) ou reação química;
- Endurecimento ou cristalização do constituinte principal.

Para aplicação da pressão ao material a ser briquetado, podem ser utilizados três processos:

1. Briquetagem em prensa de rolos (Figura 3)
2. Briquetagem por extrusão contínua em máquinas tipo maromba;

3. Briquetagem em prensas hidráulicas, em que os moldes são preenchidos de forma intermitente.

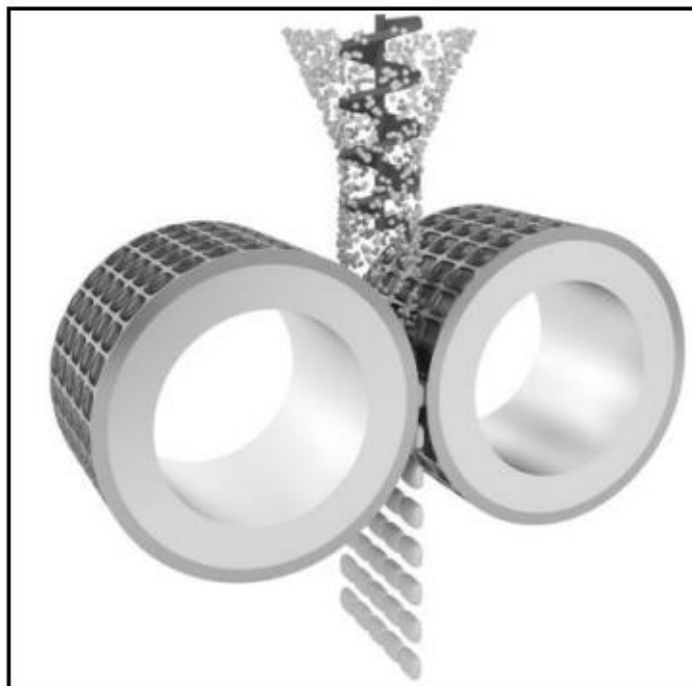


Figura 3 – Representação da briquetagem em uma prensa de rolos [5].

O processo de briquetagem pode ser dividido em quatro etapas: preparação, mistura, compressão e tratamento térmico [18].

A maior parte dos métodos para mensurar a qualidade dos briquetes, está voltada para as propriedades físicas. Para isso, existem alguns ensaios para realizar essa avaliação. O mais utilizados são: a resistência à compressão, ao impacto, à abrasão e à penetração de água. [22]

Na resistência à compressão o briquete é submetido a pressão contínua e progressiva até a fratura. Este parâmetro é bastante significativo para avaliar a sua capacidade de manuseio, transporte e empilhamento. Durante a avaliação da resistência ao impacto, é analisada a capacidade do briquete de suportar quedas repetidas, simulando assim as situações típicas de manuseio e transporte.

A resistência à ação da água, consiste na avaliação do ganho de massa apresentado pelo briquete, após a imersão em um recipiente de água. Esse ensaio é importante para simular os casos em que os briquetes são armazenados em regiões úmidas ou em ambientes externos.

Cabe destacar que é de grande importância o estudo das características de porosidade e permeabilidade dos aglomerados em geral. Inclusive, existem alguns estudos voltados para esse campo, como o de Bayão et al. (2018). Pesquisadores verificaram que a qualidade do aglomerado de minério de ferro desempenha um papel vital no consumo do agente redutor e na produtividade de redução no alto forno e no reator de redução direta [5]. Entretanto, o estudo mais a fundo sobre a porosidade e um estudo sobre a permeabilidade dos briquetes ainda é uma lacuna a ser preenchida.

Como as amostras analisadas nesse trabalho são produtos destinados ao processo de redução direta, uma revisão sobre esse método é abordada a seguir.

3.2

Processo de redução direta

O processo de redução direta (DR) originalmente se referia à fabricação de um produto a partir do minério de ferro. Agora, refere-se a qualquer processo de redução de ferro no estado sólido, mesmo que a fase de ferro metálico precise de processamento adicional para o produto final [16].

O início da era moderna do ferro feito proveniente do processo de redução direta (DR) teve início com o desenvolvimento do processo Hysla no México nos anos 1950 e ganhou impulso com a disseminação global do processo Midrex nos anos 1970. Atualmente, há inúmeras plantas de redução direta (DR) espalhadas pelo mundo, apresentando variações em tamanho e tipos de fornos [16].

O resultado obtido por meio do processo de redução direta é conhecido como ferro diretamente reduzido (DRI) ou *direct reduced iron* [23].

Os processos de DR podem ser classificados em três categorias principais:

1. Processos que utilizam redutores gasosos em leito granular, como os processos Midrex e Hysla;
2. Os processos que utilizam redutores gasosos em leito fluidizado, como o processo de carboneto de ferro;
3. E os processos que utilizam redutores sólidos em leito granular, como o processo Fastmet.

3.3 Porosidade

A porosidade é uma propriedade fundamental para muitos materiais, já que está relativamente relacionada à capacidade de um material armazenar fluido. Para realizar o cálculo da porosidade, basta relacionar o volume dos vazios com o volume total do material, como podemos observar a partir da equação a seguir.

$$\phi(\%) = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \quad (1)$$

onde:

ϕ : é a porosidade absoluta;

V_v : volume de vazios;

V_t : volume total.

De modo geral, os poros podem ser classificados com base em sua acessibilidade ao fluido externo. Os poros fechados são aqueles que não são acessíveis ao fluido externo e estão completamente isolados dos demais poros. Esses poros têm influência sobre a densidade, elasticidade, resistência mecânica e condutividade térmica do material. No entanto, eles são irrelevantes em processos nos quais ocorre o fluxo de fluidos e a percolação de gases, por exemplo. Por outro lado, os poros abertos são aqueles que possuem uma comunicação direta com a superfície externa do sólido, permitindo o transporte de fluidos e, conseqüentemente, a transferência interna de calor. Assim, a estrutura de poros ideal para que o material apresente alto índice de redutibilidade é aquela composta por poros abertos. No entanto, a fim de garantir que o material também tenha resistência mecânica adequada, é necessário que a porosidade possua um valor adequado, de modo que o aglomerado possua propriedades suficientes para cumprir todas as etapas que demandem de tal característica [24].

Devido a esse isolamento, a porosidade pode ser classificada em dois tipos distintos: porosidade absoluta, que é a razão entre o volume de todos os poros, sejam eles interconectados ou não, e o volume total do material; porosidade efetiva, que é a relação entre os espaços vazios interconectados e o volume total

da amostra [25]. Uma imagem representativa pode ser observada a partir da Figura 4.

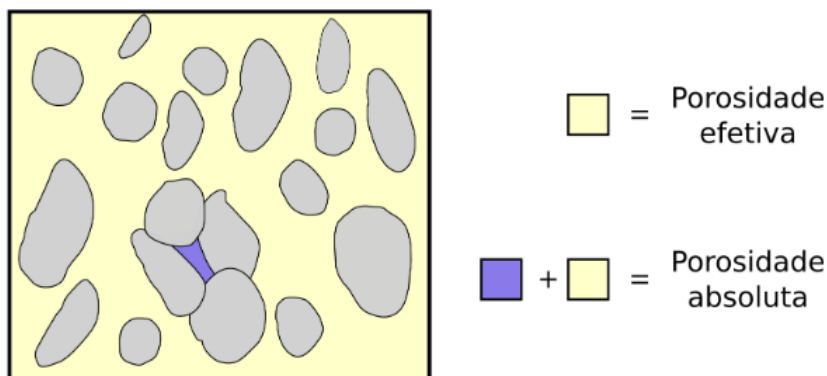


Figura 4 - Porosidades absoluta e efetiva [25].

Algumas medidas são importantes para a descrição dos efeitos da microarquitetura de poros conectados nos resultados de permeabilidade absoluta. Tais medidas são: a porosidade, volume e diâmetro dos poros e número de conectividade entre eles. O número de conectividade é uma medida que quantifica o número de poros que estão conectados a um determinado poro [26].

3.3.1

Porosidade em aglomerados de minério ferro

A porosidade para os aglomerados de minério de ferro também é de extrema importância, visto que ela vai influenciar nas propriedades mecânicas, que definem a resistência durante o transporte e o manuseio deste tipo de material, e influenciará na eficiência de redutibilidade nos altos fornos e outros reatores de redução.

A formação dos poros para os aglomerados de minério de ferro está relacionada com o processo de fabricação desses materiais. Dessa forma, há diversos parâmetros que podem influenciar a formação e estrutura dos poros em aglomerados de minério de ferro, tais como a quantidade de matérias-primas utilizadas, as temperaturas empregadas durante os processos de fabricação e a força utilizada na compressão (no caso da briquetagem). O controle dessas variáveis pode contribuir para aprimorar tanto a quantidade quanto a forma dos poros [24], [27], [28].

A porosidade influencia na resistência do aglomerado (isto é, a formação de poros grandes ou um aumento na porosidade total pode resultar em menor qualidade física), a permeabilidade ao gás (isto é, que depende do tamanho e da conectividade dos poros) além de outros parâmetros [28], [29].

Shatokha et al. (2010) verificaram que parâmetros morfológicos como a distribuição do tamanho dos poros, a forma dos poros e a proporção de poros abertos e fechados podem afetar drasticamente a redutibilidade e a resistência do sinter (outro tipo de aglomerado de minério de ferro). Foram conduzidos testes de redutibilidade (utilizando análise termogravimétrica) e testes de porosidade (utilizando intrusão de mercúrio e picnometria de nitrogênio) nas amostras de sinter queimadas. Os resultados indicaram que a redutibilidade parece ser pouco sensível à mineralogia, sugerindo que a estrutura pode ter uma influência maior na redutibilidade do que a composição [27], [29].

Harvey et al, verificaram a qualidade do sinter de minério de ferro como importância produtiva e eficiente para a redução em alto-forno. O ponto de partida foi a complicação com a variabilidade do produto, devido a muitos fatores, incluindo distribuição heterogênea de matéria-prima, variação espacial no perfil de temperatura e atmosfera do gás utilizado no leito de sinterização. Para reduzir a variabilidade, eles utilizaram análogos do sinter de minério de ferro, criados a partir de uma fração de 1,0 mm de minério de ferro australiano. As amostras foram queimadas sob as mesmas condições térmicas e atmosféricas, devidamente controladas utilizando um forno de aquecimento infravermelho. Os resultados mostraram que a maior temperatura de queima, sem que aconteça uma supersinterização, apresentou um produto com porosidade ideal, por ter preservado a resistência mecânica e possuir uma estrutura que facilite a percolação dos gases no alto forno [28].

Klobles P. e Meyer K. (1984) mostraram que os aglomerados precisam ser fisicamente fortes, facilmente reduzidos (ou seja, possuir alta permeabilidade permitindo a passagem de gases de redução) e quimicamente compatíveis com os requisitos químicos dos processos (alto forno e redução direta, por exemplo). Embora a química e mineralogia do sinter do produto sejam essenciais, a estrutura dos poros também é um parâmetro crítico que influencia a qualidade e a produtividade dos aglomerados [30], [31].

Apesar de já existirem diversas pesquisas que mostram a importância do estudo da porosidade dos aglomerados de minério de ferro em específico, não existem pesquisas que realizam ou estudam essa propriedade nos briquetes. Tendo isso em vista, este trabalho também visa preencher essa lacuna do conhecimento.

3.3.2

Características do espaço poroso (diâmetro, volume, conectividade)

O diâmetro de um poro é a medida da largura ou abertura de um espaço vazio ou canal dentro de um material. Simplificadamente, ele representa a distância entre as superfícies internas opostas desse espaço vazio. Em termos gerais, o diâmetro de um poro é a distância entre duas superfícies internas opostas do espaço vazio. O tamanho dos poros é um fator crítico que influencia propriedades como a porosidade total do material, a permeabilidade a fluidos e gases e a capacidade de transporte de substâncias [24], [32], [33].

Na indústria siderúrgica, o diâmetro dos poros é uma característica essencial para determinar o desempenho e a qualidade do material. Ele pode impactar na resistência mecânica como foi verificado por Klobes e Meyer (1984), como pode influenciar na percolação dos gases no processo de redução como foi estudado por Shatokha et al. (2010).

O volume de um poro é a medida volumétrica do espaço poroso contido dentro de um material. Esse valor tem total relação com a porosidade além de influenciar em outras propriedades como a densidade, resistência mecânica, permeabilidade e redução [33].

A conectividade de um poro refere-se ao número de conexões que ele possui com outros poros em um sistema ou material poroso. Essa medida quantifica os caminhos disponíveis para o deslocamento de fluidos ou gases entre os poros por meio dessas conexões. A conectividade de um poro desempenha um papel fundamental em diversas áreas, como geologia, hidrologia e engenharia de materiais, pois afeta diretamente o fluxo de fluidos através de meios porosos. Quanto maior a conectividade de um poro, mais fácil será a passagem do fluido por ele, resultando em uma maior permeabilidade do material [34], [35].

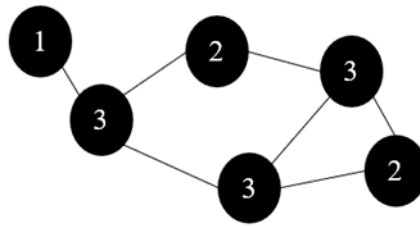


Figura 5 - Representação da conectividade de uma rede de poros. O número inscrito corresponde ao número de conexões que um poro possui com outros poros.

Essa medida é particularmente relevante em estudos relacionados a difusão de substâncias químicas em materiais porosos e a percolação de gases, por exemplo. Essas informações são de extrema importância para indústria siderúrgica, já que sua matéria prima precisa de uma boa permeabilidade.

3.4 Permeabilidade

A permeabilidade é a habilidade de um material permitir a passagem de substâncias através dele. Trata-se de uma propriedade física que relaciona a dificuldade que um fluido, seja líquido ou gás, apresenta para atravessar um meio sólido poroso. Essa característica é influenciada pela estrutura, composição e algumas propriedades do material em questão, como é o caso da permeabilidade, volume dos poros, conectividade do espaço poroso, entre outros. Materiais altamente permeáveis permitem que substâncias fluam livremente através deles, enquanto materiais de baixa permeabilidade restringem ou impedem o movimento dessas substâncias [36].

A base para a compreensão do fenômeno do escoamento de fluidos através de meios porosos, é a Lei de Darcy, que pode ser apresentada a partir da seguinte relação matemática:

$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{\Delta P}{L} \quad (2)$$

onde Q é a vazão volumétrica através do leito poroso, k é uma característica exclusiva do meio poroso denominada de permeabilidade absoluta ou simplesmente permeabilidade do meio, μ é a viscosidade da substância permeada, A é a área transversal do meio poroso, ΔP representa o diferencial de pressão

associado ao escoamento através do meio poroso e L é o comprimento do leito poroso ou comprimento da amostra na direção do fluxo [36].

Obtendo-se como base essa definição e essa relação matemática, a permeabilidade absoluta na siderurgia está relacionada à passagem de gases em diferentes etapas dos processos de produção do ferro e aço. Dessa forma, é uma prioridade crítica para garantir a eficiência, qualidade e controle dos processos siderúrgicos.

Embora a influência do tipo de minério, umidade e aglutinante sólido na permeabilidade ideal dos aglomerados tenham sido amplamente relatadas [37]–[39], há pouca atenção voltada para a relação da rede de poros com a permeabilidade. Entretanto, Zhou et al. (2020) encontraram alguns resultados de permeabilidade, realizando uma simulação em uma rede de poros 3D obtidas a partir de amostras de uma espécie de sinter.

Existem muitas pesquisas envolvendo o sinter, inclusive estudos de porosidade e permeabilidade, entretanto, outros aglomerados como a pelota e o briquete, foram pouco estudados. Alguns pesquisadores já abordaram o estudo da porosidade de pelotas, como foi feito por Augusto et al. (2018), porém, não existe um estudo voltado para a permeabilidade deste tipo de aglomerado. Já para os briquetes, até onde o autor deste trabalho sabe, não existem trabalhos sobre a investigação da sua porosidade e permeabilidade.

3.5 Microtomografia

A microtomografia computadorizada de Raios X (MicroCT), é uma técnica de microscopia 3D que proporciona informações detalhadas sobre a estrutura interna e externa de materiais sólidos. Essa técnica permite a visualização tridimensional do material e a realização de medidas precisas em 3D. Além disso, ela requer pouca ou nenhuma preparação de amostras, o que viabiliza a realização de análises adicionais em MicroCT ou em outras técnicas utilizando a mesma amostra [24].

Essa técnica utiliza aquisições de imagens bidimensionais de projeção de raios X sob diferentes ângulos através da amostra. A amostra é posicionada em

um suporte giratório entre a fonte de raios X e um detector. Os feixes de raios X atravessam a amostra e a radiação transmitida é captada pelo detector e armazenada digitalmente. Esse processo se repete em pequenos passos angulares até uma volta completa da amostra em torno do seu eixo (360°). É possível controlar o valor do passo angular e, portanto, a quantidade de projeções para cada amostra. Quanto maior for o número de projeções, mais informações da amostra é possível captar. Esse processo pode ser repetido para uma determinada quantidade de posições verticais [40].

Feito isso, um algoritmo realiza a reconstrução das projeções captadas pelo detector, transformando as informações em um conjunto de camadas bidimensionais. Dessa forma, o conjunto de camadas bidimensionais empilhadas forma uma imagem tridimensional (3D) [41]. A Figura 6 ilustra este processo.

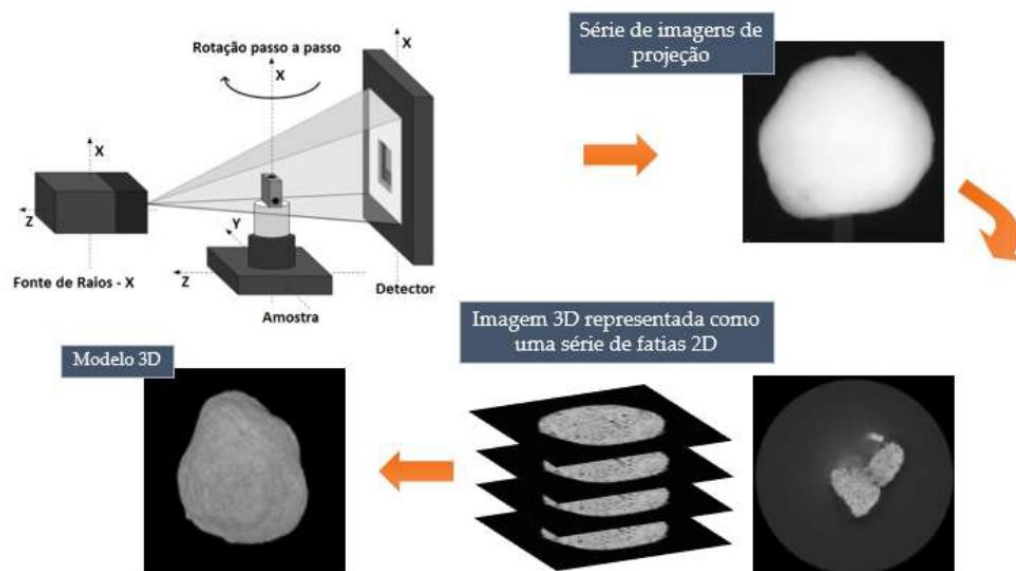


Figura 6 - Processo de microtomografia de raios X. Adaptado de [41].

Para realizar aquisições com melhor qualidade em MicroCT é necessário entender sobre os conceitos de resolução espacial e magnificação geométrica [35]. A resolução espacial pode ser definida como o número de pixels que são usados para construir uma imagem digital. Assim para obter uma imagem com maior resolução espacial é necessário que essa imagem seja composta pela maior quantidade de pixels possível [41], [42].

Em geral, os equipamentos de MicroCT empregam duas geometrias de feixe distintas: paralela e cônica. A geometria de feixe cônico é especialmente vantajosa, pois possibilita maximizar o aproveitamento dos raios X gerados pelo tubo de raios X [41]. O feixe cônico é amplamente adotado no âmbito comercial e foi o utilizado para este estudo em particular.

A magnificação geométrica é uma abordagem utilizada para aprimorar a resolução espacial na geometria de feixe cônico. Essa técnica consiste em estabelecer uma relação entre o tamanho da imagem produzida por uma lente e o tamanho do objeto real, resultando em uma ampliação significativa. Essa amplificação geométrica é uma forma eficaz de melhorar a qualidade e os detalhes da imagem utilizada. O resultado da resolução da imagem pode ser influenciado pelo fator de magnificação, visto que ele é inversamente proporcional à resolução, como podemos observar a partir da equação a seguir.

$$R = \frac{k}{M}$$

Onde:

R: é a resolução espacial;

k : é o tamanho do pixel no detector;

M: é o fator de magnificação

O fator de magnificação (M) é calculado com base na equação abaixo, que foi formulada a partir da Figura 7, em que é ilustrada a geometria de um feixe cônico.

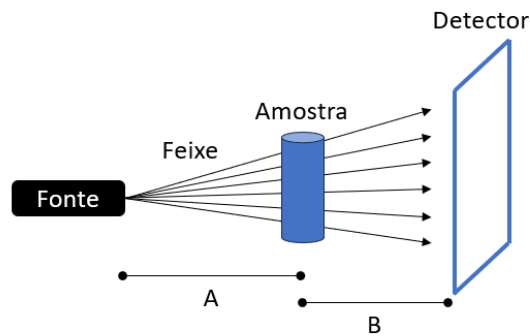


Figura 7 - Geometria cônica. Adaptado de [43].

$$M = \frac{A + B}{A} \quad (3)$$

Vale ressaltar que a resolução da imagem adquirida melhora à medida que a amostra se aproxima da fonte. Com isso, um fator que pode acabar dificultando ou até impossibilitando uma maior aproximação, é o tamanho da amostra. Amostras menos espessas podem se aproximar mais da fonte de raios X. Dessa forma, permitem resolução melhor do que uma amostra mais espessa.

Além da flexibilidade na mudança geométrica entre a fonte, a amostra e o detector, alguns equipamentos de microtomografia, como o utilizado neste estudo, possuem um conjunto de lentes objetivas. Isso oferece a possibilidade de escolher entre a magnificação geométrica e a magnificação óptica, ou até mesmo combinar ambas, visando alcançar uma resolução espacial ainda melhor [41]. Essa abordagem permite otimizar a qualidade da imagem e obter detalhes mais nítidos.

Depois que as imagens estão reconstruídas, as fatias 2D passam a ser representadas em três dimensões. Nesse caso, o pixel é matematicamente transformado em voxel, pois o modelo de matriz bidimensional passa a ser reproduzido por uma matriz volumétrica. [44], [45]

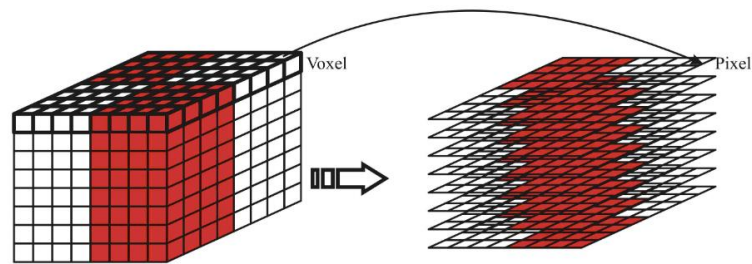


Figura 8 - A transformação da representação de um volume em voxels para a representação em camadas por pixels. Adaptado de [45].

3.6 Processamento e análise digital de imagens

Após o processo de aquisição, as imagens 2D e 3D passam por um processo de correção e realce das regiões de interesse e, esse processo ocorre através de operações matemáticas [41]. O intuito é extrair atributos quantitativos e qualitativos. A ordem desse processo pode ser observada a partir da Figura 9.

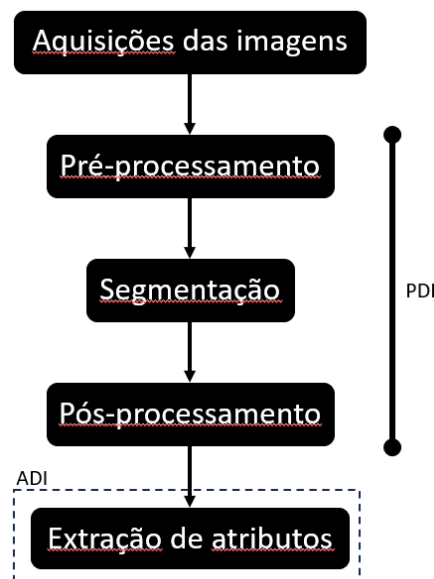


Figura 9 – Sequência padrão de processamento e análise digital de imagens.

A primeira etapa corresponde às aquisições das imagens, que pode acontecer através de diferentes equipamentos, incluindo microscópios e microtomógrafos, como é o caso deste trabalho.

A segunda etapa é a de pré-processamento, que é utilizada para realizar correções de defeitos gerados no processo de aquisição, mas pode ser utilizada também para realçar uma região de interesse.

O terceiro ponto, a segmentação, corresponde ao processo de identificação e separação da região de interesse. O resultado desse processo é uma imagem binária (que possui apenas 2 tons) que contém os objetos de interesse representados por pixels brancos e o fundo representado por pixels pretos.

Em alguns casos a imagem resultante do processo de segmentação pode apresentar defeitos e não acontecer de forma efetiva, como por exemplo incluir objetos com tonalidades semelhantes, mas que não correspondem à região de interesse do estudo. Nesses casos, é preciso realizar uma etapa de pós-processamento, que tem como intuito corrigir as limitações ou defeitos provenientes do processo de segmentação.

Por fim, a etapa de extração de atributos se refere à parte do processo em que são obtidos os resultados quantitativos, ou seja, dados numéricos que descrevem os atributos e características da região de interesse.

As etapas de pré-processamento, segmentação e pós processamento correspondem a etapas do processamento digital de imagens (PDI), enquanto a etapa de extração de atributos está relacionada ao processo de análise digital de imagens (ADI).

3.7

Modelagem de rede de poros (Pore Network Modeling)

A estrutura dos meios porosos é complexa, mas essencial para a compreensão dos processos de transporte, abrangendo o escoamento de fluídos monofásicos e multifásicos. O *Pore Network Modeling* (PNM) é uma representação esquemática de uma rede de poros, que utiliza algoritmos computacionais e computação gráfica para descrever a geometria do meio poroso utilizando formas geométricas simples. Por isso, essa modelagem é uma ferramenta valiosa para estudar esses processos em diversos meios porosos [10], [46], [47].

Uma das métricas estruturais mais importantes de um material poroso é a conectividade dos espaços de poros, ou a chamada rede de poros. A PNM visa construir uma estrutura topologicamente equivalente ao sistema poroso da imagem, mantendo as conectividades entre os poros, mas com uma geometria simplificada, conforme ilustrado na Figura 10.

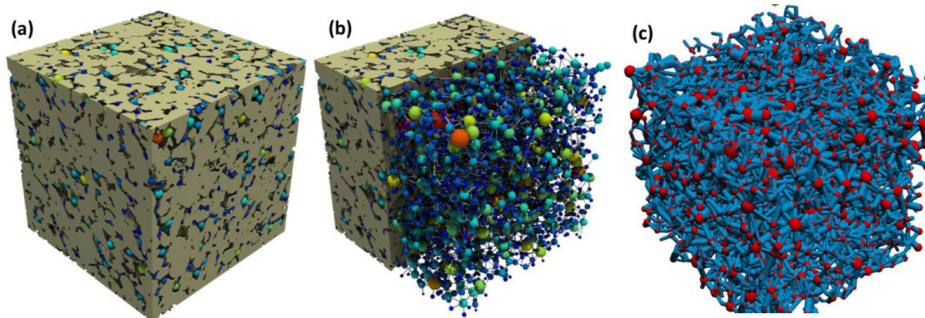


Figura 10 - Vistas de um exemplo de uma amostra de arenito. (a) A visualização 3D de um sólido em amarelo e a rede extraída; (b) o mesmo que (a), mas com a parte do sólido retirada; (c) representação do volume dos poros e conexões [10].

Atualmente, o método preferido para extrair redes de poros de imagens é baseado no algoritmo da máxima esfera inscrita, inicialmente proposto por Silin e Parzek, e posteriormente aprimorado por Blunt [48]–[50]. Outra abordagem amplamente utilizada é baseada em encontrar os pontos de ramificações do eixo medial do espaço poroso [51].

Complementando os métodos, existe também um método baseado na segmentação de *watershed* do espaço de poros. Essa técnica foi originalmente investigada por Thompson et al. e Sheppard et al. há mais de uma década [52], [53]. No entanto, é surpreendente notar que essa abordagem recebeu pouca atenção até recentemente [10], [47], [54], [55]. Visto isso, cabe destacar que este trabalho foi realizado utilizando o modelo do *Open Pore Network Modeling*, o qual utiliza a técnica baseada na segmentação de *watershed*.

3.7.1 Open Pore Network Modeling (OpenPNM)

O OpenPNM é um modelo de rede de poros que fornece uma estrutura de meio poroso pronta para ser realizada uma ampla gama de simulações. Gostick et al (2016) desenvolveram um projeto para produzir uma estrutura PNM de código

aberto, em total contraste com o campo da dinâmica de fluidos computacionais, onde existe uma infinidade poderosa de simulações.

Geralmente, os pesquisadores da comunidade PNM desenvolvem seu próprio código para ser usado internamente por seu grupo de pesquisa. Isso requer recursos e investimentos consideráveis, e o código existente pode não ser otimizado para velocidade, modularidade, extensibilidade ou manutenção. Além disso, quase nunca é bem documentado para futuros usuários e trabalhos [11].

Entretanto, para modelar a rede porosa de um material, existem alguns desafios. Como foi destacado por Bhatta et al. (2011) em seu abrangente artigo de revisão que compara diversas técnicas de extração de redes. Um dos principais desafios consiste na definição incerta de um poro e uma garganta, bem como na identificação de pontos precisos onde um poro se encerra e o outro começa, especialmente num contexto tridimensional [56].

A segmentação de *watershed* possui um enorme potencial para extrair redes de poros de imagens de tomografia, pois pode-se argumentar que a definição de um poro corresponde basicamente a um *watershed* em um mapa de contorno [57]. A Figura 11 ilustra o processo em várias estruturas básicas e “bem-comportadas”. O espaço intersticial entre quatro discos representa um poro, e a restrição entre dois discos representa uma garganta que conecta dois poros. A escala de cores em (a) e (c) representa a distância euclidiana (mapa de distância do espaço vazio), onde pontos mais brilhantes correspondem a região mais distantes do sólido. Os picos locais de brilho são identificados nos centros dos poros, indicados por pequenos pontos brancos. Esses picos são encontrados aplicando um filtro máximo com um elemento estruturante esférico de raio R e, em seguida, localizando as regiões na imagem filtrada que são iguais ao mapa de distância. Esses picos são então utilizados como “marcadores” em um algoritmo de watershed baseado em marcadores, que identifica as bacias do mapa de distância, resultando na segmentação de cada região de poro, conforme mostrado nas Figura 11 (a) e (b). Mesmo para uma geometria tridimensional, como exemplificado na Figura 11(e), o processo é trivial devido à uniformidade e clara definição dos corpos dos poros e das restrições das gargantas.

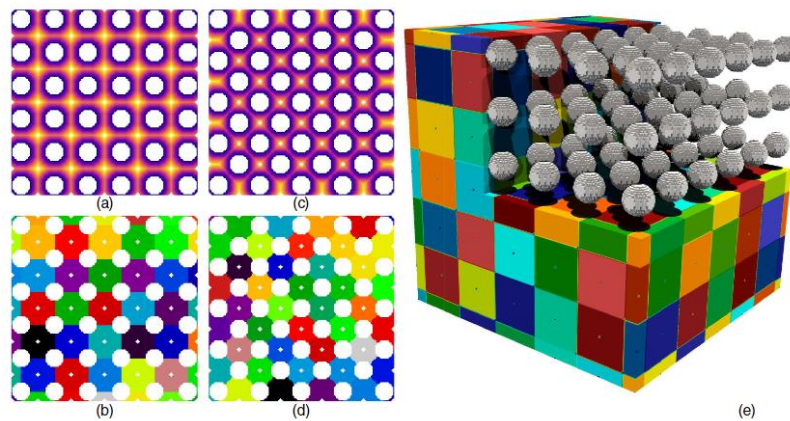


Figura 11 – Ilustração do procedimento de segmentação de watershed baseado em marcadores em imagens simples de empacotamentos cúbicos de esferas. (a), (c) Transformação de distância do espaço vazio. (b), (d) Espaço de poros segmentados resultante da segmentação de watershed baseada em marcadores. (e) Resultados de segmentação em empacotamento cúbico de corpo centrado em 3D, mostrando em fatias das localizações das esferas [10].

No método watershed, a extração da PNM é iniciada carregando a imagem binária tridimensional da segmentação dos poros da amostra estudada. A estrutura geral pode ser dividida em várias partes bem definidas [58]:

- a. Transformação do mapa de distância;
- b. Construção da hierarquia de bolas inscritas usando o mapa de distância pré-computado e definido os poros [58], [59];
- c. Divisão do espaço de poro em volumes porosos distintos aplicando segmentação de watershed a partir de pontos iniciais definidos pelo mapa de distância (centro dos poros);
- d. Identificação das interseções entre poros e parametrização das gargantas;
- e. Particionamento do espaço poroso 3D em corpos de poros e gargantas, com suas características relevantes para futuras simulações de fluxo monofásico em uma única estrutura de rede porosa;

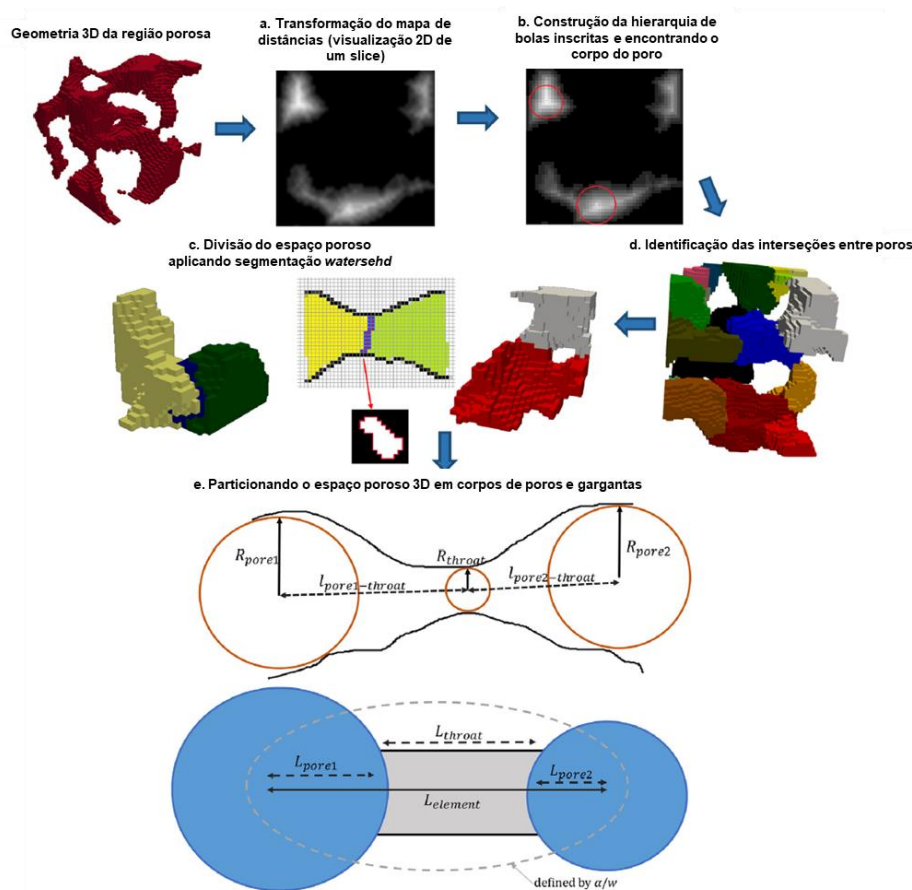


Figura 12 - Esquema geral da estrutura de extração da rede de poros com todas as principais partes de um algoritmo típico de segmentação watershed. Adaptado de [58].

De forma mais detalhada, após obter-se o mapa de distância, é iniciada a inscrição de esferas máximas em voxels para cada poro selecionado. A implementação da MIB (*Maximum inscribed ball* – bola máxima inscrita), acontece através da inflação de uma esfera a partir de um voxel de poro [58]. Conforme observado posteriormente por vários pesquisadores, como Yi et al., 2017; Raeoni et al., 2017; Arand e Hesser, 2017; o valor da transformação do mapa de distância em si fornece uma base robusta para a inscrição da esfera, ou seja, fornece raios MIB locais [59]–[61].

Após todos os MIBs serem posicionados, eles são agrupados em uma hierarquia seguindo de perto a ideia original de *ancestors and descendants* (ancestrais e descendentes) proposta por Silin e Parzek (2006) e Dong e Blunt (2009). Começamos classificando a lista de bolas inscritas em ordem decrescente de raios. A partir do topo da lista, verificamos se o MIB possui interseções com bolas no mesmo raio ou maiores. Todos os voxels que servem como centros das

maiores bolas locais são marcados como centros de corpos de poro. Se um MIB ancestral tem uma interseção com uma ou mais bolas no mesmo raio, a proximidade com seu centro de massa define a bola líder que se torna o centro do corpo de poro. Como resultado dessa parte do algoritmo, marcamos os voxels que representam os centros dos corpos de poro [48], [49], [58].

Partido disso, é utilizado um algoritmo de *watershed* baseado em marcadores, como foi proposto por Barnes et al. (2014), utilizando os centros dos corpos de poro como sementes para separar os poros uns dos outros. Como resultado, marcamos não apenas cada volume de poro em 3D, mas também obtemos as interseções entre os poros, ou seja, as interfaces do *watershed* que representam os poros separados, como é possível observar na Figura 13 [10], [54].

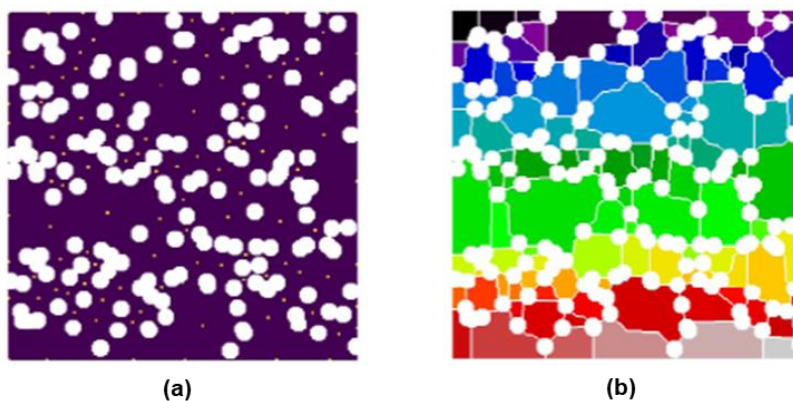


Figura 13 – Ilustração do algoritmo de segmentação do espaço poroso. (a) mostra os picos da transformação de distância, e (b) mostra a segmentação resultante do espaço poroso.

Após concluir essas etapas, o PNM resultante pode ser visualizado usando o chamado diagrama de esferas e hastes, que é útil para observar a topologia da rede de poros e algumas especificações de geometria, por exemplo tamanho de poros e gargantas [58].

A base das simulações de fluxo em PNM, tanto para fluxo monofásico quanto multifásico, é o modelo de Hagen-Poiseuille para condutância hidráulica entre os poros conectados por gargantas, como é possível observar a partir da equação abaixo:

$$q = \frac{g_{element}}{L_{element}} \Delta p \quad (4)$$

onde q representa o fluxo entre os poros conectados, $g_{element}$ representa a condutância da substância na garganta, $L_{element}$ representa o comprimento do caminho entre os centros dos corpos dos poros e Δp corresponde a variação de pressão entre os poros [62].

3.7.2

Características das redes de poros

Um modelo de rede de poros substitui as complexas estruturas de poros por uma rede representativa de corpos de poros conectados por canais mais estreitos chamados de gargantas ou conexões [47]. Para os poros e gargantas são atribuídos às propriedades geométricas correspondentes ao volume, diâmetro inscrito, diâmetro escrito, entre outros. A tabela fornece uma breve descrição de como cada propriedade é obtida:

Tabela 1 – Descrição das propriedades geométricas para poros e gargantas. Adaptado de [10]

Propriedades obtidas	Descrição
Volume	O volume de uma região pode ser facilmente encontrado somando o número de voxels na região, ou seja, todos os voxels pretos na Figura 14(a). Entretanto, esse valor não é o mesmo que o volume do corpo do poro que está localizado na região, o qual pode ser encontrado utilizando o diâmetro e a fórmula geométrica apropriada. Isso também se aplica para as gargantas.
Diâmetro estendido	Esse valor é encontrado como o valor máximo do mapa de distância global que está dentro de cada região de poro. Conforme mostrado na Figura 14(c), essa definição significa que o diâmetro do poro pode se estender para poros vizinhos. Esses poros estendidos tendem a se sobrepor, o que cria inconsistências, como comprimentos de garganta negativos e contagem duplicada do volume de poros.
Diâmetro inscrito	Essa propriedade é obtida da mesma maneira que o diâmetro estendido, mas um mapa de distância local da região do poro é utilizado. Isso confina completamente o corpo do poro dentro de sua região, conforme mostrado na Figura 14(d). A menos que indicado de outra forma, esse valor é usado como o diâmetro do poro em todos os cálculos.
Diâmetro equivalente	Esse valor é definido como o diâmetro de um círculo com a mesma área da seção transversal de um poro ou garganta. Para isso, é encontrado o número de voxels no mapa de distância local e a área é estimada multiplicando esse valor pela área de uma face do voxel.

Para determinar o volume, diâmetro, etc. de um determinado poro, basta isolar a região da imagem de watershed com seus voxels definidos e analisar as propriedades da região. Conforme ilustrado nas Figura 14(b) – (d). Em geral, as informações de tamanho necessárias são obtidas observando o conjunto correspondente de voxels do mapa de distância.

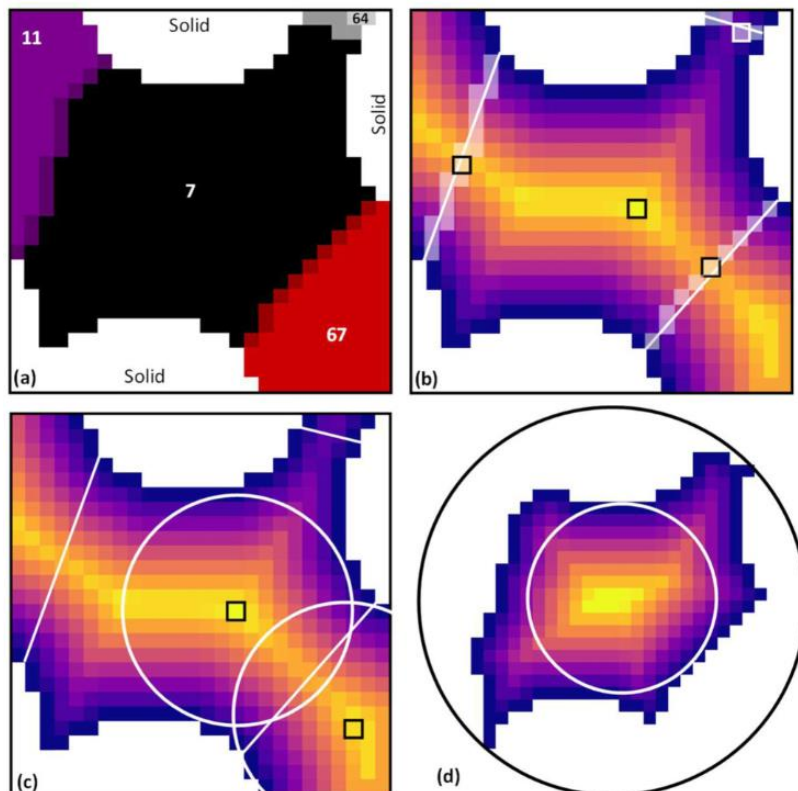


Figura 14 – Ilustração da determinação do tamanho de um poro e da formação das conexões. (a) As regiões de poro são rotuladas, por exemplo, com o poro 7 sendo o poro de interesse e os poros vizinhos 11, 64 e 67. As regiões de conexão são encontradas dilatando a região 6 e identificando as regiões sobrepostas. (b) A transformação de distância da imagem é utilizada para determinar as informações de tamanho do poro e garganta a partir dos valores máximos de intensidade indicados pelas caixas pretas. (c) Usando o mapa de distância global, o diâmetro do poro se estende para o poro vizinho. (d) Usando o mapa de distância obtido apenas dentro do poro, resulta no diâmetro inscrito do poro e em um centroide de poro mais geometricamente consistente [10].

4 Metodologia

Este capítulo apresenta as atividades que foram realizadas para a implementação e desenvolvimento da metodologia abordada neste trabalho.

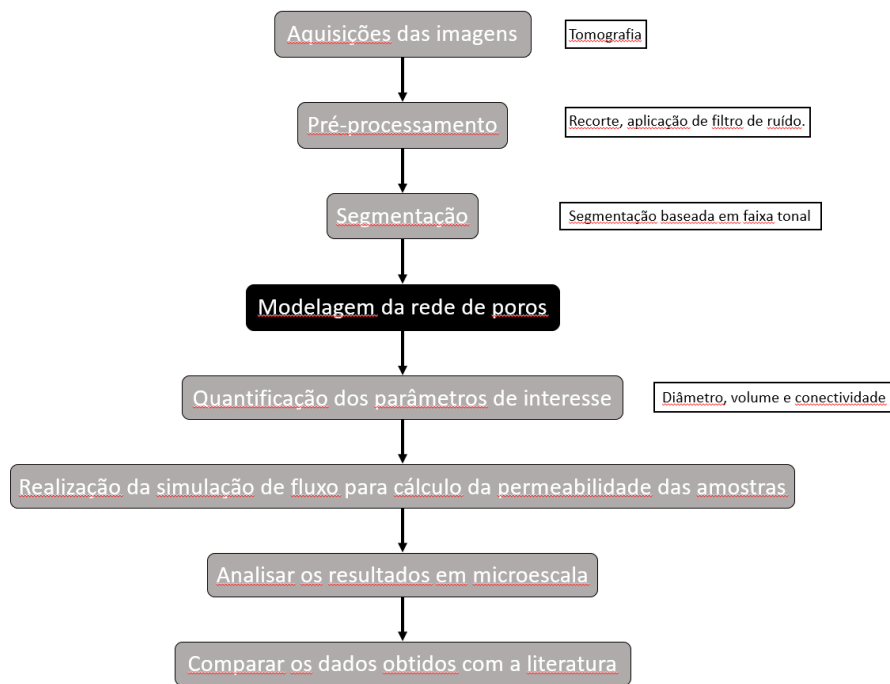


Figura 15 - Etapas de análises abordadas neste trabalho.

O primeiro passo descrito no fluxograma foi a aquisição das imagens através da microtomografia de raios X. Para fins comparativos, optou-se por realizar aquisições com diferentes resoluções. Portanto, foram realizadas variações no processo de captura com o objetivo de obter um conjunto de imagens de maior resolução e outro conjunto de imagens de menor resolução.

A etapa de pré-processamento corresponde aos processos de correções das imagens, como por exemplo a realização de recortes, correções de ruído, possíveis problemas de iluminação, entre outros. Já a etapa de segmentação corresponde ao processo de identificação da região de interesse, ou seja, segmentar as regiões de poros baseada na faixa tonal.

Após realizar a correção e a segmentação dos poros, é iniciado o processo de modelagem da rede de poros, utilizando o algoritmo do OpenPNM. Esse tipo de modelagem representa o espaço poroso definindo os poros e conexões através de formas geométricas simples. Dessa forma, depois que essa etapa é realizada, são gerados resultados referentes às propriedades da rede de poros, como por exemplo o diâmetro dos poros e conexões. Essa modelagem possibilita a realização de uma simulação de um fluxo monofásico para ser realizado o cálculo da permeabilidade absoluta das amostras.

Em seguida, os resultados obtidos em microescala são analisados, e por fim, os resultados das análises serão comparados com informações e outros resultados existentes na literatura. Vale ressaltar que as amostras são recebidas diretamente da empresa Vale. Dessa forma, nenhuma preparação de amostras foi necessária até esse momento. Portanto, o processo inicia-se a partir da aquisição das imagens de microtomografia de raios X, cujos parâmetros serão detalhados posteriormente.

4.1

Amostras

A Vale forneceu quatro amostras de briquetes e três amostras de pelotas de minério de ferro, que foram utilizadas para a realização deste trabalho. As amostras de pelota foram repartidas, mas sem nenhum detalhamento (Figura 16).

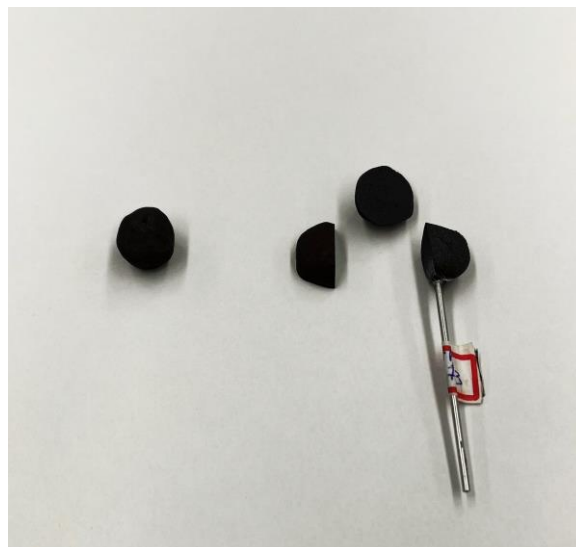


Figura 16 – Pelotas de minério de ferro.

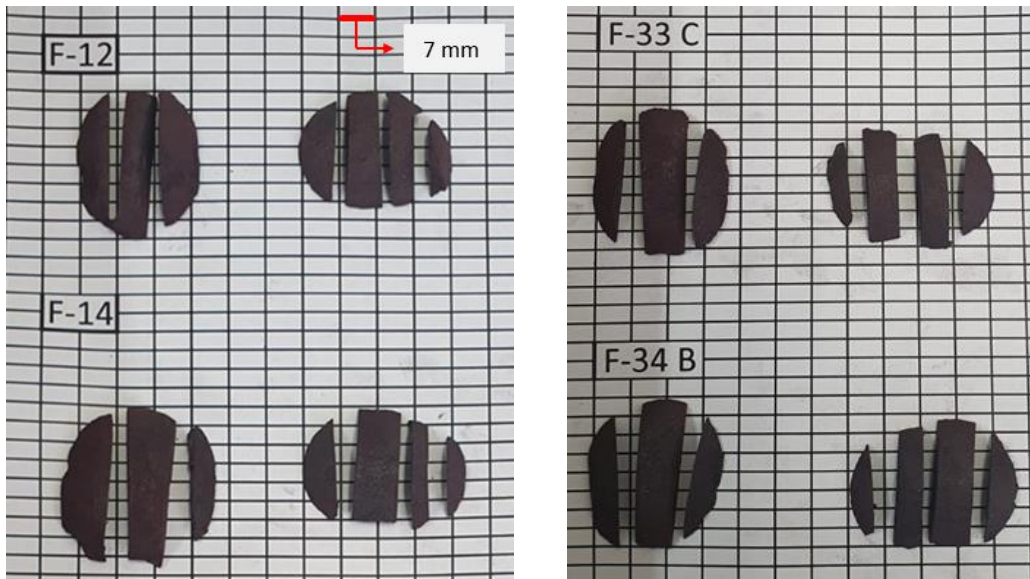


Figura 17 - Representação dos cortes longitudinais (recortes da fatia esquerda de cada imagem) e cortes transversais (recortes da fatia direita de cada imagem).

Os diferentes cortes foram identificados por sua orientação, conforme ilustrado na Figura 18. Por exemplo, nas amostras F-12, a metade da esquerda foi definida como F-12-L por seu corte ser longitudinal, enquanto a metade da direita foi definida como F-12-T por seu corte ser transversal. Para definir cada fragmento foram utilizadas letras, por exemplo, a amostra F-12-L foi subdividida em A, B e C, ou seja, o primeiro fragmento da esquerda para a direita é F-12-LA, o segundo F-12-LB e assim por diante.

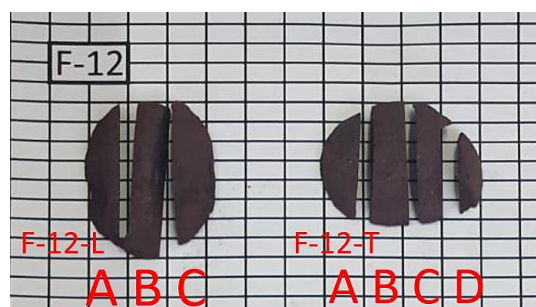


Figura 18 – Nomenclatura dos fragmentos das amostras.

Essa divisão de amostra foi adotada para que fosse possível localizar exatamente qual fragmento foi utilizado para realizar a modelagem e a simulação.

4.2 Microtomografia de raios X

4.2.1 Preparação das amostras

Para realizar a microtomografia de raios X não é necessário nenhum tipo de preparação de amostra. Cabe ressaltar que após o recebimento das amostras, nenhum procedimento foi realizado nelas antes de serem analisadas. As amostras foram presas a um suporte fino para ser possível encaixá-las no porta-amostras do microtomógrafo, como visto na Figura 19, com a devida identificação da amostra por meio de uma etiqueta.



Figura 19 – Suporte com um fragmento de briquete pronto para ser tomografado.

4.2.2 Aquisição das imagens

Para a aquisição das imagens, foi utilizado o microtomógrafo de raios X modelo ZEISS Xradia 510 Versa (Figura 20). O *software* de aquisição é específico do sistema Zeiss, chamado de Scout-and-Scan Control System. As condições de aquisição para cada amostra analisada variaram devido aos diferentes formatos e volumes e são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições de aquisição no Micro-CT.

	<i>Voxel size</i>	<i>Tempo de exposição</i>	<i>Lente objetiva</i>	<i>Binning</i>	<i>Número de projeções</i>	<i>Voltagem</i>	<i>Tempo de varredura</i>
Briquete-F12	16 μm	1,0 s	0,4 x	2	1601	140	1,08 h
	6 μm	1,1 s	0,4 x	2	1601	140	3,4 h
	2 μm	3,3 s	4 x	2	1601	140	2,17 h
Briquete-F14	16 μm	1,0 s	0,4 x	2	1601	120	1,08 h
	6 μm	1,0 s	0,4 x	2	1601	120	1,08 h
	2 μm	2,2 s	4 x	2	1601	120	1,67 h
Briquete-F33C	16 μm	1,0 s	0,4 x	2	1601	140	1,08 h
	6 μm	1,0 s	0,4 x	2	1601	140	4,33 h
	2 μm	3,0 s	4 x	2	1601	140	2,03 h
Briquete-F34B	16 μm	1,0 s	0,4 x	2	1601	120	1,08 h
	6 μm	1,0 s	0,4 x	2	1601	120	1,08 h
	2 μm	3,2 s	4 x	2	1601	120	2,17 h
Pelota-RD1	2 μm	3,4 s	4 x	2	1601	120	2,25 h
Pelota-RD2	2 μm	3,8 s	4 x	2	1601	120	2,42 h
Pelota-RD3	2 μm	6,0 s	4 x	2	1601	120	3,5 h



Figura 20 - Visão interna do microtomógrafo ZEISS Xradia Versa 510.

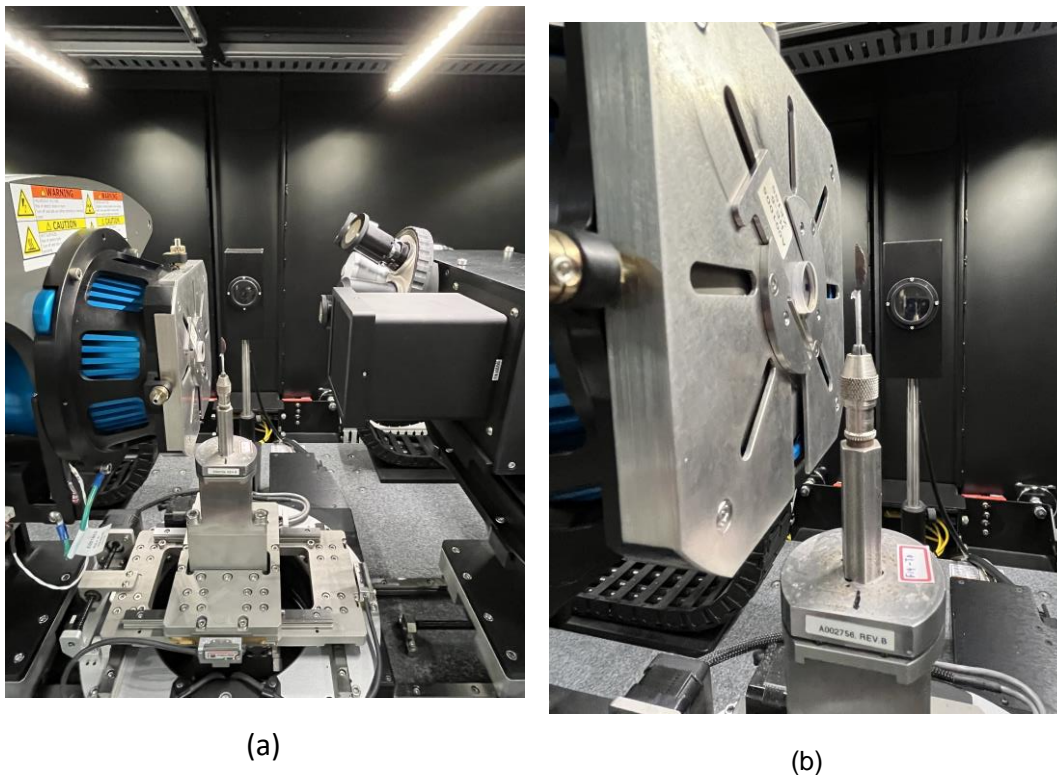


Figura 21 - Visão interna do MicroCT Zeiss XRadia Versa 510: (a) Fonte de raios X (esquerda), amostra de briquete (centro) e detector e conjunto de lentes (direita); (b) Imagem ampliada da fonte e amostra.

O tempo de exposição e o número de projeções têm um impacto direto no tempo total de análise. Além disso, o processo de agrupamento de pixels, conhecido como *Binning*, também influencia no tempo de análise, pois melhora a relação sinal-ruído, porém reduz a resolução espacial e afeta o *pixel size*.

Todas as amostras foram tomografadas utilizando, primeiro, a lente macro (0.4x) para cobrir todo o volume. Em seguida, foi utilizada a lente de 4x com o intuito de obter um subvolume da amostra com melhor resolução.

Algumas aquisições foram realizadas utilizando o processo de *stitching*. Esse processo é utilizado quando não é possível obter-se o volume desejado com apenas uma tomografia. Neste caso, o equipamento varre a amostra de cima a baixo, unindo as diferentes capturas no final. Geralmente, cada captura sobrepõe de 20 a 40% da próxima e com isso, o *software* realiza uma operação de correlação entre imagens adjacentes, deixando-as fielmente alinhadas.

Outro parâmetro adotado em todas as aquisições foi o uso do filtro HE1, que é um tipo de filtro mais indicado para análises de amostras mais densas que necessitam de alta voltagem. Os filtros são utilizados para remover raios X de menor energia, que seriam preferencialmente absorvidos mais próximo à superfície da amostra. Esta absorção preferencial é denominada de endurecimento do feixe (*Beam Hardening*) e gera um artefato que degrada a imagem. Nesse caso específico, as bordas da amostra ficam mais claras como se ali o material fosse mais denso e absorvesse mais radiação. A escolha do filtro se dá com base no valor de transmissão, que é uma relação entre o sinal de raios X recebidos com e sem a amostra (sinal sem a amostra sobre o sinal com a amostra).

Mesmo utilizando o filtro para eliminar os raios X de baixa energia, o efeito do *Beam Hardening* ainda não é totalmente corrigido, dessa forma, ainda é comum o surgimento de regiões claras na extremidade das amostras. Nesse caso, ainda é necessário realizar um procedimento de correção por software durante a etapa de reconstrução.

4.2.3 Reconstrução das imagens

A reconstrução tomográfica das imagens de raios X foi feita com o *software* Scout-and-Scan Control System Reconstructor, específico do sistema ZEISS. Durante o processo de reconstrução, alguns parâmetros são ajustados, como o “center-shift” e o “beam hardening”.

A primeira etapa da reconstrução das imagens consiste na escolha de um parâmetro denominado “*Center Shift*”.

Este parâmetro determina a quantidade em pixels que o eixo de rotação da amostra está deslocado em relação ao centro da coluna do detector. Assim, a imagem reconstruída conterá artefatos, que podem ser corrigidos ajustando a distância de deslocamento.

A segunda etapa da reconstrução consiste na escolha do parâmetro “*Beam Hardening*”. O fenômeno de Beam Hardening se manifesta quando os raios X de menor energia são mais atenuados do que raios X de alta energia ao passarem por um objeto denso. Dessa forma, esse processo consiste na remoção dos raios X de baixa energia para corrigir ou minimizar artefatos indesejados nas imagens de microCT.

4.2.4 Definição da resolução

Nessa etapa, duas resoluções foram almeçadas: uma com a lente de 0.4x e outra com a lente de 4x com o intuito de realizar comparações nos resultados da modelagem com as diferentes resoluções. Dessa forma, diferentes condições de análises foram testadas, como por exemplo, variação no tempo de exposição, no número de projeções e diferentes configurações geométricas na aquisição, que se referem ao posicionamento da fonte de raios X, da amostra e do detector.

A justificativa para aquisição de duas tomografias com resoluções diferentes será explicada na sessão referente à modelagem da rede de poros.

4.3 Processamento e análise digital de imagens

Para a etapa de processamento e análise digital de imagens, dois *softwares* foram utilizados: o *software* livre FIJI/ImageJ e o *software Dragonfly* da empresa *Object Research Systems (ORS)* [63], [64]. Essa variação de *softwares* é comum em processamento e análise de imagens, principalmente quando se trata de imagens 3D, nesses casos, isso acontece a partir do desempenho de cada um, assim como as limitações que cada *software* apresenta.

Para as etapas de pré-processamento das imagens, foi utilizado o *software* FIJI/ImageJ, enquanto na etapa de segmentação foi utilizado o *Dragonfly*.

Todos os problemas que não foram possíveis de serem resolvidos na etapa de aquisição das imagens a partir da variação de alguns parâmetros, tais como diferentes configurações geométricas na aquisição, que conseqüentemente alteram a resolução da imagem, foram corrigidas ou melhoradas nessa etapa.

O primeiro processo realizado visa ajustar as características de brilho e contraste da imagem. Para isso, utilizou-se o *software* FIJI/ImageJ. A ferramenta utilizada (*Brightness/contrast*) permite alterar iterativamente o contraste e o brilho da imagem.

De maneira geral, quando é realizado a alteração do brilho, o histograma é apenas deslocado para uma das pontas, por exemplo, se o brilho for diminuído, o histograma será deslocado para a esquerda (onde a tonalidade dos pixels é menor) e se o brilho for aumentado, o histograma será deslocado para a direita (onde a tonalidade dos pixels é maior). O processo que foi adotado nas imagens utilizadas, foi a otimização automática do histograma, isto é, ele ajusta o contraste e o brilho de forma automática, fazendo com que o histograma fique mais bem distribuído e mais disperso.

Ainda utilizando o *software* FIJI/ImageJ, outro processo que é abordado em alguns casos, é a correção de ruído das imagens. Para isso, utiliza-se um filtro conhecido e bastante utilizado no ramo de processamento e análise digital de imagens, que é o *Non Local Means Denoising*. Trata-se de um filtro que substitui a cor de um pixel por uma média das cores de pixels semelhantes. No entanto, os pixels mais semelhantes não têm necessariamente que estejam próximos. Com isso, o filtro explora uma ampla região da imagem em busca de todos os pixels que realmente se assemelham ao pixel que se deseja limpar, dessa forma, ele diminui o ruído da imagem mantendo detalhes e estrutura [65].

No FIJI, é possível alterar dois parâmetros, o *Sigma* e o *Smoothing Factor*. O *Sigma* é o parâmetro que modifica a quantidade de vizinhos considerados para o cálculo desta média e o *Smoothing Factor* defini o nível de suavização desejada. A Tabela 3 mostra os parâmetros utilizados nas imagens dos aglomerados para realizar a extração do ruído.

Tabela 3 - Parâmetros adotados para aplicação do filtro *non local means denoising*.

	Pixel Size	Sigma	Smoothing Factor
Briquete-F12	2 μm	11	1
	6 μm	10	
	16 μm	-	
Briquete-F14	2 μm	11	
	6 μm	10	
	16 μm	-	
Briquete-F33C	2 μm	11	
	6 μm	10	
	16 μm	-	
Briquete-F34	2 μm	11	
	6 μm	10	
	16 μm	-	
Pelota-RD1	2 μm	12	
	16 μm	-	
Pelota-RD2	2 μm	13	
	16 μm	-	
Pelota-RD3	2 μm	13	
	16 μm	-	

O passo seguinte foi o processo de segmentação da região porosa dos aglomerados de minério de ferro. Em princípio, esse processo é realizado apenas definindo o limiar que abranja os pixels correspondente aos poros (tons mais escuros do histograma), como podemos observar na Figura 22.

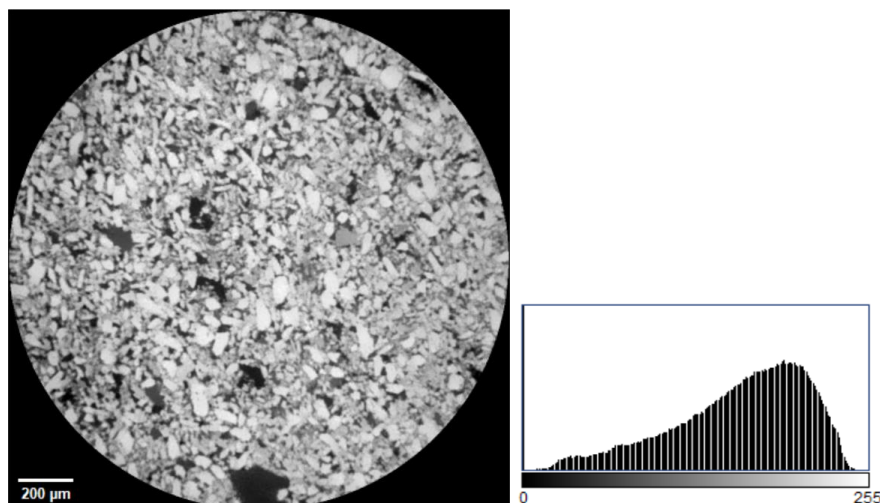


Figura 22 - Imagem de microtomografia de raios X com o seu respectivo histograma de intensidade do slice.

Entretanto, a segmentação direta dos poros acaba acarretando na segmentação do fundo como é possível observar na Figura 23. Esse problema é uma peculiaridade das imagens adquiridas por microtomografia.

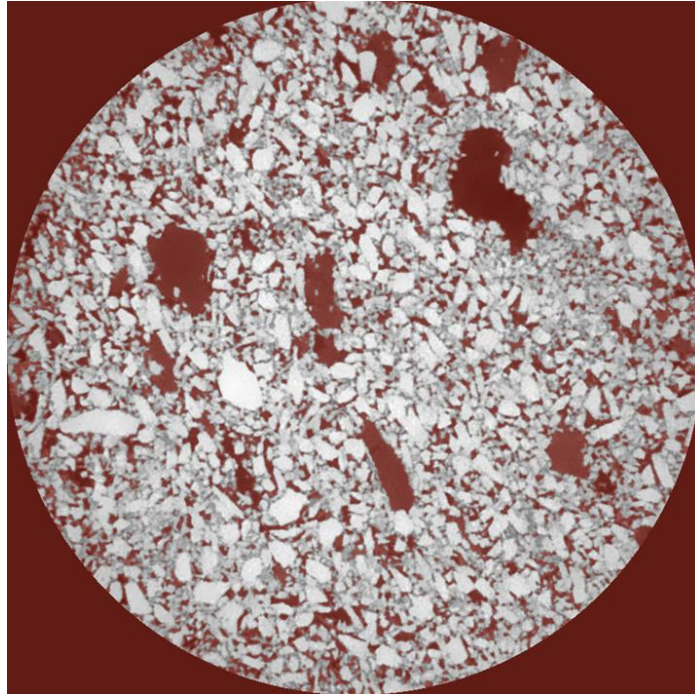


Figura 23 - Problema apresentado durante a segmentação dos poros.

Dessa forma, para segmentar os poros, é preciso realizar alguns passos:

- 1) Segmentar a parte sólida da amostra, criando uma ROI que preserve os poros;
- 2) Duplicar a ROI e realizar um procedimento de preenchimento;
- 3) Realizar uma subtração entre a ROI preenchida e a ROI da segmentação do sólido (imagem preenchida – imagem do sólido), obtendo uma ROI que representa os poros.

O resultado dessas etapas é uma imagem binária referente a região porosa da amostra, imagem esta que será utilizada para realizar a modelagem da rede de poros. Todos os passos dessa etapa podem ser observados a partir da Figura 24.

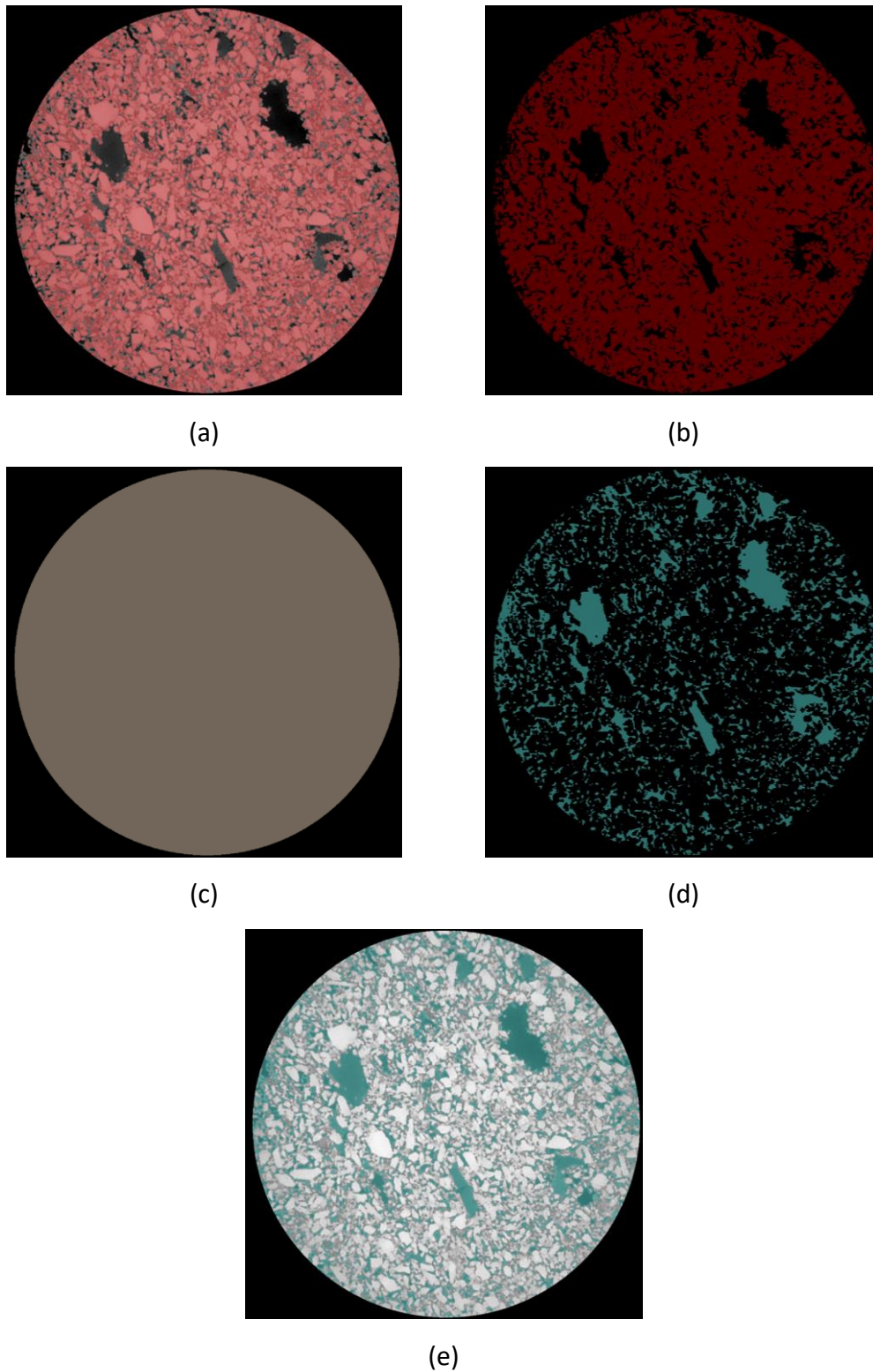


Figura 24 – Processo realizado para a segmentação dos poros. (a) Segmentação da região sólida da amostra; (b) ROI da região sólida; (c) ROI proveniente do procedimento de preenchimento; (d) Resultado da subtração da ROI do sólido preenchido com a ROI da segmentação do sólido; (e) Resultado da segmentação dos poros.

4.4 Modelagem da rede de poros

Nessa etapa foi utilizada a estrutura do *Open Pore Network Modeling*, um projeto de código aberto que possibilita obter-se resultados referentes às propriedades de poros e conexões além de possibilitar a realização de simulações de um gás através da estrutura porosa do aglomerado. Outro ponto importante, é que essa metodologia permitiu fazer o cálculo da permeabilidade absoluta do material estudado de forma mais simplificada. O fluxograma de basicamente todos os passos seguidos pode ser observado na Figura 25.

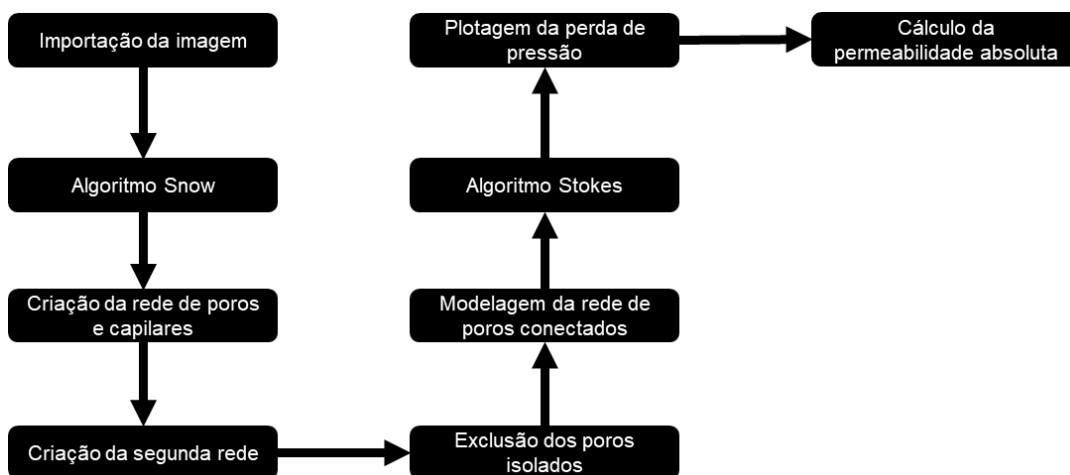


Figura 25 - Fluxograma da modelagem da rede porosa das amostras de aglomerado de minério de ferro.

O processo da modelagem e simulação foi realizado utilizando a interface do Jupyter Notebook com a plataforma do Anaconda, aplicando o pacote do *openpnm* (*Open Pore Network Modeling*). O primeiro passo é a importação da imagem binária da região de interesse, no caso os poros, como podemos observar na Figura 26. Uma parte desse código foi utilizada para mostrar uma pré-visualização de algumas camadas da imagem 3D, para confirmar a importação da imagem correta.

```

path = 'D:/Users/Igor/Brique_F3_150kV6um/Python/Brique_F3_150kV6um_Stitch-poros.tif'
file_name = 'poros'
file_format = '.tif'
file = file_name + file_format
image = os.path.join(path, file)
fetch_file = os.path.join(path, file)
im = imageio.mimread('D:/Users/Igor/Brique_F3_150kV6um/Python/Brique_F3_150kV6um_Stitch-poros.tif', memtest=False)
im = np.array(im, dtype=bool)
print('The input Micro-CT image size is: {}'.format(im.shape))
fig, ax = plt.subplots(1, 3, figsize=(12,5))
ax[0].imshow(im[:, :, 300], cmap='gray');
ax[0].set_title("Slice No. 300 View");
ax[1].imshow(im[:, :, 200], cmap='gray');
ax[1].set_title("Slice No. 200 View");
ax[2].imshow(im[:, :, 100], cmap='gray');
ax[2].set_title("Slice No. 100 View");

```

The input Micro-CT image size is: (709, 1574, 633)



Figura 26 - Parte do código referente à importação da imagem para o ambiente.

O passo seguinte foi a utilização do algoritmo Snow, informando a resolução da imagem em metros e os parâmetros que serão utilizados para a modelagem. No caso, foram utilizados os parâmetros *default*, calibrados pelos desenvolvedores do código (Figura 27).

O algoritmo *Snow* usa um algoritmo de segmentação por *watershed* baseado em marcadores para particionar uma imagem em regiões pertencentes a cada poro (define o que é poro e garganta utilizando um processo de segmentação baseado em *watershed*). A principal contribuição do algoritmo é encontrar um conjunto adequado de poros e conexões na imagem para que o *watershed* não segmente demais.

```

resolution = 5.97153795312561e-6 #metros
net=ps.networks.snow2(im, voxel_size=resolution, accuracy='standard', sigma=0.4, r_max=4)

```

Figura 27 - Fornecimento de informações da amostra e parâmetros utilizados na modelagem.

O passo seguinte foi a criação da rede de poros, em que são definidas as propriedades que podem ser extraídas e as ligações de um poro a outro (Figura 28). Vale destacar que essa primeira rede criada é relacionada a toda a estrutura porosa do material, contendo informações de poros conectados e poros isolados. Poros conectados são poros que possuem conexão com o ambiente externo e com outro poro, enquanto poros isolados apesar de possuírem ou não conexão com algum outro poro, não possuem conexão com o ambiente externo.

```
proj_1 = op.Project()
pn_tudo = op.network.Network(name=file_name, project=proj_1)
pn_tudo.update(net.network) # Fills 'pn' with data from 'net'
print(pn_tudo)
```

Figura 28 - Parte do código referente a criação da rede de poros totais (conectados e isolados).

# Properties	Valid Values
2 throat.conn	12839 / 12839
3 pore.coords	31497 / 31497
4 pore.region_label	31497 / 31497
5 pore.phase	31497 / 31497
6 throat.phases	12839 / 12839
7 pore.region_volume	31497 / 31497
8 pore.equivalent_diameter	31497 / 31497
9 pore.local_peak	31497 / 31497
10 pore.global_peak	31497 / 31497
11 pore.geometric_centroid	31497 / 31497
12 throat.global_peak	12839 / 12839
13 pore.inscribed_diameter	31497 / 31497
14 pore.extended_diameter	31497 / 31497
15 throat.inscribed_diameter	12839 / 12839
16 throat.total_length	12839 / 12839
17 throat.direct_length	12839 / 12839
18 throat.perimeter	12839 / 12839
19 pore.volume	31497 / 31497
20 pore.surface_area	31497 / 31497
21 throat.cross_sectional_area	12839 / 12839
22 throat.equivalent_diameter	12839 / 12839

# Labels	Assigned Locations
2 pore.all	31497
3 throat.all	12839

Figura 29 - Propriedades e informações que podem ser extraídas depois do processo de criação da rede de poros.

Em seguida, cria-se a geometria de poros e conexões (totais e isolados). Nesse ponto, o algoritmo modela geometricamente os poros e conexões, gerando os resultados referentes à geometria (Figura 30).

```
mods = op.models.collections.geometry.spheres_and_cylinders
pn_tudo.add_model_collection(mods)
pn_tudo.regenerate_models()
print(pn_tudo)
```

Figura 30 - Parte do código que realiza a modelagem geométrica dos poros e conexões.

Depois de criar a rede total de poros (poros conectados e isolados), o algoritmo busca identificar os poros que não possuem conexão com o ambiente externo. Com isso, é criada uma segunda rede de poros onde os poros isolados são removidos (Figura 31). O resultado é uma rede porosa contendo apenas os poros conectados.

```
h = op.utils.check_network_health(pn)
op.topotools.trim(network=pn, pores=h['disconnected_pores'])
print(h)
```

Figura 31 – Exclusão de poros desconectados.

Feito isso, basicamente todo o processo descrito anteriormente é repetido, só que dessa vez os resultados obtidos serão referentes apenas à rede conectada, úteis para o cálculo de permeabilidade. Com isso a seguinte ordem é seguida:

1. Criação da segunda rede;

2. Exclusão dos poros isolados;
3. Criação da geometria de poros conectados.

Depois que toda a modelagem da rede de poros conectados estar completa, é aplicado o algoritmo *Stokes* (Figura 32) para realizar o cálculo da permeabilidade absoluta. É importante mencionar que a rotina do OpenPNM já possui em suas bibliotecas, algumas fases criadas, como é a água, ar e óleo. Isso significa que a rotina já possui informações das propriedades que são utilizadas para fazer o cálculo da permeabilidade, como é o caso da viscosidade.

```
#Uso do algoritmo de Stokes para cálculo de permeabilidade absoluta
phase_1 = op.phase.Air(network=pn) #troquei a fase padrão Water para Air
phase_1.add_model_collection(op.models.collections.physics.standard)
phase_1.regenerate_models()
inlet = pn.pores('xmin')
outlet = pn.pores('xmax')
flow = op.algorithms.StokesFlow(network=pn, phase=phase_1)
flow.set_value_BC(pores=inlet, values=1) #pressão aplicada na amostra
flow.set_value_BC(pores=outlet, values=0)
flow.run()
phase_1.update(flow.soln)
```

Figura 32 - Parte do código referente a aplicação do algoritmo de *Stokes*.

Como a permeabilidade absoluta é a propriedade do meio poroso e não a propriedade do fluido, qualquer fluido com um valor de viscosidade atribuído pode ser usado como fase.

Para o cálculo da permeabilidade absoluta das amostras, o pacote OpenPNM calcula o fluxo do fluido por meio da estrutura da rede de poros utilizando a lei de Hagen-Poiseuille, que relaciona um fluxo laminar de um fluido newtoniano, Q , em um tubo cilíndrico sob perda de pressão [11]:

$$Q = -\frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \mu \cdot L} \quad (5)$$

onde, r é o raio interno do tubo, ΔP é a diferença de pressão entre as extremidades do tubo, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e L é o comprimento do tubo.

Partindo deste princípio, é realizado o cálculo da condutância hidráulica (κ) da fase utilizada (medida da capacidade do fluido de fluir através de um meio poroso).

$$\kappa = \frac{\pi \cdot r^4}{8 \cdot \mu \cdot L} \quad (6)$$

Essa equação é empregada para descrever a condutância hidráulica entre os espaços porosos de uma estrutura. A condutância hidráulica total é determinada somando as condutâncias hidráulicas da metade de um poro x , a conexão entre x e y , e metade do poro y . Essa abordagem estabelece um sistema de equações algébricas que calculam as pressões em cada espaço poroso da estrutura. Após a resolução desse sistema, a permeabilidade do modelo da rede de poros é determinada usando a lei de Darcy, como explicado anteriormente.

A partir disso, é descrito o comportamento do gás. Até então foi utilizado ar, e realizada a simulação do escoamento, permitindo assim o cálculo da permeabilidade absoluta de um meio poroso aplicando de forma simplificada a lei de *Darcy*, Figura 33.

```

pi=math.pi
# Simulação Permeabilidade absoluta
Q = flow.rate(pores=inlet, mode='group')[0]
A = (pi*(im.shape[1]*im.shape[1])/4) * resolution**2
#A = op.topotools.get_domain_area(pn, inlets=inlet, outlets=outlet)
L = im.shape[2] * resolution
mu = phase_1['pore.viscosity'].max()
delta_P = (1 - 0)
K = abs((Q * L * mu) / (A * delta_P))
print(f'The value of K is: {K/0.98e-12:.2f} D')
print(f'The value of K is: {K/0.98e-12*1000:.2f} mD')

```

Figura 33 - Cálculo da permeabilidade absoluta.

Levando em conta todas as informações fornecidas, o motivo para empregar três resoluções distintas para cada amostra teve o propósito de examinar e contrastar as discrepâncias entre elas por meio dos resultados de modelagem e simulações. Isso se deve ao fato de que uma aquisição com melhor resolução pode revelar regiões porosas que podem passar despercebidas em uma aquisição de menor resolução.

Neste processo, dois modelos da rede porosa da amostra são gerados, um contendo rede conectada e isolada e outro contendo apenas a rede conectada. Com isso, é possível visualizar toda essa estrutura modelada. Para isso, é possível exportar essa modelagem do código em *python* e abri-la em um programa chamado *Paraview*. Neste programa é possível observar, através de uma renderização 3D, todos os poros e gargantas que foram modelados com a rotina, como é possível observar a partir da Figura 34.

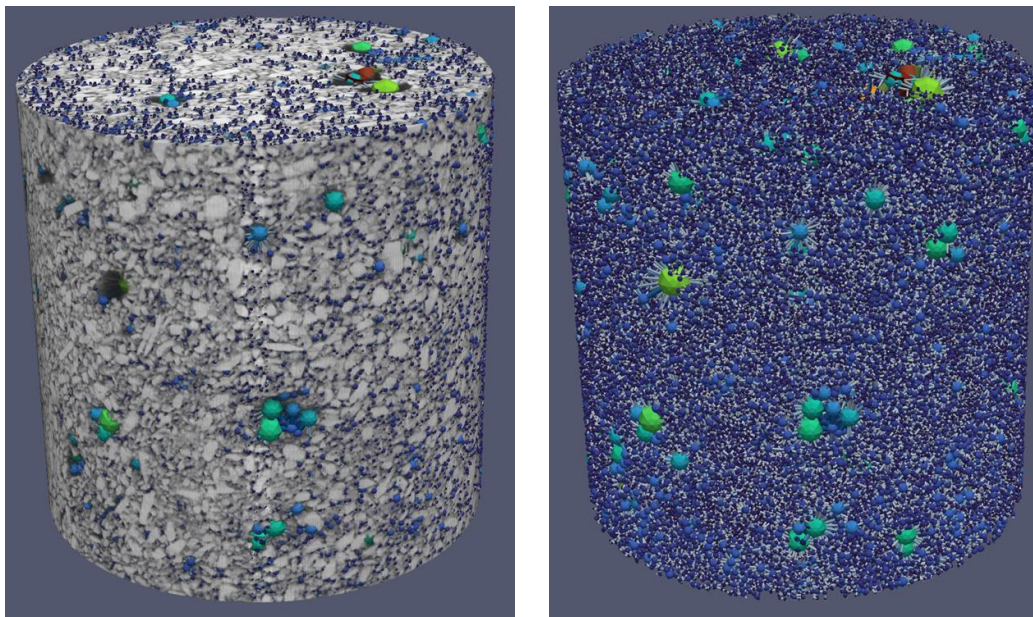


Figura 34 – Visualização da modelagem da rede de poros da amostra de Briquete-F12 com 2 μm de tamanho de voxel.

5

Resultados e discussão

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos neste trabalho. Inicialmente, por razões de configuração e tempo de captura do tomógrafo, a resolução de 6 μm foi utilizada. No entanto, logo foi identificado que essa resolução apresentava limitações para revelar a estrutura porosa das amostras. Por isso, passamos para uma comparação entre diferentes resoluções com o intuito de encontrar um tamanho de *voxel* adequado. Por fim, serão apresentados os resultados comparativos, com um tamanho de *voxel* de 2 μm , entre dois diferentes tipos de aglomerados e suas respectivas análises.

5.1

Análise com diferentes tamanhos de voxel (2 μm , 6 μm e 16 μm)

5.1.1

Porosidade

Como a região adquirida em 2 μm corresponde a uma pequena parte da amostra, a Figura 35 representa a região de cada amostra que foi capturada em alta resolução.

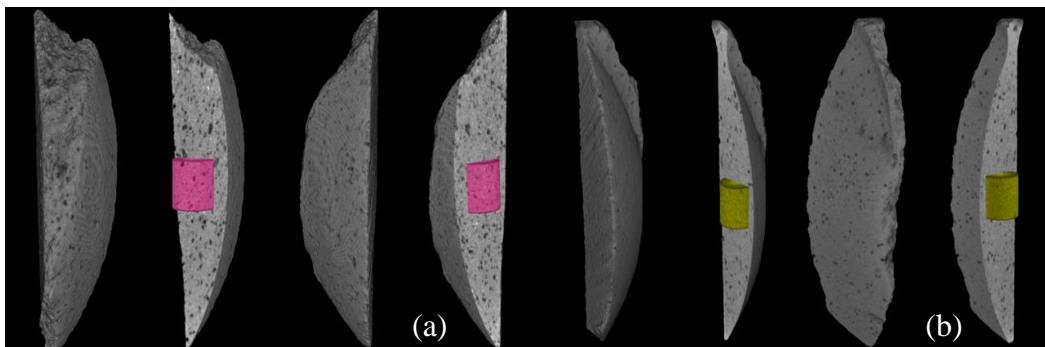


Figura 35 - Região das amostras que foram capturadas com tamanho de voxel de 2 μm .

(a) Brique-F12-TD; (b) Brique-F33C-TA.

Conhecendo o volume adquirido em 2 μm , um recorte exatamente no mesmo espaço volumétrico foi realizado nas demais resoluções, no caso, 6 e 16 μm de tamanho de voxel. Na Figura 36 podemos ver o mesmo volume em

diferentes resoluções. O mesmo processo foi realizado na amostra Briquete-F33C-TA.

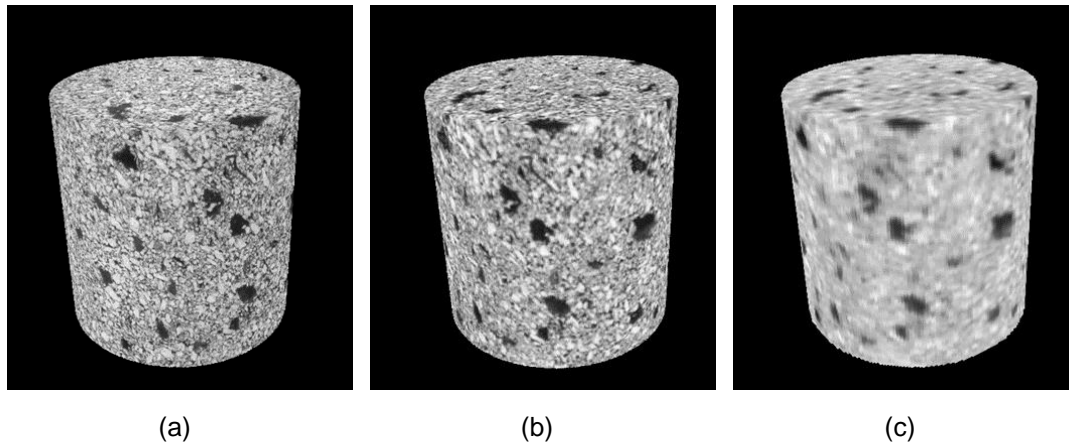


Figura 36 - Mesma região da amostra Briquete-F12-TD adquirida em diferentes tamanhos de voxel. (a) 2 μm ; (b) 6 μm ; (c) 16 μm .

A Tabela 4 mostra os valores dos limiares utilizados para realizar as segmentações, o valor da porosidade de cada amostra e seu respectivo tamanho de voxel.

Tabela 4 – Limiares adotados e porosidade total da amostra Briquete-F12-TD e Briquete-F33C-TA em 2, 6 e 16 μm .

-	Tamanho do voxel	Limiar de Segmentação	Porosidade
Briquete-F12-TD	2 μm	0 – 120	23,7%
	6 μm	0 – 144	13,6%
	16 μm	0 – 140	3,3%
Briquete-F33C-TA	2 μm	0 – 144	21,4%
	6 μm	0 – 144	13,4%
	16 μm	0 – 164	5,3%

Quando observamos os resultados referentes às diferentes resoluções para os dois briquetes, as amostras que foram capturadas com um *voxel size* menor apresentaram maior porosidade. Isso pode ser atribuído ao nível de detalhamento obtido nas melhores resoluções, visto que é possível discriminar regiões menores correspondentes ao espaço poroso.

5.1.2 Modelagem da Rede Porosa

Os resultados obtidos da modelagem nas diferentes resoluções para as amostras Briquete-F12-TD e Briquete-F33C-TA são apresentados na Tabela 5 e na Tabela 6.

Tabela 5 – Propriedades extraídas das modelagens da amostra Briquete-F12-TD em diferentes resoluções.

-	Briquete-F12-TD-2 μ m	Briquete-F12-TD-6 μ m	Briquete-F12-TD-16 μ m
Quantidade de poros	193425	1429	6
Quantidade de conexões	336283	1824	5
Diâmetro médio dos poros (μ m)	10,7 \pm 4,1	24,2 \pm 12,7	104,7 \pm 49,4
Diâmetro mínimo dos poros (μ m)	4,06	12,09	64,12
Diâmetro máximo dos poros (μ m)	170,8	179,7	184,16
Diâmetro médio das conexões (μ m)	6,5 \pm 3,4	15,4 \pm 10,4	128,2 \pm 55,5
Diâmetro mínimo das conexões (μ m)	4,06	12,09	32,06
Diâmetro máximo das conexões (μ m)	163,2	171,3	172,6
Número médio de conectividade	3,4 \pm 2,6	2,5 \pm 2,3	1,6 \pm 0,8
Número mínimo de conectividade	1	1	1
Número máximo de conectividade	208	42	3

Tabela 6 – Propriedades extraídas das modelagens da amostra Briquete-F33C-TA em diferentes resoluções.

	Briquete-F33C-TA-2 μ m	Briquete-F33C-TA-6 μ m	Briquete-F33C-TA-16 μ m
Quantidade de poros	208808	2641	9
Quantidade de conexões	376775	3361	10
Diâmetro médio dos poros (μ m)	10,3 \pm 3,6	23,4 \pm 10,2	32,3 \pm 11,85
Diâmetro mínimo dos poros (μ m)	4,04	12,09	17,1
Diâmetro máximo dos poros (μ m)	163,05	197,15	51,29
Diâmetro médio das conexões (μ m)	6,4 \pm 3,1	14,6 \pm 5,8	16 \pm 7,4
Diâmetro mínimo das conexões (μ m)	4	12	17
Diâmetro máximo das conexões (μ m)	159,9	95,1	34,1
Número médio de conectividade	3 \pm 2	2 \pm 2	2 \pm 1
Número mínimo de conectividade	1	1	1
Número máximo de conectividade	181	33	4

A análise da quantidade de poros e conexões confirma o grande impacto da resolução. A quantidade de poros e conexões cai mais de 98% entre 2 e 6 μ m. O surgimento de uma grande quantidade de poros e conexões em 2 μ m confirma a existência de uma quantidade substancial de detalhes e estruturas do espaço poroso que não podem ser capturados pela aquisição com 6 μ m. Cabe destacar que resoluções muito baixas, como é o caso das capturas com 6 e 16 μ m, não são úteis para esse tipo de material, visto que quando é utilizado uma resolução melhor, é observado que a média do diâmetro dos poros e conexões é aproximadamente de 10 e 6 μ m, respectivamente.

Naturalmente, a resolução irá impactar diretamente em todos os resultados encontrados, como é o caso do número de conectividade dos poros. Apesar de

apresentarem pouca diferença na conectividade média, é possível observar que a conectividade máxima é muito maior em 2 μ m.

5.1.3 Permeabilidade absoluta

Os resultados da permeabilidade absoluta das amostras em 2, 6 e 16 μ m podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados da permeabilidade absoluta das diferentes resoluções do Briquete-F12-TD e Briquete-F33C-TA.

-	Tamanho do voxel	Permeabilidade absoluta
Briquete-F12-TD	2 μ m	2,25 mD
	6 μ m	X
	16 μ m	X
Briquete-F33C-TA	2 μ m	1,71 mD
	6 μ m	0,03 mD
	16 μ m	X

Como esperado, os resultados indicam que a permeabilidade só pode ser adequadamente estimada com a melhor resolução. Nestas condições, as duas amostras apresentaram permeabilidade similar.

Com base nos resultados apresentados, é perceptível que as imagens adquiridas com 2 μ m de *voxel size* se mostraram mais adequadas para caracterizar esse material utilizando a metodologia abordada neste trabalho quando comparada com os demais tamanhos de *voxel* empregados. Desse modo, uma análise mais detalhada e comparativa com outro aglomerado mais conhecido, no caso a pelota, foi realizada. Os resultados se encontram na seção a seguir.

5.2

Análise comparativa entre briquetes e pelotas

5.2.1

Porosidade

Nesta análise, foram utilizadas apenas as imagens adquiridas com tamanho de voxel de 2 μm . As regiões que foram utilizadas para cada amostra podem ser observadas na Figura 37.

Tal como realizado previamente, o procedimento de segmentação dos poros foi aplicado a cada volume individualmente (Figura 38). Os limiares utilizados para cada amostra e o resultado da porosidade total, podem ser observados na Tabela 8.

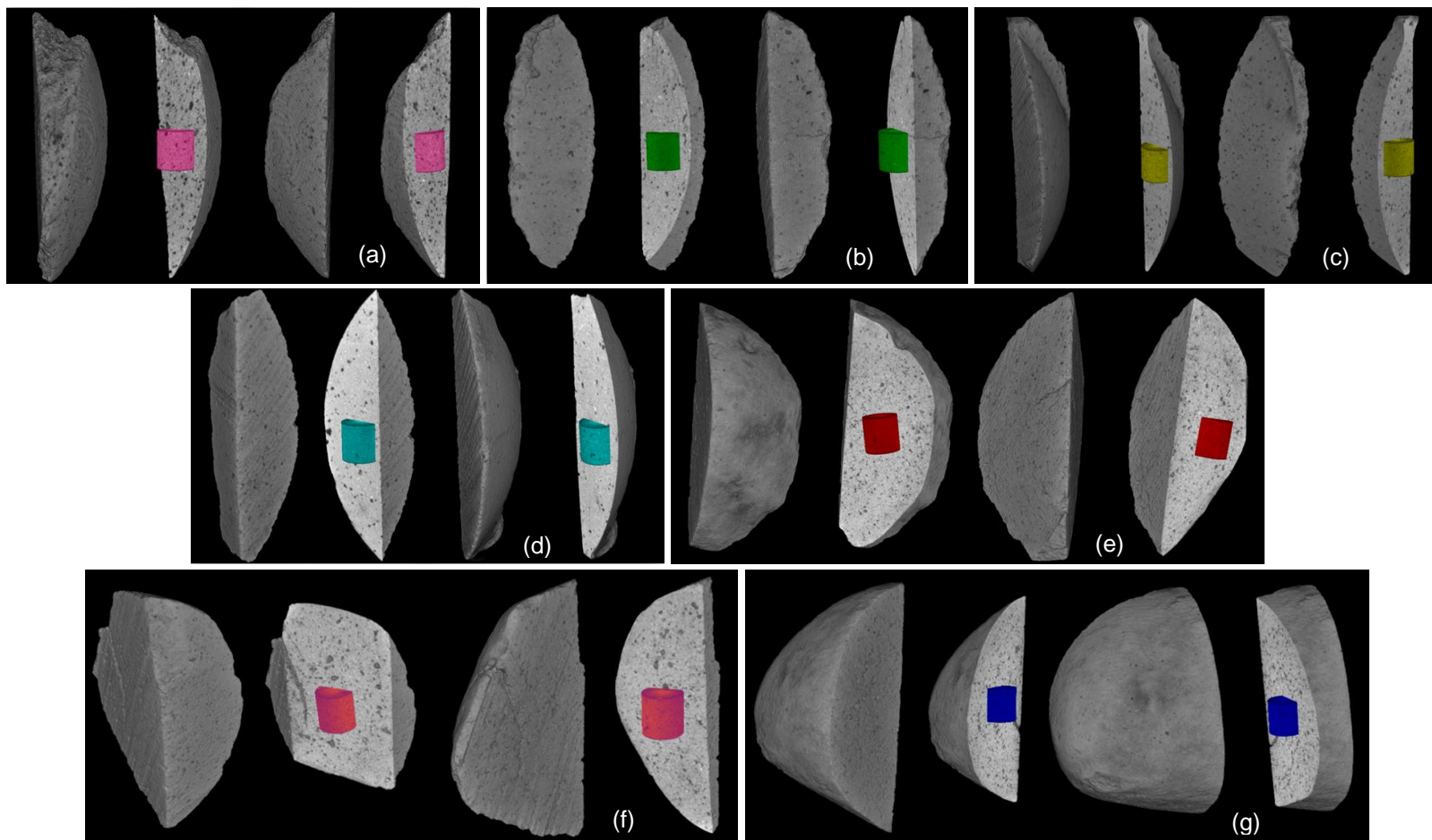


Figura 37 – Regiões das amostras que foram capturadas com resolução espacial de 2 μm . (a) Briqueite-F12-TD; (b) Briqueite-F14; (c) Briqueite-F33C-TA; (d) Briqueite-F34B; (e) Pelota-RD1; (f) Pelota-RD2; (g) Pelota-RD3.

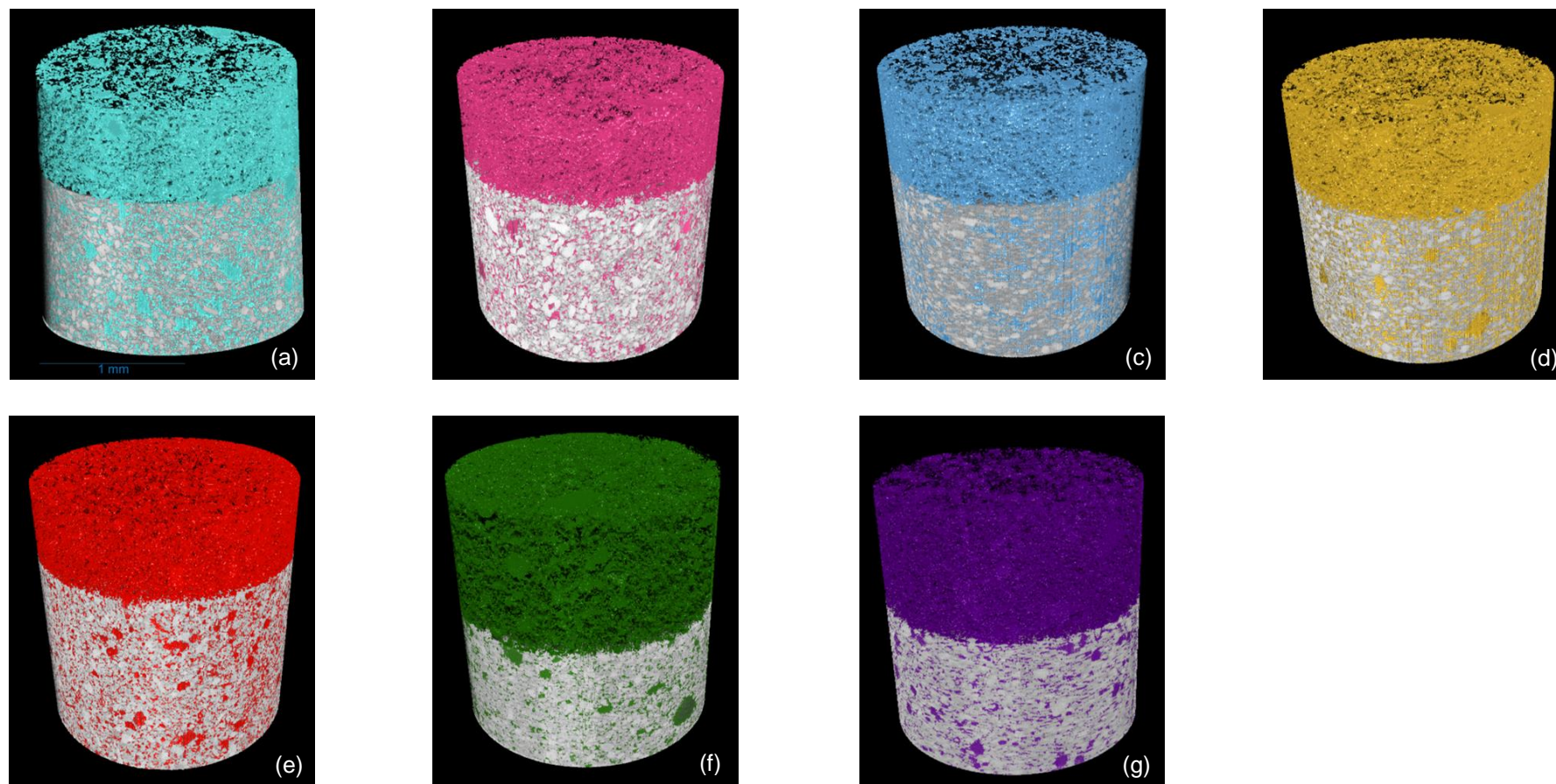


Figura 38 - Visualização da região segmentada de cada amostra. (a) Brique-F12; (b) Brique-F14; (c) Brique-F33C; (d) Brique-F34B; (e) Pelota-RD1; (f) Pelota-RD2; (g) Pelota-RD3.

Tabela 8 – Limiares adotados e porosidade total para as amostras de briquete e pelota.

-	Briquete F12	Briquete F14	Briquete F33C	Briquete F34B	Pelota RD1	Pelota RD2	Pelota RD3
Limiar de Segmentação	0-120	0-155	0-130	0-140	0-140	0 – 150	0 – 140
Porosidade	22,3%	12,78%	19,77%	19,49%	21%	16,7%	14,7%

Os valores referentes à porosidade acabaram variando principalmente nas amostras Briquete-F14, Pelota-RD2 e Pelota-RD3. Isso pode ter ocorrido por algum por algum problema no processo de produção desses aglomerados ou por conta da região tomografada que realmente possuía menor porosidade. É importante destacar que o limiar utilizado pode variar de pessoa para pessoa, uma vez que é determinado pelo critério visual. Neste estudo, a segmentação foi executada de maneira minuciosa e cautelosa para enfatizar apenas aquilo que se tinha certeza de ser um poro, utilizando um valor baseado no critério visual (avaliação qualitativa de quem está realizando o procedimento) adequado para cada amostra abordada.

5.2.2

Modelagem da rede porosa

Os resultados das modelagens das amostras de briquete e pelota se encontram na Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades extraídas das modelagens das amostras de briquetes e pelotas com resolução espacial de 2 μm .

	Briquete-F12	Briquete-F14	Briquete-F33C	Briquete-F34B	Pelota-RD1	Pelota-RD2	Pelota-RD3
Quantidade de poros	193425	119895	208808	222179	290056	126511	75014
Quantidade de conexões	336283	193883	376775	369455	484352	195630	108103
Diâmetro médio dos poros (μm)	10,7 \pm 4,1	9,9 \pm 3,7	10,3 \pm 3,6	10,2 \pm 3,5	9,3 \pm 3,7	9,5 \pm 4,3	9,1 \pm 4,6
Diâmetro mínimo dos poros (μm)	4,06	4,06	4,04	4,06	4,06	4,04	4,06
Diâmetro máximo dos poros (μm)	170,8	121,6	163,05	170,34	120,99	152,11	134,81
Diâmetro médio das conexões (μm)	6,5 \pm 3,4	6,3 \pm 3,1	6,4 \pm 3,1	6,3 \pm 2,8	5,8 \pm 2,5	6 \pm 3,1	5,7 \pm 2,7
Diâmetro mínimo das conexões (μm)	4,06	4,06	4	4,06	4,06	4,04	4,06
Diâmetro máximo das conexões (μm)	163,2	156,2	159,9	154,2	84	199,85	78,74
Número médio de conectividade	3,4 \pm 2,6	3,2 \pm 2,4	3 \pm 2	3,3 \pm 2,4	3,3 \pm 2,72	3 \pm 2,8	2,8 \pm 2,8
Número mínimo de conectividade	1	1	1	1	1	1	1
Número máximo de conectividade	208	104	181	207	161	206	198

Apesar de serem amostras diferentes, com preparações diferentes, os resultados das modelagens dos briquetes e das pelotas mantiveram-se próximos. O único ponto que cabe dar destaque são as quantidades de poros e conexões das amostras Briquete-F14, Pelota-RD2 e Pelota-RD3. Esse resultado é coerente com os resultados de porosidade encontrados dessas três amostras. A quantidade de poros separadamente não interfere diretamente na porosidade, a menos que seja associada a um valor médio de diâmetro dos poros. Por exemplo, se existir apenas um poro com um valor extremamente alto de volume, a porosidade da amostra

também seria alta, entretanto, se existir uma quantidade pequena de poros com um baixo valor médio de volume, a porosidade será baixa.

As distribuições de diâmetro dos poros podem ser vistas na Figura 39.

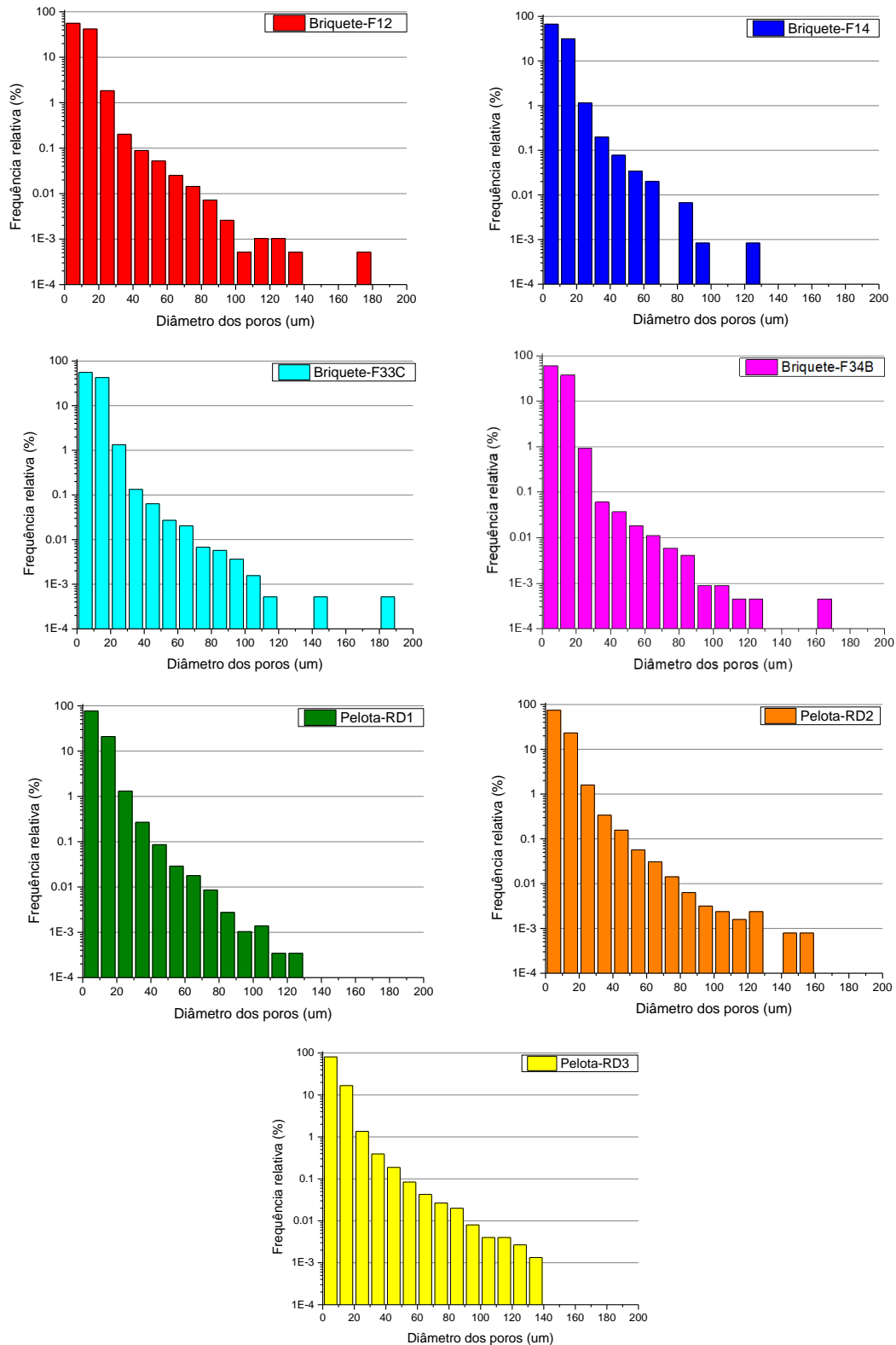


Figura 39 – Gráficos da frequência relativa do diâmetro dos poros.

A distribuição de diâmetro dos poros para todas as amostras foi relativamente parecida para ambos os aglomerados. Existe uma grande quantidade de poros com um valor pequeno de diâmetro. Entretanto, em alguns casos existem alguns poros isolados com um valor alto, são *outliers*. De fato há poros grandes que se isolam do restante dos dados.

A distribuição da conectividade dos poros das amostras de briquete e pelota pode ser visualizada na Figura 40. A maior frequência da conectividade de um poro está no intervalo de 0 a 20. Por outro lado, existe uma pequena quantidade de poros que possuem um alto valor de conectividade.

Por fim, a Figura 41 mostra a distribuição do diâmetro das conexões de todas as amostras. A distribuição da frequência relativa do diâmetro das conexões para todas as amostras é praticamente a mesma. A maior frequência está localizada na região esquerda do histograma, afirmando que a maior parte das conexões possuem diâmetro entre 0 e 20 μm . Através dos resultados citados, não é possível discriminar os diferentes tipos de aglomerados, ou apontar para uma propriedade em que determine uma diferença entre eles. Adiante, serão apresentados e discutidos os resultados referentes à permeabilidade.

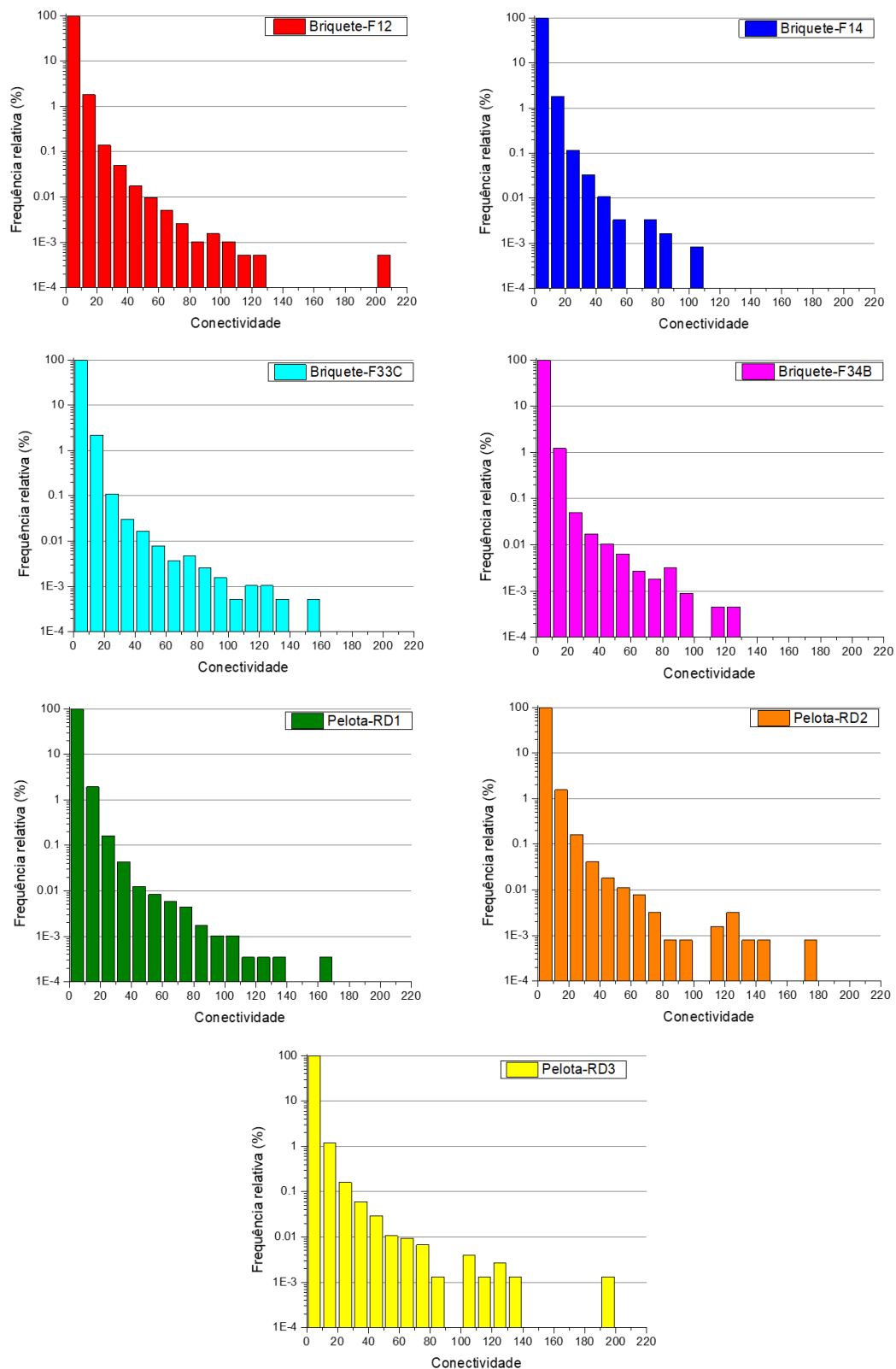


Figura 40 – Gráficos da frequência relativa da conectividade dos poros.

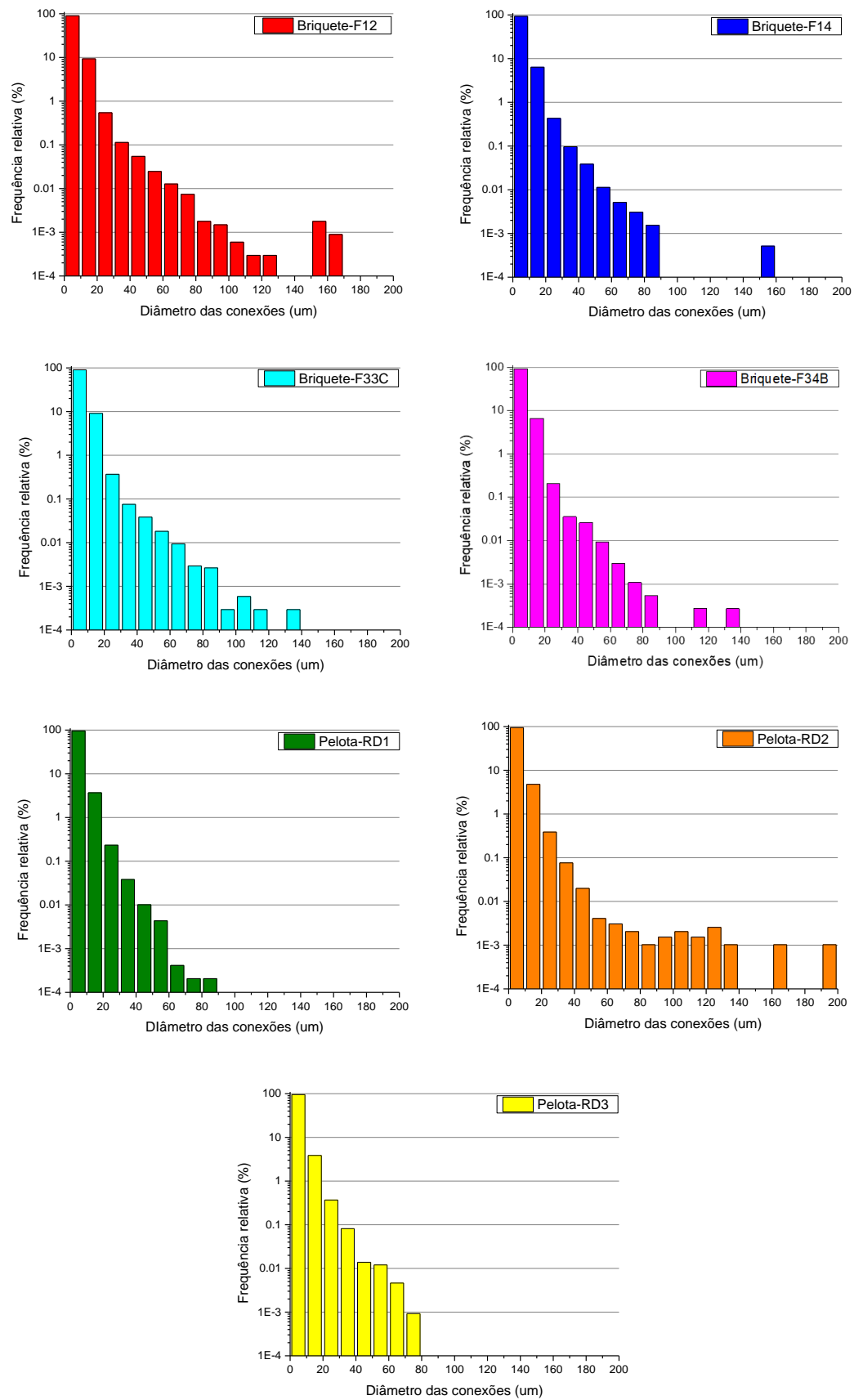


Figura 41 – Gráficos da frequência relativa do diâmetro das conexões.

5.2.3

Permeabilidade absoluta

Os resultados de permeabilidade absoluta das amostras de briquete e pelota, podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados de permeabilidade absoluta das amostras de briquete e pelota.

	Briquete-F12	Briquete-F14	Briquete-F33C	Briquete-F34B	Pelota-RD1	Pelota-RD2	Pelota-RD3
Permeabilidade absoluta (mD)	2,25	0,48	1,39	1,52	1,54	0,34	0,02

Conforme observado nos resultados de permeabilidade absoluta, os briquetes tendem a ser levemente mais permeáveis que as pelotas. A permeabilidade absoluta dos briquetes variou de 0,48 até 2,25 mD, enquanto a das pelotas variou de 0,02 (quase zero) até 1,54 mD. Uma maior diferença dessa propriedade era esperada nas pelotas RD2 e RD3, visto que elas apresentaram menores valores de porosidade. Por outro lado, a pelota RD1 apresentou um valor de permeabilidade superior e mais próximo aos resultados encontrados nos briquetes.

Correlacionando os resultados de permeabilidade com a distribuição da frequência relativa de cada propriedade, não é possível definir ou destacar algo que justifique uma diferença da permeabilidade absoluta dos aglomerados. Observou-se que o parâmetro que mais impactou na variabilidade dos resultados foi a quantidade de poros e conexões. Os aglomerados que apresentaram menor valores de permeabilidade absoluta também apresentaram valores significativamente menores na quantidade de poros e conexões. Entretanto, para os demais (Briquete-F12, F33C, F34B e Pelota-RD1 e RD2) essa propriedade (quantidade de poros e conexões) não foi, separadamente, a justificativa para os resultados de permeabilidade encontrados.

Considerando esses fatos, é possível argumentar que a explicação para a diversidade nos resultados de permeabilidade absoluta pode derivar da distribuição espacial da estrutura dos poros em cada aglomerado. Em outras palavras, embora os aglomerados compartilhem semelhanças em termos de quantidade de poros e conexões, diâmetro médio das conexões e conectividade, a

distribuição da estrutura dos poros, seja ela alta ou baixa, desempenha um papel crucial e direto na determinação do resultado final.

5.3

Análise da variação do limiar de segmentação

A partir dos resultados encontrados na comparação entre os briquetes e as pelotas, viu-se a necessidade de verificar o impacto da variação do limiar utilizado na segmentação dos poros nos resultados de porosidade e permeabilidade das amostras. Além disso, essa análise serviu para verificar melhor as propriedades das amostras Briquete-F14 e Pelota-RD3 que apresentaram resultados inferiores quando comparados com os demais aglomerados.

5.3.1

Porosidade

Com o intuito de verificar a sensibilidade e o impacto da variação do limiar de segmentação nos resultados de permeabilidade absoluta, foram segmentados os poros de quatro amostras com diferentes intervalos de tons de cinza. As que obtiveram o menor valor de permeabilidade (Briquete-F14 e Pelota-RD3) e as que obtiveram maior valor de permeabilidade (Briquete-F12 e Pelota-RD1). Os intervalos adotados para as amostras com menor valor de permeabilidade, podem ser observados na Figura 42.

Após realizar as segmentações dos poros, foi calculado o valor de porosidade total. A Tabela 11 mostra os resultados de porosidade de cada segmentação.

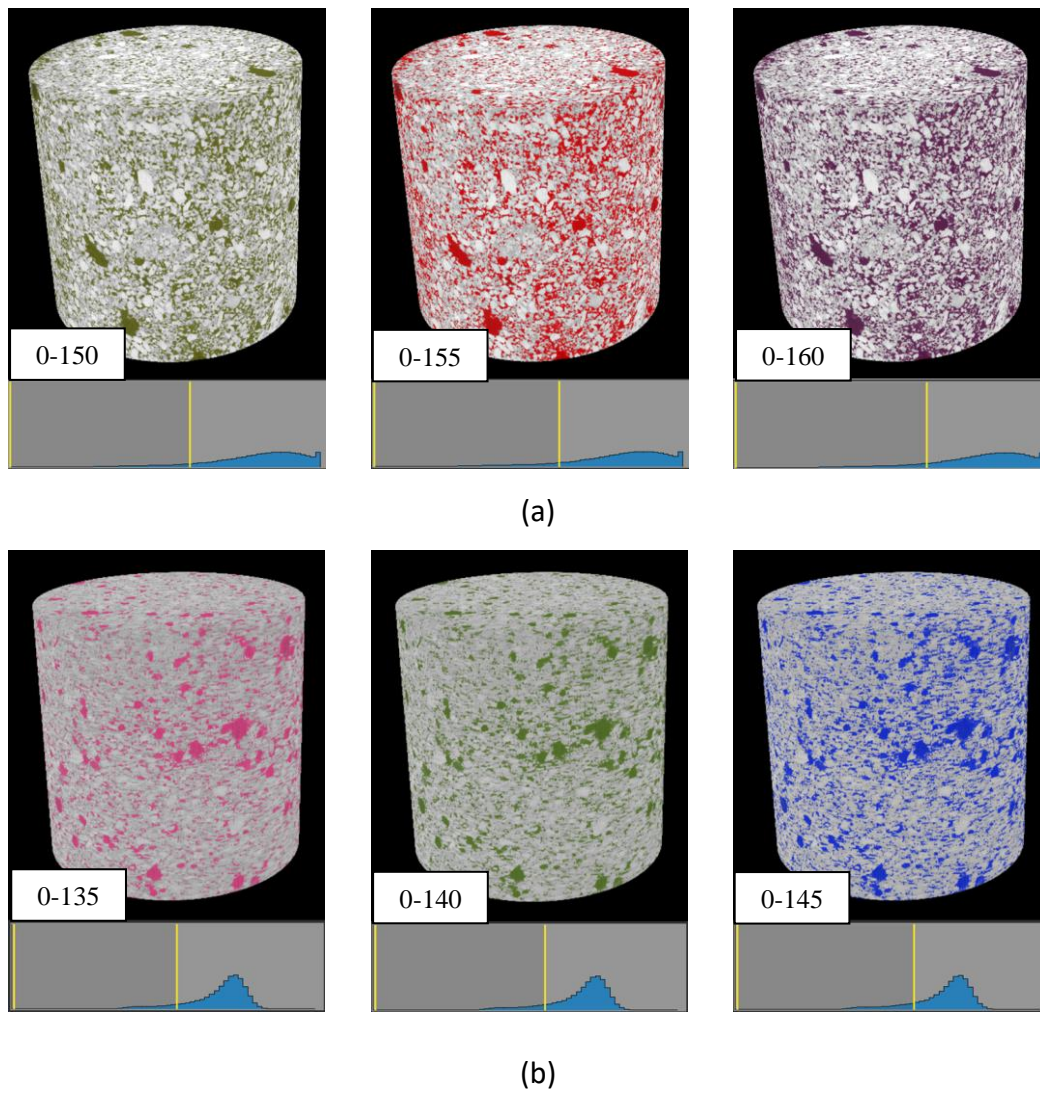


Figura 42 - Intervalo de tons de cinza utilizados na segmentação dos poros. (a) Briquete-F14; (b) Pelota-RD3.

Tabela 11 - Resultados de porosidade para os diferentes intervalos adotados para as amostras (Briquete-F14 e Pelota-RD3).

	Intervalo de tons de cinza	Porosidade
Briquete-F14	0 – 150	11%
	0 – 155	12%
	0 – 160	14%
Pelota-RD3	0 – 135	10%
	0 – 140	12%
	0 – 145	15%

Observando os histogramas da Figura 42 é quase imperceptível visualizar as diferenças nos intervalos, visto que, foi realizada uma variação de ± 5 tons de cinza. Na amostra de Briquete-F14, para essa variação de limiar, a porosidade variou de 11 até 14%. Já na amostra de Pelota-RD3 a variação foi de 10 a 15%.

Os intervalos referentes às amostras com maior valor de permeabilidade (Briquete-F12 e Pelota-RD1), podem ser observados na Figura 43.

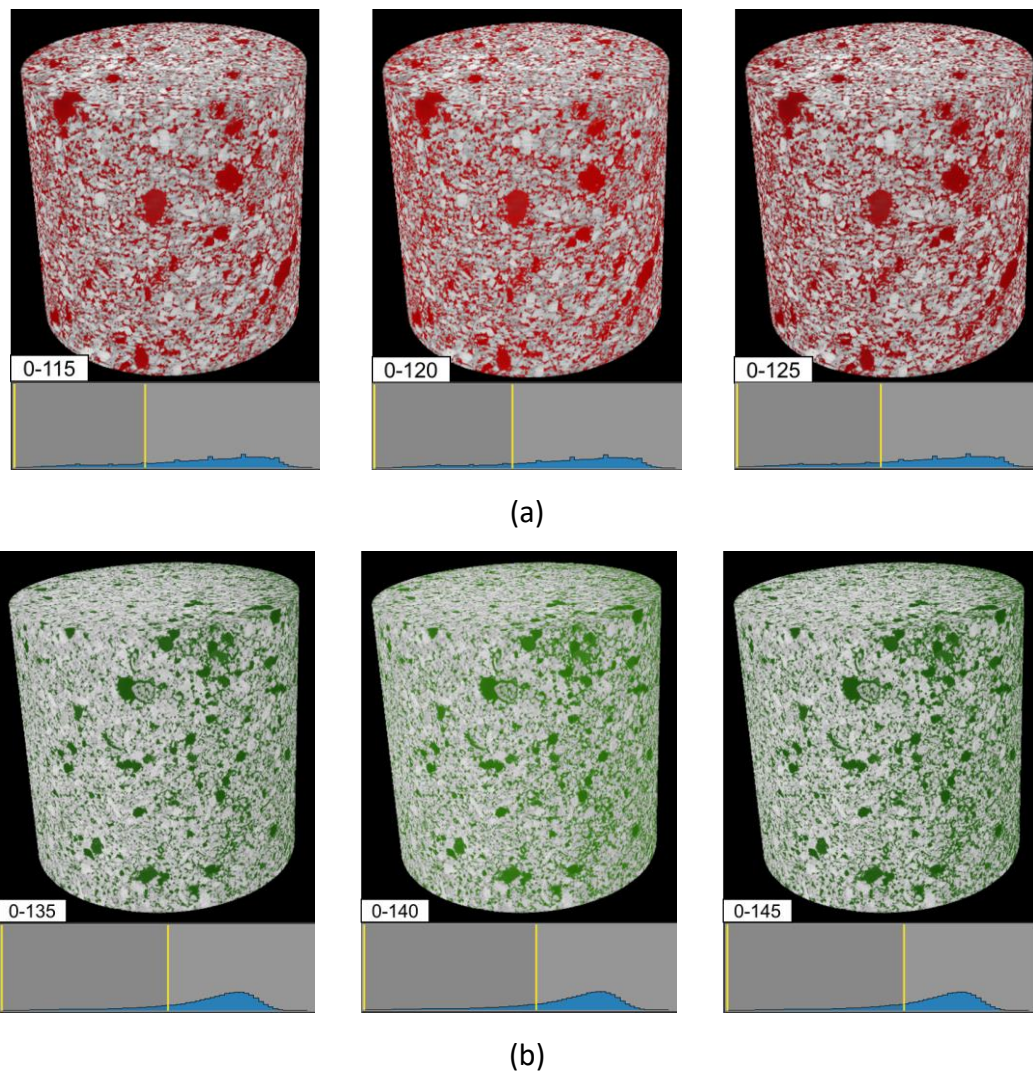


Figura 43 – Intervalos de tons de cinza utilizados nas segmentações dos poros. (a) Briquete-F12; (b) Pelota-RD1.

O cálculo da porosidade dos diferentes limiares aplicados nas amostras Briquete-F12 e Pelota-RD3, pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados de porosidade para os diferentes intervalos adotados para as amostras (Briquete-F14 e Pelota-RD3).

-	Intervalo de tons de cinza	Porosidade
Briquete-F12	0 – 115	20%
	0 – 120	22%
	0 – 125	24%
Pelota-RD1	0 – 135	19%
	0 – 140	21%
	0 – 145	24%

Para a amostra de Briquete-F12, os resultados de porosidade variaram do menor para o maior limiar de 20 a 24%. Enquanto na amostra de Pelota-RD1 a mesma variação foi de 19 a 24%.

Analisando os resultados obtidos, observou-se que o impacto da variação do limiar sobre a porosidade é da ordem de 5 pontos percentuais. Dessa forma, a sensibilidade à variação do limiar utilizado na segmentação, para o cálculo da porosidade, é pequena.

5.3.2 Modelagem da rede porosa

Os resultados da modelagem do Briquete-F14 e Pelota-RD3 encontram-se na Tabela 13 e na Tabela 14, respectivamente.

A amostra de Briquete-F14 apresentou uma variação na quantidade de poros de 55% do intervalo 0-150 para o intervalo 0-160. Na quantidade de conexões a mesma variação foi de 67%.

Assim como na amostra de briquete, na Pelota-RD3 observou-se que a quantidade de poros e conexões também variou significativamente para cada limiar utilizado. Houve uma variação de aproximadamente 410% da quantidade de poros do intervalo 0-135 para o intervalo 0-145. Para a quantidade de conexões, a variação foi de 411% do intervalo 0-135 para o 0-145. Nota-se que a quantidade de poros da rede conectada é muito sensível ao limiar utilizado para realizar a segmentação.

Tabela 13 - Resultados das modelagens dos diferentes limiares do Briquete-F14.

-	Briquete-F14 (0-150)	Briquete-F14 (0-155)	Briquete-F14 (0-160)
Quantidade de poros	93746	119895	145393
Quantidade de conexões	146668	193883	245440
Diâmetro médio dos poros (μm)	$9,8 \pm 3,7$	$9,9 \pm 3,7$	$9,9 \pm 3,6$
Diâmetro mínimo dos poros (μm)	4,06	4,06	4,06
Diâmetro máximo dos poros (μm)	93,36	121,6	161,81
Diâmetro médio das conexões (μm)	$6,3 \pm 3,2$	$6,3 \pm 3,1$	$6,3 \pm 3$
Diâmetro mínimo das conexões (μm)	4,06	4,06	4,06
Diâmetro máximo das conexões (μm)	86,1	156,2	96,8
Número médio de conectividade	$3,1 \pm 2,3$	$3,2 \pm 2,4$	$3,3 \pm 2,5$
Número mínimo de conectividade	1	1	1
Número máximo de conectividade	103	104	94

Tabela 14 - Resultados das modelagens com diferentes limiares da Pelota-RD3.

-	Pelota-RD3 (0-135)	Pelota-RD3 (0-140)	Pelota-RD3 (0-145)
Quantidade de poros	26516	75014	135358
Quantidade de conexões	38672	108103	197625
Diâmetro médio dos poros (μm)	9,1 \pm 4,9	9,1 \pm 4,6	9,1 \pm 4,2
Diâmetro mínimo dos poros (μm)	4,06	4,06	4,06
Diâmetro máximo dos poros (μm)	121,7	134,8	134,8
Diâmetro médio das conexões (μm)	5,8 \pm 2,8	5,7 \pm 2,7	5,7 \pm 2,6
Diâmetro mínimo das conexões (μm)	4,06	4,06	4,06
Diâmetro máximo das conexões (μm)	104,58	78,74	103,55
Número médio de conectividade	2,9 \pm 3	2,8 \pm 2,8	2,9 \pm 2,8
Número mínimo de conectividade	1	1	1
Número máximo de conectividade	170	198	229

Os resultados das modelagens das variações dos limiares do Briquete-F12 e Pelota-RD1 são apresentados na Tabela 14 e na Tabela 16.

Tabela 15 – Resultados das modelagens com diferentes limiares do Briquete-F12.

-	Briquete-F12 (0-115)	Briquete-F12 (0-120)	Briquete-F12 (0-125)
Quantidade de poros	178176	193425	207349
Quantidade de conexões	293705	336283	382409
Diâmetro médio dos poros (μm)	10,6 \pm 4,1	10,7 \pm 4,1	10,9 \pm 4,1
Diâmetro mínimo dos poros (μm)	4,06	4,06	4,06
Diâmetro máximo dos poros (μm)	135,7	170,8	171
Diâmetro médio das conexões (μm)	6,8 \pm 3,7	6,5 \pm 3,4	6,9 \pm 3,6
Diâmetro mínimo das conexões (μm)	4,06	4,06	4,06
Diâmetro máximo das conexões (μm)	176,7	163,2	166,4
Número médio de conectividade	3,2 \pm 2,5	3,4 \pm 2,6	3,6 \pm 2,8
Número mínimo de conectividade	1	1	1
Número máximo de conectividade	125	208	201

Para o Briquete-F12 as variações do número de poros e conexões foram de 16% e 30% para o intervalo (0-115 para 0-125), respectivamente. A maior diferença apresentada foi no número máximo de conectividade do primeiro intervalo de limiar.

Tabela 16 -Resultados das modelagens com diferentes limiares da Pelota-RD1

-	Pelota-RD1 (0-135)	Pelota-RD1 (0-140)	Pelota-RD1 (0-145)
Quantidade de poros	236403	290056	320443
Quantidade de conexões	370663	484352	564746
Diâmetro médio dos poros (μm)	9,2 \pm 3,8	9,3 \pm 3,7	9,4 \pm 3,7
Diâmetro mínimo dos poros (μm)	4,06	4,06	4,06
Diâmetro máximo dos poros (μm)	120,4	120,9	121,3
Diâmetro médio das conexões (μm)	5,7 \pm 2,5	5,8 \pm 2,5	5,8 \pm 2,5
Diâmetro mínimo das conexões (μm)	4,06	4,06	4,06
Diâmetro máximo das conexões (μm)	84	84,1	85,9
Número médio de conectividade	3,1 \pm 2,5	3,3 \pm 2,72	3,5 \pm 2,8
Número mínimo de conectividade	1	1	1
Número máximo de conectividade	151	161	170

A variação percentual da quantidade de poros da Pelota-RD1 foi de 35%. Para a quantidade de conexões o valor foi de 52%. Uma variação parecida com a das amostras anteriores foi observada no restante das propriedades.

As propriedades extraídas das redes apresentaram valores próximos, com exceção do diâmetro máximo das conexões e do número máximo de conectividade. O diâmetro máximo das conexões diminuiu, em algumas amostras, no maior intervalo, provavelmente por conta da nova distribuição do mapa de distâncias durante a segmentação de *watershed*. Como as conexões são geradas depois da criação dos poros a partir do mapa de distâncias, algumas conexões podem ficar com um diâmetro inscrito menor. Esse fator pode também ser a causa da variação do número de conectividade, entretanto, na amostra da Pelota-RD1 não houve esse problema.

5.3.3 Permeabilidade absoluta

O resultado de permeabilidade absoluta para os diferentes intervalos de tons de cinza das amostras Briquete-F14, Pelota-RD3, Briquete-F12 e Pelota-RD1 podem ser observados na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados da permeabilidade absoluta com diferentes limiares.

-	Intervalo de tons de cinza	Permeabilidade absoluta
Briquete-F14	0 – 150	0,29 mD
	0 – 155	0,48 mD
	0 – 160	0,77 mD
Pelota-RD3	0 – 135	0 mD
	0 – 140	0,02 mD
	0 – 145	0,11 mD
Briquete-F12	0 – 115	1,58 mD
	0 – 120	2,25 mD
	0 – 125	2,98 mD
Pelota-RD1	0 – 135	0,83 mD
	0 – 140	1,54 mD
	0 – 145	2,23 mD

O resultado da permeabilidade absoluta do Briquete-F14 apresentou uma variação de 165% entre o menor e o maior limiar. Enquanto isso, a Pelota-RD3 com intervalo entre 0-135 não apresentou resultado de permeabilidade, mas a variação entre o intervalo de 0-140 e 0-145 foi de 450%.

A variação percentual do resultado do Briquete-F12 foi de aproximadamente 88%, enquanto para a Pelota-RD1 o mesmo valor foi de 168%. De maneira geral, é perceptível que a permeabilidade das amostras de Pelota é mais susceptível a variações do limiar utilizado na segmentação dos poros.

Assim, foi constatado que as variações no limiar de segmentação exercem uma influência significativa sobre os resultados da permeabilidade absoluta. Isso pode ser atribuído ao provável aumento na quantidade de poros e conexões. No

entanto, é importante salientar que a permeabilidade absoluta não está unicamente ligada a uma única propriedade. Portanto, é equivocado assumir que um aumento substancial no diâmetro das conexões inevitavelmente resultará em um aumento correspondente na permeabilidade absoluta. Nesse contexto, é plausível afirmar que o resultado da permeabilidade é uma concatenação das várias propriedades identificadas pela modelagem.

Além disso, foi possível constatar que as amostras Briquete-F14 e Pelota-RD3 realmente possuem porosidade e permeabilidade absoluta inferiores quando comparadas com os demais aglomerados analisados neste trabalho. Esse problema pode ser proveniente de alguma etapa do processo de formação desses aglomerados.

6

Conclusão e trabalhos futuros

Com a técnica de micro-CT e a modelagem de rede de poros foi possível visualizar e analisar tridimensionalmente a estrutura da rede poros, levando em consideração suas conexões, sem danificar a amostra e preservando suas características iniciais.

A aquisição com uma resolução espacial de 6 μm mostrou-se inadequada para realizar a caracterização da porosidade e permeabilidade dos briquetes. Para esse tipo de minério, ficou clara a necessidade de obter-se uma melhor resolução espacial para que seja possível resolver melhor os poros e gargantas. A escolha do limiar é um fator determinante para o cálculo da porosidade e permeabilidade, pois a variação do limiar se mostrou muito sensível e acabou variando bastante os resultados.

Levando em consideração as propriedades extraídas da rede de poros, é difícil discriminar os diferentes tipos de aglomerados, visto que ambos possuem comportamentos e propriedades da rede de poros muito parecidos. Como foi possível perceber a partir do diâmetro dos poros e conexões e da conectividade dos poros. Dessa forma, partindo das propriedades extraídas da rede de poros, não há uma justificativa para a diferença no comportamento da permeabilidade dos aglomerados.

Embora os resultados de permeabilidade absoluta não tenham mostrado uma diferença significativa que justifique uma maior eficiência de redução dos briquetes, é importante considerar a estrutura de cada aglomerado e combinar com os resultados encontrados. É possível que as pelotas acabem retendo gases em seus espaços vazios, dificultando a percolação no leito de redução, resultando em uma menor eficiência quando comparado com o briquete.

Todavia, a metodologia desenvolvida nesse trabalho produziu resultados razoáveis e coerentes com relação aos parâmetros abordados, como a resolução do

diâmetro dos poros e porosidade, por exemplo. As técnicas permitiram a visualização da estrutura e distribuição espacial dos poros e conexões, bem como sua conectividade.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se tentar obter aquisições de tomografias em melhores resoluções. Incluir o estudo da influência das trincas da pelota na permeabilidade absoluta, possibilitado pela separação de objetos com diferentes tamanhos e formas. Além disso, medir a porosidade e permeabilidade de forma experimental para comparar com os resultados encontrados na modelagem. Para obter um comportamento mais constante e menos sujeito a erros humanos, realizar uma segmentação dos poros utilizando deep learning. Além disso, realizar uma correlação dos resultados de permeabilidade com a eficiência de redução, modelando aglomerados em diferentes níveis de redutibilidade.

7

Referências

- [1] MITRA, M. K. **Cold briquetting of iron ore fines for DRI production: challenges, possibilities and solutions** Chanchal Biswas ArcelorMittal Nippon Steel India Limited. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/335526526>>.
- [2] BHASKAR, A.; ASSADI, M.; SOMEHSARAEI, H. N. Decarbonization of the iron and steel industry with direct reduction of iron ore with green hydrogen. **Energies**, v. 13, n. 3, p. 1–23, 2020.
- [3] BÉCHARA, R. et al. Optimization of the iron ore direct reduction process through multiscale process modeling. **Materials**, v. 11, n. 7, p. 1–18, 2018.
- [4] MAN-SHENG, C. et al. Fundamental study on carbon composite iron ore hot briquette used as blast furnace burden. **Steel Research International**, v. 82, n. 5, p. 521–528, 2011.
- [5] BAYÃO, D. V. et al. Influência Da Porosidade Na Qualidade De Pelotas De Minério De Ferro. **Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro**, p. 152–164, 2018.
- [6] UMADEVI, T. et al. Influence of Pellet Basicity (CaO / SiO₂) on Iron Ore Pellet Properties and Microstructure. **ISIJ International**, v. 51, n. 1, p. 14–20, 2011.
- [7] ZHOU, M.; XU, J.; ZHOU, H. Evaluating the permeability properties of green bed in iron ore sintering using high resolution X-ray computed tomography and orthogonal array tests. **Powder Technology**, v. 375, p. 360–368, 20 set. 2020.

- [8] SHUNJI, K.; TSUTOMU, N.; TADAHIRO, I. New Analysis Method of Sinter Cake Pore Structure for Permeability Evaluation. **ISIJ International**, v. 34, n. 7, p. 562–569, 1994.
- [9] CHATZIS, I.; D. F. A. L. The Modeling of Mercury Porosimetry and the Relative Permeability of Mercury in Sandstones Using Percolation Theory. **International chemical engineering**, v. 25, n. 1, p. 47–66, 1985.
- [10] GOSTICK, J. T. Versatile and efficient pore network extraction method using marker-based watershed segmentation. **Physical Review E**, v. 96, n. 2, 16 ago. 2017.
- [11] GOSTICK, J. et al. OpenPNM: A Pore Network Modeling Package. **Computing in Science and Engineering**, v. 18, n. 4, p. 60–74, 1 jul. 2016.
- [12] DWARAPUDI, S.; GUPTA, P. K.; RAO, S. M. Prediction of Iron Ore Pellet Strength Using Artificial Neural Network Model. **ISIJ International**, v. 47, n. 1, p. 67–72, 2007.
- [13] OLIVEIRA, L. C. P. **Reaproveitamento do Pó de Aciaria LD gerado no Sistema de Despoeiramento Primário a seco**, Rio de Janeiro, 2016.
- [14] LUZ, A. B. DA; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: [s.n.], v. 5, 2010.
- [15] VINING, K. R.; KHOSA, J.; SPARROW, G. J. Briquetting conditions for australian hematite-goethite iron ore fines. **ISIJ International**, v. 57, n. 9, p. 1517–1523, 2017.
- [16] BATTLE, T. et al. **The Direct Reduction of Iron**. 1. ed. [s.l.] Elsevier Ltd., 2014. v. 3
- [17] WOLFGANG, P. **Agglomeration Processes**. Naples: [s.n.], v. 1, 2002.
- [18] OLIVEIRA, S. J. **Avaliação de briquetes de misturas de finos de minérios de ferro e rejeito de mineração para uso em altos-fornos**. Ouro Preto: [s.n.], 2019.

- [19] DARVELL, B. W. Uniaxial compression tests and the validity of indirect tensile strength. **Journal of Materials Science**, v. 25, p. 757–780, 1990.
- [20] NYSTROM, C.; ALDERBORN, G.; DUBERG, M. Bonding Surface Area and Bonding Mechanism - Two Important Factors for the. **Drug Development and Industrial Pharmacy**, v. 19, p. 2143–2196, 1993.
- [21] VALE. Vale anuncia “briquete verde” que pode reduzir em até 10% as emissões de CO₂ de clientes siderúrgicos. Disponível em: <[https://saladeimprensa.vale.com/pt/w/vale-announces-green-briquette-capable-of-reducing-co2-emissions-of-steelmaking-clients-by-up-to-10->](https://saladeimprensa.vale.com/pt/w/vale-announces-green-briquette-capable-of-reducing-co2-emissions-of-steelmaking-clients-by-up-to-10-). Acesso em: 19 maio. 2023.
- [22] TOSHIO TANAKA, M. **Aglomerados a frio**. [s.l: s.n.].
- [23] MAHI, F. T.; NASSARALLA, C. L. Iron Production. **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**, n. July 2015, p. 1–8, 2016.
- [24] AUGUSTO, K. S.; PACIORNIK, S. Porosity characterization of iron ore pellets by x-ray microtomography. **Materials Research**, v. 21, n. 2, 2018.
- [25] DOS, E. P. et al. **Ajuste automático de histórico em reservatório de petróleo utilizando o método TSVD**. [s.l: s.n.], 2009.
- [26] OLGA MARIA OLIVEIRA DE, A. **Metodologia para análise de rochas por meio digital utilizando microCT e simulações de fluxo de fluidos**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.
- [27] IGNÁCIO, I. R. et al. Porosity, Mineralogy, Strength, and Reducibility of Sinter Analogues from the Fe₂O₃ (Fe₃O₄)-CaO-SiO₂ (FCS) Ternary System. **Minerals**, v. 12, n. 10, 1 out. 2022.
- [28] HARVEY, T. et al. Sinter Strength and Pore Structure Development using Analogue Tests. **ISIJ International**, v. 60, n. 1, p. 73–83, 2020.
- [29] SHATOKHA, V. et al. Iron ore sinter porosity characterisation with application of 3D X-ray tomography. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 37, n. 5, p. 313–319, 1 jul. 2010.

- [30] KLOBES P., MEYER K., M. R. G. Porosity and Specific Surface Area Measurements for Solid Materials. **Nursing**, v. 14, n. 11, p. 89–93, 1984.
- [31] POWNCEBY, M. I.; CLOUT, J. M. F. Importance of fine ore chemical composition and high temperature phase relations: Applications to iron ore sintering and pelletising. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy**, v. 112, 2003.
- [32] IUPAC. **Compendium of Chemical Terminology Gold Book**. 2.3.3 ed. [s.l: s.n.].
- [33] KIRKHAM, M. B. **Principles of soil and plant water relations**. 2. ed. San Diego: [s.n.], 2014.
- [34] RAMANDI, H. L.; MOSTAGHIMI, P.; ARMSTRONG, R. T. Digital rock analysis for accurate prediction of fractured media permeability. **Journal of Hydrology**, v. 554, p. 817–826, 1 nov. 2017.
- [35] SILVA JUNIOR, F. J. **Influência da microestrutura de rochas na variação de sua permeabilidade devido a diferentes trajetórias de tensão**. [s.l: s.n.], 2023.
- [36] ROSA, A. J. **ENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016.
- [37] VENKATARAMANA, R.; GUPTA, S. S.; KAPUR, P. C. A combined model for granule size distribution and cold bed permeability in the wet stage of iron ore sintering process. **Int. J. Miner. Process**, v. 57, p. 43–58, 1999.
- [38] ZHOU, H. et al. Influence of binder dosage on granule structure and packed bed properties in iron ore sintering process. **ISIJ International**, v. 56, n. 11, p. 1920–1928, 2016.
- [39] ELLIS, B. G.; LOO, C. E.; WITCHARD, D. Effect of ore properties on sinter bed permeability and strength. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 34, n. 2, p. 99–108, mar. 2007.
- [40] BRABANT, L. et al. Three-dimensional analysis of high-resolution X-ray computed tomography data with morpho+. **Microscopy and Microanalysis**, v. 17, n. 2, p. 252–263, abr. 2011.

- [41] AUGUSTO, K. S. **Microtomografia Computadorizada de Raios X Aplicada à Caracterização de Porosidade em Pelotas de Minério de Ferro**. [s.l: s.n.], 2016.
- [42] LAMBROS S. ATHANASIOU, D. I. F. L. K. M. **Atherosclerotic Plaque Characterization Methods Based on Coronary Imaging**. 1. ed. [s.l: s.n.]. v. 1, 2017
- [43] MANTOVANI, I. F. **Microtomografia e nanotomografia de raios X aplicada à caracterização multiescalar de sistemas porosos carbonáticos**. [s.l: s.n.], 2013.
- [44] NÓBREGA, D. A. I. **Manual de Tomografia Computadorizada**. 1. ed. [s.l: s.n.]. v. 1, 2007.
- [45] CHAOUKI, B. M.; DJALLEL, H.; NOUREDDINE, D. Integration of Voxel Colouring Technique in the Volumetric Textures Representation Based on Image Layers. **Journal of Computer Science**, v. 2, n. 7, p. 600–606, 1 jul. 2006.
- [46] XIONG, Q.; BAYCHEV, T. G.; JIVKOV, A. P. Review of pore network modelling of porous media: Experimental characterisations, network constructions and applications to reactive transport. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 192, p. 101–117, 1 set. 2016.
- [47] WANG, C. et al. A New Method for Pore Structure Quantification and Pore Network Extraction from SEM Images. **Energy and Fuels**, v. 34, n. 1, p. 82–94, 16 jan. 2020.
- [48] SILIN, D.; PATZEK, T. Pore space morphology analysis using maximal inscribed spheres. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 371, n. 2, p. 336–360, 15 nov. 2006.
- [49] DONG, H.; BLUNT, M. J. Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images. **Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, v. 80, n. 3, 14 set. 2009.
- [50] AL-KHARUSI, A. S.; BLUNT, M. J. Network extraction from sandstone and carbonate pore space images. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 56, n. 4, p. 219–231, abr. 2007.

- [51] SOK, R.; AVERDUNK, H. Improved Pore Network Extraction Methods. **International Symposium of the Society of Core Analysis**, 2015.
- [52] THOMPSON, K. E.; WILLSON, C. S.; WHITE, C. D. Application of a New Grain-Based Reconstruction Algorithm to Microtomography Images for Quantitative Characterization and Flow Modeling. **SPE Journal**, 2008.
- [53] SHEPPARD, A. P. et al. ANALYSIS OF ROCK MICROSTRUCTURE USING HIGH-RESOLUTION X-RAY TOMOGRAPHY. **International Symposium of the Society of Core Analysis**, 2006.
- [54] RABBANI, A.; JAMSHIDI, S.; SALEHI, S. An automated simple algorithm for realistic pore network extraction from micro-tomography images. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 123, p. 164–171, 1 nov. 2014.
- [55] AGAESSE, T. et al. Validation of pore network simulations of ex-situ water distributions in a gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cells with X-ray tomographic images. **Journal of Power Sources**, v. 331, p. 462–474, 1 nov. 2016.
- [56] BHATTAD, P.; WILLSON, C. S.; THOMPSON, K. E. Effect of Network Structure on Characterization and Flow Modeling Using X-ray Micro-Tomography Images of Granular and Fibrous Porous Media. **Transport in Porous Media**, v. 90, n. 2, p. 363–391, nov. 2011.
- [57] PIERRE, S. **Morphological Image Analysis**. 2. ed. Soille: [s.n.], 2003.
- [58] GERKE, K. M. et al. Improving watershed-based pore-network extraction method using maximum inscribed ball pore-body positioning. **Advances in Water Resources**, v. 140, 1 jun. 2020.
- [59] ARAND, F.; HESSER, J. Accurate and efficient maximal ball algorithm for pore network extraction. **Computers and Geosciences**, v. 101, p. 28–37, 1 abr. 2017.
- [60] YI, Z. et al. Pore network extraction from pore space images of various porous media systems. **Water Resources Research**, v. 53, n. 4, p. 3424–3445, 1 abr. 2017.

- [61] RAEINI, A. Q.; BIJELJIC, B.; BLUNT, M. J. Generalized network modeling: Network extraction as a coarse-scale discretization of the void space of porous media. **Physical Review E**, v. 96, n. 1, 20 jul. 2017.
- [62] PATZEK, T. W.; SILIN, D. B. Shape factor and hydraulic conductance in noncircular capillaries: I. One-phase creeping flow. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 236, n. 2, p. 295–304, 15 abr. 2001.
- [63] “Object Research Systems (ORS) Inc, Montreal, Canadá”, <http://www.theobjects.com/dragonfly>, 2020.
- [64] D. ABRÀMOFF, M.; MAGALHÃES, P. J.; RAM, S. J. Image_Processing_with_ImageJ. **Biophotonics International**, 2004.
- [65] BUADES, A.; COLL, B.; MOREL, J.-M. Non-Local Means Denoising. **Image Processing**, v. 1, p. 208–212, 13 set. 2011.