



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES

DAIANE FRANCISCA DO NASCIMENTO SILVA

**AVALIAÇÃO DA POROSIDADE E COLMATAÇÃO DE CAMADAS FILTRANTES
VIA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X E FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL**

Recife

2024

DAIANE FRANCISCA DO NASCIMENTO SILVA

**AVALIAÇÃO DA POROSIDADE E COLMATAÇÃO DE CAMADAS FILTRANTES
VIA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X E FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de mestre em Ciências. Área de concentração: Aplicações de Radioisótopos na Agricultura e Meio-Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Milian Pérez

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Silva, Daiane Francisca do Nascimento.

Avaliação da porosidade e colmatação de camadas filtrantes via tomografia computadorizada de raios X e fluidodinâmica computacional / Daiane Francisca do Nascimento Silva. - Recife, 2024.

120 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologias e Geociências, Programa de Pós Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2024.

Orientação: Antonio Celso Dantas Antonino.

Coorientação: Daniel Milian Pérez.

1. Filtração em meios porosos; 2. Modelos físicos de simulação; 3. Ansys CFX; 4. Porosimetria por injeção de fluidos; 5. Colunas de percolação; 6. Sensibilidade de parâmetros de simulação. I. Antonino, Antonio Celso Dantas - Orientação. II. Milian Pérez, Daniel - Coorientação. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CDD 541.38

DAIANE FRANCISCA DO NASCIMENTO SILVA

**AVALIAÇÃO DA POROSIDADE E COLMATAÇÃO DE CAMADAS FILTRANTES
VIA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X E FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de concentração: Aplicações de Radioisótopos na Agricultura e Meio-Ambiente.

Aprovado em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Daniel Milian Pérez (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Dr. Allan de Almeida Albuquerque
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Dr. Abel Gámez Rodríguez
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Dra. Manuella Virginia Salgueiro Gondim
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

À minha mãe, por sua batalha incessante para me proporcionar tudo aquilo que lhe foi negado.

AGRADECIMENTOS

Durante meu trajeto encontrei pessoas incríveis que me ajudaram a ser quem sou hoje. Agradeço aos amigos que fiz durante a graduação por me darem motivação para finalizar o curso. Aos professores que me incentivaram a seguir a carreira acadêmica, em especial Me. Jardiene Azevedo, Dr^a. Ana Alice Agostinho, Dr^a. Kamylla Alexandre, Dr. Alexsandro Santos (*in memoriam*), Dr^a. Verônica, Esp. Marcos Gouveia e Dr. Nilson Medeiros.

Agradecimentos mais que especiais ao Dr. Nilson Medeiros e ao Dr. Marcio Paixão, por me guiar no ingresso do mestrado. Ao meu orientador e coorientador, Dr. Antonio Antonino e Dr. Daniel Perez, pelo magnífico papel desempenhado. Ao futuro mestre João Victor Félix, por ter me ajudado a desenvolver a ferramenta que possibilitou a extração dos dados referentes à simulação. Ao Me. Daniel Duarte e Dr. Fernando Oliveira - não o Pessoa -, por me ensinaram que trabalho acadêmico não é feito por uma pessoa só.

E como nem tudo são flores, agradeço ao meu *backstage* de suporte emocional (tiveram bastante trabalho!), pelos momentos em que ouviram minhas apreensões e por me darem atenção quando tudo que eu fazia era reclamar - e chorar-. São tantas pessoas que não caberiam nessas poucas linhas de agradecimento, mas que as guardo em minha memória com muito respeito e gratidão.

Finalizo esta seção reconhecendo todos os esforços da minha mãezinha, Dona Lucinalva - Navinha para os mais íntimos -, sendo a única pessoa que sempre acreditou no meu potencial, e a quem dedico todo e qualquer trabalho que fiz, faço e farei em toda minha existência. Mainha com sua frase “a riqueza do pobre é o estudo” me fez desenvolver um apreço enorme pela trajetória acadêmica. Me apropriou por inteiro do clichê ao dizer que nenhuma outra pessoa se encaixaria tão perfeitamente no papel de ser minha mãe, pois ela soube me educar sem podar minhas asas, alimentou meus sonhos e, por mais que tenha doído muito, me deixou voar quando foi preciso.

"A educação tem sentido porque mulheres e homens aprenderam que é aprendendo que se fazem e refazem, porque mulheres e homens se puderam assumir como seres capazes de saber."

(Freire, 2000)

RESUMO

A filtração de águas residuais para reúso é uma prática aplicada para a conservação dos recursos hídricos. Contudo, sua eficácia está diretamente relacionada à permeabilidade do filtro, que pode ser comprometida pelos processos de colmatação devido à retenção de partículas suspensas. Este estudo investiga a colmatação da estrutura porosa de camadas filtrantes. Para avaliar a porosidade, empregou-se técnicas de porosimetria por injeção de fluidos e μ TC-RX. As porosidades entre as diferentes técnicas foram correlatas, apresentando desvio padrão abaixo de 1,5%. Os processos de colmatação e a sensibilidade do mesmo aos parâmetros de velocidade, tamanho, rugosidade e taxa de partícula foram estudados a partir de simulações de fluidodinâmica computacional (CFD) utilizando partículas de zircônia. Os resultados indicaram a necessidade de intervalos de fluxo entre 24 e 50 horas para reduções de porosidade acima de 1% nos meios porosos estudados, além de evidenciarem caminhos prioritários e pontos de maior deposição ao longo das amostras, e alta sensibilidade quanto a variação dos parâmetros de simulação de tamanho, velocidade e taxa de partículas. A variação do parâmetro de rugosidade da partícula apresentou baixa sensibilidade. A diferença relativa entre o modelo de simulação utilizado nesta pesquisa (*one way*) e o mais acurado (*fully coupled*) foi de 8%, sugerindo que o modelo *one way* oferece uma boa aproximação para estes casos de colmatação com menor custo computacional.

Palavras-chave: Filtração em meios porosos; Modelos físicos de simulação; Ansys CFX; Porosimetria por injeção de fluidos; Colunas de percolação; Sensibilidade de parâmetros de simulação.

ABSTRACT

The filtration of wastewater for reuse is a practice applied for the conservation of water resources. However, its effectiveness is directly related to the permeability of the filter, which can be compromised by clogging processes due to the retention of suspended particles. This study investigates the clogging of the porous structure of filter layers. To evaluate porosity, fluid injection porosimetry and μ CT-XR techniques were employed. The porosities between the different techniques were correlated, presenting a standard deviation below 1.5%. The clogging processes and their sensitivity to parameters such as velocity, size, roughness, and particle rate were studied using computational fluid dynamics (CFD) simulations with zirconia particles. The results indicated the necessity of flow intervals between 24 and 50 hours for porosity reductions above 1% in the studied porous media. Additionally, they evidenced preferential paths and points of higher deposition along the samples, as well as high sensitivity to variations in simulation parameters of particle size, velocity, and rate. The variation in the particle roughness parameter showed low sensitivity. The relative difference between the simulation model used in this research (one-way) and the more accurate model (fully coupled) was 8%, suggesting that the one-way model offers a good approximation for these clogging cases with lower computational cost.

Keywords: Filtration in porous media; Physical simulation models; Ansys CFX; Fluid injection porosimetry; Percolation columns; Simulation parameter sensitivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Indicação da matriz porosa, poros interconectados e poro isolado.....	23
Figura 2 - Ilustração de amostras porosas com (a) alta, (b) baixa porosidade.....	25
Figura 3 - Representação esquemática de um tubo de raios X.....	28
Figura 4 - Representação esquemática do escaneamento de amostras em microtomógrafo de raios x.....	28
Figura 5 - Configuração de filtro doméstico de areia de filtragem lenta.....	32
Figura 6 - Transporte de partículas em meios porosos saturados.....	35
Figura 7 - Filtração de partículas por meios porosos.....	37
Figura 8 - Mecanismos de filtração de partículas suspensas em fluídos por meio poroso.....	38
Figura 9 - Retenção de partículas por camada filtrante ao longo do tempo.....	39
Figura 10 - Componentes do protótipo de de coluna de percolação de baixo custo.	45
Figura 11 - Conector união (A) e suas peças (B,C e D).....	46
Figura 12 - Disco de Nylon com conector central (a) e substituição da peça C (Figura 18) pelo disco de Nylon (b).....	46
Figura 13 - Disco de PVC com perfurações (a) e disposição do disco entre tubos de acrílico e conectores (b).....	47
Figura 14 - Dimensões dos discos de Nylon (a) e PVC (b) em mm.....	47
Figura 15 - Esquematização dos ensaios de fluxo hidráulico.....	48
Figura 16- Esquematização dos ensaios de carga hidráulica.....	49
Figura 17 - Colunas de referência.....	50
Figura 18 - Colunas de referência com fitas adesivas nas extremidades.....	52
Figura 19 - Vedação de uma das extremidades da coluna para ensaio de porosimetria direta.....	53
Figura 20 - Saturação da amostra para ensaio de porosimetria direta.....	54
Figura 21 - Saturação da amostra para ensaio de gravimetria.....	55
Figura 22 - Saturação da amostra para ensaio de porosimetria indireta.....	56
Figura 23 - Porosímetro a gás hélio DCI Test System.....	57

Figura 24 - Diagrama esquemático de um porosímetro a gás Hélio.....	58
Figura 25 - Percentual de porosidade, o volume de poros e volume total da amostra gerados pelo programa do DCI Test System.....	58
Figura 26 - Tomógrafo de Raios X, modelo XT H 225 ST da Empresa Nikon Metrology.....	59
Figura 27 - Recorte do volume de interesse do volume total da amostra.....	60
Figura 28 - Representação de corpo sólido da coluna de pérolas de vidro (a) e região fluida (b) após operação de subtração booleana.....	62
Figura 29 - Taxa de saída de partículas do domínio computacional através das malhas estudadas.....	64
Figura 30 - Seção transversal das estruturas da malha interna.....	64
Figura 31 - Modelo computacional em Ansys CFX.....	66
Figura 32 - Desprendimento do conector inferior do protótipo CF2_3mm decorrente do vazamento apresentado durante ensaio de carga hidráulica.....	72
Figura 33 - Variações das ϕ (%) das colunas de referência.....	73
Figura 34 - Comparação dos modelos físicos na amostra CF4_3mm.....	77
Figura 35 - Comparação dos modelos físicos na amostra CF7_4mm.....	78
Figura 36 - Comparação dos modelos físicos na amostra CF10_M.....	79
Figura 37 - Velocidade do fluido e caminhos preferenciais percorridos pelas partículas (a), fração volumétrica de partículas na superfície das esferas de vidro (b) e distribuição de pressão (c) ao longo da amostra CF4_3mm.....	80
Figura 38 - Velocidade do fluido e caminhos preferenciais percorridos pelas partículas (a), fração volumétrica de partículas na superfície das esferas de vidro (b) e distribuição de pressão (c) ao longo da amostra CF7_4mm.....	81
Figura 39 - Velocidade do fluido e caminhos preferenciais percorridos pelas partículas (a), fração volumétrica de partículas na superfície das esferas de vidro (b) e distribuição de pressão (c) ao longo da amostra CF10_M.....	82
Figura 40 - Partículas retidas por coluna estudada.....	83
Figura 41 - Estimativa de redução percentual de porosidade das amostras por tempo sob fluxo contínuo.....	84
Figura 42 - Partículas retidas na CF4_3mm em função da variação do tamanho das	

partículas.....	85
Figura 43 - Partículas retidas na CF7_4mm em função da variação do tamanho das partículas.....	86
Figura 44 - Partículas retidas na CF10_M em função da variação do tamanho das partículas.....	87
Figura 45 - Partículas retidas na CF4_3mm em função da variação da velocidade das partículas.....	89
Figura 46 - Partículas retidas na CF7_4mm em função da variação da velocidade das partículas.....	90
Figura 47 - Partículas retidas na CF10_M em função da variação da velocidade das partículas.....	91
Figura 48 - Partículas retidas na CF4_3mm em função da variação da rugosidade das partículas.....	93
Figura 49 - Partículas retidas na CF7_4mm em função da variação da rugosidade das partículas.....	93
Figura 50 - Partículas retidas na CF10_M em função da variação da rugosidade das partículas.....	94
Figura 51 - Partículas retidas na CF4_3mm em função da variação da taxa de partículas.....	96
Figura 52 - Partículas retidas na CF7_4mm em função da variação da taxa de partículas.....	96
Figura 53 - Partículas retidas na CF10_M em função da variação da taxa de partículas.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões dos cilindros de acrílico das colunas de referência.....	50
Tabela 2 - Principais características das malhas estudadas.....	63
Tabela 3 - Porosidades das colunas de referência.....	73
Tabela 4 - Porosidade média das triplicatas.....	74
Tabela 5 - Desvio padrão da porosidades das triplicatas.....	75
Tabela 6 - Coeficiente de determinação (r^2) entre as técnicas de porosimetria por injeção de fluido e μ TC-RX.....	76
Tabela 7 - Porosidade das amostras após a simulação, com base na contagem de partículas retidas.....	83
Tabela 8 - Partículas retidas a cada 100 passos de tempo.....	83
Tabela 9 - Estimativa de porosidade das amostras após 14.400 passos de tempo..	84
Tabela 10 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) da variação dos tamanhos das partículas na amostra CF4_3mm, em função do tamanho padrão de 10 μ m.....	86
Tabela 11 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação dos tamanhos das partículas na amostra CF7_4mm, em função do tamanho padrão de 10 μ m.....	87
Tabela 12 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação dos tamanhos das partículas na amostra CF10_M, em função do tamanho padrão de 10 μ m.....	88
Tabela 13 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da velocidade das partículas na amostra CF4_3mm, em função do tamanho padrão de 1mm/s.....	90
Tabela 14 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da velocidade das partículas na amostra CF7_4mm, em função	

do tamanho padrão de 1mm/s.....	91
Tabela 15 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da velocidade das partículas na amostra CF10_M, em função do tamanho padrão de 1mm/s.....	92
Tabela 16 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da rugosidade das partículas na amostra CF4_3mm, em função da rugosidade padrão de $0\mu\text{m}$	94
Tabela 17 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da rugosidade das partículas na amostra CF7_4mm, em função da rugosidade padrão de $0\mu\text{m}$	95
Tabela 18 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da rugosidade das partículas na amostra CF10_M, em função da rugosidade padrão de $0\mu\text{m}$	95
Tabela 19 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da taxa de partículas e a taxa de partículas padrão (2×10^4) na amostra CF4_3mm.....	97
Tabela 20 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da taxa de partículas e a taxa de partículas padrão (2×10^4) na amostra CF7_4mm.....	97
Tabela 21 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da taxa de partículas e a taxa de partículas padrão (2×10^4) na amostra CF10_4mm.....	98

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.5 OBJETIVOS.....	21
1.5.1 Objetivo geral.....	21
1.5.2 Objetivos específicos.....	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 DEFINIÇÕES E APLICAÇÕES DE MEIOS POROSOS.....	23
2.1.1 Meios porosos.....	23
2.1.2 Porosidade.....	24
2.1.2.1 Técnicas de porosimetria.....	26
2.1.2.1.1 <i>Porosimetria utilizando volumetria de fluidos.....</i>	<i>26</i>
2.1.2.1.2 <i>Porosimetria por Microtomografia Computadorizada de Raios X (μTC-RX)...</i>	<i>27</i>
2.1.3 Permeabilidade.....	30
2.1.4 Camadas filtrantes.....	31
2.2 TRANSPORTE DE ÁGUA E PARTÍCULAS EM MEIOS POROSOS.....	33
2.2.1 Filtração de partículas suspensas e colmatção dos poros.....	37
2.3 SIMULAÇÕES DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL E SUAS APLICAÇÕES AO ESTUDO DE MEIOS POROSOS.....	40
2.3.1 Simulações de fluidodinâmica computacional.....	40
2.3.2 Estudo de meios porosos a partir de simulações CFD.....	41
3 METODOLOGIA.....	44
3.1 DESENVOLVIMENTO DAS COLUNAS DE PERCOLAÇÃO DE BAIXO CUSTO.....	44
3.1.1 Montagem.....	44
3.1.2 Avaliação dos protótipos.....	48
3.1.3 Construção das colunas de referência.....	49
3.2 AVALIAÇÃO DA POROSIDADE DAS COLUNAS.....	51
3.2.1 Método de porosimetria direta.....	53
3.2.2 Método gravimétrico.....	54

3.2.3 Método de porosimetria indireta.....	55
3.2.4 Porosimetria a gás.....	56
3.2.5 Microtomografia Computadorizada de Raios X (μTC-RX).....	59
3.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL COM FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.	
61	
3.3.1 Modelo geométrico.....	61
3.3.2 Geração da malha e estudo de independência.....	62
3.4 SIMULAÇÕES DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.....	65
3.4.1 Avaliação da colmatação: condições de contorno e parâmetros de solução para avaliação da colmatação.....	65
3.4.2 Estudo de sensibilidade.....	68
3.4.3 Estudo dos modelos físicos.....	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
4.1 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS PROTÓTIPOS DE COLUNAS DE PERCOLAÇÃO.....	71
4.2 AVALIAÇÃO DA POROSIDADE DAS COLUNAS.....	72
4.3 SIMULAÇÕES DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.....	76
4.3.1 Estudo dos modelos físicos.....	77
4.3.2 Avaliação da colmatação dos poros das colunas de percolação.....	79
4.3.3 Estudos de sensibilidade.....	85
4.3.3.1 Tamanho da partícula.....	85
4.3.3.2 Velocidade da partícula.....	89
4.3.3.3 Rugosidade da partícula.....	93
4.3.3.4 Taxa de partículas.....	95
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
6 PROPOSTA DE PESQUISAS FUTURAS.....	101
REFERÊNCIAS.....	103

1 INTRODUÇÃO

Diante das mudanças climáticas evidentes, do aumento populacional e, conseqüentemente, da urbanização desenfreada, a gestão sustentável dos recursos hídricos tem sido um grande desafio (Tseklevs *et al.*, 2021; Hu, 2020). Estudos recentes evidenciam o aumento do uso da água em consequência das mudanças climáticas (Muzammil *et al.*, 2023), associada a constante degradação dos recursos hídricos em decorrência do crescimento urbano (Warsame *et al.*, 2023; Hu, 2020).

A conservação da água não é apenas essencial quando tratada no âmbito da saúde pública, mas também se faz imprescindível no cultivo de alimentos, garantindo a segurança alimentar e os direitos humanos (Tseklevs *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022b), visto que o artigo 5º da Constituição Federal Brasileira de 1988 afirma que todos os cidadãos têm direito à vida (Brasil, 1988).

Em decorrência do atual cenário global de crescimento populacional, a disponibilidade e qualidade da água têm sido afetadas, requerendo a reutilização de águas residuárias para garantir a continuidade do seu fornecimento, seja na esfera urbana ou rural, a fim de reduzir a pressão sobre os recursos hídricos existentes e atender à crescente demanda por água (Hu, 2020; Tseklevs *et al.*, 2021). Nesse contexto, a reutilização de águas residuais apresenta a vantagem de evitar custos com seu transporte (Leigh; Lee, 2019).

As águas residuárias podem ser divididas em duas classes: águas negras e águas cinzas. As águas negras são aquelas provenientes de banheiros podendo apresentar contaminação por coliformes fecais, enquanto as residuais classificadas como cinzas são provenientes das demais atividades domésticas (Van de Walle *et al.*, 2023). Teoricamente, por conta da baixa presença de contaminantes fecais, cerca de 50% a 80% de toda água cinza produzida em países em desenvolvimento podem ser reutilizadas quando devidamente tratadas (Noutsopoulos *et al.*, 2018; Van de Walle *et al.*, 2023).

Para o reúso de água residuárias, a mesma pode ser tratada pelo processo de filtração dessas partículas (Mahmoudi *et al.*, 2021). Os processos de filtração podem ser definidos como todo e qualquer mecanismo que efetue a remoção de partículas suspensas em um fluido, quando o mesmo atravessa um meio poroso (Song, *et al.*, 2023). A técnica pode ser aplicada a diversas atividades que variam

desde a remoção de partículas do ar até mesmo a tecnologias de prevenção e remediação da contaminação de recursos hídricos, tanto subterrâneos quanto superficiais (Raouf *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2022b).

Embora seja um método simples e eficaz para remover simultaneamente contaminantes em solução e em suspensão, o processo de filtração de contaminantes em solução pode ser prejudicado pela colmatação dos poros da camada, uma vez que a redução da permeabilidade impede que o contaminantes cheguem ao sítio ativo (Endo Kokubun *et al.*, 2019; Parvan *et al.*, 2021). Sendo assim, para analisar as alterações na estrutura física dos poros em camadas filtrantes decorridas dos processos de colmatação, Wantanaphong *et al.* (2006) e Medawela *et al.* (2022) destacam a necessidade de aplicar técnicas não destrutivas de porosimetria para monitoramento.

Neste contexto, a microtomografia de raios X (μ TC-RX) é uma técnica não destrutiva que permite visualizar e quantificar a estrutura interna de amostras em alta resolução (Burch, 2002; Rouquerol *et al.*, 2011; Vaz *et al.*, 2014), sendo capaz de fornecer informações precisas sobre a geometria, tamanho, distribuição e conectividade dos poros presentes na amostra (Burch, 2002; Rouquerol *et al.*, 2011). Sendo uma técnica capaz de representar o volume 3D da amostra, a metodologia também possibilita a aplicação de simulações de fluidodinâmica computacional (CFD, do inglês *computational fluid dynamics*) ao estudo dos processos de transporte e retenção de partículas na estrutura porosa.

A investigação desses processos é essencial devido à sua ampla aplicação em áreas como tratamento de água. Compreender a movimentação das partículas através de meios porosos é fundamental para garantir a qualidade da água, gerenciar os recursos hídricos, otimizar processos industriais e prevenir a contaminação do solo.

Nesse contexto, as simulações de CFD desempenham um papel crucial na análise dos processos de transporte e retenção de partículas em meios porosos (Tu, *et al.*, 2013). Essas simulações permitem uma análise minuciosa do comportamento do fluido e das partículas, levando em conta variáveis como velocidade do fluxo e geometria do meio poroso (Tu, *et al.*, 2013; Afzali, *et al.*, 2022; Li; Wang; Chen, 2023). Ao oferecer *insights* sobre padrões de fluxo e interações microscópicas na retenção de partículas em meios porosos, contribuem para otimizar projetos de engenharia, estratégias de remediação e aprimoramento de processos industriais,

resultando em avanços significativos em pesquisa e desenvolvimento (Tu, et al., 2013; Afzali, et al., 2022; Li, et al., 2023; Elrahmani, et al., 2023).

Observada a importância da porosidade e permeabilidade para a eficiência do processo de filtração de partículas suspensas, o presente trabalho se propõe a estudar, através da combinação de simulações de fluidodinâmica computacional (CFD) com técnicas de Microtomografia Computadorizada de Raios X (μ TC-RX) e porosimetria por injeção de fluidos (porosimetria indireta, direta, gravimetria e porosimetria a gás), buscando avaliar a capacidade de retenção de partículas suspensas ao longo do tempo.

Este trabalho se faz necessário para aprofundar os conhecimentos sobre a viabilidade da implementação de simulações de CFD no estudo de retenção de partículas em meios porosos, um campo que ainda possui lacunas na literatura, cujo trabalho mais recente publicado foi o estudo da deposição de partículas de zircônia em pérolas de vidro utilizando CFD realizado por Sadeghnejad *et al.* (2022).

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo geral

Estudar os processos de colmatação de camadas filtrantes utilizadas para a retenção de partículas suspensas em fluidos, visando a compreensão do comportamento das partículas em relação ao fluxo e à matriz porosa.

1.5.2 Objetivos específicos

- Desenvolver protótipos de coluna de percolação de baixo custo.
- Caracterizar o meio poroso dos protótipos de coluna de percolação de baixo custo por μ TC-RX.
- Comparar as técnicas de porosimetria tradicionais com os resultados da μ TC-RX, para aplicação em trabalhos futuros na avaliação da evolução de camadas filtrantes contendo barreiras reativas permeáveis.
- Desenvolver um modelo CAD da coluna de percolação de baixo custo utilizando as imagens da μ TC-RX.
- Desenvolver um modelo computacional da coluna de percolação de baixo custo para simulação com Ansys CFX.
- Avaliar a colmatação dos poros da coluna de percolação de baixo custo por deposição e retenção de partículas suspensas a partir de simulações CFD.

- Realizar estudos de sensibilidade para avaliar os efeitos de parâmetros de interesse na simulação do entupimento do meio poroso, como a velocidade da suspensão e o tamanho da partícula.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta uma análise dos temas centrais que constituem a base deste trabalho. Inicialmente, é oferecido um panorama teórico sucinto, seguido de uma revisão bibliográfica detalhada. Este levantamento teórico-bibliográfico abrange desde a definição de meio poroso até o transporte de água e partículas nesses meios, culminando na exploração das aplicações de métodos de simulação de fluidodinâmica computacional (CFD) e suas correlações no estudo dessas camadas porosas.

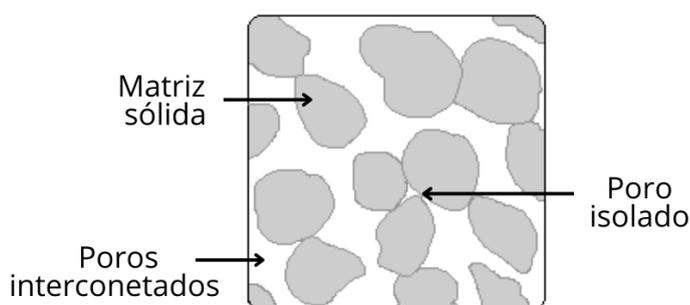
A relevância desta seção vai além da simples contextualização, se revelando fundamental para que os leitores adentrem nos processos subjacentes à problemática abordada nesta pesquisa. Além disso, proporciona um enquadramento das principais aplicações das ferramentas e metodologias adotadas neste estudo, contrastante com as pesquisas atuais.

2.1 DEFINIÇÕES E APLICAÇÕES DE MEIOS POROSOS

2.1.1 Meios porosos

Na literatura, meio poroso é definido como um material sólido que contém espaços vazios interconectados ou isolados (Heinemann; Mittermeir, 2013). A parte sólida é denominada de matriz, enquanto a região fluida é denominada de região poros. Os poros geralmente encontram-se preenchidos por fluidos, que podem permear livremente entre os poros interconectados. A região que não apresenta conectividade representa o poro isolado, caracterizado pela ausência de fluidez em seu interior, (Bear, 1988; Heinemann; Mittermeir, 2013).

Figura 1 - Indicação da matriz porosa, poros interconectados e poro isolado.



Fonte: Höök, 2010 (ADAPTADO).

O conceito de meio poroso é estudado em diversas áreas da ciência e engenharia, com a finalidade de descrever e caracterizar fenômenos (Heinemann;

Mittermeir, 2013), bem como de aplicar tais meios para remoção de partículas pelo método de filtração (Elimelech *et al.*, 1995; Heinemann; Mittermeir, 2013).

Nas ciências do solo e na hidrologia, o solo é estudado como meio poroso capaz de reter e transportar água e nutrientes para plantas, tal como contaminantes para reservas de águas subterrâneas (Frippiat; Holeyman, 2008; Ling *et al.*, 2021; Lee; Jung, 2022; Leal *et al.*, 2023). Esses processos são regidos pelos princípios da hidrodinâmica e da hidrologia (Ling *et al.*, 2021; Leal *et al.*, 2023). Já nas engenharias, o estudo de meios porosos, naturais ou sintéticos, são aplicados para desenvolvimento de filtros (Heinemann; Mittermeir, 2013; Liu *et al.*, 2022b), extração de petróleo de rochas reservatório (Heinemann; Mittermeir, 2013) e irrigação de plantações (Graciano-Uribe *et al.* 2022).

2.1.2 Porosidade

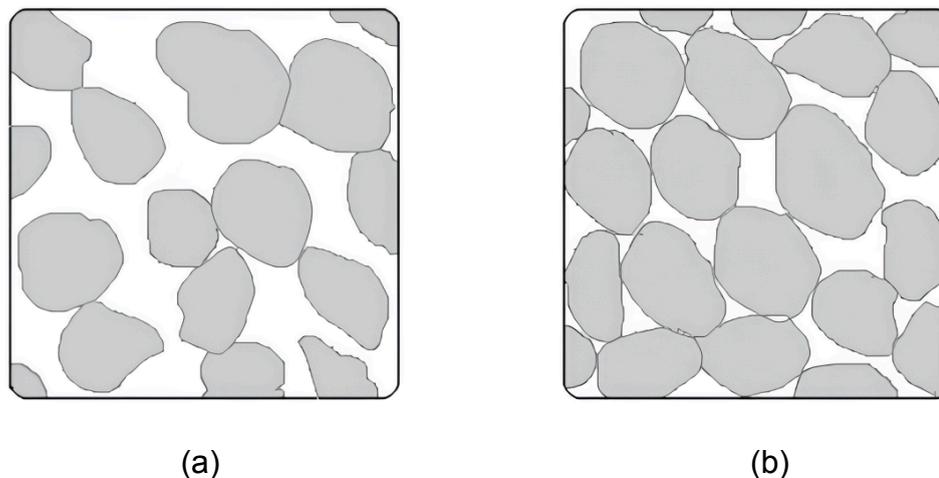
Fisicamente, a porosidade (ϕ) refere-se à capacidade de um material poroso de armazenar fluidos. Essa capacidade é determinada a partir da razão entre o volume de vazios e o volume total de uma determinada amostra, conforme a Equação (1) (Bear, 1988).

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (1)$$

A depender de suas características físicas, a porosidade de um meio pode ser classificada em porosidade absoluta, tida como o volume total de poros de uma amostra, e porosidade efetiva, sendo esta o volume de poros interconectados da mesma (Bear, 1988).

Todo espaço confinado em um meio poroso é considerado como região de vazios, enquanto a região de poros interconectados é definida como o volume da amostra que pode ser preenchido por fluidos, ou porosidade efetiva. De modo geral, quanto maior o volume de poros interconectados em uma amostra, maior será sua porosidade, conseqüentemente, maior será sua capacidade de armazenamento de fluidos (Bear, 1988; Höök, 2010), como apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Ilustração de amostras porosas com (a) alta, (b) baixa porosidade.



Fonte: HÖÖk, 2010 (ADAPTADO).

A permeabilidade da camada porosa, melhor tratada na seção **2.1.3**, é afetada significativamente pela presença dos poros isolados, uma vez que o fluido dispõe de um volume inferior para atravessar a camada comparado a outras que apresentam porosidade efetiva mais próximas a porosidade absoluta (Bear, 1988; Vafai, 2005; Costa, 2006; Zhang, Mehrabian, 2021).

Dentre os métodos experimentais empregados na determinação da porosidade de amostras, destacam-se as técnicas de medidas materializadas de volumes, e as técnicas de imageamento por Microtomografia Computadorizada de Raios X (μ TC-RX), de Tomografia Computadorizada de Raios Gama (TC-R γ) e Ressonância Magnética Nuclear (RMN) (Bear, 1988; Borgia *et al.*, 1996; Aligizaki, 2005; Rouquerol *et al.*, 2011; Meng *et al.*, 2013; Gao; Li, 2015; Haide *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023).

As técnicas de porosimetria por medidas materializadas baseiam-se na determinação dos volumes de poros e da matriz porosa, mensurados a partir do volume ocupado por fluidos injetados/infiltrados nas amostras. Um fator limitante para essas técnicas é a impossibilidade da determinação do volume de poros isolados, uma vez que só é medido o volume de poros efetivos do meio (Bear, 1988; Silva *et al.*, 2023).

Já as técnicas de porosimetria por imageamento permitem a visualização de poros conectados e poros isolados contidos em uma amostra, apresentando grande precisão na determinação da porosidade absoluta do meio (Borgia *et al.*, 1996;

Aligizaki, 2005; Rouquerol *et al.*, 2011; Meng *et al.*, 2013; Gao; Li, 2015; Haide *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023).

2.1.2.1 Técnicas de porosimetria

2.1.2.1.1 Porosimetria utilizando volumetria de fluidos

Uma das formas mais comuns de se determinar a porosidade de um meio é preencher os seus poros com um fluido, tais como líquidos (porosimetria por intrusão de líquidos ou por imersão de líquidos) ou gases (porosimetria gasosa/expansão de gás). Desse modo, o volume do fluido necessário para preenchimento dos poros da amostra é adotado como volume de poros interconectados (Rouquerol *et al.*, 2011; Labani *et al.*, 2013; Kuila *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2023).

Na porosimetria por intrusão de líquidos, é comumente utilizado mercúrio, para meios porosos hidrofílicos, e água, para meios porosos hidrofóbicos. (Giesche, 2006; Rouquerol *et al.*, 2011). A intrusão de água em meios hidrofóbicos vem sendo amplamente estudada a fim de atestar sua eficiência e vantagens em relação aos demais métodos de porosimetria (Rouquerol *et al.*, 2011; Kuila *et al.*, 2014; Jarrahi *et al.*, 2019).

Nesse sentido, ensaios de determinação da porosidade de xistos executados por Kulia *et al.* (2014) demonstraram a alta reprodutibilidade e eficácia do método de Porosimetria por Imersão de Água (PIA) em relação ao método de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM), constatando que o mercúrio não conseguiu acessar integralmente a estrutura dos poros dos xistos.

Em concordância, Jarrahi *et al.* (2019), ao determinar a porosidade de amostras de concreto por meio das técnicas PIM, RMN, Expansão de Gases (EG) e Expansão de Gases Induzida a partir da Porosimetria por Intrusão de Água (EGPIA), constataram que a EGIPIA se mostrou tão eficaz quanto as demais. No entanto, a EGIPIA apresentou melhor relação custo-benefício que a RMN, e menor tempo de preparo da amostra em relação à PIM.

Na porosimetria à gás, é utilizado o gás hélio por ser um gás inerte, de baixa reatividade e de sua baixa densidade molar, que permite ao mesmo permear por pequenos poros com maior facilidade (Labani *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2016).

Ao estudar as diferenças entre as medidas de porosidade por intrusão de água (PIA), mercúrio (PIM) e gás (PIG), Qian *et al.* (2021) constataram que a porosidade encontrada via PIG e PIA apresentaram grande proximidade, sendo PIA

cerca de 2,88% abaixo dos resultados via PIG. Em contrapartida, os resultados via PIM apresentaram-se de 7,15% a 16,71% menores em relação à porosidade das mesmas amostras via PIG.

Apesar das inúmeras vantagens das técnicas de porosimetria baseada na volumetria de fluidos, há a limitação de apenas ser possível determinar a porosidade efetiva das amostras. Sendo assim, para a determinação da porosidade total/absoluta é necessário empregar técnicas não destrutivas, baseada na densidade de partícula da amostra, técnicas de não-imageamento como RMN, ou ainda técnicas tomográficas, como a μ TC-RX e TC-R γ (Borgia *et al.*, 1996; Rouquerol *et al.*, 2011; Meng *et al.*, 2013; Gao; Li, 2015; Haide *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023).

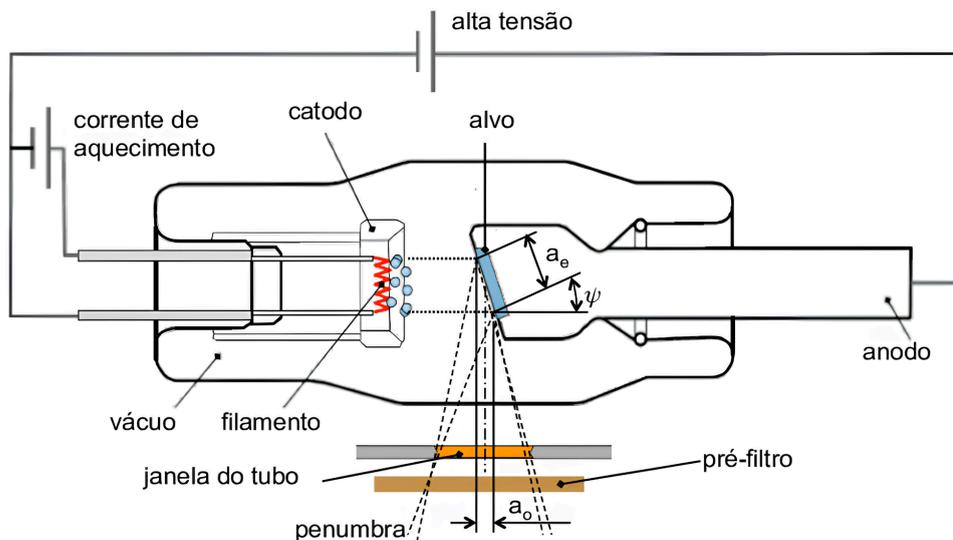
2.1.2.1.2 Porosimetria por Microtomografia Computadorizada de Raios X (μ TC-RX)

A μ TC-RX é uma técnica não destrutiva que permite visualizar e quantificar a estrutura interna de amostras em alta resolução (Burch, 2002; Rouquerol *et al.*, 2011; Vaz *et al.*, 2014). Para Burch (2002), Rouquerol *et al.* (2011) e Vaz *et al.* (2014), o processo de μ TC-RX aplicado a porosimetria geralmente envolve a preparação da amostra, aquisição das imagens tomográficas, reconstrução do volume a partir das imagens tomográficas e análise dos dados.

A amostra é preparada de acordo com as necessidades do experimento, onde as dimensões de corte e secagem dependerá do que se deseja ser determinado. Para a aquisição de imagens tomográficas é utilizado um scanner μ TC-RX. A amostra é posicionada no interior do equipamento, entre a fonte de raios X e o detector.

Os raios X são gerados por meio do processo de frenagem dos elétrons. Ocorrendo em um tubo (fonte) de raios X, onde, como bem ilustra a Figura 3, os elétrons derivados do filamento são emitidos de um cátodo a partir de uma emissão termiônica e acelerados em direção a um ânodo. A colisão abrupta resulta na desaceleração dos elétrons e na emissão de radiação eletromagnética. A radiação eletromagnética produzida pela colisão dos elétrons com o ânodo é a radiação de raios X. Para produzir um feixe de raios X de alta qualidade e direcional, são utilizados filtros para remover a faixa de radiação indesejada e colimadores para controlar a direção e a dispersão do feixe.

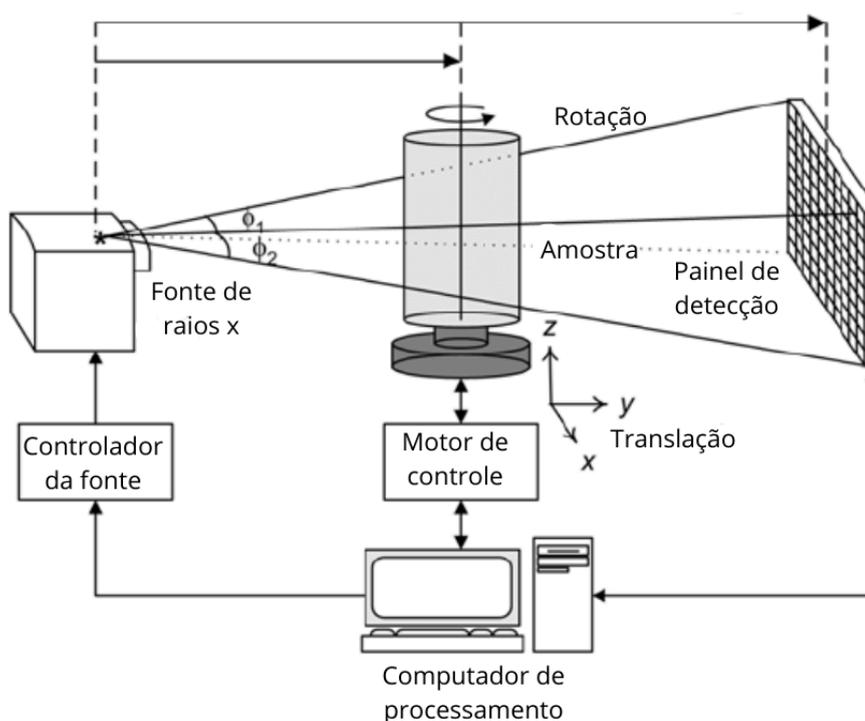
Figura 3 - Representação esquemática de um tubo de raios X



Fonte: Nardelli, 2012.

Como consta na Figura 4, o equipamento produz e emite feixes de raios X, que ao atravessarem a amostra sofrem atenuações relativas à densidade do material.

Figura 4 - Representação esquemática do escaneamento de amostras em microtomógrafo de raios x



Fonte: Lee *et al.*, 2003 (ADAPTADO).

Essas variações de atenuação são captadas por sensores, convertidas em sinais de saída e transformadas em imagens digitais. As projeções resultantes representam a distribuição do material na extensão da amostra (Gonzalez; Woods, 2010). O processo de aquisição varia de alguns minutos a algumas horas, dependendo do equipamento, tamanho da amostra e da resolução desejada.

As imagens capturadas pelo scanner são processadas para produzir um volume tridimensional. Esse processo de reconstrução pode ser feito usando diferentes algoritmos e técnicas de filtragem, e geralmente produz uma imagem em que os diferentes materiais da amostra aparecem em cores diferentes.

A imagem tridimensional resultante é analisada para determinar a geometria, tamanho, distribuição e conectividade dos poros presentes na amostra. Um *software* especializado permite a segmentação da imagem em diferentes fases e a quantificação dos poros baseada na segmentação. Essas informações podem ser usadas para entender a distribuição dos poros por toda extensão da amostra, como ela se comporta em diferentes condições e para otimizar o design de materiais porosos (Maire *et al.*, 2001; Burch, 2002; Rouquerol *et al.*, 2011; Vaz *et al.*, 2014).

Pesquisas desenvolvidas por Costa (2016), Machado (2019) e Vila Nova (2020) obtiveram resultados promissores ao estudar a porosidade de solos (Costa, 2016; Machado, 2019) e rochas (Vila Nova, 2020) utilizando os métodos de processamento e segmentação disponíveis no programa de domínio público *Image J*, sendo alguns desses *plugins* desenvolvidos em parceria pelos grupos de pesquisa do Laboratório de Imagem de Solo da Universidade de Guelph, Canadá e do Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios X (LTC-RX) do Departamento de Energia Nuclear (DEN), da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Weber *et al.* (2010), ao comparar medidas de porosidade e densidade de compostos de carbono realizadas por μ TC-RX e PIM, constataram que ambas as técnicas apresentavam resultados de porosidade efetiva semelhantes. Entretanto, pela possibilidade de determinar também a porosidade absoluta das amostras via μ TC-RX, a técnica se mostra mais abrangente que a de PIM.

Em concordância, estudos posteriores realizados por Wang *et al.*, (2020), ao caracterizar a distribuição dos poros em carvões utilizando as técnicas de μ TC-RX e PIM, constataram que a análise de imagens de μ TC-RX são mais eficientes para esta caracterização que a técnica de PIM.

Apesar disso, uma limitação apresentada pela técnica é a dificuldade de caracterizar poros de tamanho inferior à resolução da imagem tomográfica gerada a partir dos escaneamentos. Nesse contexto, Rigby *et al.* (2011) observou que a combinação das técnicas de PIM e μ TC-RX pode ser eficaz na resolução desta limitação, uma vez que o preenchimento dos microporos com mercúrio pode ser facilmente evidenciado por conta da densidade do metal.

2.1.3 Permeabilidade

A permeabilidade é a capacidade do meio poroso de permitir a movimentação de fluidos através dele, estando diretamente relacionada com a velocidade do mesmo. Ela é afetada pelo tamanho, forma, distribuição e interconectividade dos poros. Em termos mais concisos, um meio poroso que apresenta grande volume de poros distribuídos uniformemente por toda a amostra, assumindo que todos os poros estejam interconectados, permite que fluidos o atravessem com menor resistência (Bear, 1988; SAHIMI, 1995; Vafai, 2005; Costa, 2006).

De acordo com Costa (2006), essa relação pode ser expressa matematicamente utilizando o modelo empírico de Kozeny-Carman (Kozeny, 1927; Carman, 1937; Fand *et al.*, 1987), dado pela Equação (2).

$$k = C_{kc} \frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2} \quad (2)$$

Na qual k é a permeabilidade do meio poroso, ϕ é a porosidade do meio poroso, C_{kc} é uma constante que depende da forma (c), do quadrado da área superficial interna específica (a_v^2) e da tortuosidade (τ) dos poros dada pela Equação (3).

$$C_{kc} = \frac{c}{(8a_v^2\tau)} \quad (3)$$

Apesar do modelo mostrar que a permeabilidade do meio poroso cresce com o aumento da porosidade, a permeabilidade também diminui à medida que a porosidade se aproxima de 100%, pois nesse ponto, o meio se torna completamente cheio de fluido, e não há espaço para o fluxo de fluido adicional. Vale ressaltar que essa equação é uma aproximação e a relação real entre porosidade e

permeabilidade pode variar dependendo do meio poroso específico e de outras condições ambientais.

Além disso, a permeabilidade pode ser influenciada por outros fatores, como a distribuição dos tamanhos de poros e a tortuosidade do meio poroso (Tuli *et al.*, 2005; Costa, 2006; XIAO, *et al.*, 2019; Nimmo *et al.*, 2023; Xiao *et al.*, 2023).

A tortuosidade é uma medida da curvatura dos caminhos que os fluidos percorrem dentro do meio poroso. E está diretamente relacionada à forma dos poros e sua distribuição espacial. Via de regra, ela afeta a resistência ao fluxo de fluidos dentro do meio poroso. Quanto maior a tortuosidade, mais sinuosos são os caminhos percorridos pelos fluidos e maior é a resistência ao fluxo (Cai *et al.*, 2019; Conzelmann *et al.*, 2022).

A maneira de explicitar a relação entre a permeabilidade e a tortuosidade é conferida ao adicionar a tortuosidade como um fator no modelo de Kozeny-Carman (Equação (3)) (Matyka, 2020). Onde a tortuosidade (τ) do meio poroso é dada a partir da Equação (4) (Fu; Thomas; Li, 2021).

$$\tau = \frac{\varphi}{1-(1-\varphi)^{2/3}} \quad (4)$$

2.1.4 Camadas filtrantes

Como descrito na seção 2.1.1, meios porosos são comumente aplicados na remoção de partículas presentes em fluidos, sendo utilizados como camadas filtrantes (Vafai, 2012; Heinemann; Mittermeir, 2013; Liu *et al.*, 2022a).

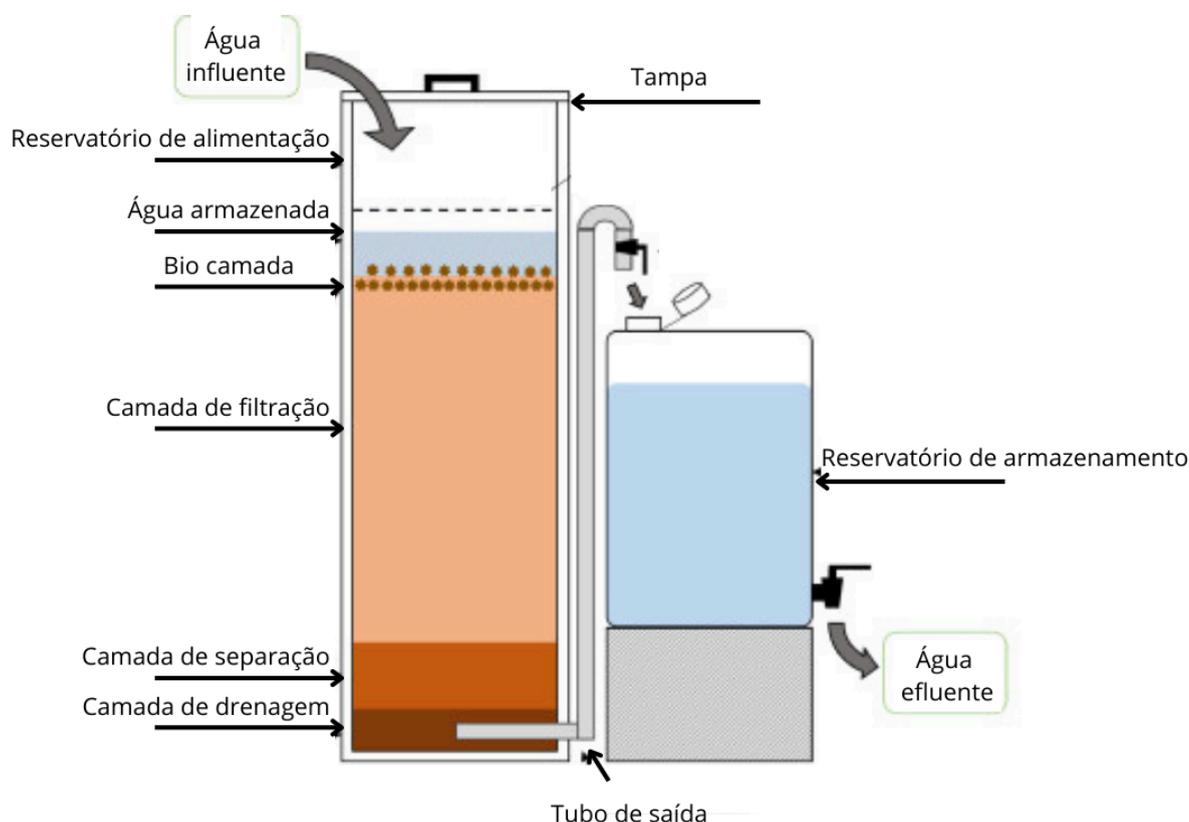
As camadas filtrantes podem ser compostas por uma diversidade de materiais, como fibras, malhas ou membranas, bem como podem apresentar sobreposição de diversas camadas porosas. Esses materiais são selecionados com base no tamanho, forma e composição das partículas que se deseja remover (Vafai, 2012; Heinemann; Mittermeir, 2013; Berry, *et al.*, 2023; Zu *et al.*, 2023). A escolha da camada filtrante adequada é crucial para garantir que o fluido seja adequadamente purificado ou tratado sem afetar negativamente suas propriedades químicas e físicas (Vafai, 2012; Berry, *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2023b).

Por sua grande versatilidade e fácil adaptação, camadas filtrantes podem ser aplicadas em diversos processos industriais, como tratamento de água e produção de alimentos e bebidas, bem como em aplicações médicas e farmacêuticas

(Crittenden *et al.*, 2012; GEA Group, 2012; Vafai, 2012; Xu *et al.*, 2020; Graciano-Uribe *et al.*, 2022; Kakoria; Sinha-Ray, 2022; Liang *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2022).

Um exemplo bastante comum de camadas filtrantes aplicadas ao tratamento de água é o filtro doméstico de areia de filtragem lenta, que combina a remoção de partículas suspensas a partir da camada de areia, com a correção dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos promovida por bio barreiras e materiais reativos (Figura 5) (Vafai, 2012; Freitas *et al.*, 2022; Van de Walle *et al.*, 2023).

Figura 5 - Configuração de filtro doméstico de areia de filtragem lenta.



Fonte: Freitas *et al.*, 2022 (ADAPTADO).

Entretanto, para o tratamento de águas residuais para reúso em atividades básicas como lavagens de calçadas, pisos, e atividades semelhantes, apenas a redução de Sólidos Totais Suspensos (STS) se faz necessário (Fountoulakis *et al.*, 2016; Mahmoudi *et al.*, 2021).

Neste sentido, Martín-García *et al.* (2022), ao analisarem a eficiência de três filtros compostos por (1) areia (mono camada), (2) areia e coque em camadas delimitadas (dupla camada) e (3) coque (mono camada) na remoção de

micropartículas e microplásticos de águas residuais, constataram que o filtro de dupla camada apresentou uma eficiência ligeiramente maior na remoção de microplásticos em relação aos demais. Entretanto, o filtro de areia demonstrou-se mais eficaz na remoção de micropartículas no geral.

Estudos anteriores realizados por Egea-Corbacho *et al.* (2019) constataram que o uso de filtros de camada dupla compostos por coque e areia também é eficaz na redução de partículas de cafeína, teobromina, teofilina, amoxicilina e penicilina G de águas residuais à níveis de reutilização. Combinados, as duas pesquisas indicam que um filtro de areia e coque pode ser uma alternativa altamente eficaz para o tratamento de água para o consumo humano.

2.2 TRANSPORTE DE ÁGUA E PARTÍCULAS EM MEIOS POROSOS

O transporte de água e poluentes em meios porosos é governado pelos princípios da hidrodinâmica e da hidrologia (Frippiat; Holeyman, 2008; Lee; Jung, 2022). Em síntese, meios porosos são constituídos por uma matriz sólida (por exemplo, solo, rocha) com espaços vazios entre as partículas, chamados de poros (Ling *et al.*, 2021; Leal *et al.*, 2023). A água e os poluentes podem se mover dentro desses poros por meio de processos físicos e químicos, que dependem basicamente das características do meio poroso e das propriedades da água e dos poluentes (Nielsen *et al.*, 1997).

O transporte de água em meios porosos é denominado de fluxo poroso. Esse processo envolve a passagem da água por poros e canais, sob a ação de gradientes de pressão hidráulica. Sendo a pressão hidráulica uma medida da energia associada à água, que depende da altura da coluna de água acima do ponto de referência e de suas propriedades. A água flui do ponto de alta pressão para o ponto de baixa pressão, seguindo as leis do movimento de fluidos, como a lei de Darcy e Navier-Stokes (Nielsen *et al.*, 1997; Hariti *et al.*, 2020).

A lei de Darcy estabelece que o fluxo de água através de um meio poroso é diretamente proporcional ao gradiente de pressão hidráulica, à permeabilidade do meio poroso e inversamente proporcional à viscosidade da água. Portanto, quanto maior a diferença de pressão hidráulica entre dois pontos do meio poroso, maior será o fluxo entre eles, desde que o meio seja permeável o suficiente para permitir a passagem do fluido com maior facilidade (Wang *et al.*, 2022a). Essa permeabilidade depende das características da matriz sólida e dos espaços vazios entre as

partículas do meio (Nielsen *et al.*, 1997; Guha, 2008; White, 2009; Hariti *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2022a).

De modo geral, a lei de Darcy é descrita conforme a Equação (5) (Atangana, 2018).

$$Q = \left(\frac{-kA}{\mu}\right)\left(\frac{(P_b - P_a)}{L}\right) \quad (5)$$

Sendo Q o fluxo de água através do meio poroso, k a permeabilidade do meio, $(P_b - P_a)$ a variação de pressão, μ a viscosidade do fluido, L a altura da amostra e A a área de seção transversal. Ao assumirmos um fluido de baixa viscosidade, podemos reescrever a fórmula de Darcy a fim de determinar a vazão de um fluido de acordo com a Equação (6) (Atangana, 2018).

$$Q = -KA \left(\frac{dh}{dl}\right) \quad (6)$$

Em que K é a condutividade hidráulica do meio poroso, dh/dl é o gradiente de pressão hidráulica, que é a diferença de pressão hidráulica entre dois pontos do meio poroso, dividida pela distância entre esses pontos.

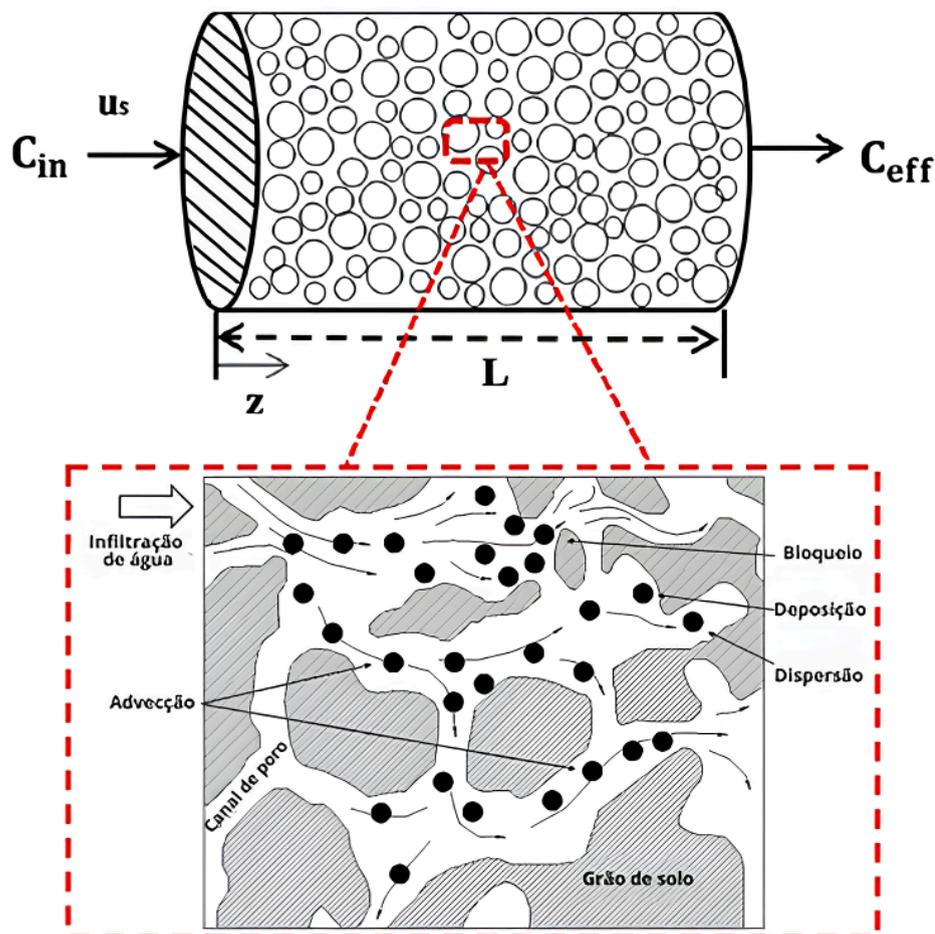
O gradiente de pressão hidráulica pode ser expresso pela Equação (7).

$$\frac{dh}{dl} = \frac{\rho g h}{A} \quad (7)$$

Onde ρ a densidade do fluido, g a gravidade e h a altura entre os pontos.

Existem três principais mecanismos envolvidos no transporte de partículas suspensas em meios porosos. Sendo eles advecção, a difusão e a filtração (Figura 6) (Bear, 1988; Sahimi, 1995). A combinação desses três mecanismos determina o padrão de transporte de partículas suspensas em meios porosos. A complexidade desse transporte depende das características do meio poroso, bem como das propriedades das partículas suspensas (como tamanho, forma e carga) e das condições do fluxo de água (como velocidade e direção) (McDowell-Boyer *et al.*, 1986; Bear, 1988; Sahimi, 1995; Deng *et al.*, 2022).

Figura 6 - Transporte de partículas em meios porosos saturados.



Fonte: Zhou *et al.*, 2018a (ADAPTADO).

A advecção refere-se ao transporte das partículas suspensas juntamente com o fluxo de água que passa pelo meio poroso. Esse transporte ocorre devido às diferenças de velocidade entre a água e as partículas, e à medida que a água flui através dos poros do material, ela arrasta as partículas suspensas em sua direção, semelhante ao transporte de objetos arrastados por correntezas de rios (McDowell-Boyer *et al.*, 1986; Bear, 1988; Sahimi, 1995; Deng *et al.*, 2022; Monga *et al.*, 2023).

A difusão/dispersão ocorre devido ao movimento aleatório das partículas suspensas, que resulta em seu espalhamento em todas as direções. A difusão é especialmente significativa para partículas pequenas, que são mais afetadas pelo movimento térmico e colisões com outras partículas e moléculas de água. A difusão tende a espalhar as partículas suspensas por todo o meio poroso (Bear, 1988; Sahimi, 1995; Deng *et al.*, 2022; Ren *et al.*, 2022; Monga *et al.*, 2023).

As equações fundamentais que governam o comportamento do fluido são as equações de conservação da massa, do momento e da energia. Estas são conhecidas como as equações de Navier-Stokes, que podem ser escritas na forma diferencial ou integral, dependendo da abordagem adotada (White, 2009; Li *et al.*, 2023a; Zheng *et al.*, 2023)

Na forma diferencial, as equações de Navier-Stokes são expressas como um conjunto de equações diferenciais parciais que descrevem como as variáveis do fluido (como velocidade, pressão, densidade e temperatura) variam continuamente no tempo e no espaço. De acordo com Opaku, Uddin e Atkinson (2023) essas equações são: de Conservação da Massa (Equação 8); de Conservação do Momento linear (Equação 9); e de Conservação da Energia (Equação 10).

$$\frac{D\rho}{Dt} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (8)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g - \nabla p + \nabla \left[\mu (\nabla u + (\nabla u)^T) + \lambda (\nabla u) I \right] \quad (9)$$

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla (k_c \nabla T) + (\nabla u) \left[\mu (\nabla u + (\nabla u)^T) + \lambda (\nabla u) I \right] \quad (10)$$

Sendo ρ , t , u , g , ∇p , μ , T , λ , I , h , p , k_c e ∇T referentes a densidade, tempo, velocidade vetorial, aceleração gravitacional, gradiente de pressão, coeficiente de viscosidade, temperatura, coeficiente de viscosidade, tensor de identificação, entalpia, pressão, condutividade térmica e gradiente de temperatura, respectivamente.

O coeficiente de viscosidade de volume é dado pela relação com o coeficiente de viscosidade, demonstrada na Equação (11).

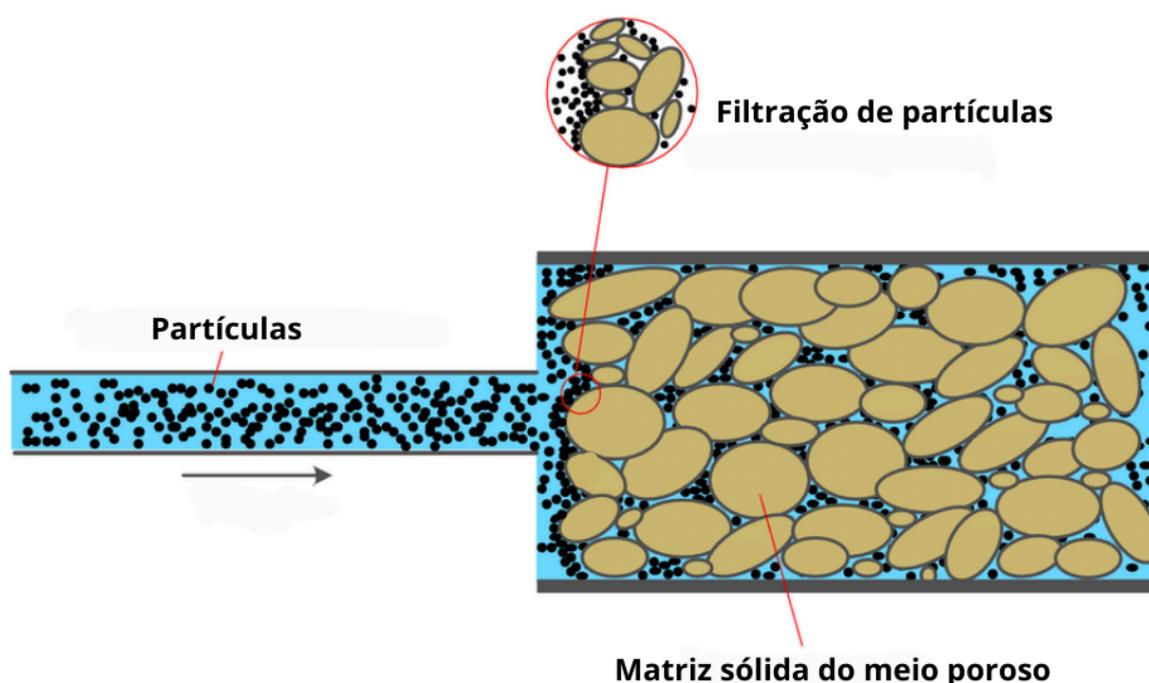
$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad (11)$$

Na forma integral, as equações de Navier-Stokes são expressas como integrais sobre volumes de controle que abrangem o domínio do problema, sendo obtidas a partir da aplicação do teorema do transporte de Reynolds às equações diferenciais (White, 2009).

2.2.1 Filtração de partículas suspensas e colmatção dos poros

A filtração ocorre quando as partículas são retidas/bloqueadas pelos poros do meio devido a forças de aderência entre as partículas e as superfícies do poro (Figura 7). Esse mecanismo é mais relevante para partículas maiores, que têm menos probabilidade de serem transportadas por advecção ou difusão. À medida que a água flui através do meio poroso, as partículas maiores tendem a ficar presas nos poros, enquanto as partículas menores podem passar com facilidade (Bear, 1988; Elimelech *et al.*, 1995; Sahimi, 1995; Guha, 2008; Deng *et al.*, 2022; Civan, 2023; Monga *et al.*, 2023).

Figura 7 - Filtração de partículas por meios porosos.

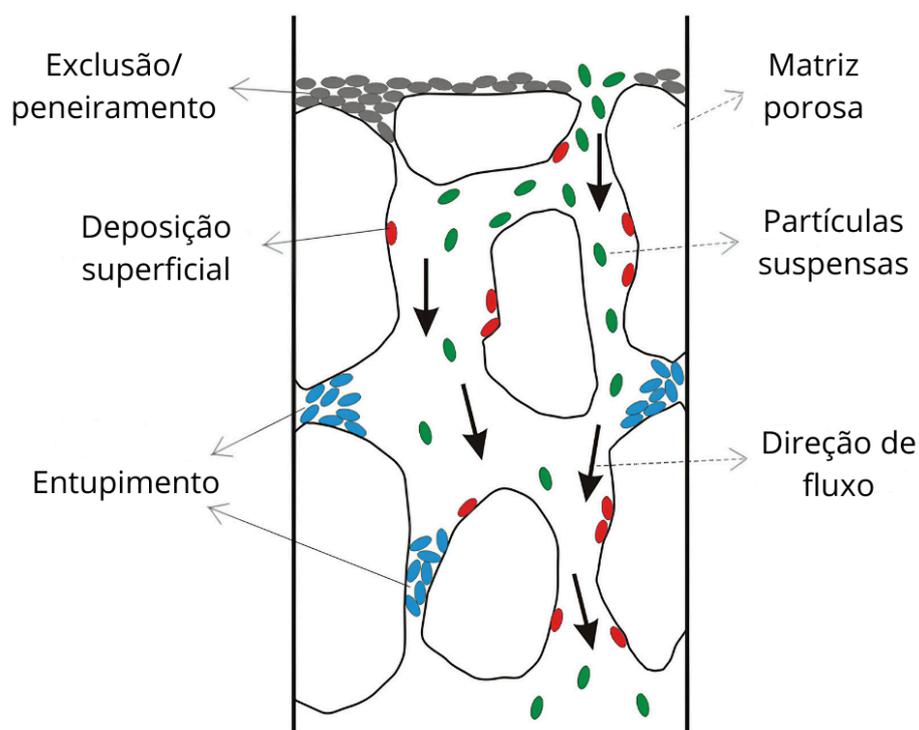


Fonte: Zhou *et al.*, 2018b (ADAPTADO).

As camadas filtrantes são projetadas para remover partículas indesejáveis e impurezas da água, permitindo que apenas a água limpa passe pelos poros. De acordo com Nan *et al.* (2023), diversos processos hidrodinâmicos e físico-químicos desempenham um papel crucial na geração de partículas retidas em meios porosos, tanto saturados quanto insaturados. Sendo a deposição superficial, o entupimento/bloqueio e o efeito de exclusão/peneiramento os principais mecanismos que regem a retenção de partículas.

Forças de superfície, como as de Van der Waals e as eletrostáticas, são responsáveis pela adesão e aglomeração de partículas na superfície da matriz. O entupimento ocorre quando múltiplas partículas formam uma ponte ou arco nas gargantas de entrada do poro. Já o peneiramento ocorre quando as partículas obstruem gargantas de poros menores que seus diâmetros. Esses mecanismos encontram-se ilustrados na Figura 8. Fatores como a velocidade de fluxo, a concentração inicial de partículas, o tamanho e a polidispersidade das partículas, a força iônica e a heterogeneidade da superfície (rugosidade e molhabilidade) governam a magnitude da retenção de partículas nos meios porosos (Lin et al., 2021; Sadeghnejad *et al.*, 2022).

Figura 8 - Mecanismos de filtração de partículas suspensas em fluídos por meio poroso



Fonte: YE *et al.*, 2019 (ADAPTADO).

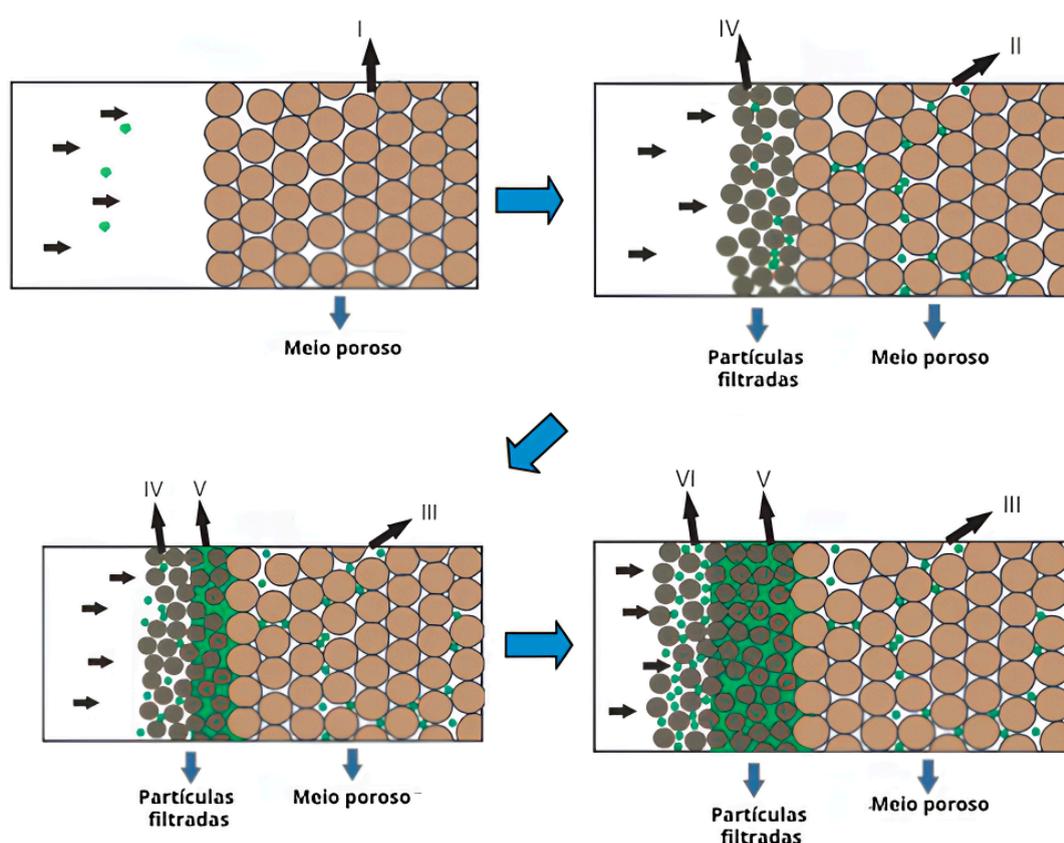
Adicionalmente, as partículas depositadas podem ser novamente arrastadas em resposta a mudanças no pH da solução, redução da força iônica ou aumento do cisalhamento hidrodinâmico. A liberação de partículas das superfícies das paredes é determinada pela competição entre as forças adesivas ativas e as forças de arrasto hidrodinâmico, de modo que alterações na composição química e na taxa de fluxo

do fluido transportador podem influenciar a liberação de partículas (Chen *et al.*, 2009; Nishad *et al.*, 2021; Sadeghnejad *et al.*, 2022).

No entanto, à medida que as partículas são retidas/filtradas pelo meio poroso, há a formação de camadas de partículas filtradas que se acumulam nos poros de modo a causarem resistência à infiltração de fluidos, fenômeno esse comumente conhecido como entupimento/colmatação dos poros (Elimelech *et al.*, 1995; Sacramento *et al.*, 2015; Civan, 2023; Monga *et al.*, 2023).

A Figura 9 ilustra o comportamento de um fluxo, com partículas de diâmetros distintos suspensas, ao atravessar um meio poroso (I).

Figura 9 - Retenção de partículas por camada filtrante ao longo do tempo



Fonte: Sacramento *et al.*, 2015 (ADAPTADO).

Inicialmente, as partículas de diâmetros menores conseguem penetrar os poros, sendo depositadas ou bloqueadas (entupimento) nos/pelos poros menores (II). As partículas de diâmetro maior acabam por não penetrar os poros do meio e se aglomerando no início do meio poroso, formando uma camada espessa (IV). Em um dado momento, as partículas retidas na superfície do meio poroso começam a

bloquear a passagem das partículas menores (V), formando uma camada de bloqueio que se adensa ao longo do tempo e impede a entrada das partículas menores no meio poroso (III).

Quando os poros das camadas filtrantes são obstruídos, o fluxo é restringido, pois o entupimento dos poros cria uma barreira que dificulta a passagem da água através do filtro. E à medida que a obstrução aumenta, o espaço disponível para o fluxo diminui, resultando na redução da vazão de água. Uma outra consequência dos entupimentos é o aumento da pressão diferencial, uma vez que a água precisa exercer maior pressão para superar a obstrução e passar pelo filtro, levando a um aumento na pressão diferencial entre a entrada e a saída. De modo geral, a redução da porosidade de camadas filtrantes resulta na perda da eficiência da filtração, em seu aspecto físico Elimelech *et al.*, 1995; Nielsen *et al.*, 1997; Costa, 2006; Sacramento *et al.*, 2015; Hariti *et al.*, 2020; Civan, 2023; Monga *et al.*, 2023).

Dentre as ações que podem ser tomadas a fim de remediar os problemas causados pela colmatação das camadas filtrantes, estão o monitoramento da eficiência e a manutenção das camadas (Duran-Ros *et al.*, 2022). Para o monitoramento da evolução estrutural de camadas filtrantes após a instalação e início da utilização, são normalmente aplicadas técnicas de imageamento que possibilitam a quantização do volume de poros das camadas, tais como as técnicas de RMN, TC-Ry e μ TC-RX (Borgia *et al.*, 1996; Rouquerol *et al.*, 2011; Meng *et al.*, 2013; Gao; Li, 2015; Haide *et al.*, 2022; Song *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023).

2.3 SIMULAÇÕES DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL E SUAS APLICAÇÕES AO ESTUDO DE MEIOS POROSOS

2.3.1 Simulações de fluidodinâmica computacional

A simulação CFD é uma técnica numérica utilizada para modelar e analisar o comportamento de fluidos, como líquidos e gases, e suas interações com estruturas sólidas (Tu *et al.*, 2013). Ela permite a resolução das equações fundamentais que regem o movimento dos fluidos, como as equações de conservação da massa, momento e energia, utilizando métodos computacionais para prever o comportamento do escoamento em diferentes condições (Tu *et al.*, 2013; Spurin *et al.*, 2023; Zheng *et al.*, 2023).

Essa abordagem apresenta-se com diversas vantagens, incluindo a economia de custos, uma vez que elimina a necessidade de realizar experimentos físicos,

reduzindo os custos associados à construção de modelos e testes em laboratório. Além disso, oferece flexibilidade para simular uma ampla gama de condições e cenários, possibilitando uma análise mais abrangente do comportamento do fluido sob diferentes condições de contorno, geometrias e parâmetros operacionais. A rapidez na obtenção de resultados é outra vantagem, uma vez que as simulações podem ser executadas em computadores de alta performance, agilizando o processo de projeto e otimização de sistemas fluidodinâmicos (Tu *et al.*, 2013; Sadeghnejad *et al.*, 2022; Nan *et al.*, 2023; Dhar *et al.*, 2024;).

No entanto, a simulação CFD também apresenta algumas desvantagens. A precisão dos resultados pode ser limitada pela qualidade dos modelos matemáticos e das simplificações assumidas durante a simulação, bem como pela resolução numérica e representação dos fenômenos físicos (Khan *et al.*, 2020; Spurin *et al.*, 2023). Além disso, a validação experimental é necessária para garantir a confiabilidade dos resultados, o que pode ser custoso e demorado. A simulação CFD também pode exigir grandes recursos computacionais, limitando sua aplicabilidade a casos específicos ou requerendo acesso a infraestrutura computacional robusta (Sadeghnejad *et al.*, 2022; Nan *et al.*, 2023). Por fim, a interpretação e análise dos resultados exigem expertise em fluidodinâmica, modelagem matemática e métodos numéricos para garantir resultados confiáveis e significativos (Tu *et al.*, 2013).

2.3.2 Estudo de meios porosos a partir de simulações CFD

No atual contexto, a importância das simulações CFD no estudo dos fenômenos de transporte e retenção de partículas em meios porosos é enfatizada (Tu, *et al.*, 2013). Essas simulações possibilitam uma análise minuciosa do comportamento do fluido e das partículas, considerando variáveis como a velocidade do fluxo e a geometria do meio poroso (Tu, *et al.*, 2013; Afzali, *et al.*, 2022; Li, *et al.*, 2023). Ao oferecer perspectivas sobre os padrões de fluxo e as interações microscópicas durante o estudo da retenção de partículas em meios porosos, elas contribuem para a otimização de projetos de engenharia, estratégias de remediação e aprimoramento de processos industriais, resultando em avanços substanciais na pesquisa e no desenvolvimento (Tu, *et al.*, 2013; Afzali, *et al.*, 2022; Li, *et al.*, 2023; Elrahmani, *et al.*, 2023).

Em pesquisas voltadas à retenção de partículas em meios porosos, o estudo realizado por Sadeghnejad *et al.* (2022) investigou a evolução da estrutura de poros devido à retenção de partículas, destacando interações heterogêneas e não lineares entre as partículas e o fluido. Por meio de modelagem em escala de poros com uma abordagem euleriana-lagrangeana, foram resolvidas as equações de Navier-Stokes para determinar as trajetórias e os campos de velocidade das partículas. A validação experimental foi conduzida utilizando colunas de pérolas de vidro de 0,255mm de diâmetro médio. Os resultados indicaram que o tamanho das partículas e as forças de adesão exercem influência predominante na permeabilidade por meio de mecanismos de entupimento, em vez de deposição na superfície. A retenção de partículas atinge seu ponto máximo em uma velocidade crítica, marcando a transição do desenvolvimento de um bolo de filtro para uma retenção homogênea.

Posteriormente, o estudo conduzido por Nan *et al.* (2023) investigaram o movimento de partículas de rejeitos em sistemas de rochas residuais sob diferentes taxas de fluxo, complementando a compreensão da dinâmica de partículas em meios porosos. Semelhante à pesquisa sobre a quebra de bolhas em reatores gás-líquido e o fluxo multifásico em meios porosos heterogêneos, esse estudo emprega métodos experimentais e numéricos para analisar o comportamento das partículas.

Apesar desses estudos contribuírem coletivamente para uma compreensão mais profunda das interações fluido-partícula em diversos ambientes porosos, oferecendo insights valiosos para várias aplicações de engenharia, como projeto de reatores, sequestro de carbono e gestão de resíduos, o primeiro utilizou CFD-DMD (Decomposição Modal Dinâmica) e o segundo utilizou CFD-DEM (Método de Elemento Discreto).

As simulações CFD-DMD (Decomposição de Modo Dinâmico) e CFD-DEM (Método de Elementos Discretos) são técnicas computacionais distintas para estudar fenômenos de transporte de partículas em fluidos. Enquanto o CFD-DMD se concentra na análise de padrões dinâmicos em dados de fluxo complexos, identificando modos significativos de comportamento oscilatório em sistemas multifásicos, o CFD-DEM simula explicitamente o comportamento de partículas individuais em um meio fluido, considerando suas interações com o fluido e entre si. Ambas as técnicas são úteis para entender o transporte de partículas, mas têm objetivos e abordagens diferentes. Embora a técnica CFD-DEM seja mais precisa na

descrição do comportamento específico de cada partícula, isso requer uma grande capacidade computacional, o que limita sua aplicação a clusters poderosos. (Sadeghnejad *et al.*, 2022; Nan *et al.*, 2023).

3 METODOLOGIA

As ações metodológicas deste trabalho foram segmentadas em quatro etapas:

- **Desenvolvimento de protótipos de coluna de percolação de baixo custo (seção 3.1):** onde foi-se estudado a melhor estrutura possível de colunas de percolação.
- **Avaliação da porosidade das colunas por diferentes técnicas (seção 3.2):** tendo como objetivo validar a técnica de porosimetria por μ TC-RX para aplicação na avaliação experimental da colmatação de camadas filtrantes e barreiras reativas permeáveis.
- **Modelagem computacional com fluidodinâmica computacional (seção 3.3):** na qual foram desenvolvidas representações computacionais dos meios porosos das amostras estudadas.
- **Simulações de fluidodinâmica computacional (seção 3.4):** sendo realizados estudos de colmatação dos meios porosos nas condições padrões definidas; estudos de sensibilidade, onde foram variadas algumas condições das padrões iniciais, a fim de observar os impactos na retenção de partículas nos meios porosos; e estudo dos erros associados ao modelo físico utilizado (modelo *one-way*) e o modelo mais acurado (modelo *fully-coupled*).

Esta pesquisa foi fruto da parceria estabelecida entre Grupo de Engenharia de Reatores (GER) e o Grupo de Pesquisa em Imageamento, Caracterização e Simulação em Meios Porosos (ICSMP), ambos localizados no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN/UFPE).

3.1 DESENVOLVIMENTO DAS COLUNAS DE PERCOLAÇÃO DE BAIXO CUSTO

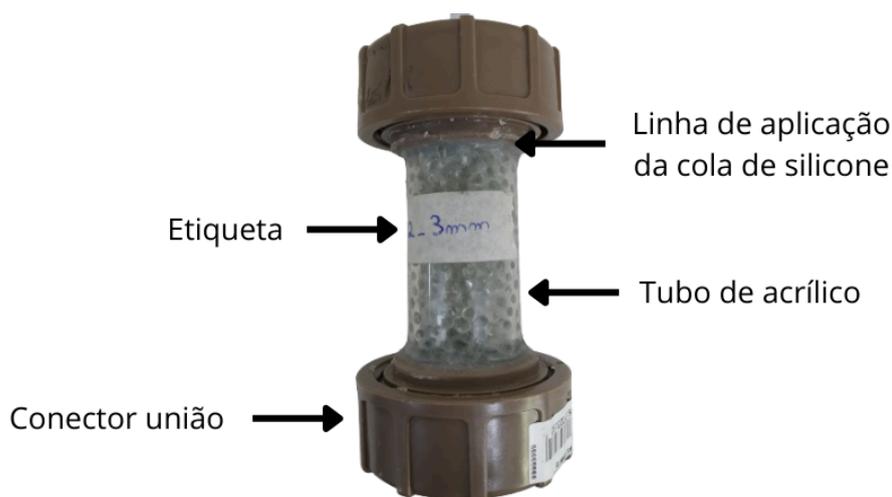
3.1.1 Montagem

Para o desenvolvimento das colunas, foram traçados os objetivos de construir uma coluna de percolação com materiais de baixo custo que não apresentasse vazamentos, sendo facilmente desmontável sem causar danos à estrutura. Além disso, outro fator importante levado em consideração foi a possibilidade de alteração do comprimento (altura) da coluna sem que haja a necessidade de uma reconfiguração completa da coluna. Também foi considerada a configuração que

permitisse melhor adequação das colunas no aparelho μ TC-RX e no banco de raios gama.

Baseado nessas considerações, foi desenvolvida uma configuração de coluna composta por um cilindro de acrílico de 70mm de comprimento, com conectores do tipo união de 32mm de diâmetro interno acoplados em suas extremidades, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Componentes do protótipo de coluna de percolação de baixo custo

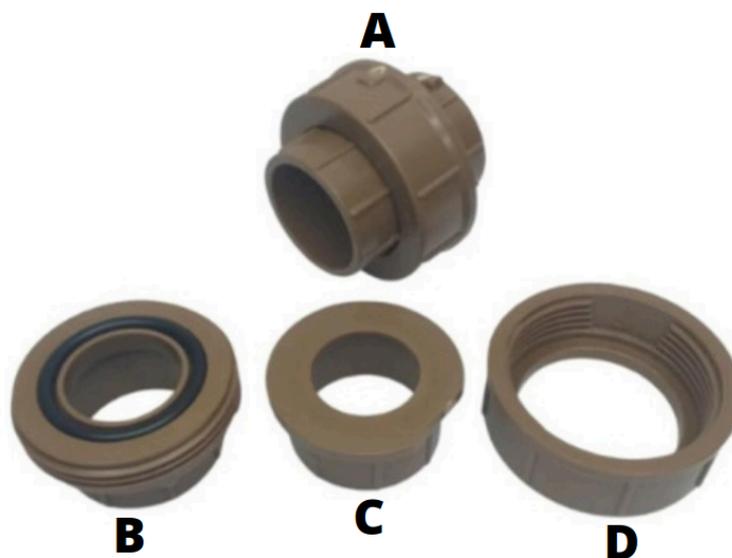


Fonte: A autora, 2024.

Foi utilizado cola de silicone para fixar o conector ao cilindro, contribuindo para a vedação da coluna. Como o silicone é um material que pode ser facilmente removido das superfícies, ele também garantiu a possibilidade de desmonte da estrutura sem gerar danos às peças e ao conteúdo do cilindro (amostra).

Os conectores união são compostos por 3 peças (Figura 11) e tem por objetivo conectar/unir 2 cilindros. Entretanto, a peça responsável por conectar o segundo cilindro (peça C) foi substituída por um disco de nylon com um conector central de 2,6mm de diâmetro para encaixe do capilar para entrada e saída do fluxo no cilindro (Figura 12).

Figura 11 - Conector união (A) e suas peças (B,C e D)



Fonte: A autora, 2024.

Figura 12 - Disco de Nylon com conector central (a) e substituição da peça C (Figura 18) pelo disco de Nylon (b)



(a)



(b)

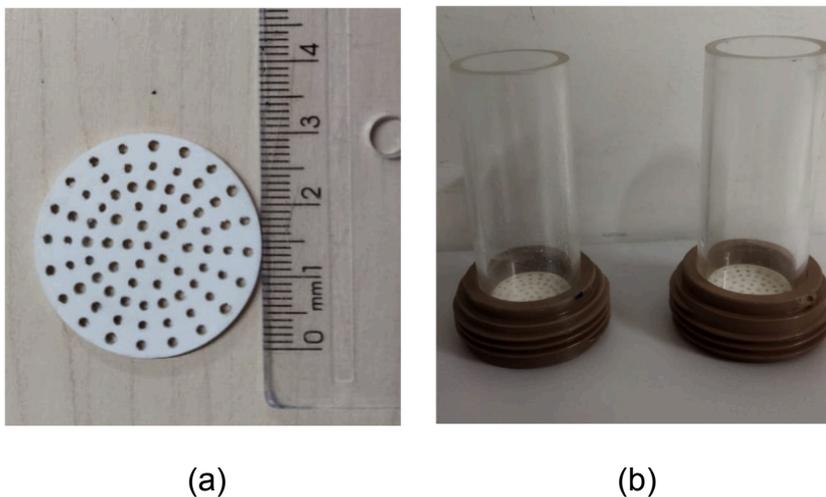
Fonte: A autora, 2024.

Tanto o disco de nylon quanto o conector central posicionado no meio do disco, foram fixados utilizando cola industrial Araldite®. Para melhor visualização da parte interna ao tubo de acrílico, foi necessário reduzir 12mm da altura da peça B.

Para sustentação do material que preencherá a coluna e distribuição uniforme da entrada do fluxo, foram confeccionados 2 discos de PVC com perfurações de

1,5mm distribuídos por toda sua extensão. Esses discos foram posicionados entre o cilindro de acrílico e os conectores como mostrado na Figura 13.

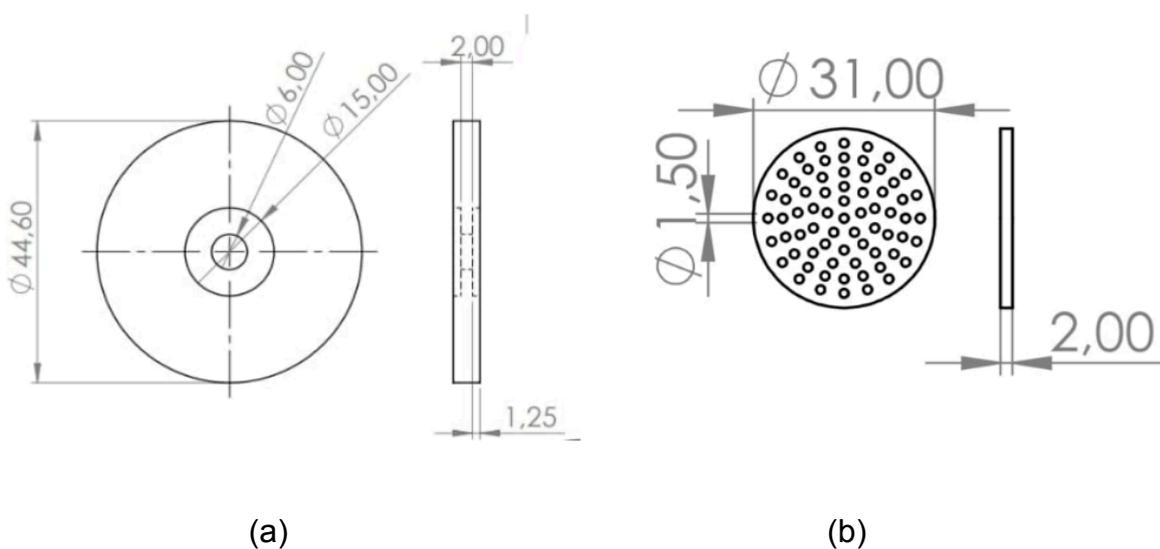
Figura 13 - Disco de PVC com perfurações (a) e disposição do disco entre tubos de acrílico e conectores (b).



Fonte: A autora, 2024.

Os discos de PVC e de Nylon foram confeccionados a partir das dimensões ilustradas na Figura 14.

Figura 14 - Dimensões dos discos de Nylon (a) e PVC (b) em mm



Fonte: A autora, 2024.

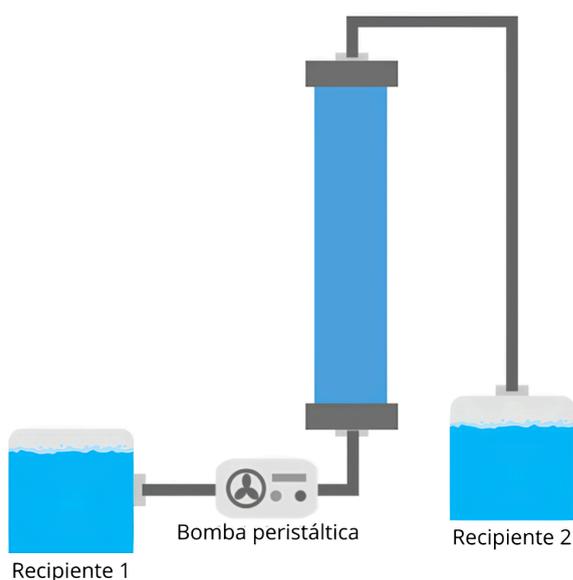
Ao final, o custo de confecção por coluna foi de R\$ 400,00. As estruturas foram submetidas a testes sob fluxo contínuo (bomba peristáltica) e carga hidráulica para verificação da eficácia da vedação proporcionada pela cola de silicone.

3.1.2 Avaliação dos protótipos

Para atestar a vedação, foram confeccionados 3 protótipos que se diferenciaram pela quantidade de cola de silicone utilizada no ponto de conexão entre o cilindro de acrílico e o conector da base. O protótipo CF1_4mm recebeu cola apenas no cilindro de acrílico antes de encaixar na base, tendo o excesso removido. Já no CF2_3mm, o excesso foi espalhado por todo o ponto de conexão. E na confecção do CF3_3mm, além do excesso, foi adicionado mais cola ao ponto de conexão, formando um volume mais espesso. O ponto de conexão é indicado na Figura 10. Após montados, foram submetidos a ensaios de fluxo e carga hidráulica.

Para os ensaios de fluxo hidráulico, foi utilizado uma bomba peristáltica para estabelecimento do fluxo pela coluna. A direção do fluxo foi estabelecida contra a gravidade, como ilustrado no esquema da Figura 15, onde temos uma bomba peristáltica sendo responsável por estabelecer o fluxo pela coluna até o recipiente 2. Nestes ensaios, foi utilizada a vazão de 0,07mL/s até o surgimento de vazamentos.

Figura 15 - Esquematização dos ensaios de fluxo hidráulico.

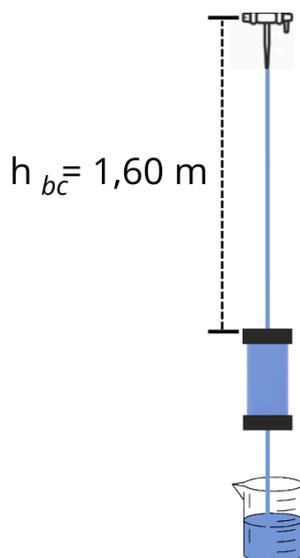


Fonte: A autora, 2024.

Já para os ensaios de carga hidráulica, a execução foi inteiramente manual. Como mostra o esquema da Figura 16, um recipiente (3L de capacidade) foi

posicionado a uma altura de 1,6m da parte superior da coluna, e conectado a ela por meio de um capilar de plástico. O recipiente foi alimentado por uma mangueira conectada à torneira. À saída da coluna, foi conectado um outro capilar que conduziu a água que saía para a pia do laboratório.

Figura 16 - Esquematização dos ensaios de carga hidráulica.



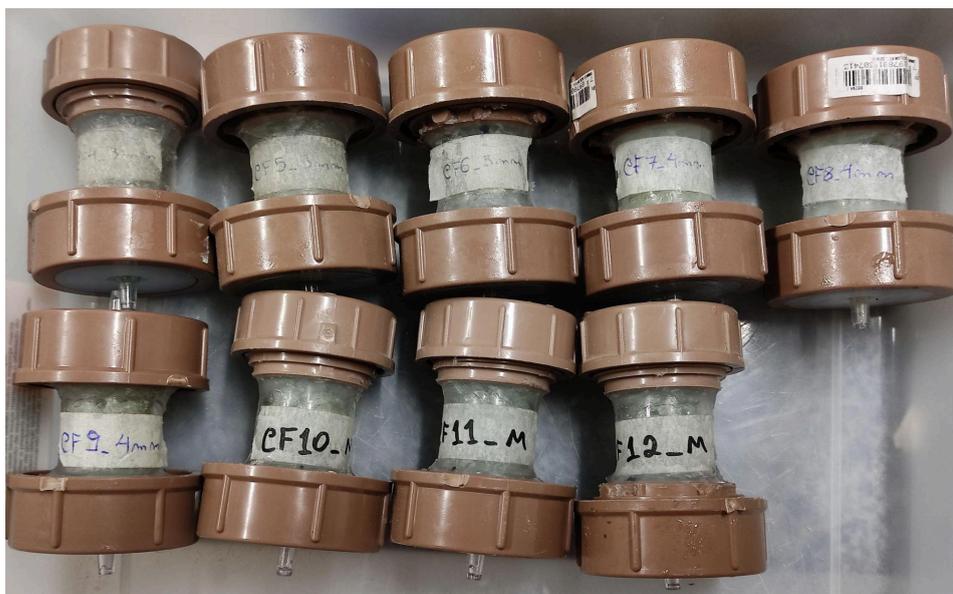
Fonte: A autora, 2024.

Inicialmente a coluna foi saturada com uma seringa. O início do ensaio se deu com a desobstrução do capilar ligado à parte inferior da coluna, estabelecendo um fluxo. Neste ensaio, as colunas foram submetidas a vazões de 5 mL/s até 15 mL/s, onde houve o surgimento de vazamentos.

3.1.3 Construção das colunas de referência

Após validação dos protótipos, foram montadas colunas de referência preenchidas com pérolas de vidro de 3mm e 4mm de diâmetro para a etapa de validação, sendo preparadas triplicatas com pérolas de 3mm, 4mm e misto. As colunas foram identificadas como CF4_3mm, CF5_3mm, CF6_3mm, CF7_4mm, CF8_4mm, CF9_4mm, CF10_M, CF11_M e CF12_M (Figura 17).

Figura 17 - Colunas de referência



Fonte: A autora, 2024.

O “M” nas colunas CF10_M, CF11_M e CF12_M indica que foram preenchidas com uma mistura de pérolas de 3mm e 4mm em proporção de $\frac{1}{2}$ cada. Metade do cilindro foi preenchida com pérolas de 3mm e a outra metade com pérolas de 4mm, antes de serem misturadas e transferidas de volta para o cilindro. A Tabela 1 apresenta as dimensões dos cilindros utilizados para cada uma das colunas.

Tabela 1 - Dimensões dos cilindros de acrílico das colunas de referência

Colunas ID	Comprimento (mm)	Diâmetro interno (mm)	Diâmetro externo (mm)
CF4_3mm	49,76	25,55	31,54
CF5_3mm	49,91	26,36	31,58
CF6_3mm	49,64	25,76	31,46
CF7_4mm	49,81	25,63	31,66
CF8_4mm	49,71	25,56	31,59
CF9_4mm	49,86	25,61	31,57
CF10_M	49,94	26,16	31,80
CF11_M	49,79	25,43	31,53
CF12_M	49,87	25,42	31,52

Para o arranjo misto, metade do volume do cilindro de acrílico que compõe a coluna foi preenchido com pérolas de 3 mm e a outra metade por pérolas de 4 mm. Ao final, o montante foi despejado em um recipiente à parte e então misturado através da agitação do recipiente, e então devolvido ao cilindro de acrílico.

3.2 AVALIAÇÃO DA POROSIDADE DAS COLUNAS

Para trabalhos futuros, é pretendido conduzir experimentos referentes às simulações executadas neste trabalho, a fim de englobar como fator adicional ao entupimento da camada porosa, o precipitado derivado de mecanismos de remoção de contaminantes a partir de barreiras reativas. Desta forma, esta seção da metodologia objetiva validar a metodologia de acompanhamento, no caso, a porosimetria por μ TC-RX, que poderá ser implementada para a avaliação da evolução da colmatação de camadas porosas contendo barreiras reativas permeáveis. Essa validação será realizada a partir da comparação das porosidades das nove colunas de referência, determinadas pelos métodos de μ TC-RX, porosimetria por injeção de fluidos (porosimetria direta, gravimetria, e porosimetria a gás), porosimetria por medidas materializadas de volumes (porosimetria indireta) e porosimetria por transmissão de raios gama.

A utilização de pérolas de vidro nas colunas de referência foi essencial nesta etapa, uma vez que seu formato esférico garante que, por terem vazios bem definidos e conectados, o meio apresente porosidade absoluta igual à porosidade efetiva (importante para os métodos de porosimetria baseados na saturação das colunas). Após as medições de porosidades, os dados obtidos por cada uma das técnicas foram então comparados com o propósito de identificar congruências e/ou inconsistências.

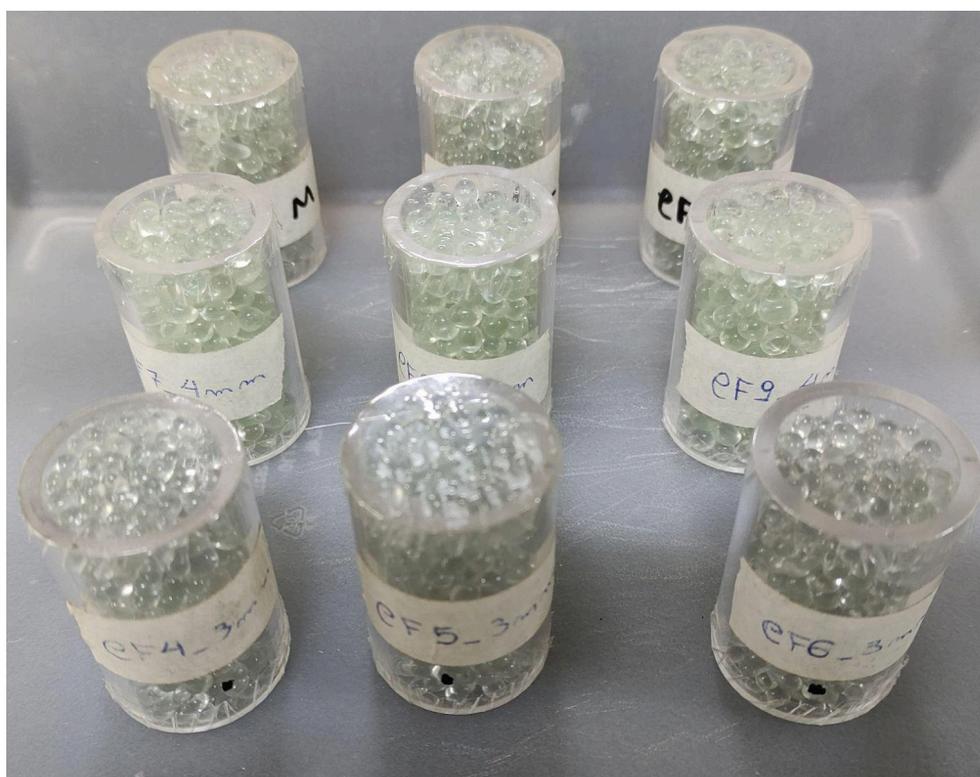
Para os métodos de porosimetria direta, gravimetria, porosimetria indireta, foi utilizado água destilada como fluido de preenchimento dos poros, uma vez que as partículas constituintes das camadas filtrantes apresentam diâmetros superiores a 3 mm. Além disso, em testes preliminares em que houve o emprego do álcool etílico absoluto P.A (99,95%), foram observados danos aos cilindros de acrílico expostos ao álcool.

As colunas foram mantidas sem a aplicação da cola de silicone para realização dos métodos de porosimetria direta, gravimétrico, porosimetria indireta e

a TC-Ry, visto que a metodologia seguida exigia a remoção dos do arranjo para secagem das pérolas, no caso das técnicas de porosimetria por intrusão de água, e escaneamento inicial do tubo de acrílico vazio, no caso da TC-Ry.

Por conta da limitação do espaço da câmara onde a amostra é inserida no equipamento de porosimetria a gás, os conectores das extremidades foram substituídos por fita adesiva com perfurações que permitiam a entrada do gás, ao passo que sustentavam o recheio no volume do cilindro (Figura 18). Por fim, para os escaneamentos no equipamento de μ TC-RX os conectores foram fixados com cola de silicone, a fim de garantir estabilidade à estrutura, uma vez que a amostra é rotacionada durante o procedimento.

Figura 18 - Colunas de referência com fitas adesivas nas extremidades



Fonte: A autora, 2024.

Os ensaios de porosimetria direta, gravimetria e porosimetria indireta foram conduzidos no Laboratório de Física do Solo (LabFiSol), enquanto o de porosimetria a gás foi conduzido no Laboratório de Petrofísica. O método de transmissão gama foi executado no Laboratório de Tomografia Gama (LabTG) Prf. Dr. Corneliu Keller. Sendo todos os laboratórios citados pertencentes ao Grupo de Pesquisa ICSMP.

3.2.1 Método de porosimetria direta

O método de porosimetria ou porosimetria direta consiste na determinação do volume de vazios presentes em uma amostra porosa com base no volume ocupado por um líquido que preenche os poros do material. É um método consideravelmente simples e de fácil execução, que necessita apenas de uma bureta e do líquido.

O procedimento iniciou com uma das extremidades dos cilindros de acrílico das colunas sendo vedada com plástico filme, para retenção do líquido no cilindro. Também foi utilizado um disco de PVC sob a base do conector para apoiar a extremidade vedada e evitar a deformação do plástico decorrente do peso do líquido, como apresentado na Figura 19.

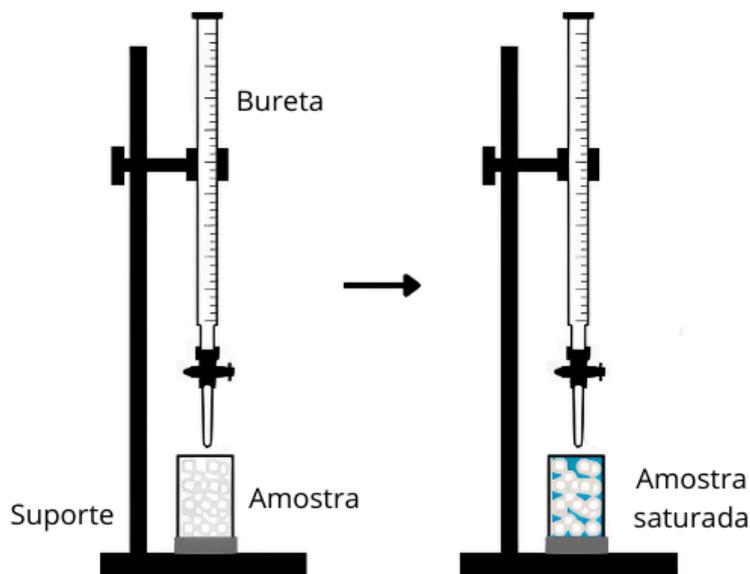
Figura 19 - Vedação de uma das extremidades da coluna para ensaio de porosimetria direta



Fonte: A autora, 2024.

Com a amostra seca e a bureta de 50mL devidamente preenchida, iniciou-se o preenchimento da mesma com o líquido de forma cautelosa, evitando a formação de bolhas de ar no líquido. Ao final, após o preenchimento total da amostra (Figura 20), o volume do líquido (V_L) utilizado indicado pela bureta refere-se ao volume de poros (V_p) da amostra (Equação (15)).

Figura 20 - Saturação da amostra para ensaio de porosimetria direta



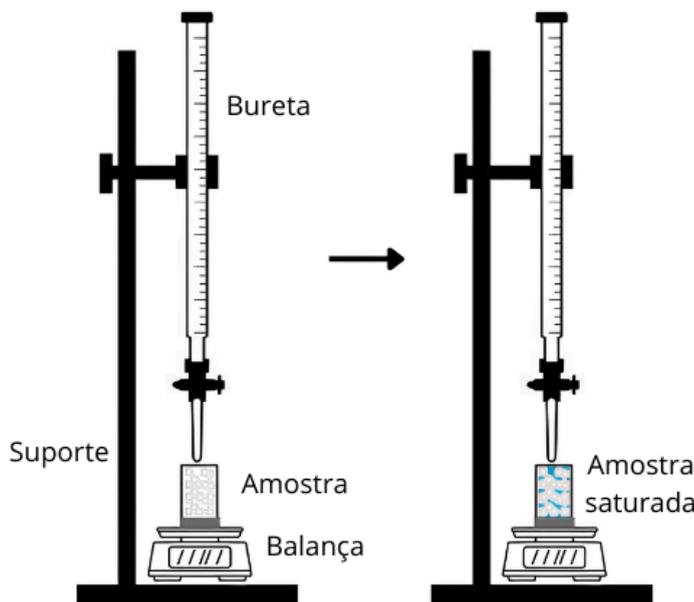
Fonte: A autora, 2024.

3.2.2 Método gravimétrico

O método gravimétrico é uma técnica usada para determinar a porosidade de um material, baseada na medição do aumento de massa da amostra causada pela adição de um líquido que preenche os poros do material. É um método relativamente simples e pode ser aplicado a diversos materiais porosos.

O procedimento iniciou-se com a pesagem da amostra seca, assumindo como massa 1 (M_1), utilizando uma balança analítica modelo BL3200H da *Shimadzu*. Em seguida, os poros foram preenchidos por água destilada, como ilustra a Figura 21. A amostra foi mantida imersa no líquido por tempo suficiente para que o líquido penetrasse completamente nos poros, tentando evitar a retenção de bolhas no líquido. Em seguida é tomada a medida da massa da amostra mais o líquido, denominada massa 2 (M_2).

Figura 21 - Saturação da amostra para ensaio de gravimetria



Fonte: A autora, 2024.

A partir do balanço das massas, a massa do líquido (M_L) é dada pela diferença entre as massas 1 e 2 (Equação (17)). Posteriormente, é determinado o volume do líquido (V_L) com base na massa do líquido e na sua densidade (ρ), que no caso da água destilada foi assumido o valor de $1,0 \text{ g/cm}^3$ (Equação (18)). Por fim, a porosidade $\phi(\%)$ da coluna é expressa pela Equação (16).

$$M_L = M_2 - M_1 \quad (17)$$

$$V_L = \frac{M_L}{\rho} \quad (18)$$

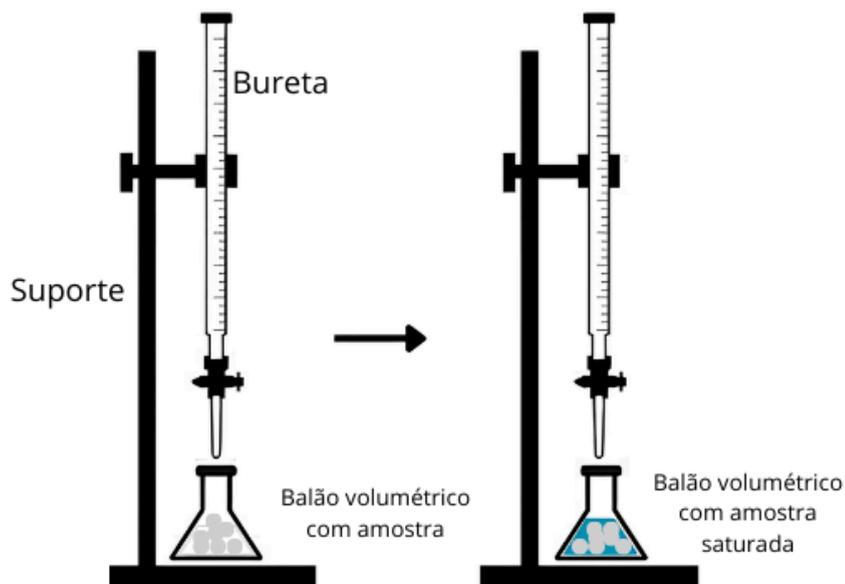
3.2.3 Método de porosimetria indireta

Diferentemente dos métodos citados anteriormente, esta técnica determina a porosidade com base no volume ocupado pelos sólidos que compõem a amostra. No caso das colunas montadas, foi determinado o volume do agrupamento de pérolas de vidro de cada uma das colunas.

Para o procedimento foi necessário utilizar uma bureta (50 mL), balões volumétricos (50 mL) e água destilada. Após a definição do agrupamento das pérolas de cada uma das colunas com suas respectivas identificações, os montantes foram dispostos separadamente em balões volumétricos.

Para determinação do volume do montante, o balão volumétrico, contendo as amostras, foi preenchido com água destilada até a marcação indicada pela vidraria, como demonstra a Figura 22.

Figura 22 - Saturação da amostra para ensaio de porosimetria indireta



Fonte: A autora, 2024.

Ao final, a diferença entre o volume do balão volumétrico (V_B) e o volume de água utilizado (V_L), indicado pela bureta, resulta no volume do montante de pérolas de vidro (V_{PV}) (Equação (19)). O volume total de poros (V_P) é obtido pela diferença entre o volume do cilindro de acrílico vazio (V_C) e o volume das pérolas de vidro (V_{PV}) (Equação (20)). A porosidade $\phi(\%)$ é dada pela Equação (16).

$$V_{PV} = V_B - V_L \quad (19)$$

$$V_P = V_C - V_{PV} \quad (20)$$

3.2.4 Porosimetria a gás

O porosímetro a gás hélio é amplamente utilizado em várias áreas, como ciência dos materiais e geologia, para determinar a porosidade de diferentes materiais, incluindo rochas, cerâmicas, membranas, entre outros. A análise dos poros é importante para entender as propriedades físicas e o desempenho desses materiais em várias aplicações. O gás hélio é usado em função de sua baixa

densidade e não reatividade com a maioria dos materiais, o que permite que ele penetre em poros muito pequenos e forneça medições precisas (Oliveira *et al.*, 2016; Njiekak *et al.*, 2018)

O princípio de funcionalidade do porosímetro a gás hélio se baseia na lei dos gases ideais, que descreve o comportamento dos gases em termos de volume, pressão, temperatura e quantidade de substância. Segundo essa lei, a pressão de um gás é inversamente proporcional ao volume ocupado por ele, desde que a temperatura e a quantidade de substância sejam mantidas constantes. Essa relação também é conhecida como lei de Boyle-Mariotte (Halliday, *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2016; Atkins, *et al.*, 2021).

Foi utilizado o porosímetro a gás hélio DCI *Test System* (Figura 23). Por se tratar de uma camada porosa contida no interior de um cilindro de acrílico, foi necessário fazer a consideração do volume parede do cilindro como sendo um espaçador do próprio equipamento, a fim de minimizar sua influência na porosidade da amostra.

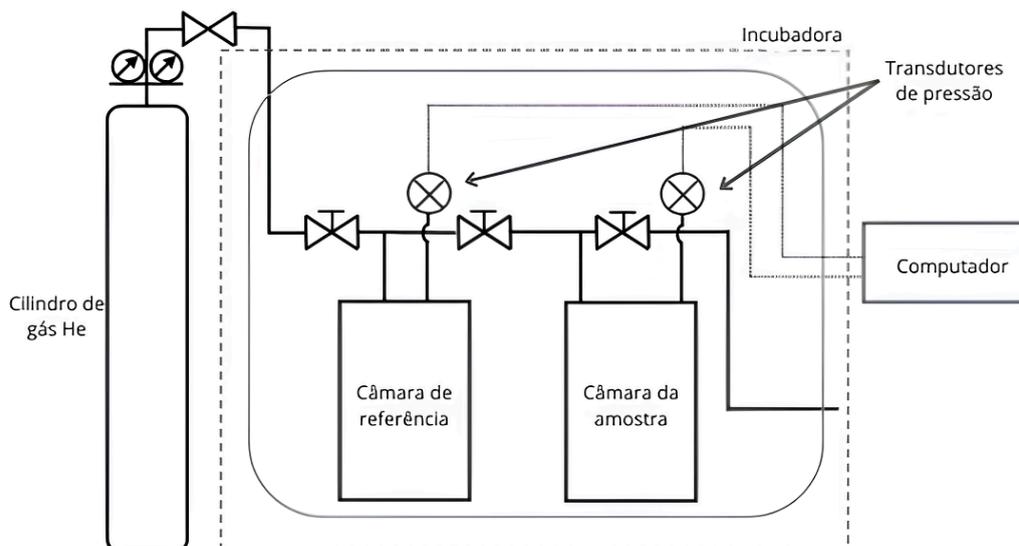
Figura 23 - Porosímetro a gás hélio DCI *Test System*



Fonte: A autora, 2024.

Como citado anteriormente, para esta medição os conectores foram substituídos por fita adesiva (Figura 18). O procedimento teve início com a inserção da amostra sólida em uma câmara hermética, que é conectada a um sistema de gás por uma câmara de referência, como a Figura 24 ilustra.

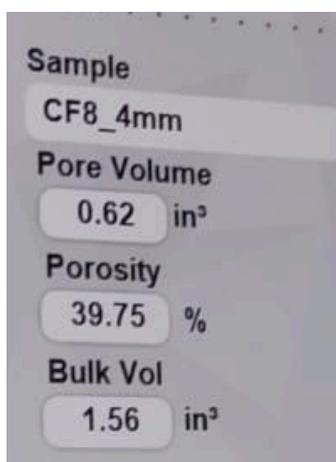
Figura 24 - Diagrama esquemático de um porosímetro a gás Hélio



Fonte: Sun *et al.*, 2016 (ADAPTADO).

Inicialmente o gás hélio é introduzido na câmara de referência até estabilizar numa pressão entre 100 PSI e 110 PSI, em seguida é aberta a entrada para a câmara hermética contendo a amostra. A pressão do gás é monitorada com um sensor, sendo determinado seu volume a partir desse monitoramento. Por fim, o percentual de porosidade, o volume de poros e volume total da amostra (Figura 25) é dado com base no volume ocupado pelo gás e nas medidas da amostra inseridas inicialmente no aparelho.

Figura 25 - Percentual de porosidade, o volume de poros e volume total da amostra gerados pelo programa do DCI Test System



Fonte: A autora, 2024.

3.2.5 Microtomografia Computadorizada de Raios X (μ TC-RX)

A tomografia computadorizada (TC) é uma técnica avançada de imagem que tem uma ampla gama de aplicações em diferentes campos, incluindo a ciências dos materiais. Quando aplicada como método não destrutivo a TC desempenha um papel fundamental na caracterização de materiais e estruturas, como determinação de porosidade, tortuosidade e permeabilidade (Berger, 1965; Rouquerol *et al.*, 2011; Haide *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023).

A TC é baseada na captura de imagens bidimensionais de seções transversais de um objeto e na reconstrução computacional dessas seções em uma imagem tridimensional. No caso da μ TC-RX, são utilizados raios X, produzidos no aparelho de microtomografia.

A porosidade via Tomografia Computadorizada de Raios X é dada com base na atenuação sofrida pelos feixes de raios X que incidem sobre uma amostra localizada entre a fonte e o detector. As imagens tomográficas foram obtidas com um aparelho de μ TC-RX de terceira geração modelo NIKON XT H 225 ST (Figura 26), localizado no LTC-RX - DEN/UFPE.

Figura 26 - Tomógrafo de Raios X, modelo XT H 225 ST da Empresa Nikon Metrology.

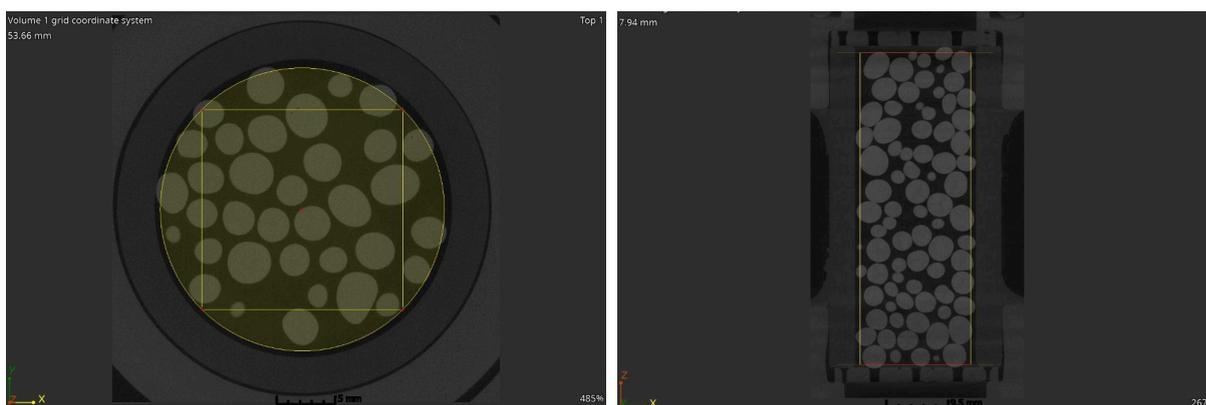


Fonte: VILA NOVA (2020).

Foram utilizadas as seguintes condições de escaneamento: tensão de 200 kV, corrente igual a 90 μ A, filtro de Cu de 0,5 mm e resolução de 25 μ m.

As projeções tomográficas foram reconstruídas no programa CTPro 3D XT 3.03 (*Nikon Metrology*). O processo baseia-se na obtenção de um volume 3D representativo a partir do empilhamento das radiografias. Após gerado, o volume foi recortado a fim de eliminar a parede do tubo de acrílico, como destaca a Figura 27.

Figura 27 - Recorte do volume de interesse do volume total da amostra.



Fonte: A autora (2024).

Na região no interior do destaque é possível observar que para recortar totalmente o acrílico, foi necessário recortar também parte da região de borda da amostra, que, por ser a região de encontro das extremidades das pérolas de vidro com o acrílico, é predominantemente constituída por regiões de poros. Essa observação é importante, visto que a eliminação de uma vasta quantidade de regiões de vazios pode resultar em uma subestimação da porosidade da amostra, em relação às outras técnicas.

Finalizada a seleção do volume de interesse, as amostras foram processadas e segmentadas no *software* VGStudio Max 3.4.4 (*Volume Graphics*). Na etapa de processamento, foi aplicado o filtro de Gauss em todas as amostras, uma vez que as mesmas apresentaram artefatos de ruídos na superfície das pérolas. Para os cálculos de porosidade e permeabilidade, foi necessário segmentar a amostra (processo no qual a imagem é separada em regiões, neste caso, de vazios e não vazios). Após isso, a porosidade foi calculada pela relação entre o volume total da amostra e o volume de poros identificados no processo de segmentação, feita pelo

próprio *software*. E a permeabilidade foi obtida selecionando a região de entrada da amostra como sendo o topo superior ilustrado na Figura 38.

3.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL COM FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Em um processo típico de simulações de CFD, o primeiro passo é a definição da geometria do problema e das condições iniciais e de contorno. Em seguida, a malha é gerada e os parâmetros do fluido são atribuídos aos elementos finitos ou volumes finitos. As equações de conservação são discretizadas e resolvidas numericamente para obter a distribuição de velocidade, pressão, temperatura, entre outras variáveis, no domínio do problema.

No caso deste trabalho, a simulação de CFD foi utilizada para determinar o número de partículas retidas em um meio poroso. Inicialmente, a geometria do meio poroso foi definida (seção 3.3.1), contemplando sua forma, tamanho e a distribuição dos poros. Em seguida, uma malha computacional foi gerada para representar a geometria dos meios porosos (seção 3.3.2). Essa malha, composta por elementos finitos, permite discretizar o domínio do problema, facilitando a análise numérica.

Das nove colunas projetadas e estudadas, foram desenvolvidos um modelo CAD (do inglês *Computer-Aided Design*) para as amostras CF4_3mm, CF7_4mm e CF10_M.

3.3.1 Modelo geométrico

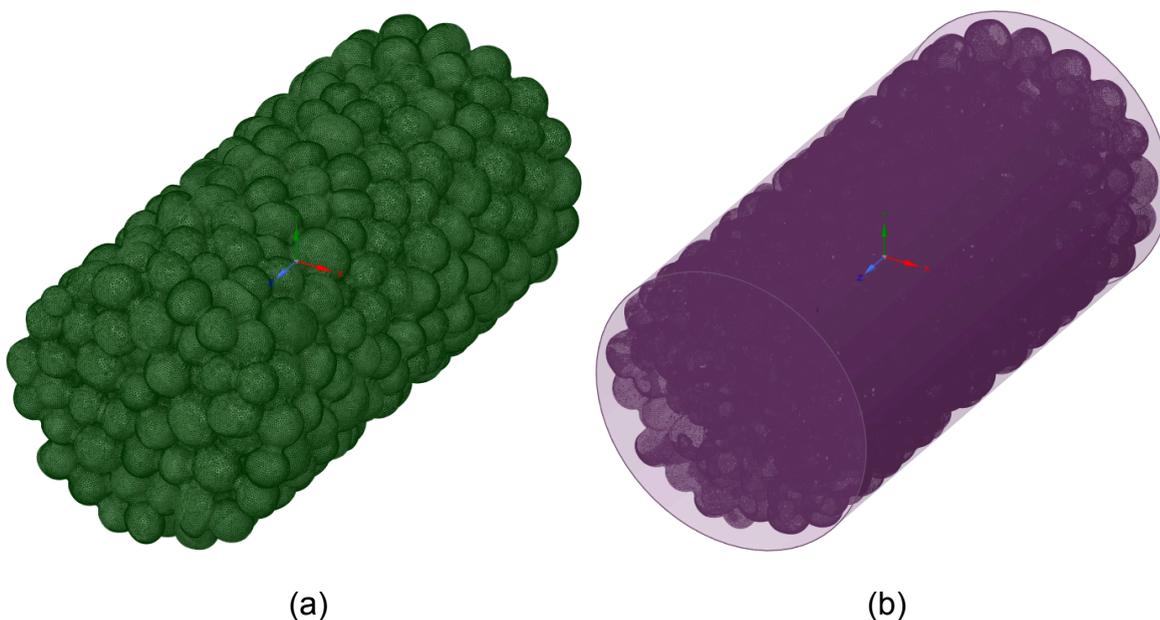
Um modelo CAD é uma representação digital de um objeto físico ou sistema, criado usando software especializado de design assistido por computador. A etapa inicial do processo de geração do modelo geométrico envolve a reconstrução de imagens tomográficas e extração de superfícies para formar um modelo tridimensional (3D) no formato STL, facilitado pelo *plugin 3D Viewer* dentro do *software ImageJ 1.54f* (Ferreira; Rasband, 2012).

Arquivos STL codificam dados geométricos definindo superfícies através de facetas triangulares. Cada faceta é caracterizada por um vetor normal unitário, ortogonal ao seu triângulo correspondente com uma magnitude de 1.0, e delineada pelas coordenadas de seus três vértices. Para cada faceta, um total de 12 valores numéricos são armazenados: três para o vetor normal e nove para as coordenadas dos vértices (Szilvsi-Nagy e Mátyási, 2003). Essa representação assegura a preservação precisa da topologia da superfície e dos detalhes geométricos

essenciais para análises e simulações computacionais subsequentes. Como benefício adicional, este formato de arquivo pode ser carregado no software Ansys Discovery SpaceClaim (ANSYS Team, 2023a).

Utilizando este último, o modelo com facetas triangulares é transformado em um corpo sólido (Figura 28a). Após essa transformação, ferramentas de reparo são aplicadas para identificar lacunas, faces ausentes, arestas extras ou duplicadas, entre outros problemas no corpo sólido. Por fim, a coluna de pérolas de vidro é encapsulada dentro de um cilindro com dimensões equivalentes às da parede interna da coluna de acrílico, e é realizada uma operação de subtração booleana entre o cilindro e as pérolas. O corpo sólido resultante (Figura 28b) desta operação de subtração corresponde ao espaço fluido, e é este corpo sólido que deve ser malhado e utilizado para simulações com Ansys CFX. O processo de geração desta geometria é repetido de forma idêntica para as três colunas.

Figura 28 - Representação de corpo sólido da coluna de pérolas de vidro (a) e região fluida (b) após operação de subtração booleana.



Fonte: A autora (2024).

3.3.2 Geração da malha e estudo de independência

O próximo procedimento consistiu na criação de malhas de elementos tetraédricos para o domínio computacional. Foram realizadas avaliações meticulosas dos parâmetros de qualidade da malha, como a *Skewness* (Irregularidade) e a *Orthogonal Quality* (Qualidade Ortogonal), a fim de garantir que permanecessem

dentro dos limites aceitáveis. Isso assegura a robustez e a precisão da análise computacional.

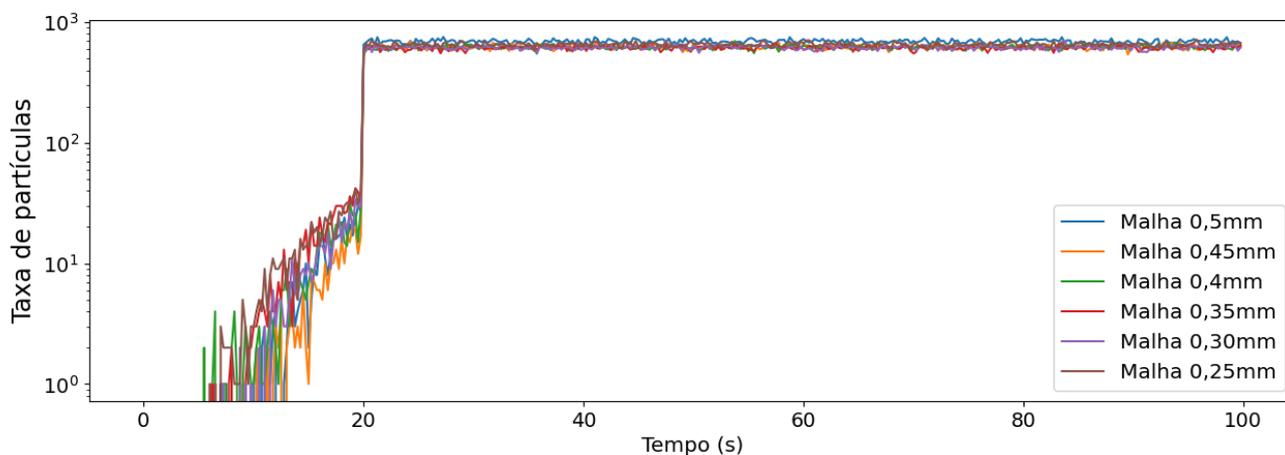
Posteriormente, foi conduzido um estudo de independência da malha para determinar o tamanho do elemento no qual os resultados permanecem consistentes independentemente da resolução da malha. Diversos tamanhos de elementos de malha foram avaliados, variando de 0,50mm a 0,25mm. A seleção desses intervalos de tamanho foi embasada em experiências anteriores, buscando-se encontrar um tamanho de elemento que garantisse a independência dos resultados em relação à resolução da malha. A Tabela 2 apresenta os tamanhos dos elementos estudados e os números correspondentes de nós e elementos gerados para cada malha no modelo geométrico da CF4_3mm.

Tabela 2 - Principais características das malhas estudadas

Malha ID	Tamanho do elemento (mm)	Elementos	Nós
1	0,50	2,24M	665k
2	0,45	2,45M	700k
3	0,40	2,75M	751k
4	0,35	3,19M	827k
5	0,30	3,90M	951k
6	0,25	5,03M	1,15M

Para investigar a independência da malha, foram realizados cálculos transientes de 100 segundos utilizando cada malha, com avaliação da convergência da quantidade média de partículas retidas no domínio computacional através da saída a cada passo de tempo (estabelecido em 0,25 segundos). A Figura 29 apresenta os valores obtidos para esse parâmetro em cada malha. Observa-se que os resultados são próximos entre si, pois os tamanhos dos elementos de malha foram selecionados intencionalmente próximos a intervalos nos quais os resultados se tornam independentes da malha.

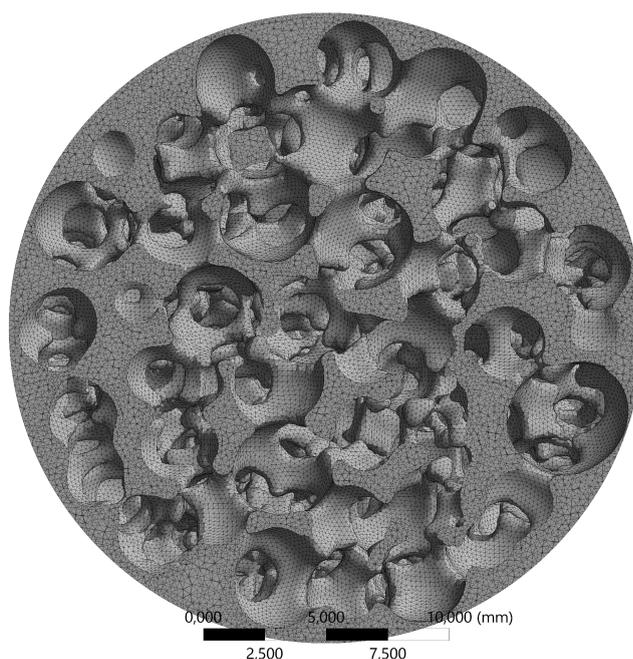
Figura 29 - Taxa de saída de partículas do domínio computacional através das malhas estudadas



Após analisar esse parâmetro, constatou-se que ele converge abaixo de uma diferença relativa de 1% a partir da malha 2 (com tamanho de elemento de 0,45 mm) e assim por diante. Portanto, todas as simulações com ANSYS CFX serão realizadas utilizando esse tamanho de elemento.

A Figura 30 mostra uma seção transversal das estruturas internas de uma das malhas geradas, revelando os espaços vazios equivalentes às pérolas de vidro, que não são representados explicitamente, pois não são relevantes para a simulação de fluidodinâmica.

Figura 30 - Seção transversal das estruturas da malha interna



Fonte: A autora (2024).

3.4 SIMULAÇÕES DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Desenvolvidos os modelos CAD para as 3 amostras estudadas, deu-se início às simulações de CFD. Simulação CFD é uma ferramenta que combina princípios da física dos fluidos, matemática e computação para analisar e resolver problemas relacionados ao comportamento de fluidos.

Quando se simula o transporte de partículas em meio poroso, cada uma das equações de Navier-Stokes (Equações (8), (9) e (10)) é resolvida em cada passo de tempo, permitindo que o movimento do fluido, e conseqüentemente o trajeto das partículas seja calculado desde a entrada do domínio até a saída, com base nas condições de simulação determinadas pelo usuário. Estas condições referem-se aos valores que satisfazem essas equações. Neste tipo de simulação, além dos cálculos de previsão do trajeto, também são computadas as perdas de energia que as partículas podem sofrer ao passar por colisões elásticas (Meira Filho, Kamassury, Meira, 2017). Assim, uma condição crucial para tornar a simulação o mais realista possível é a utilização do coeficiente de restituição do material sendo simulado.

Para este trabalho, foram assumidas condições de simulação que se assemelham às de um experimento de percolação em meios porosos. No entanto, também foram consideradas discrepâncias nos tamanhos dos poros, seja em colunas contendo solo (comumente usadas em ensaios de percolação) ou em colunas contendo pérolas de vidro.

Dado que os meios porosos deste estudo possuem um volume poroso considerável, optou-se por simular a passagem de partículas de zircônia suspensas em água através desses meios. A zircônia foi escolhida devido à sua natureza inerte e não reativa, o que permitiria a reprodução experimental de todas as condições das simulações, em caso de haver a necessidade de validação. Para todos os estudos de simulação, foram adotadas as seguintes propriedades da zircônia: capacidade térmica específica de 418,4 J/kgK (AZoM, 2024); condutividade térmica de 2,7 W/mK (CERAMTEC, 2024) e massa molar igual a 123,218 g/mol (SUNWISE CHEM, 2023).

3.4.1 Avaliação da colmatação: condições de contorno e parâmetros de solução para avaliação da colmatação

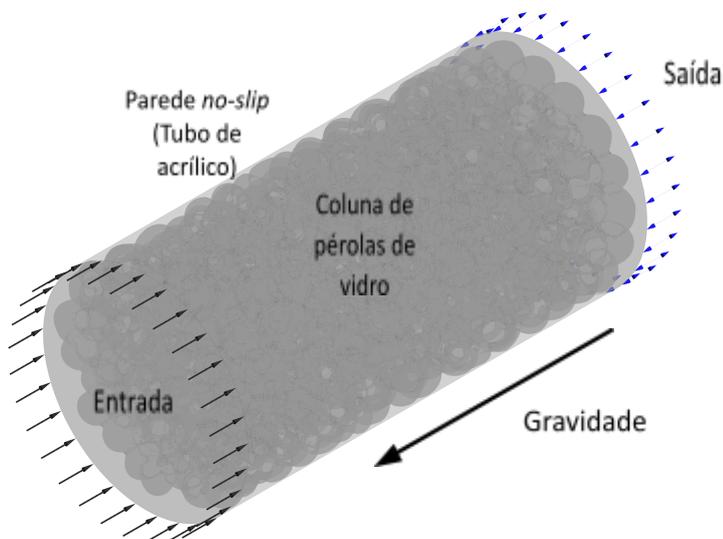
As simulações foram realizadas de forma transiente, utilizando a abordagem Euler-Lagrange, por meio do código ANSYS CFX 2023R1 (ANSYS Team, 2023b),

com uma duração total de 100 segundos e intervalos de tempo de 0,25 segundos. A temperatura da mistura água-partícula foi mantida constante a 25°C, seguindo uma condição isotérmica e um modelo de escoamento laminar.

A abordagem Euler-Lagrange foi escolhida por sua capacidade de tratar as partículas como entidades discretas e o fluido como um contínuo, permitindo uma representação precisa da interação entre fluido e partícula. Condições de contorno de *no-slip* (antiderrapante) foram aplicadas às paredes rígidas tanto do cilindro de acrílico, quanto das pérolas de vidro.

Foi utilizado o modelo de flutuabilidade, no qual a gravidade atua contra o movimento da mistura (Figura 31). Para simular o escoamento da coluna, foi estabelecida uma condição de contorno de 'abertura' na saída, permitindo que fluido e partículas deixem livremente o domínio computacional. Utilizou-se o coeficiente de tensão superficial da água, e o modelo de Schiller Naumann foi empregado para calcular a força de arrasto.

Figura 31 - Modelo computacional em Ansys CFX.



Fonte: A autora (2024).

Foi definido um alvo residual para o erro quadrático médio (RMS) de 10^{-6} . Além disso, foram empregados os modelos de *High Resolution* (Alta Resolução) e de *Second Order Backward Euler* (Segunda Ordem de Euler Reverso) para os esquemas de advecção e transientes, respectivamente.

As propriedades dos materiais para água e partículas foram configuradas de acordo com a biblioteca de materiais do ANSYS CFX 2023R1. Para o coeficiente de

restituição, referente às perdas de energia causadas pelas colisões elásticas entre a superfície do meio poroso e as partículas de zircônia foi adotado o valor de 0,9, por especificidade da interação dos materiais (Sadeghnejad *et al*, 2022). Para a mistura, foi estabelecida uma velocidade de entrada de 10mm/s, com partículas de 10µm, e não foi considerada rugosidade na parede de pérolas de vidro. Inicialmente, uma taxa de entrada de partículas equivalente a 2×10^4 partículas por segundo foi estabelecida como caso padrão para análise de independência de malha e avaliação da colmatção. Posteriormente, esses parâmetros foram examinados em estudos de sensibilidade. A colmatção foi avaliada a partir da comparação entre as porosidades inicial, obtida a partir do volume obtida por meio da μ TC-RX, e após as simulações, obtida a partir da soma da porosidade inicial e do volume de partículas retidas após a simulação.

O arquivo de saída gerado ao final das simulações categoriza as partículas em seis grupos distintos: as que adentraram a coluna (*entered domain*); aquelas que prosseguiram na coluna para o próximo passo de tempo (*continue from last time step*); as que deixaram a coluna (*left domain*); as que permaneceram contidas na coluna até o final do passo de tempo e aguardam o próximo (*waiting for next time step*); as que ultrapassaram o limite de integração (*exceeded integration limit*); e as que ultrapassaram o limite de tempo (*exceeded time limit*).

Esses dois últimos parâmetros formam parte do grupo de controles dos que dispõe o modelo de transporte de partículas do Ansys CFX para terminar o “caminho” ou “vida” das partículas numa simulação. Dentro desse modelo, cada partícula é rastreada até que um dos critérios de aborto seja satisfeito ou a partícula escape do domínio. As partículas também podem ser abortadas se for encontrado um erro de rastreamento. Como cada partícula é rastreada desde o seu ponto de injeção até que algum critério de aborto seja atendido, ela não influencia outras partículas. Assim, um erro de rastreamento para uma partícula não interrompe necessariamente a execução do software.

O parâmetro *exceeded integration limit* é o controle usado para encerrar o rastreamento de partículas que possam ficar presas em zonas de recirculação. O número de etapas de integração é calculado como o número de etapas de integração por elemento multiplicado pelo número de elementos atravessados por uma partícula. O valor padrão no *software* é 10.000.

O outro parâmetro, *exceeded time limit*, é o tempo real durante o qual as partículas são integradas. Representa um tempo suficientemente longo para que uma partícula seja rastreada através da geometria, mas não muito grande, caso contrário o custo computacional do rastreamento de partículas que podem ficar presas em zonas de recirculação pode se tornar excessivamente grande.

O tempo limite padrão em que *software* rastreia uma partícula que recircula é de 10 segundos. Contudo, para garantir uma maior acurácia no resultado da simulação, foi utilizado o dobro desse valor (20 segundos), esta é a razão pela qual pode ser observado nos gráficos das simulações uma espécie de salto no resultado da simulação no segundo 20. Essas partículas "desaparecem" do cálculo, pois o *software* as considera retidas no meio poroso, entendendo que as mesmas não contribuem mais significativamente para o fluxo e não as leva em consideração para cálculos futuros. (ANSYS, 2009). Sendo assim, os volumes das partículas que excederam os limites de integração e de tempo foram utilizados para calcular a redução da porosidade das amostras após as simulações.

3.4.2 Estudo de sensibilidade

A colmatação dos poros ocorre quando partículas obstruem poros, sejam eles menores que seu próprio diâmetro, ou quando aglomerados de partículas formam barreiras na entrada dos mesmos. A quantidade de partículas retidas em meios porosos é influenciada pela velocidade do fluxo que exerce forças de cisalhamento diferentes a depender da sua variação, pela concentração inicial de partículas, pelo tamanho da partícula e heterogeneidade da superfície (rugosidade) (Lin *et al.*, 2021).

Com o objetivo de avaliar a influência dos resultados de colmatação obtidos nos meios porosos estudados, quanto a esses parâmetros, foram variadas as condições de contorno estabelecidas inicialmente na seção 3.4.1. Dessa forma, foram conduzidas análises de sensibilidade em quatro parâmetros distintos:

- Velocidade: Foram investigados cinco valores de velocidade (0,5mm/s, 1,0mm/s, 1,5mm/s, 2,0mm/s e 2,5 mm/s).
- Tamanho das partículas: quatro tamanhos diferentes foram incluídos, variando de 5µm a 20µm, com incrementos de 5 µm entre cada ponto.
- Rugosidade da parede de pérolas de vidro: A rugosidade foi explorada utilizando o modelo de Sommerfeld-Frank, com valores assumidos de 0µm, 5µm, 10µm, 15µm e 20µm.

- Taxa de entrada de partículas: Foram examinados valores de 5×10^3 , 10^4 , $1,5 \times 10^4$ e 2×10^4 partículas por segundo.

Em cada análise de sensibilidade, foi considerado o número de partículas retidas na coluna ao final das simulações. Por fim, foram calculadas: a diferença de partículas, a diferença relativa, a média das diferenças locais por segundo, e o coeficiente de determinação (r^2) de partículas retidas entre a simulação com as condições padrão e as simulações variando cada parâmetro, para cada coluna estudada.

3.4.3 Estudo dos modelos físicos

Foi empregada uma modelagem de interação fluido-partícula unidirecional (*one-way coupling*) para a avaliação da colmatação e estudo de sensibilidade das amostras. Entretanto foram realizados estudos a fim de verificar a eficácia de um modelo completamente acoplado (*fully coupling*).

Na modelagem de interação fluido-partícula unidirecional, o fluido afeta o movimento das partículas, mas as partículas não afetam o movimento do fluido. Ou seja, o comportamento do fluido é calculado independentemente do movimento das partículas, assumindo-se que o efeito das partículas no fluido é negligenciável. Por outro lado, na modelagem completamente acoplada, tanto o fluido quanto as partículas afetam ativamente o movimento um do outro. Isso significa que o movimento do fluido é influenciado pelas partículas, e vice-versa. Nesse caso, ocorre uma troca bidirecional de informações entre o fluido e as partículas durante o cálculo, levando em consideração a interação mútua entre eles.

Apesar de o modelo *fully-coupled* ser mais acurado que o *one-way*, este trabalho utilizou o modelo mais simples para a avaliação da colmatação das amostras, visto que o *one-way* é mais simples e demanda menor capacidade computacional para sua realização. Neste sentido, este estudo foi realizado a fim de avaliar a perda de informação ao utilizar o modelo *one-way* em detrimento ao modelo *fully-coupled*.

Para este estudo, foram utilizadas as mesmas condições definidas para a avaliação da colmatação (velocidade de entrada de 10mm/s; tamanho de partículas de 10 μ m; rugosidade zero e taxa de entrada de 2×10^4 partículas por segundo). Por fim, foram calculadas: a diferença de partículas, a diferença relativa, a média das

diferenças locais por passo de tempo, e o coeficiente de determinação (r^2) de partículas retidas entre os dois modelos, para cada coluna estudada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, foram discutidos os resultados de uma abordagem integrada que combina a confecção e validação de protótipos, a validação da técnica de porosimetria por μ TC-RX em relação às porosimetrias por injeção de fluidos e os estudos de fluidodinâmica computacional (CFD). Essa abordagem abrangente visa fornecer uma compreensão dos processos e fenômenos estudados, utilizando tanto os aspectos experimentais quanto os computacionais.

Inicialmente, foi tratado a confecção e validação dos protótipos, que servem como modelos físicos representativos dos sistemas estudados. Esses protótipos foram projetados e produzidos a fim de baixar os custos dos ensaios experimentais que demandam o uso de muitas colunas de percolação. A validação desses protótipos envolveu uma análise de condições operacionais específicas.

Em seguida, foi explorada a validação da técnica de porosimetria por tomografia de raios X, comparando seus resultados com as porosimetrias obtidas por meio da injeção de fluidos. Essa comparação permitiu avaliar a precisão e a confiabilidade da μ TC-RX na determinação da porosidade nos materiais investigados.

Por fim, os estudos de CFD foram analisados, buscando uma compreensão abrangente dos processos nos sistemas estudados. Ao reunir esses elementos, esta dissertação representa um esforço abrangente para investigar e compreender os sistemas estudados, utilizando abordagens computacionais para fornecer uma compreensão dos processos e fenômenos em investigados.

4.1 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS PROTÓTIPOS DE COLUNAS DE PERCOLAÇÃO

Os três protótipos foram submetidos a testes de carga hidráulica e fluxo contínuo para verificar sua resistência. Eles se diferem na quantidade de cola de silicone usada na junção entre a base do conector de PVC e a parede externa do tubo de acrílico, de maneira crescente. Logo, o protótipo CF3_3mm apresenta mais cola nessa região que o protótipo CF2_3mm, que por sua vez apresenta mais cola que o protótipo CF1_4mm.

O protótipo CF1_4mm apresentou vazamento logo nos primeiros instantes do ensaio de fluxo hidráulico, sob uma vazão de 0,07mL/s. Já os protótipos CF2_3mm

e CF3_3mm foram submetidos a essa vazão por 2 horas sem apresentarem vazamentos.

Apesar do bom desempenho, no ensaio de carga hidráulica a base do protótipo CF2_3mm veio a colapsar (como apresentado na Figura 32) após ser submetido a uma vazão de 5mL/s por cerca de 2 horas.

Figura 32 - Desprendimento do conector inferior do protótipo CF2_3mm decorrente do vazamento apresentado durante ensaio de carga hidráulica.



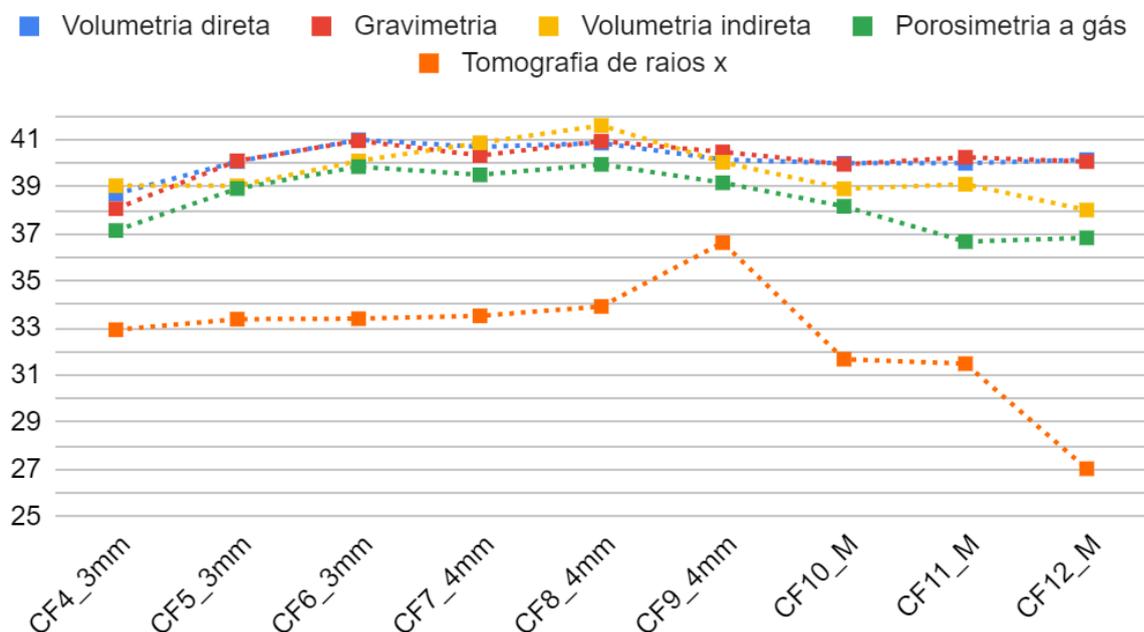
Fonte: A autora, 2024.

Em contrapartida, o prototipo CF3_3mm não apresentou nenhum vazamento após a realização dos ensaios com as três vazões diferentes. No primeiro momento, foi submetido a vazão de 5mL/s por 24 h, no segundo a 10mL/s por 24 h e no terceiro momento a 15mL/s por 24h.

Sendo assim, os resultados sugeriram que a confecção de colunas com base na adição mais generosa de cola de silicone, como foi o caso do protótipo CF3_3mm é mais vantajosa.

4.2 AVALIAÇÃO DA POROSIDADE DAS COLUNAS

Conforme apresentado no gráfico da Figura 33, as técnicas de porosimetria direta e gravimetria produziram resultados praticamente idênticos nas triplicatas de 3mm, apresentando, quando correlacionados entre si, um coeficiente de determinação de 0,99, com base na Tabela 3.

Figura 33 - Variações das ϕ (%) das colunas de referência.**Tabela 3 - Porosidades das colunas de referência.**

Colunas ID	Porosimetria direta	Gravimetria	Porosimetria indireta	Porosimetria a gás	μ TC-RX
CF4_3mm	38,70	38,07	39,05	37,14	32,92
CF5_3mm	40,07	40,10	39,04	38,93	33,38
CF6_3mm	40,99	40,95	40,10	39,86	33,40
CF7_4mm	40,70	40,33	40,87	39,51	33,52
CF8_4mm	40,86	40,94	41,60	39,95	33,92
CF9_4mm	40,15	40,48	40,04	39,17	36,63
CF10_M	40,00	39,95	38,92	39,17	31,68
CF11_M	40,00	40,25	39,11	36,67	31,49
CF12_M	40,15	40,07	38,01	36,83	27,03

A porosidade baixa apresentada pela técnica de μ TC-RX (com diferenças relativas acima de 14,5% comparado com a porosimetria direta) pode ser explicada pela subestimação da porosidade possivelmente causada pela técnica de processamento do volume, cuja Figura 27 demonstra o recorte do volume que

resulta na eliminação de parte do volume de vazios próxima a região de parede da amostra.

Embora as porosidades obtidas pela porosimetria indireta para os conjuntos de 3mm e 4mm foram próximas aos valores obtidos por porosimetria direta e gravimetria, no conjunto misto, observou-se uma diferença de 1,33%, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Porosidade média das triplicatas.

Triplicatas	Porosimetria direta	Gravimetria	Porosimetria indireta	Porosimetria a gás	μTC-RX
3mm	39,92	39,71	39,40	38,64	33,24
4mm	40,57	40,58	40,84	39,44	34,69
Mista	40,05	40,09	38,68	37,23	30,07

A porosidade determinada pela porosimetria a gás hélio foi ligeiramente inferior àquela obtida pelas outras técnicas de injeção de fluido. No entanto, para os conjuntos de 3 mm e 4 mm, essa diferença não ultrapassou 1,4%. No caso dos conjuntos mistos, a porosimetria com gás hélio apresentou uma discrepância de menos de 2% em relação à porosimetria indireta e menos de 3% em relação à porosimetria direta e gravimetria. Sendo observada uma relação contrária à encontrada por Njiekak *et al.* (2018) ao estudar rochas carbonáticas, cuja porosidade pela porosimetria de gás hélio foi cerca de 16% inferior à técnica de μ TC-RX e à Porosimetria por Injeção de Mercúrio (PIM).

Dado o tamanho das moléculas envolvidas em cada experimento, era esperado que a porosimetria a gás apresentasse uma porosidade ligeiramente inferior às outras técnicas. Este fenômeno pode ser atribuído a fatores de correção aplicados no porosímetro a gás, como as medidas de eliminação do volume da parede dos cilindros de acrílico. Fatores estes não observados nas amostras estudadas por Njiekak *et al.* (2018).

Além disso, incertezas de medição também podem estar associadas a uma possível superestimação de porosidade nas técnicas de porosimetria direta, indireta e gravimétrica, uma vez que nestas se faz necessário o fator visual, que é subjetivo, e a possível incorporação de bolhas de ar no fluido, devido à tensão superficial da água.

A possível interferência da parede do cilindro de acrílico nos cálculos de porosimetria a gás decorreu da necessidade de inserir informações sobre seu volume para desconsiderá-lo nos cálculos. Contudo, as medições da parede foram conduzidas experimentalmente em pontos dispersos ao longo de seu comprimento, possivelmente incapazes de detectar todas as irregularidades na parede, uma vez que a mesma não apresenta uma distribuição uniforme. Este cenário pode ter contribuído para uma subestimação da porosidade pelo dispositivo. É relevante destacar que essa interferência já havia sido identificada antes dos testes, embora, apesar dos esforços empreendidos, não tenha sido completamente mitigada.

O desvio padrão entre os valores das triplicatas por cada método demonstrou-se satisfatório, visto que os desvios mais altos são inferiores a 1,5%, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Desvio padrão da porosidades das triplicatas

Triplicatas	Porosimetria direta	Gravimetria	Porosimetria indireta	Porosimetria a gás	μTC-RX
3mm	1,16	1,48	0,61	1,39	0,27
4mm	0,37	0,32	0,78	0,41	1,69
Mista	0,09	0,15	0,59	0,82	2,63

Apesar desta subestimação de porosidade apresentada pela técnica de μTC-RX (33), ao observar os coeficientes de determinação (r^2) (Tabela 6) entre esta técnica e as demais utilizadas neste estudo, é possível constatar que as técnicas apresentaram correlações lineares altas no grupamento de triplicatas de 3mm, cujo valor menos correlato é evidenciado na porosimetria indireta (0,28). No entanto, a porosimetria direta apresentou correlações lineares altas (acima de 0,87) em todos os grupamentos.

Tabela 6 - Coeficiente de determinação (r^2) entre as técnicas de porosimetria por injeção de fluido e μ TC-RX.

Triplicatas	Porosimetria direta	Gravimetria	Porosimetria indireta	Porosimetria a gás
3mm	0,87	0,93	0,28	0,91
4mm	0,89	0,03	0,67	0,57
Mista	1	0,01	0,96	0,20

A constatação das correlações lineares altas entre as técnicas de porosimetria direta, e de moderada a alta em alguns dos grupamentos de triplicatas da porosimetria indireta, gravimetria e porosimetria a gás com a porosimetria por μ TC-RX demonstram que a mesma é válida para aplicações em estudos de porosimetria de amostras de meios porosos. Entretanto, a subestimação de porosidade causada pelo recorte do volume durante a etapa de processamento da imagem ainda deve ser investigada.

4.3 SIMULAÇÕES DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Nesta ramificação dos resultados, concentram-se as análises abrangentes dos resultados obtidos por meio de simulações de CFD, abordando diversos aspectos cruciais. Em particular, examinando de perto os modelos físicos adotados para descrever os fenômenos fluidodinâmicos subjacentes, considerando sua adequação aos sistemas estudados e sua capacidade de capturar com precisão o comportamento dos fluidos em diferentes cenários.

Além disso, exploramos a importância da avaliação da colmatação das amostras nos processos de simulação. A integridade e representatividade das amostras utilizadas para alimentar os modelos de CFD desempenham um papel fundamental na confiabilidade e na validade dos resultados obtidos. Portanto, investigou-se métodos e práticas para garantir uma seleção adequada e uma preparação cuidadosa das amostras, entretanto, aproximações foram adotadas para estimar resultados de simulações contínuas em grandes intervalos de tempo.

Outro aspecto crucial abordado neste trabalho é o estudo de sensibilidade dos parâmetros de simulação. Reconhecendo a complexidade dos sistemas fluidodinâmicos e a influência de variáveis como viscosidade, densidade e geometria, explorou-se de forma sistemática como as mudanças nos parâmetros de

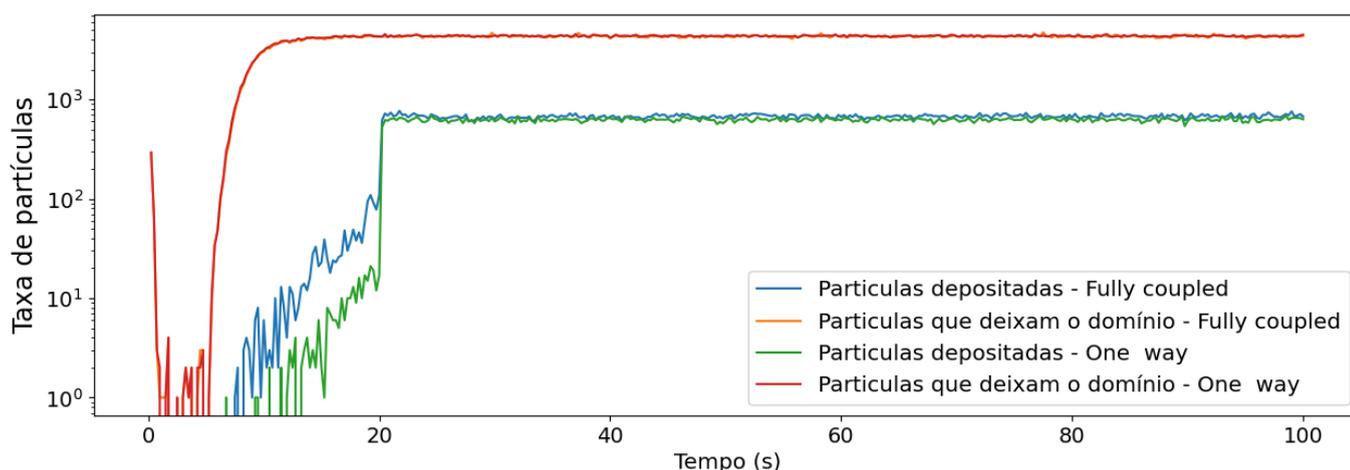
entrada afetam as saídas da simulação. Esta análise detalhada não só forneceu *insights* valiosos sobre a retenção de partículas no meio poroso estudado, como também ajudará na tomada de decisões a respeito da elaboração do modelo experimental para validação das simulações realizadas neste trabalho.

4.3.1 Estudo dos modelos físicos

Com o objetivo de estimar a diferença relativa do modelo *one way* em relação ao modelo físico mais preciso (*fully coupled*), foram realizados estudos que analisaram o número de partículas retidas e que abandonaram o domínio de simulação nas amostras desta pesquisa. Neste estudo, foram empregadas as mesmas condições utilizadas na avaliação da colmatação: velocidade de entrada de 10mm/s, tamanho de partículas de 10 μ m, rugosidade zero e taxa de entrada de 2x10⁴ partículas por segundo. Ao final das simulações, os resultados provenientes de ambos os modelos foram comparados a partir de gráficos e de cálculos estatísticos.

Na primeira amostra (Figura 34), os modelos apresentam comportamento similar em relação ao acúmulo e à saída de partículas do domínio de amostra. Diferenças sutis são observadas apenas no número de partículas depositadas nos primeiros 20 segundos da percolação, convergindo posteriormente em perfis quase que sobrepostos, o que indica resultados próximos entre os modelos.

Figura 34 - Comparação dos modelos físicos na amostra CF4_3mm.

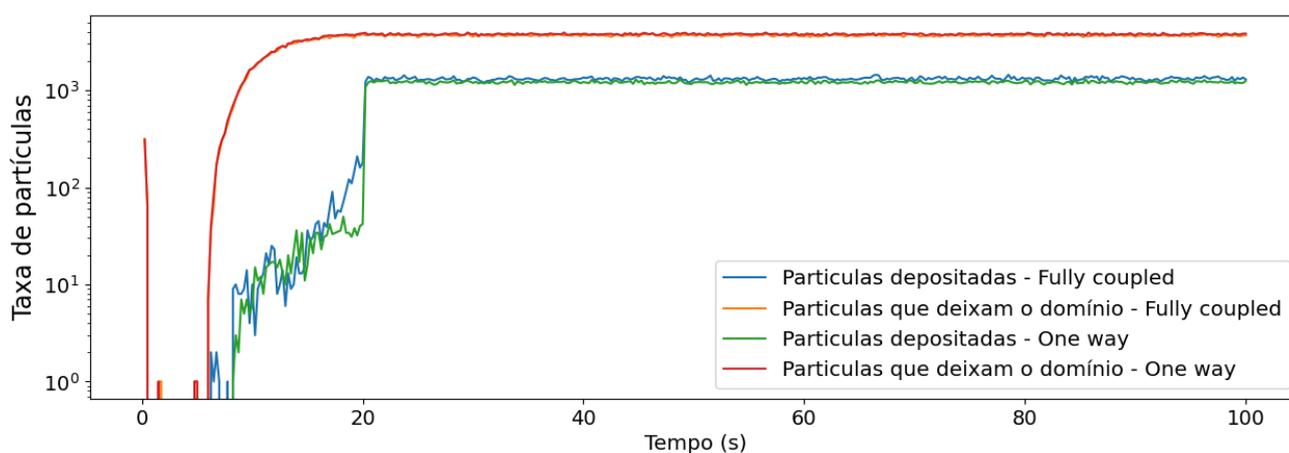


Quando observadas a diferença relativa entre as contagens de partículas acumuladas nos dois modelos e a média das diferenças relativas locais (por passo de tempo), é notado resultados de 8,03% e 8,07%, respectivamente. No entanto, mesmo apresentando cerca de 8% de diferença entre os dados, os coeficientes de

determinação (r^2) demonstram que os valores dos resultados apresentam uma correlação linear de 0,999, o que é considerado uma alta correlação pelos parâmetros de Pearson.

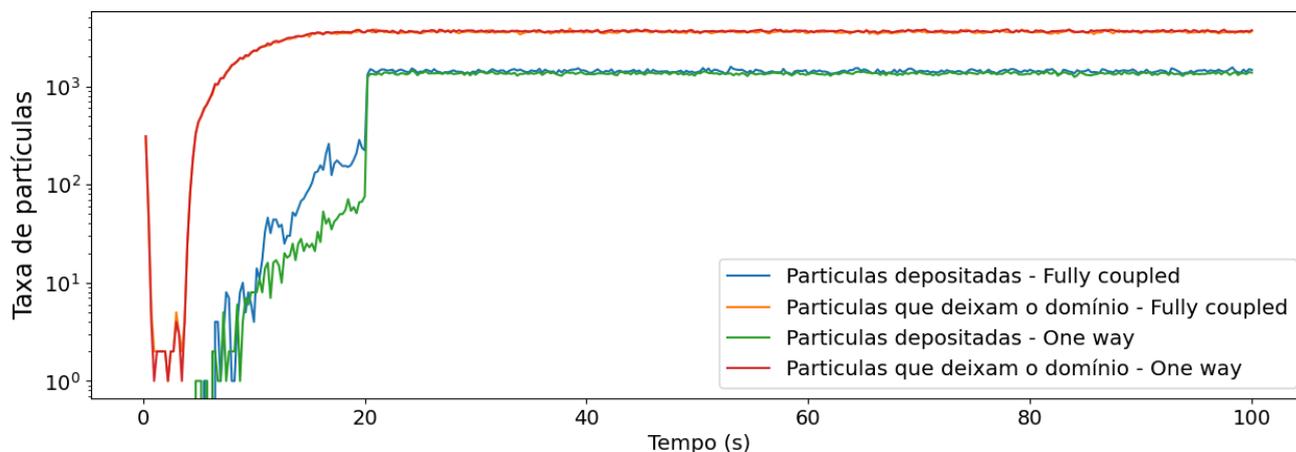
A segunda amostra (Figura 35) exibiu comportamento similar à primeira, com diferença relativa e média das diferenças relativas locais de 8,17% e 7,57%, respectivamente. A correlação linear (r^2) entre os dados dos modelos foi de 0,993, alta nos parâmetros de Pearson, mas ligeiramente inferior à observada na primeira amostra.

Figura 35 - Comparação dos modelos físicos na amostra CF7_4mm.



Na terceira amostra (Figura 36), os perfis seguiram a tendência observada nas amostras anteriores. A diferença relativa e a média das diferenças relativas locais foram menores em relação às outras amostras, alcançando 5,92% e 5,43%, respectivamente. A correlação linear, embora ligeiramente inferior às amostras anteriores, ainda se manteve alta na escala de Pearson, com valor de 0,992.

Figura 36 - Comparação dos modelos físicos na amostra CF10_M.



De modo geral, observa-se que o modelo *one way*, quando comparado com o modelo mais acurado, subestima o número de partículas depositadas na coluna durante os 20 primeiros segundos da simulação. No entanto, os resultados indicam correlações lineares elevadas entre os modelos, com diferença relativa de aproximadamente 7,2%.

4.3.2 Avaliação da colmatação dos poros das colunas de percolação

Para avaliar os perfis teóricos de deposição de partículas nas amostras e investigar o comportamento de colmatação em camadas porosas, foi realizada a comparação entre as porosidades inicial e final. A porosidade inicial foi obtida a partir do volume da amostra, determinado por μ TC-RX, enquanto a porosidade final foi calculada pela soma da porosidade inicial com o volume de partículas retidas após a simulação. As condições de simulação empregadas foram: velocidade de entrada de 10mm/s, tamanho de partículas de 10 μ m, rugosidade zero e taxa de entrada de 2×10^4 partículas por segundo.

As simulações revelaram um caminho preferencial percorrido pelas partículas, concentrando-se nas bordas das colunas devido à menor resistência ao fluxo. Essa tendência é ilustrada nas Figuras 37a, 38a e 39a. Conseqüentemente, observou-se uma taxa de retenção mais elevada nas regiões periféricas das amostras, conforme demonstrado nas Figuras 37b, 38b e 39b. Todas as amostras apresentaram reduções graduais de pressão ao longo do comprimento, como evidenciado nas Figuras 37c, 38c e 39c.

Figura 37 - Velocidade do fluido (a), fração volumétrica de partículas na superfície das esferas de vidro (b) e distribuição de pressão (c) ao longo da amostra CF4_3mm.

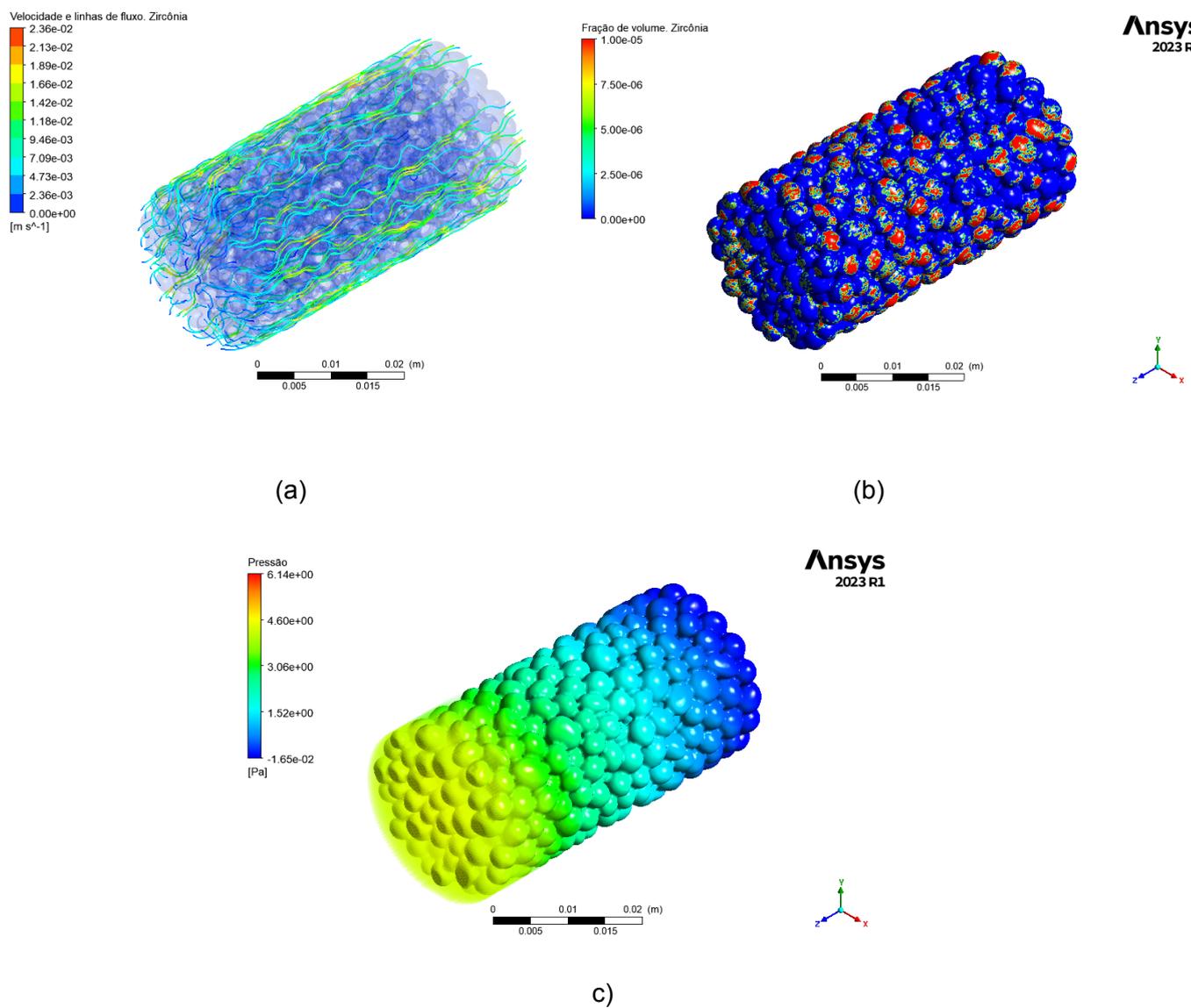


Figura 38 - Velocidade do fluido (a), fração volumétrica de partículas na superfície das esferas de vidro (b) e distribuição de pressão (c) ao longo da amostra CF7_4mm.

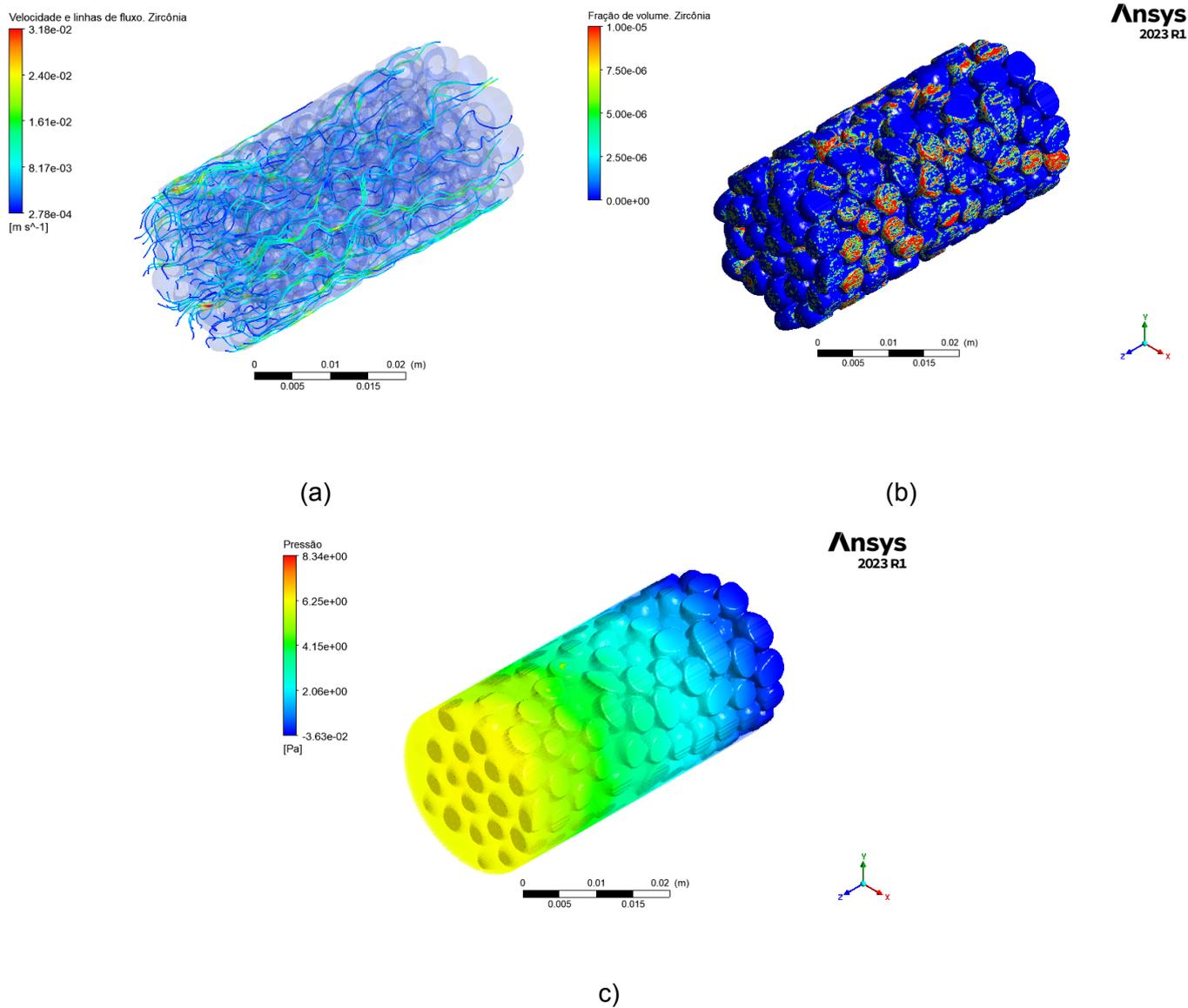
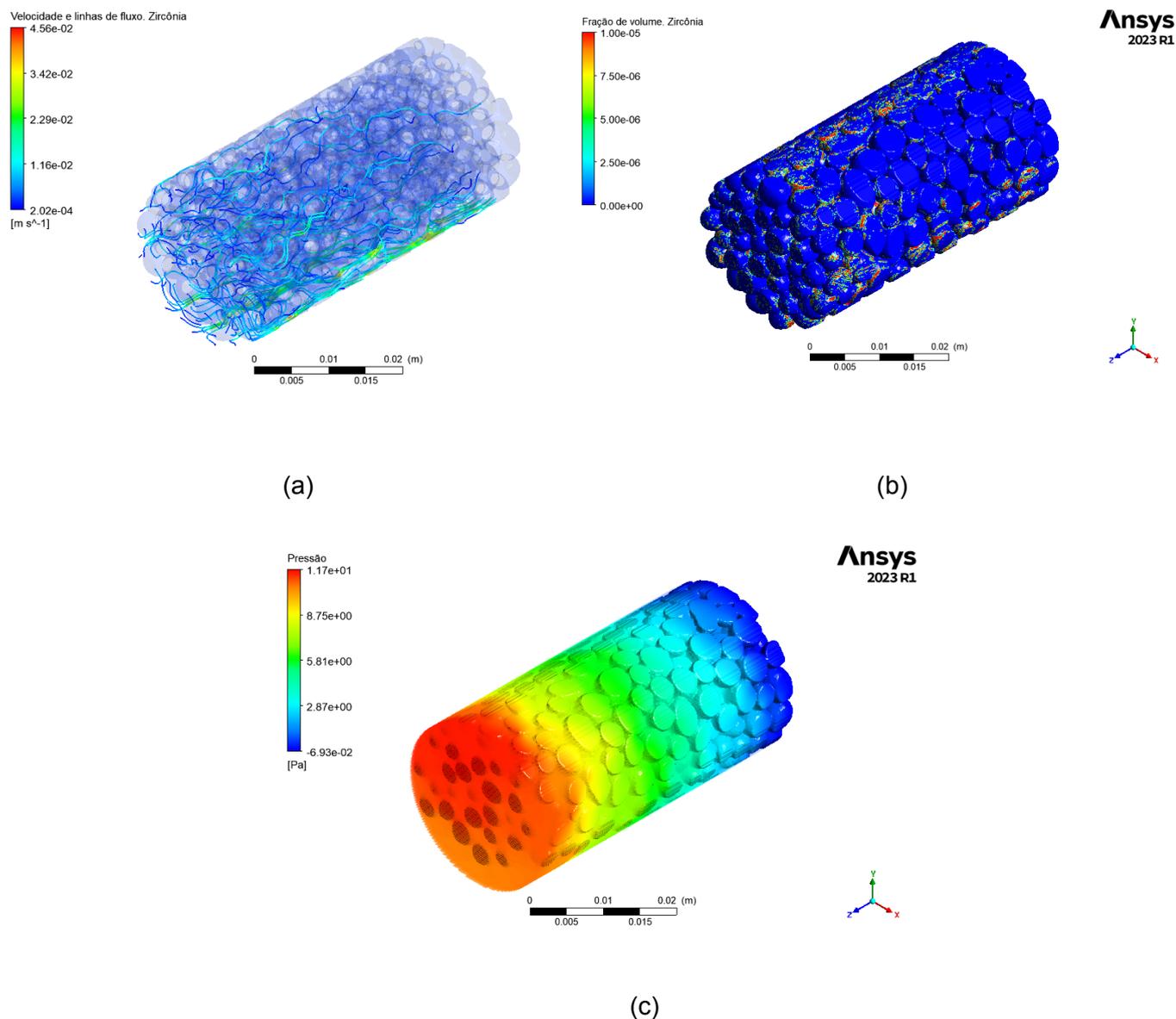
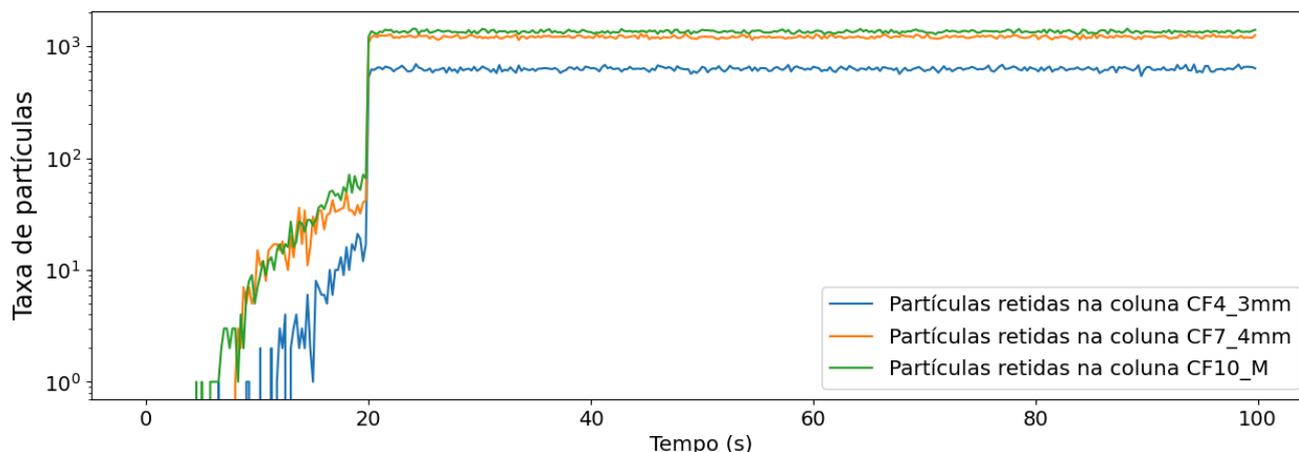


Figura 39 - Velocidade do fluido (a), fração volumétrica de partículas na superfície das esferas de vidro (b) e distribuição de pressão (c) ao longo da amostra CF10_M.



Ao analisar os perfis dos resultados das simulações (Figura 40), verifica-se que as amostras de menor porosidade (CF7_4mm e CF10_M) apresentaram maior acúmulo de partículas em comparação com a amostra mais porosas (CF4_3mm), conforme detalhado na Tabela 7.

Figura 40 - Partículas retidas por coluna estudada.**Tabela 7 - Porosidade das amostras após a simulação, com base na contagem de partículas retidas.**

Amostras	Φ Antes das simulações	Partículas retidas	Φ Depois das simulações
CF4_3mm	0,328568	200.645	0,328564
CF7_4mm	0,285856	388.323	0,285848
CF10_M	0,301264	433.063	0,295700

A análise dos resultados indica que as amostras apresentaram uma redução de porosidade entre 0,0001% e 0,001% após as simulações. É importante ressaltar que esses resultados se referem a um período de simulação de 100 segundos. Após os 100 primeiros passos de tempo (1 passo de tempo = 0,25 segundos), a contagem de partículas acumuladas a cada 100 passos de tempo apresenta-se relativamente constante, conforme detalhado na Tabela 8.

Tabela 8 - Partículas retidas a cada 100 passos de tempo.

Passos de tempo	CF4_3mm	CF7_4mm	CF10_M
0	0	0	0
0-100	10.833	24.187	26.960
100-200	63.094	122.186	136.290
200-300	63.248	121.878	136.246
300-400	63.470	123.696	137.550

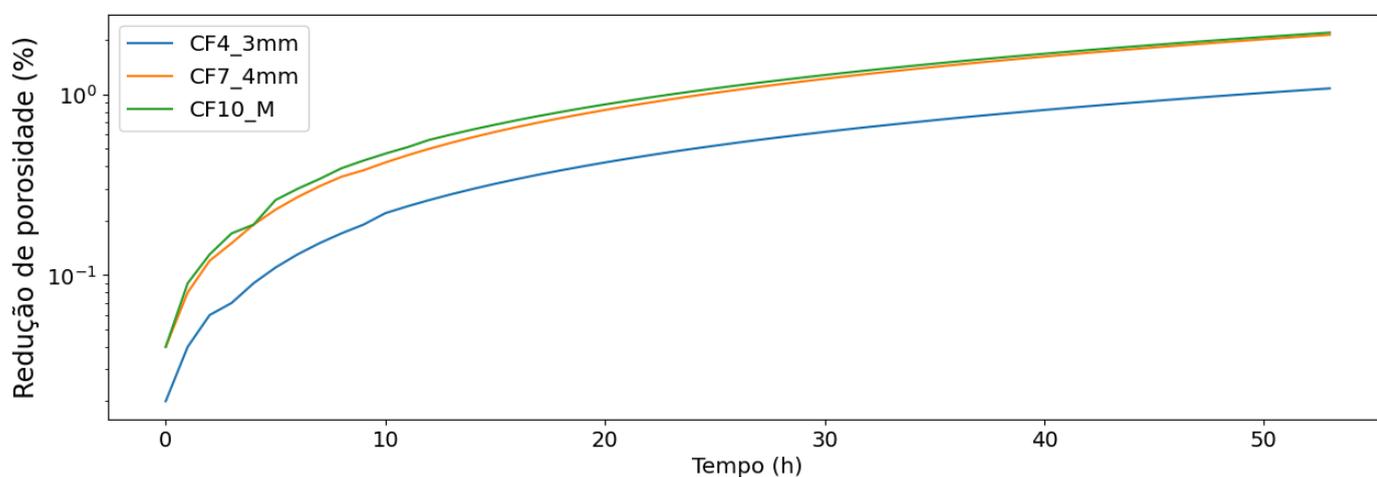
Considerando que a cada 240 passos de tempo têm-se 1 minuto de tempo físico simulação e que a cada 14.400 passos de tempo têm-se 1 hora, poderia-se, de forma totalmente arbitrária, considerar os 100 primeiros passos de tempo como sendo o tempo de saturação da amostra. Sendo assumido após a saturação um acúmulo constante para cada passo de tempo, sendo ele o valor médio respectivo por coluna demonstrado na Tabela, teria-se uma diminuição de porosidade estimada aproximado ao exposto na Tabela 9.

Tabela 9 - Estimativa de porosidade das amostras após 14.400 passos de tempo.

Amostras	φ Antes das simulações	Partículas retidas	φ Estimada
CF4_3mm	0,328568	9.107.712	0,328381
CF7_4mm	0,285856	17.594.784	0,285473
CF10_M	0,301264	19.625.760	0,300836

Com base nas estimativas, para reduzir a porosidade da amostra CF4_3mm em 0,02%, da CF7_4mm em 0,04% e da CF10_M em 0,04%, seria necessário aproximadamente 1 hora de fluxo contínuo. Conforme ilustrado no gráfico da Figura 41, para alcançar uma redução de porosidade superior a 1%, seriam necessárias 50 horas, 26 horas e 24 horas de fluxo para as amostras CF4_3mm, CF7_4mm e CF10_M, respectivamente. No entanto, simular tais cenários por meio de simulações contínuas demandaria um alto custo computacional.

Figura 41 - Estimativa de redução percentual de porosidade das amostras por tempo sob fluxo contínuo.



4.3.3 Estudos de sensibilidade

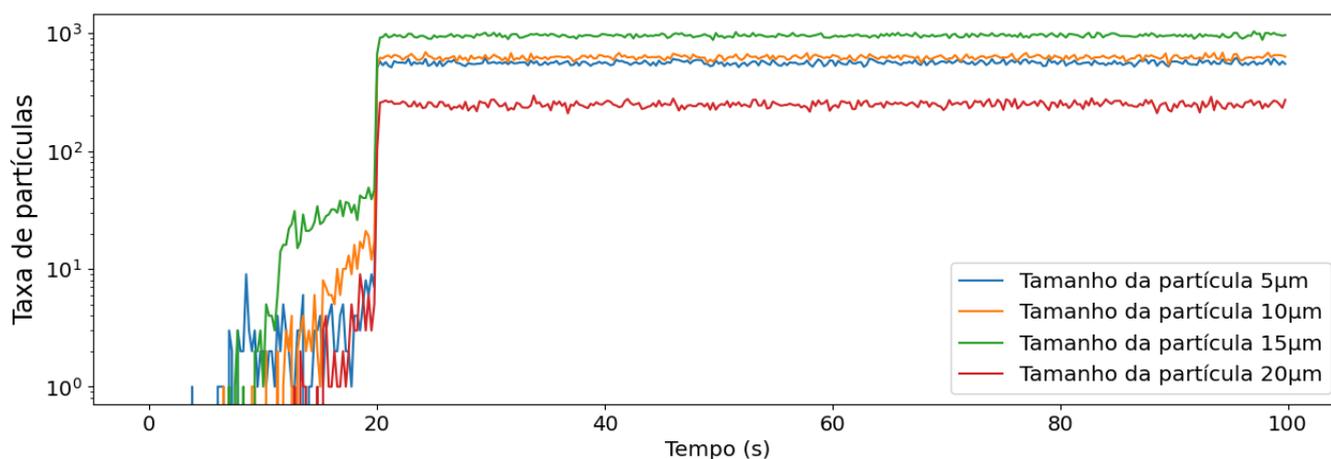
Com o objetivo de aprofundar a compreensão da sensibilidade dos resultados de colmatação em meios porosos, investigamos o impacto de diversos parâmetros nas condições de colmatação. Foram avaliados 5 valores de velocidade (0,5mm/s, 1,0mm/s, 1,5mm/s, 2,0mm/s e 2,5mm/s), 4 tamanhos de partículas (5 μ m, 10 μ m, 15 μ m e 20 μ m), 5 valores de rugosidade (0 μ m, 5 μ m, 10 μ m, 15 μ m e 20 μ m) e 4 taxas de entrada de partículas (5x10³, 1x10⁴, 1,5x10⁴ e 2x10⁴ partículas por segundo).

Os resultados detalhados da análise de cada amostra, acompanhados de suas respectivas discussões, estão dispostos nas subseções a seguir.

4.3.3.1 Tamanho da partícula

Analisando os perfis de partículas retidas na primeira amostra (Figura 42), observa-se que os valores para os menores tamanhos de partículas (5 μ m e 10 μ m) apresentam proximidade entre si. Essa proximidade, no entanto, não se verifica para os tamanhos de 15 μ m e 20 μ m. De modo geral, observa-se um acúmulo mais significativo de partículas nas simulações com tamanho de partícula de 15 μ m, em comparação com um acúmulo menor nas simulações com tamanho de partícula de 20 μ m.

Figura 42 - Partículas retidas na CF4_3mm em função da variação do tamanho das partículas.



Comparando os resultados para cada tamanho de partícula com o tamanho padrão utilizado no estudo de colmatação (Tabela 10), observa-se na CF4_3mm que a diferença relativa e a média das diferenças relativas locais aumentam com o aumento do tamanho das partículas. Isso pode sugerir uma maior variação nos resultados das simulações quando as partículas são maiores. O coeficiente de

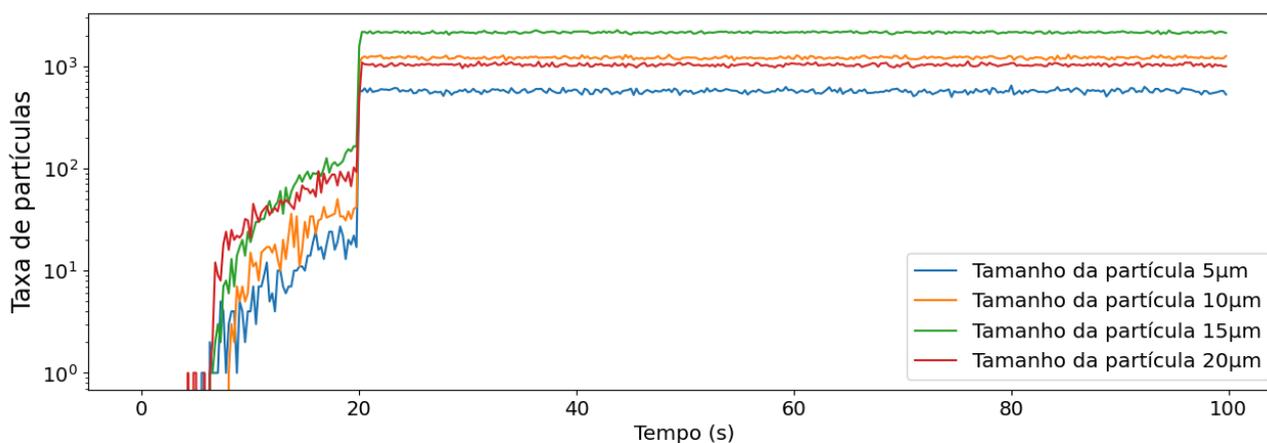
determinação permanece alto em todos os tamanhos de partículas, indicando uma forte correlação entre os diâmetros das partículas e as métricas analisadas. Em relação à diferença no número de partículas retidas, observamos uma redução de mais de $2,09 \times 10^4$ nas partículas de $5\mu\text{m}$ e aumentos de $1,07 \times 10^5$ e $1,21 \times 10^5$ para partículas de $15\mu\text{m}$ e $20\mu\text{m}$, respectivamente.

Tabela 10 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) da variação dos tamanhos das partículas na amostra CF4_3mm, em função do tamanho padrão de $10\mu\text{m}$.

Diâmetros	D_r	M_{dr}	r^2	D_p
$5\mu\text{m}$	10,21 %	9,77 %	0,996	-20.480
$15\mu\text{m}$	34,71 %	34,73 %	0,991	+106.671
$20\mu\text{m}$	60,29 %	59,74 %	0,974	+120.965

Na análise da segunda amostra, os perfis de partículas retidas (Figura 43) indicam que o menor tamanho de partícula ($5\mu\text{m}$) apresentou menores deposições na coluna, enquanto o tamanho de $15\mu\text{m}$ resultou no maior número de retenções, corroborando a tendência observada na primeira amostra. Os tamanhos de $10\mu\text{m}$ e $20\mu\text{m}$ apresentaram resultados próximos.

Figura 43 - Partículas retidas na CF7_4mm em função da variação do tamanho das partículas.



Comparando os resultados da segunda amostra para cada tamanho de partícula com o tamanho padrão utilizado no estudo de colmatação (Tabela 11), notamos uma tendência semelhante à amostra anterior, onde os maiores valores de

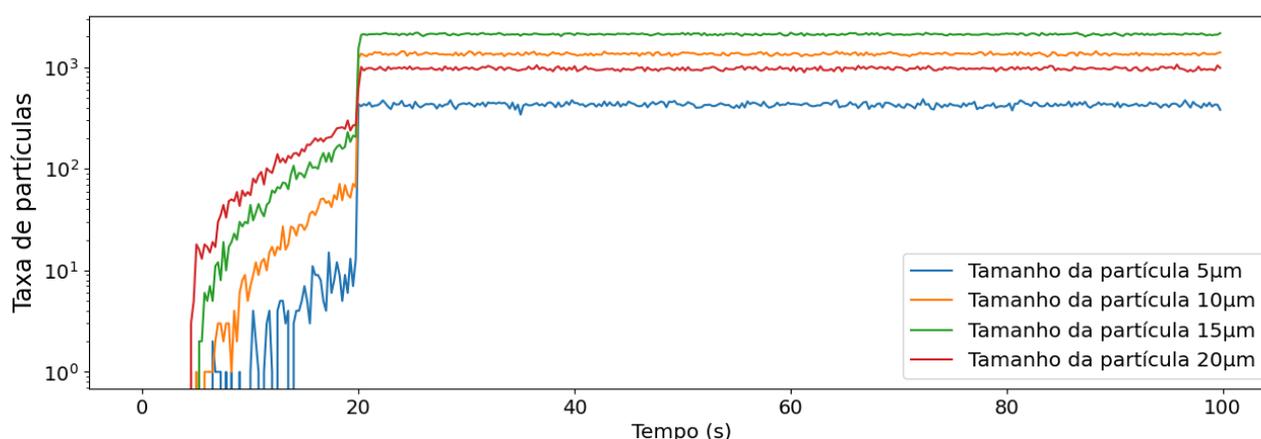
D_r e M_{dr} estão associados aos tamanhos maiores de partículas. Os coeficientes de determinação permanecem altos, indicando uma forte correlação entre os diâmetros das partículas e as métricas analisadas. Em relação à D_p , observamos reduções no número de partículas acumuladas para os tamanhos de $5\mu\text{m}$ e $20\mu\text{m}$, em contraste ao aumento para o tamanho de $15\mu\text{m}$.

Tabela 11 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação dos tamanhos das partículas na amostra CF7_4mm, em função do tamanho padrão de $10\mu\text{m}$.

Diâmetros	D_r	M_{dr}	r^2	D_p
$5\mu\text{m}$	52,88 %	52,49 %	0,990	- 250.357
$15\mu\text{m}$	77,00%	77,27%	0,995	+290.021
$20\mu\text{m}$	14,53%	14,04%	0,990	-56.442

Os perfis de partículas retidas na terceira amostra (Figura 44), demonstram comportamentos semelhantes à segunda amostra, com maior número de deposições para partículas de $15\mu\text{m}$, seguido por $10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$ e $5\mu\text{m}$.

Figura 44 - Partículas retidas na CF10_M em função da variação do tamanho das partículas.



Comparando os resultados da segunda amostra para cada tamanho de partícula com o tamanho padrão utilizado no estudo de colmatação (Tabela 12), também observamos uma tendência semelhante às amostras anteriores, com maiores valores de D_r e M_{dr} associados aos tamanhos maiores de partículas. O coeficiente de determinação permanece alto, indicando uma forte correlação entre

os diâmetros das partículas e as métricas analisadas. Em relação à D_p , observamos reduções no número de partículas acumuladas para os tamanhos de $5\mu\text{m}$ e $20\mu\text{m}$, em contraste ao aumento para o tamanho de $15\mu\text{m}$, semelhante às reduções observadas na CF7_4mm.

Tabela 12 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação dos tamanhos das partículas na amostra CF10_M, em função do tamanho padrão de $10\mu\text{m}$.

Diâmetros	D_r	M_{dr}	r^2	D_p
$5\mu\text{m}$	68,39%	68,49%	0,988	-296.162
$15\mu\text{m}$	56,86%	56,96%	0,995	+246.241
$20\mu\text{m}$	26,95%	27,42%	0,981	-116.697

O estudo comparativo das três amostras revela tendências gerais consistentes. Observa-se que, para todos os tamanhos de partículas, os valores de D_r e M_{dr} são mais elevados nas amostras com partículas maiores, indicando maior sensibilidade das simulações às variações no tamanho das partículas injetadas. Ademais, o alto coeficiente de determinação em todas as amostras demonstra uma forte correlação entre o tamanho das partículas e as métricas analisadas.

No entanto, as magnitudes das diferenças (D_r , M_{dr} e D_p) variam entre as amostras, destacando a sensibilidade do processo às características específicas de cada amostra. Essas diferenças podem ser atribuídas a fatores como tortuosidade e tamanho dos poros de cada amostra analisada.

Os perfis sugerem que, em todas as amostras, as partículas de $15\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$ apresentaram maior retenção. Essa tendência pode estar relacionada ao tamanho dos poros das amostras, que limitaria a entrada de partículas maiores ($20\mu\text{m}$) em alguns poros, impedindo sua retenção nas gargantas.

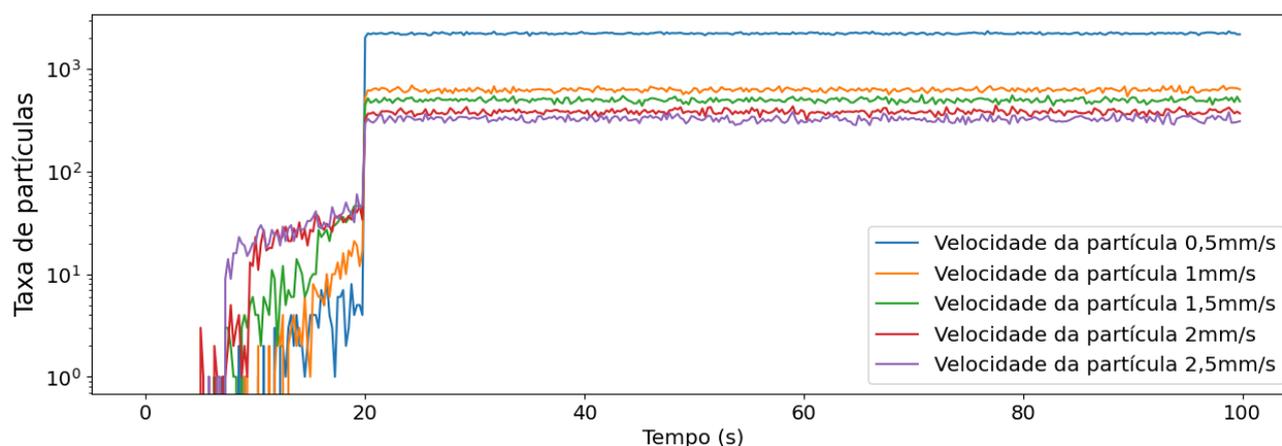
Em suma, as simulações demonstram que o tamanho das partículas exerce um impacto relevante na dinâmica do processo em todas as amostras analisadas, ao analisar as deposições de partículas em meios porosos de pérolas de vidro. Essa constatação destaca a importância de considerar essa variável na interpretação dos

resultados das simulações e no projeto de processos industriais que envolvam a manipulação de partículas.

4.3.3.2 Velocidade da partícula

A análise dos perfis de partículas retidas na primeira amostra (Figura 45) revela que a retenção de partículas no meio poroso diminui à medida que a velocidade aumenta. Nos 20 segundos iniciais do fluxo, observa-se um aumento gradual da retenção de partículas acumuladas para todas as velocidades, nos segundos subsequentes, a curva de retenção para a velocidade de 0,5 mm/s supera as demais, onde todas as curvas apresentam comportamentos distintos e bem definidos.

Figura 45 - Partículas retidas na CF4_3mm em função da variação da velocidade das partículas.



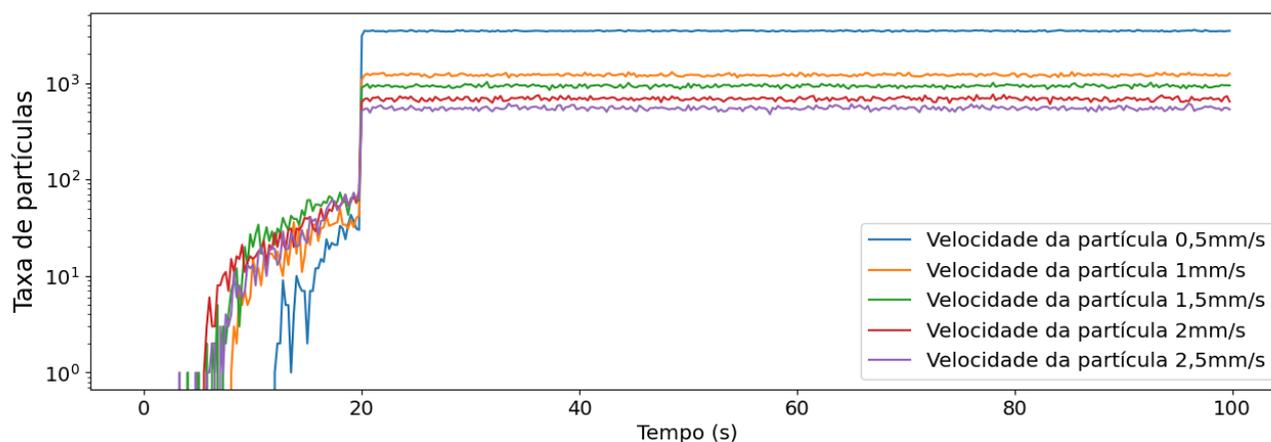
Na análise das métricas da amostra CF4_3mm (Tabela 13), verifica-se que, à medida que a velocidade das partículas se eleva, a diferença relativa e a média das diferenças relativas locais também apresentam aumento. O coeficiente de determinação, por sua vez, mantém-se alto, indicando forte correlação entre a velocidade das partículas e as métricas analisadas. Quanto à diferença no número de partículas retidas, observa-se uma redução progressiva à medida que a velocidade aumenta.

Tabela 13 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da velocidade das partículas na amostra CF4_3mm, em função do tamanho padrão de 1mm/s.

Velocidade	D_r	M_{dr}	r^2	D_p
0,5mm/s	253,69%	250,24%	0,992	509.017
1,5mm/s	25,57%	24,16%	0,989	-40.863
2,0mm/s	38,60%	38,20%	0,982	-77.450
2,5mm/s	47,28%	46,64%	0,972	-94.861

Os perfis da amostra CF7_4mm (Figura 46) reforçam as observações da primeira amostra, evidenciando a diminuição da retenção de partículas na coluna à medida que a velocidade aumenta. No entanto, diferentemente da amostra CF4_3mm, a velocidade de 0,5mm/s apresenta um comportamento divergente, superando as demais a partir do vigésimo segundo de simulação.

Figura 46 - Partículas retidas na CF7_4mm em função da variação da velocidade das partículas.



No entanto, as métricas nesta amostra (Tabela 14) apresentam um comportamento distinto da amostra anterior. A diferença relativa assume valores extremamente altos, revelando uma mudança significativa nos resultados das simulações à medida que a velocidade das partículas aumenta. O coeficiente de determinação, por sua vez, mantém-se alto em todas as velocidades, indicando forte correlação entre a velocidade das partículas e as métricas analisadas. Quanto à

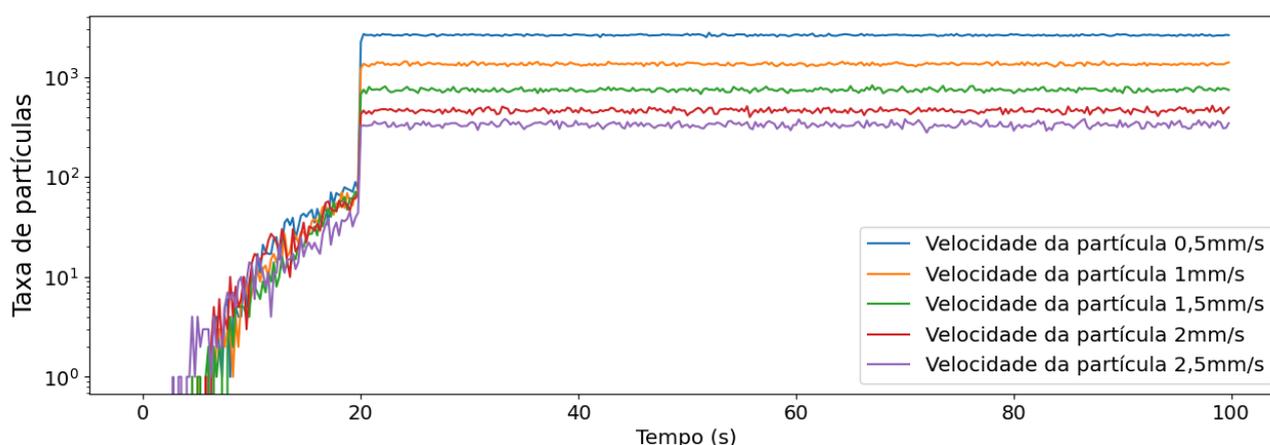
diferença no número de partículas retidas, observa-se uma variação oscilatória, sem a redução progressiva observada anteriormente.

Tabela 14 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da velocidade das partículas na amostra CF7_4mm, em função do tamanho padrão de 1mm/s.

Velocidade	D_r	M_{dr}	r^2	D_p
0,5mm/s	185,13%	184,17%	0,997	+1.107.233
1,5mm/s	29,75%	28,83%	0,993	-89.033
2,0mm/s	43,19%	42,62%	0,989	-167.722
2,5mm/s	54,52%	54,17%	0,988	-211.702

Os perfis da amostra CF10_M (Figura 47) corroboram as observações da segunda amostra, evidenciando a redução da retenção de partículas na coluna à medida que a velocidade aumenta. Observa-se que a velocidade mais baixa (0,5 mm/s) apresenta o maior número de partículas retidas no vigésimo segundo de simulação.

Figura 47 - Partículas retidas na CF10_M em função da variação da velocidade das partículas.



Na amostra CF10_M (Tabela 15) verifica-se uma diminuição gradual da diferença relativa e da média das diferenças relativas locais à medida que a velocidade das partículas aumenta. O coeficiente de determinação, por sua vez, mantém-se alto, indicando forte correlação entre a velocidade das partículas e as

métricas analisadas. Quanto à diferença no número de partículas retidas, observa-se uma redução progressiva à medida que a velocidade aumenta, similar ao padrão da primeira amostra.

Tabela 15 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da velocidade das partículas na amostra CF10_M, em função do tamanho padrão de 1mm/s.

Velocidade	D_r	M_{dr}	r^2	D_p
0,5mm/s	94,63%	93,56%	0,997	+409.805
1,5mm/s	80,90%	79,53%	0,991	-193.664
2,0mm/s	65,51%	65,22%	0,986	-283.681
2,5mm/s	75,09%	74,80%	0,981	-325.203

As três amostras apresentam uma tendência comum: à medida que a velocidade das partículas aumenta, a variação nos resultados das simulações também aumenta, indicada pelos perfis de simulação. Isso sugere que a sensibilidade das simulações à velocidade das partículas é alta, sendo uma característica geral, independentemente da amostra analisada. Além disso, o coeficiente de determinação permanece alto em todas as amostras, mostrando uma forte correlação entre os números de partículas retidas em cada velocidade analisada e o número de partículas retidas na velocidade padrão.

No entanto, as magnitudes das diferenças (D_r , M_{dr} e D_p) variam entre as amostras, indicando que a sensibilidade das simulações à velocidade das partículas pode ser influenciada por fatores específicos de cada amostra.

De modo geral, os resultados das simulações mostram que a velocidade das partículas tem um impacto significativo na dinâmica do processo em todas as amostras estudadas, ressaltando a importância de considerar essa variável ao interpretar os resultados das simulações, bem como se mostrou o tamanho das partículas.

4.3.3.3 Rugosidade da partícula

Os perfis das amostras CF4_3mm (Figura 48), CF7_4mm (Figura 49) e CF10_M (Figura 50) indicam que o número de partículas retidas não apresenta diferenciações significativas em função da variação da rugosidade.

Figura 48 - Partículas retidas na CF4_3mm em função da variação da rugosidade das partículas.

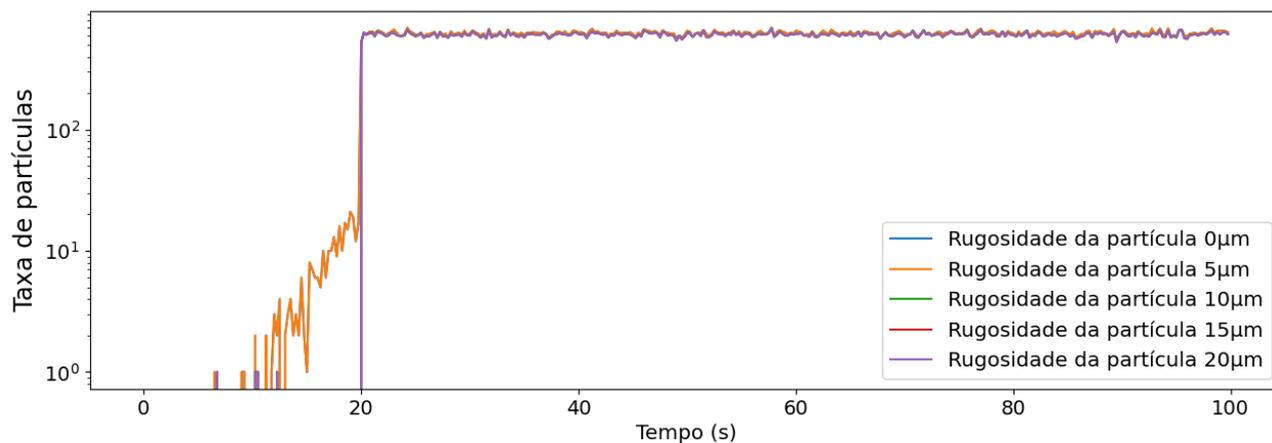


Figura 49 - Partículas retidas na CF7_4mm em função da variação da rugosidade das partículas.

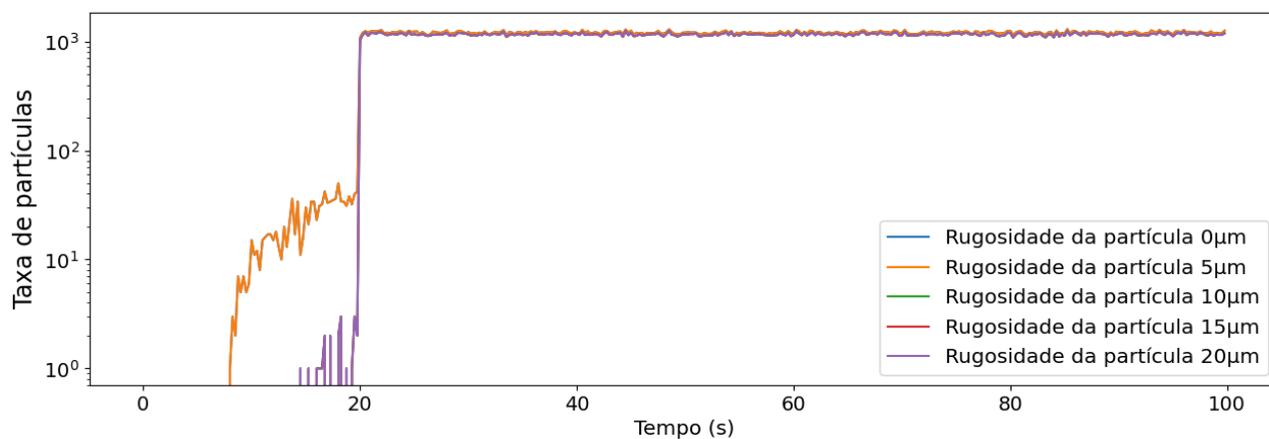
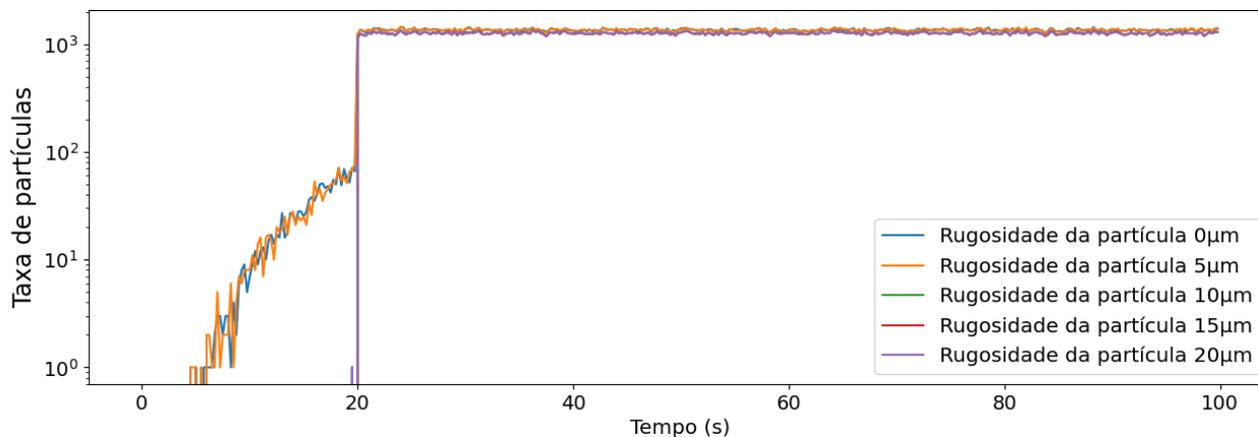


Figura 50 - Partículas retidas na CF10_M em função da variação da rugosidade das partículas.



As métricas (Tabelas 16, 17 e 18) corroboram as observações dos perfis, indicando baixa sensibilidade na faixa de rugosidade estudada. Os valores de D_r e M_{dr} para as amostras CF4_3mm, CF7_4mm e CF10_M estão abaixo de 3,02%, 4,40% e 7,31%, respectivamente, demonstrando que a retenção de partículas não é significativamente afetada por esse parâmetro.

Essa baixa sensibilidade é reforçada pelo alto coeficiente de determinação (r^2) próximo de 1 em todas as rugosidades, indicando uma boa relação entre a rugosidade e a retenção de partículas. No entanto, o M_{dr} e D_p constantes sugerem que essa relação não é diretamente proporcional, apontando que a influência da rugosidade na retenção de partículas pode ser complexa e envolver outros fatores.

Tabela 16 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da rugosidade das partículas na amostra CF4_3mm, em função da rugosidade padrão de 0 μm.

Rugosidade	D_r	M_{dr}	r^2	D_p
5 μm	0%	0%	1	0
10 μm	3,02%	2,38%	0,999	-5.889
15 μm	2,94%	2,78%	0,999	-5.889
20 μm	2,94%	2,77%	0,999	-5.889

Tabela 17 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da rugosidade das partículas na amostra CF7_4mm, em função da rugosidade padrão de $0\mu\text{m}$.

Rugosidade	D_r	M_{dr}	r^2	D_p
$5\mu\text{m}$	0%	0%	1	0
$10\mu\text{m}$	4,40%	3,72%	0,999	-16.359
$15\mu\text{m}$	4,21%	3,92%	0,999	-16.359
$20\mu\text{m}$	4,21%	3,92%	0,999	-16.359

Tabela 18 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da rugosidade das partículas na amostra CF10_M, em função da rugosidade padrão de $0\mu\text{m}$.

Rugosidade	D_r	M_{dr}	r^2	D_p
$5\mu\text{m}$	0,18%	0%	0,999	+790
$15\mu\text{m}$	7,31%	6,37%	0,998	-29.499
$20\mu\text{m}$	6,81%	6,44%	0,998	-29.499
$25\mu\text{m}$	6,81%	6,44%	0,998	-29.499

4.3.3.4 Taxa de partículas

A análise dos perfis das amostras (Figuras 51, 52 e 53) revela um comportamento similar no volume de partículas retidas: quanto maior a taxa de entrada de partículas no domínio da amostra, maior o volume de partículas depositadas em seu interior. Essa relação direta indica alta sensibilidade das simulações a esse parâmetro.

Figura 51 - Partículas retidas na CF4_3mm em função da variação da taxa de partículas.

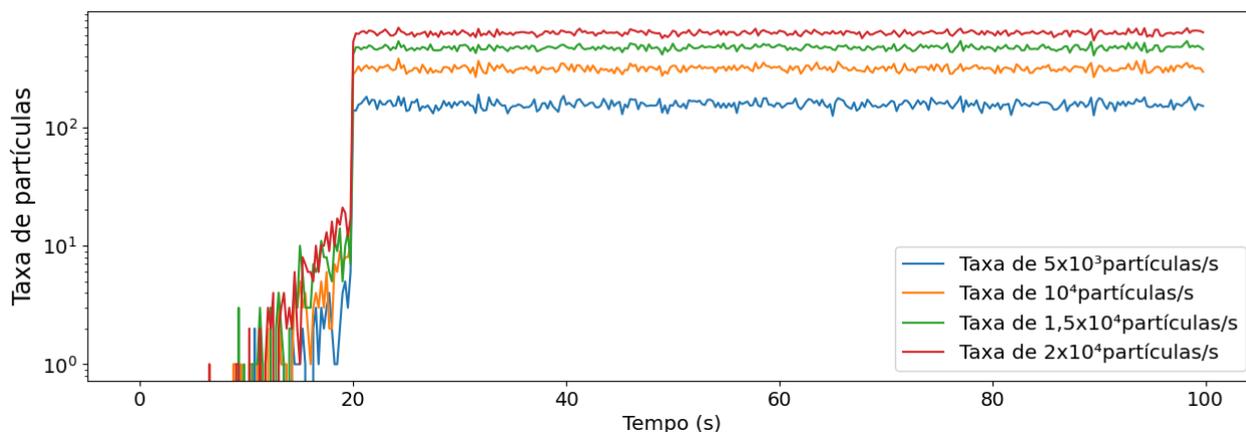


Figura 52 - Partículas retidas na CF7_4mm em função da variação da taxa de partículas.

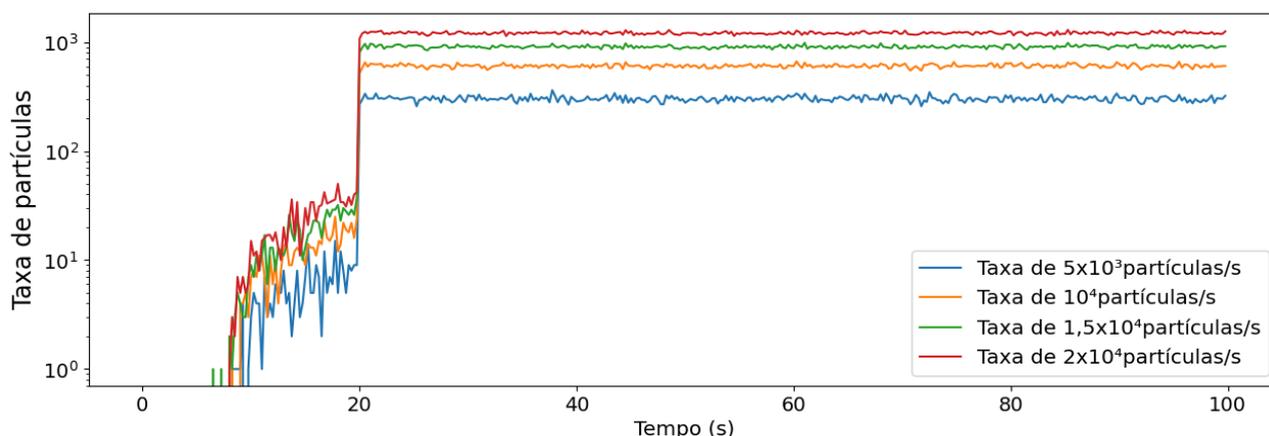
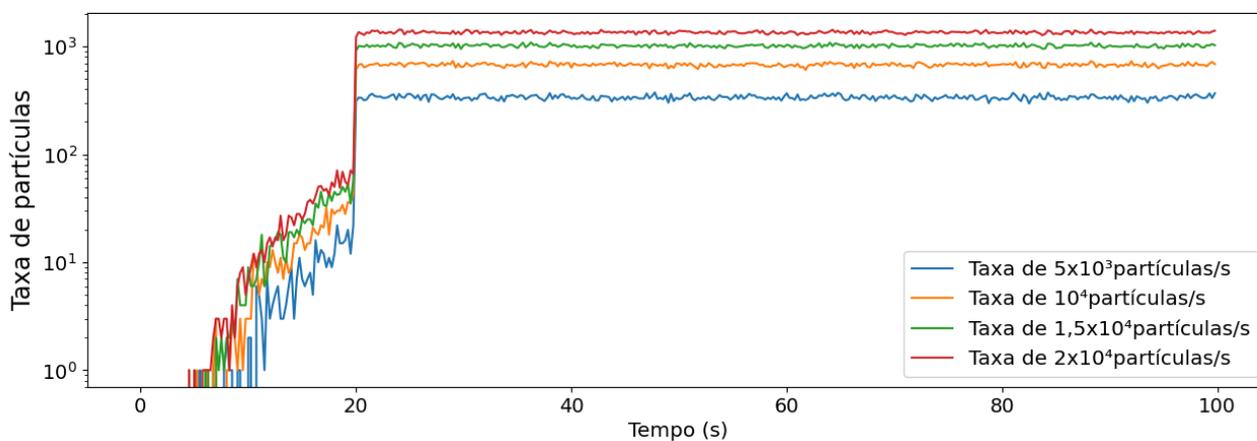


Figura 53 - Partículas retidas na CF10_M em função da variação da taxa de partículas.



Esses resultados são corroborados pela análise da diferença relativa das amostras (Tabelas 19, 20 e 21), que apresenta uma tendência decrescente à medida

que a taxa de partículas se aproxima do valor padrão utilizado nos ensaios de colmatação. Isso indica que a diferença no número de partículas retidas diminui conforme a quantidade de partículas no sistema aumenta. A forte relação entre a taxa de partículas e a retenção de partículas é evidenciada pelo alto coeficiente de determinação (r^2) próximo de 1 em todas as taxas analisadas. O aumento do (D_p) reforça essa observação, demonstrando que quanto mais próxima a taxa de partículas da taxa padrão, menor a diferença no número de partículas retidas.

Tabela 19 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da taxa de partículas e a taxa de partículas padrão (2×10^4) na amostra CF4_3mm.

Taxa de partículas por segundo	D_r	M_{dr}	r^2	D_p
5×10^3	75,06%	74,92%	0,979	-150.603
1×10^4	99,63%	96,22%	0,991	-100.135
$1,5 \times 10^4$	24,88%	24,64%	0,996	-49.9200

Tabela 20 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da taxa de partículas e a taxa de partículas padrão (2×10^4) na amostra CF7_4mm.

Taxa de partículas por segundo	D_r	M_{dr}	r^2	D_p
5×10^3	75,02%	74,88%	0,987	-291.331
1×10^4	100,1%	98,55%	0,996	-194.273
$1,5 \times 10^4$	25,07%	24,79%	0,998	-97.3560

Tabela 21 - Diferença relativa (D_r), médias das diferenças relativas locais (M_{dr}), coeficiente de determinação (r^2) e diferença de número de partículas retidas (D_p) em relação a variação da taxa de partículas e a taxa de partículas padrão (2×10^4) na amostra CF10_4mm.

Taxa de partículas por segundo	D_r	M_{dr}	r^2	D_p
5×10^3	75,00%	74,1%	0,990	-324.780
1×10^4	99,51%	98,05%	0,996	-215.995
$1,5 \times 10^4$	24,76%	24,60%	0,997	-107.236

Em resumo, os resultados das variações nas condições de simulação são comparáveis às sensibilidades observadas por Sadeghnejad et al. (2022) no estudo da deposição de partículas de zircônia em pérolas de vidro. Os autores também relataram uma redução da permeabilidade do meio devido ao aumento da rugosidade das partículas, um fator não investigado no presente estudo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante os testes de robustez das colunas de percolação, o protótipo CF3_3mm se destacou por sua resistência excepcional. Mesmo após ser submetido a diferentes vazões por um período prolongado, não apresentou nenhum vazamento. Essa característica superior se deve à aplicação mais generosa de cola de silicone em sua confecção, proporcionando maior estabilidade estrutural e segurança durante a operação sob carga hidráulica. Os resultados obtidos demonstram que a quantidade de cola de silicone utilizada na construção das colunas é um fator crucial para sua resistência estrutural a longo prazo.

No estudo das porosidades, nove colunas de percolação foram construídas, divididas em triplicatas para cada arranjo poroso: pérolas de vidro de 3mm (CF4_3mm, CF5_3mm e CF6_3mm), 4mm (CF7_4mm, CF8_4mm e CF9_4mm) e mistas (CF10_M, CF11_M e CF12_M). As colunas foram confeccionadas com base no protótipo CF3_3mm e suas porosidades foram avaliadas por meio de técnicas de porosimetria por injeção de fluido e imageamento por μ TC-RX. Os resultados demonstraram correlações altas entre ambas as técnicas, sugerindo que a μ TC-RX pode ser utilizada para análises de porosidade em amostras de meios porosos, com alto potencial para avaliação experimental da colmatação em meios porosos ao longo do tempo. No entanto, é importante investigar a possibilidade de eliminar a subestimação da porosidade causada pelo recorte do volume durante o processamento da imagem.

Simulações de fluxo contínuo utilizando fluidodinâmica computacional foram realizadas para avaliar a colmatação das colunas CF4_3mm, CF7_4mm e CF10_M durante a percolação de uma suspensão padrão de zircônia. Os resultados indicaram que para alcançar uma redução de porosidade de 1%, as colunas precisariam operar em fluxo contínuo por mais de 50, 26 e 24 horas para as amostras CF4_3mm, CF7_4mm e CF10_M, respectivamente. A redução da porosidade foi observada como um processo progressivo e linear, permitindo a realização de estimativas para diferentes graus de colmatação. Para reduções de porosidade mais significativas, espera-se que o tempo de operação necessário seja proporcionalmente maior, possibilitando previsões adicionais. As simulações também evidenciaram caminhos prioritários nas zonas periféricas das amostras, sendo estes pontos de maior deposição de partículas. Apesar dos resultados

promissores obtidos nas simulações, validações experimentais são essenciais para confirmar as conclusões.

Em virtude das restrições de tempo de simulação e demanda computacional, optou-se pela utilização de um modelo físico de simulação menos acurado (*one way*). No entanto, para avaliar a precisão do modelo escolhido, foram realizadas análises comparativas entre este e o modelo mais acurado (*fully coupled*) para as três amostras do estudo. Os resultados demonstraram correlações lineares altas entre os modelos *fully coupled* e *one way* em todas as amostras, com baixa diferença relativa (8%). Essa concordância valida a utilização do modelo *one way* para este estudo, mas ressalta que a escolha entre os modelos deve considerar as necessidades específicas da pesquisa e os recursos disponíveis.

Para avaliar a sensibilidade da retenção de partículas em relação aos parâmetros de simulação utilizados, foram realizados estudos de sensibilidade. Os parâmetros analisados foram tamanho, velocidade, rugosidade e taxa de entrada de partículas em cada uma das amostras. Os resultados indicam que os parâmetros de tamanho, velocidade e taxa de entrada de partículas apresentam alta correlação com o volume de partículas retidas. O volume retido é diretamente proporcional ao tamanho da partícula (até 15 μ m), inversamente proporcional à velocidade das partículas, e diretamente proporcional à taxa de entrada de partículas no domínio. Observou-se que o volume de partículas retidas na coluna apresenta baixa sensibilidade às variações de rugosidade neste estudo. No entanto, mais estudos são necessários para confirmar se essa sensibilidade pode ser considerada nula.

6 PROPOSTA DE PESQUISAS FUTURAS

O estudo apresentado abre portas para diversas pesquisas futuras com o objetivo de aprofundar a compreensão da colmatação em meios porosos e aprimorar as técnicas utilizadas para sua análise e simulação. As pesquisas subsequentes visam abordar diferentes aspectos relacionados à colmatação, desde a otimização de colunas de percolação de baixo custo até o desenvolvimento de metodologias mais precisas para porosimetria e simulação de fluidodinâmica.

- **Coluna de percolação de baixo custo: tempo de vida útil**

A viabilidade das colunas de percolação de baixo custo depende de sua durabilidade e confiabilidade ao longo do tempo. Para avaliar essa questão, é necessário a investigação do tempo de vida útil das colunas em diferentes regimes de fluxo e concentrações de partículas. A perda de vazão e a formação de vazamentos devem ser monitoradas para identificar o tempo médio em que as colunas perdem sua eficácia. A análise das características das colunas após o teste permitirá identificar os mecanismos de degradação e desgaste. Através da modelagem, será possível prever a vida útil das colunas em diferentes condições de operação, orientando o desenvolvimento de modelos mais duráveis e confiáveis, otimizando a frequência de substituição e minimizando o impacto ambiental.

- **Porosimetria por μ TC-RX: subestimação da porosidade**

A subestimação da porosidade causada pelo recorte do volume durante o processamento da imagem na porosimetria por μ TC-RX é um fator limitante da técnica. A comparação da porosidade obtida com diferentes métodos de processamento de imagem permitirá identificar a melhor abordagem para minimizar a subestimação. A investigação da influência do tamanho do voxel e da resolução da imagem na subestimação da porosidade fornecerá dados valiosos para a otimização dos parâmetros de aquisição e processamento. O desenvolvimento de um modelo para corrigir a subestimação da porosidade em diferentes condições se faz necessário para obter medidas mais precisas da porosidade, aumentando a confiabilidade dos dados para caracterização de meios porosos e aprimorando a interpretação dos resultados em estudos e aplicações.

- **Porosimetria por TC-Ry: atenuação de materiais envoltórios**

A atenuação de materiais que envolvem a amostra porosa na porosimetria por TC-Ry, como cilindros de acrílico, introduz um erro significativo nas medidas de porosidade. Para eliminar esse erro, é necessário a implementação de técnicas de correção de atenuação na aquisição e no processamento de imagens de TC-Ry. A eliminação do erro de atenuação é necessário para obter-se medidas mais precisas da porosidade de amostras envoltas em diversos materiais, ampliando a aplicabilidade da porosimetria por TC-Ry para uma gama mais ampla de materiais e geometrias de amostras, além de contribuir para o desenvolvimento de protocolos padronizados para essa técnica.

- **Simulações de fluidodinâmica: colmatação em matrizes porosas menores**

A investigação da colmatação em amostras compostas por matrizes porosas menores, como areia e argila, utilizando simulações de fluidodinâmica computacional, permitirá aprofundar a compreensão dos mecanismos de colmatação em meios porosos heterogêneos. A análise do efeito de diferentes propriedades das partículas (tamanho, forma, densidade) na colmatação de matrizes porosas menores permitirá avaliar a influência de diversos fatores na retenção de partículas em meios porosos heterogêneos.

REFERÊNCIAS

AFZALI, Shokufe; REZAEI, Nima; ZENDEHBOUDI, Sohrab; *et al.* Computational fluid dynamic simulation of multi-phase flow in fractured porous media during water-alternating-gas injection process. **Journal of Hydrology**, v. 610, p. 127852, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127852>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

ALIGIZAKI, Kalliopi K. Pore Structure of Cement-Based Materials: Testing, Interpretation and Requirements. **CRC Press**, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1201/9781482271959>>. Acesso em: 29 abr. 2023.

ANSYS, Team. ANSYS Fluent 12.0 User's Guide. **ANSYS**, Inc., 2009. Disponível em: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/>. Acesso em: 06 jun. 2024.

ANSYS, Team. **Discovery SpaceClaim**, 2023a.

ANSYS, Team. Ansys CFX-Solver Theory Guide, Release 2023 R1. **ANSYS**, Inc., 2023b.

ATANGANA, A. Fractional operators with constant and variable order with application to geo-hydrology. **Elsevier**, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809670-3.00020-5>>. Acesso em: 17 set. 2023.

ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L.; ALENCASTRO, R.B. **Princípios de química : questionando a vida moderna e o meio ambiente**. [s.l.]: Bookman, 2021.

AZoM. Properties. **Site AZoM**. 2024. Disponível em: <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11082>>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BEAR, Jacob. **Dynamics of fluids in porous media**. New York: Dover, 1988.

BERGER, Harold. **Nondestructive Testing**. [s.l.]: U.S. Division of Technical Information, Atomic Energy Commission, 1965.

BERRY, Gentry; BECKMAN, Ivan; CHO, Heejin. A comprehensive review of particle loading models of fibrous air filters. **Journal of Aerosol Science**, v. 167, p. 106078, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2022.106078>>. Acesso em: 3 mai. 2023.

BORGIA, G.C.; BORTOLOTTI, V.; DATTILO, P.; FANTAZZINI, P.; MADDINELLI, G.. Quantitative determination of porosity: A local assessment by NMR imaging techniques. **Magnetic Resonance Imaging**, v. 14, n. 7–8, p. 919–921, 1996. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0730-725X\(96\)00182-8](https://doi.org/10.1016/S0730-725X(96)00182-8)>. Acesso em: 29 abr. 2023.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal, 2016. 496 p. Disponível em: <https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/518231/CF88_Livro_EC91_2016.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2023.

BURCH, Steve. Measurement of density variations in compacted parts using X-ray computerised tomography. **Metal Powder Report**, v. 57, n. 2, p. 24–28, 2002. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0026-0657\(02\)85009-3](https://doi.org/10.1016/S0026-0657(02)85009-3)>. Acesso em: 1 mai. 2023.

CAI, Jianchao; ZHANG, Zhien; WEI, Wei; GUO, Dongming; LI, Shuai; ZHAO, Peiqiang. The critical factors for permeability-formation factor relation in reservoir rocks: Pore-throat ratio, tortuosity and connectivity. **Energy**, v. 188, p. 116051, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116051>>. Acesso em: 1 mai. 2023.

CARMAN, P.C. Fluid flow through a granular bed. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**. London, 1937.

CONZELMANN, N.A.; PARTL, M.N.; CLEMENS, F.J.; *et al.* Effect of artificial aggregate shapes on the porosity, tortuosity and permeability of their packings. **Powder Technology**, v. 397, p. 117019, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.11.063>>. Acesso em: 1 mai. 2023.

CERAMTEC. Zirconium Oxide. **Site Ceramtec Industrial**. 2024. Disponível em: <https://www.ceramtec-industrial.com/en/materials/zirconium-oxide>. Acesso em: 06 jun. 2024.

CIVAN, Faruk. Multiphase and multispecies transport in porous media. *In: Reservoir Formation Damage*. [s.l.]: Elsevier, 2023, p. 257–273. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90228-1.00026-1>>. Acesso em: 14 mai. 2023.

COSTA, Antonio. Permeability-porosity relationship: A reexamination of the Kozeny-Carman equation based on a fractal pore-space geometry assumption. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 2, p. L02318, 2006. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2005GL025134>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

COSTA, Larissa Fernandes. **Tomografia computadorizada de raios-x aplicada à caracterização do espaço poroso do solo**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2016.

CRITTENDEN, John C.; TRUSSELL, R. Rhodes; HAND, David W.; HOWE, Keery J.; TCHOBANOGLOUS, George; BORCHARDT, James H.. **MWH's water treatment: principles and design**. John Wiley & Sons, 2012.

DENG, Hang; GHARASOO, Mehdi; ZHANG, Liwei; DAI, Zhenxue; HAJIZADEH, Alireza; PETERS, Catherine A.; SOULAINÉ, Cyprien; THULLNER, Martin; CAPPELLEN, Philippe Van. A perspective on applied geochemistry in porous media: Reactive transport modeling of geochemical dynamics and the interplay with flow phenomena and physical alteration. **Applied Geochemistry**, v. 146, p. 105445, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105445>>. Acesso em: 7 mai. 2023.

DHAR, Sushmit; NASERI, Masoud; KHAWAJA, Hassan Abbas; *et al.* Sea-spray measurement tools and technique employed in marine icing field expeditions: A critical literature review and assessment using CFD simulations. **Cold Regions Science and Technology**, v. 217, p. 104029, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.104029>>. Acesso em: 25 mar. 2024.

DURAN-ROS, Miquel; PUIG-BARGUÉS, Jaume; CUFÍ, Sílvia; SOLÉ-TORRES, Carles; ARBAT, Gerard; PUJOL, Joan; CARTAGENA, Francisco Ramírez. Effect of different filter media on emitter clogging using reclaimed effluents. **Agricultural Water Management**, v. 266, p. 107591, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107591>>. Acesso em: 14 mai. 2023.

EGEA-CORBACHO, Agata; GUTIÉRREZ, Santiago; QUIROGA, José María. Removal of emerging contaminants from wastewater through pilot plants using intermittent sand/coke filters for its subsequent reuse. **Science of The Total Environment**, v. 646, p. 1232–1240, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.399>>. Acesso em: 4 mai. 2023.

ELIMELECH, M.; GREGORY, J.; JIA, X.; WILLIAMS, R. A.. Advanced simulation of porous media and filtration processes. *In: Particle Deposition & Aggregation*. [s.l.]: Elsevier, 1995, p. 376–401. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-075067024-1/50014-5>>. Acesso em: 13 abr. 2023.

ELRAHMANI, Ahmed; AL-RAOUSH, Riyadh I.; SEERS, Thomas D. Clogging and permeability reduction dynamics in porous media: A numerical simulation study. **Powder Technology**, v. 427, p. 118736, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118736>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

ENDO KOKUBUN, M.A.; MUNTEAN, A.; RADU, F.A.; KUMAR, K ; POP, I.S.; KEILEGAVLEN, E.; SPILDO, K.. A pore-scale study of transport of inertial particles by water in porous media. **Chemical Engineering Science**, v. 207, p. 397–409, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.06.036>>. Acesso em: 15 abr. 2023.

FAND, R.M., KIM, B.Y.K., LAM, A.C.C., PHAN, R.T., Resistance to the Flow of Fluids through Simple and Complex Porous Media whose Matrices are Composed of Randomly Packed Spheres. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, v. 109, p.268-274,1987. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.3242658>>. Acesso em: 07 set. 2023.

FERREIRA, T., RASBAND, W.. **ImageJ User Guide**. 2012. Disponível em: <<https://imagej.net/ij/docs/guide/user-guide.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2024.

FOUNTOULAKIS, M.S.; MARKAKIS, N.; PETOUSHI, I.; MANIOS, M.. Single house on-site grey water treatment using a submerged membrane bioreactor for toilet flushing. **Science of The Total Environment**, v. 551–552, p. 706–711, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.057>>. Acesso em: 15 abr. 2023.

FREIRE, Paulo. **Pedagogia da indignação: cartas pedagógicas e outros escritos**. São Paulo: Unesp. 2000.

FREITAS, B.L.S.; TERIN, U.C.; FAVA, N.M.N.; MACIEL, P.M.F.; GARCIA, L.A.T.; MEDEIROS, R.C.; OLIVEIRA, M.; FERNANDEZ-IBAÑEZ, P.; BYRNE, J.A.; SABOGAL-PAZ, L.P.. A critical overview of household slow sand filters for water treatment. **Water Research**, v. 208, p. 117870, 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135421010642>>. Acesso em: 4 mai. 2023.

FRIPPIAT, Christophe C.; HOLEYMAN, Alain E. A comparative review of upscaling methods for solute transport in heterogeneous porous media. **Journal of Hydrology**, v. 362, n. 1–2, p. 150–176, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117870>>. Acesso em: 9 abr. 2023.

FU, Jinlong; THOMAS, Hywel R.; LI, Chenfeng. Tortuosity of porous media: Image analysis and physical simulation, **Earth-Science Reviews**, v. 212, p. 103439, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103439>>. Acesso em: 15 set. 2023.

GAO, Hui; LI, Huazhou. Determination of movable fluid percentage and movable fluid porosity in ultra-low permeability sandstone using nuclear magnetic resonance (NMR) technique. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 133, p. 258–267, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.06.017>>. Acesso em: 29 abr. 2023.

GEA GROUP. **Membrane filtration: Reverse osmosis, nanofiltration, ultrafiltration and microfiltration**. p. 12, 2012. Disponível em: <https://www.gea.com/en/binaries/membrane-filtration-ultrafiltration-nanofiltration-microfiltration-reverse-osmosis-gea_tcm11-34841.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2023.

GIESCHE, Herbert. Mercury Porosimetry: A General (Practical) Overview. **Particle & Particle Systems Characterization**, v. 23, n. 1, p. 9–19, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ppsc.200601009>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard C. **Processamento digital de imagens**. 3º ed. Pearson Educação, São Paulo, 2010.

GRACIANO-URIBE, Jonathan; PUJOL, Toni; HINCAPIE-ZULUAGA, Diego; PUIG-BARGUÉS, Jaume; DURAN-ROS, Miquel; ARBAT, Gerard; CARTAGENA, Francisco Ramírez de. Bed expansion at backwashing in pressurised porous media filters for drip irrigation: Numerical simulations and analytical equations. **Biosystems Engineering**, v. 223, p. 277–294, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.09.008>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

GRACZYK, Krzysztof M., MATYKA, Maciej. Predicting porosity, permeability, and tortuosity of porous media from images by deep learning. **Scientific Reports**, v. 10, 21488, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-020-78415-x>>. Acesso em: 15 set. 2023.

GUHA, Abhijit. Transport and Deposition of Particles in Turbulent and Laminar Flow. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 40, n. 1, p. 311–341, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102220>>. Acesso em: 25 mar. 2024.

HAIDE, Robert; FEST-SANTINI, Stephanie; SANTINI, Maurizio. Use of X-ray micro-computed tomography for the investigation of drying processes in porous media: A review. **Drying Technology**, v. 40, n. 9, p. 1731–1744, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1876723>>. Acesso em: 29 abr. 2023.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. **Física: vol. 2**. 5a. ed. Rio de Janeiro: Grupo Gen - LTC, 2007.

HARITI, Yassine; HAJJI, Younes; HADER, Ahmed; FARAJI, Hamza; BOUGHALEB, Yahia; FARAJI, Mustapha; SAIFAOU, Dennoun.. Modelling of fluid flow in porous media and filtering water process: Langevin dynamics and Darcy's law based approach. **Materials Today: Proceedings**, v. 30, p. 870–875, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.343>>. Acesso em: 9 abr. 2023.

HEINEMANN, Z; MITTERMEIR, G. **Fluid flow in porous media**. 2 ed. Leoben : PHDG, 2013. 206 p. PHDG textbook series.

HÖÖK, Mikael. Coal and Oil - The Dark Monarchs of Global Energy Understanding Supply and Extraction Patterns and their Importance for Future Production. **Uppsala: Acta Acta Universitatis Upsaliensis**, 2010. (Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology, 760).

HU, Ran. Pollution control and remediation of rural water resource based on urbanization perspective. **Environmental Technology & Innovation**, v. 20, p. 101136, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101136>>. Acesso em: 14 abr. 2023.

JARRAHI, Miad; RUTH, Douglas W.; BASSUONI, Mohamed T.; HOLLANDER, Hartmut M.. Porosity Measurement of Low Permeable Materials Using Gas Expansion Induced Water Intrusion Porosimetry (GEIWIP). **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 17554, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-019-53441-6>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

KAKORIA, Ashish; SINHA-RAY, Sumit. Ultrafine nanofiber-based high efficiency air filter from waste cigarette butts. **Polymer**, v. 255, p. 125121, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125121>>. Acesso em: 5 mai. 2023.

KHAN, Irfan; WANG, Mingjun; ZHANG, Yapei; *et al.* Two-phase bubbly flow simulation using CFD method: A review of models for interfacial forces. **Progress in Nuclear Energy**, v. 125, p. 103360, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103360>>. Acesso em: 25 mar. 2024.

KOZENY, J. Über kapillare Leitung des Wassers im Boden-Aufstieg, Versickerung und Anwendung auf die Bewässerung, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften Wien. **Mathematisch Naturwissenschaftliche Abteilung**, 1927. 136, p.271-306.

KUILA, Utpalendu; MCCARTY, Douglas K.; DERKOWSKI, Arkadiusz; FISCHER, Timothy B.; PRASAD, Manika. Total porosity measurement in gas shales by the water immersion porosimetry (WIP) method. **Fuel**, v. 117, p. 1115–1129, 2014.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.073>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

LABANI, Mohammad Mahdi; REZAEI, Reza; SAEEDI, Ali; HINAI, Adnan Al. Evaluation of pore size spectrum of gas shale reservoirs using low pressure nitrogen adsorption, gas expansion and mercury porosimetry: A case study from the Perth and Canning Basins, Western Australia. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 112, p. 7–16, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.11.022>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

LEAL, Julian; AVILA, Edgar A.; DARGHAN, Aquiles E.; LOBO, Deyanira. Spatial modeling of infiltration and its relationship with surface coverage of rock fragments and porosity in soils of an andean micro-watershed in Tolima (Colombia). **Geoderma Regional**, v. 33, p. e00637, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00637>>. Acesso em: 9 abr. 2023.

LEE, Jeonghoon; JUNG, Hyejung. Understanding the relationship between meltwater discharge and solute concentration by modeling solute transport in a snowpack in snow-dominated regions – A review. **Polar Science**, v. 31, p. 100782, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100782>>. Acesso em: 9 abr. 2023.

LEE, Sang Chul; KIM, Ho Kyung; CHUN, In Kon. A flat-panel detector based micro-CT system: performance evaluation for small-animal imaging. **Physics in Medicine and Biology**, v. 48, n. 24, p. 4173–4185, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0031-9155/48/24/014>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

LEIGH, Nancey; LEE, Heonyeong. Sustainable and Resilient Urban Water Systems: The Role of Decentralization and Planning. **Sustainability**, v. 11, n. 3, p. 918, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su11030918>>. Acesso em: 14 abr. 2023.

LI, Haoting; WANG, Shuyan; CHEN, Xi; *et al.* CFD-DEM simulation of aggregation and growth behaviors of fluid-flow-driven migrating particle in porous media. **Geoenergy Science and Engineering**, v. 231, p. 212343, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212343>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

LI, Lintai; ZHOU, Yanmin; SUN, Zhongning; Gu, Haifeng; SHI, Jianxin; WANG, Xiao; CHEN, Meng; ZHAO, Zhou. Improved design of metal fiber filter materials: Experiment and theory. **Journal of Membrane Science**, v. 675, p. 121559, 2023.b Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121559>>. Acesso em: 3 mai. 2023.

LIANG, J.; WANG, Z.; YE, Q.; QIAO, L; JIANG, H.; GUO, Y.; FAN, Z.. Pump-inject antimicrobial and biodegradable aerogel as mask intermediate filter layer for medical protection of air filtration. **Materials Today Sustainability**, v. 19, p. 100211, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100211>>. Acesso em: 5 mai. 2023.

LIN, Dantong; HU, Liming; BRADFORD, Scott Alan; *et al.* Pore-network modeling of colloid transport and retention considering surface deposition, hydrodynamic bridging, and straining. **Journal of Hydrology**, v. 603, p. 127020, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127020>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

LING, Xin; YAN, Zhenhua; LIU, Yuxuan; LU, Guanghua. Transport of nanoparticles in porous media and its effects on the co-existing pollutants. **Environmental Pollution**, v. 283, p. 117098, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117098>>. Acesso em: 9 abr. 2023.

LIU, Hui; COLOMBI, Tino; JÄCK, Ortrud; KELLER, Thomas; WEIH, Martin. Effects of soil compaction on grain yield of wheat depend on weather conditions. **Science of The Total Environment**, v. 807, p. 150763, 2022a. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969721058411>>. Acesso em: 7 mai. 2023.

LIU, Xin; MATTI MARICQ, M.; DOBSON, Douglas A. Statistical capillary tube model for porous filter media: An application in modeling of gasoline particulate filter. **Separation and Purification Technology**, v. 286, p. 120393, 2022b. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1383586621020979>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

MACHADO, Cássia Bezerra. **Caracterização da microestrutura de uma pedosequência com lamelas utilizando tomografia computadorizada de raios**

X. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.

MAHMOUDI, Arezoo; MOUSAVI, Seyyed Alireza; DARVISHI, Parastoo. Greywater as a sustainable source for development of green roofs: Characteristics, treatment technologies, reuse, case studies and future developments. **Journal of Environmental Management**, v. 295, p. 112991, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112991>>. Acesso em: 15 abr. 2023.

MAIRE, E.; BUFFIÈRE, J. Y.; SALVO, L.. On the Application of X-ray Microtomography in the Field of Materials Science. **Advanced Engineering Materials**, v. 3, n. 8, p. 539, 2001.

MARTÍN-GARCÍA, Ana Pilar; EGEA-CORBACHO, Ágata; FRANCO, Ana Amelia; *et al.* Application of intermittent sand and coke filters for the removal of microplastics in wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, p. 134844, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134844>>. Acesso em: 4 maio 2023.

MCDOWELL-BOYER, Laura M.; HUNT, James R.; SITAR, Nicholas. Particle transport through porous media. **Water Resources Research**, v. 22, n. 13, p. 1901–1921, 1986. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/WR022i013p01901>>. Acesso em: 7 mai. 2023.

MEDAWELA, Subhani; INDRARATNA, Buddhima; ATHURALIYA, Senura; LUGG, Glenys; NGHIEM, Long D.. Monitoring the performance of permeable reactive barriers constructed in acid sulfate soils. **Engineering Geology**, v. 296, p. 106465, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106465>>. Acesso em: 28 fev. 2023.

MEIRA FILHO, Damiao Pedro; KAMASSURY, Jorge Kysnney Santos; MEIRA, Rose Caldas De Souza. Uma discussão sobre o coeficiente de restituição. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 4, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0278>>. Acesso em: 20 maio 2024.

MENG, Xianzhi; FOSTON, Marcus; LEISEN, Johannes; DEMARTINI, Jaclyn; WYMAN, Charles E.; RAGAUSKAS, Arthur J.. Determination of porosity of lignocellulosic biomass before and after pretreatment by using Simons' stain and

NMR techniques. **Bioresource Technology**, v. 144, p. 467–476, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.091>>. Acesso em: 29 abr. 2023.

MONGA, Ranit; DEB, Rajdeep; MEYER, Daniel W.; JENNY, Patrick. A probabilistic, flux-conservative particle-based framework for transport in fractured porous media. **Advances in Water Resources**, v. 172, p. 104368, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2023.104368>>. Acesso em: 7 mai. 2023.

MUZAMMIL, Muhammad; ZAHID, Azlan; FAROOQ, Umar; SADDIQUE, Naeem; BREUER, Lutz. Climate change adaptation strategies for sustainable water management in the Indus basin of Pakistan. **Science of The Total Environment**, v. 878, p. 163143, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163143>>. Acesso em: 14 abr. 2023.

NAN, Xuan; LIU, Xinxin; WU, Boqiang; *et al.* Coupled CFD-DEM simulation and experimental study of particle distribution and accumulation during tailings seepage process. **Journal of Cleaner Production**, v. 427, p. 139229, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139229>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

NARDELLI, Vitor Camargo. **Melhoria do desempenho metrológico da tomografia computadorizada por raios X por meio da seleção sistemática dos parâmetros de configuração**. Tese, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2012.

NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; KUTÍLEK, M.; WENDROTH, O.. A brief review of soil water, solute transport and regionalized variable analysis. **Scientia Agricola**, v. 54, n. spe, p. 89–115, 1997. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-90161997000300012>>. Acesso em: 9 abr. 2023.

NIMMO, John R.; KATUWAL, Sheela; LUCAS, Maik. Porosity and pore-size distribution. *In: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. [s.l.]: Elsevier, 2023, p. B9780128229743002000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00139-7>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

NISHAD, Safna; AL-RAOUSH, Riyadh I.; ALAZAIZA, Motasem Y.D. Release of colloids in saturated porous media under transient hydro-chemical conditions: A

pore-scale study. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 614, p. 126188, 2021. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126188>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

NJIEKAK, Gautier; SCHMITT, Douglas R.; KOFMAN, Randolf S. Pore systems in carbonate formations, Weyburn field, Saskatchewan, Canada: Micro-tomography, helium porosimetry and mercury intrusion porosimetry characterization. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 171, p. 1496–1513, 2018. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.029>>. Acesso em: 26 mar. 2024.

NOUTSOPOULOS, C.; ANDREADAKIS, A.; KOURIS, N.; CHARCHOUSI, D.; MENDRINO, P.; GALANI, A.; MANTZIARAS, I.; KOUMAKI, E... Greywater characterization and loadings – Physicochemical treatment to promote onsite reuse. **Journal of Environmental Management**, v. 216, p. 337–346, 2018. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.094>>. Acesso em: 14 abr. 2023.

OLIVEIRA, Grazielle Leite P. De; CEIA, Marco A.R.; MISSAGIA, Roseane M.; *et al.* Pore volume compressibilities of sandstones and carbonates from Helium porosimetry measurements. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 137, p. 185–201, 2016. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.11.022>>. Acesso em: 26 mar. 2024.

PARVAN, Amin; JAFARI, Saeed; RAHNAMA, Mohammad; NOROUZI-APOURVARI, Saeid; RAOOF, Amir. Insight into particle detachment in clogging of porous media; a pore scale study using lattice Boltzmann method. **Advances in Water Resources**, v. 151, p. 103888, 2021. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103888>>. Acesso em: 15 abr. 2023.

QIAN, Rusheng; SHI, Jiashun; LIU, Cheng; LIU, Guojian; LIU, Zhiyong; SHE, WEI; ZHANG, Yu; ZHANG, Yunsheng; LIANG; Yue. Investigations on pore-structure in cementitious materials using gas intrusion porosimetry. **Measurement**, v. 171, p. 108816, 2021. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108816>>. Acesso em: 1 mai. 2023.

RAOOF, Amir; HASSANIZADEH, S. Majid; LEIJNSE, Anton. Upscaling Transport of Adsorbing Solutes in Porous Media: Pore-Network Modeling. **Vadose Zone Journal**,

v. 9, n. 3, p. 624–636, 2010. Disponível em:

<<http://doi.wiley.com/10.2136/vzj2010.0026>>. Acesso em: 15 abr. 2023.

REN, Wanli; ERSHADNIA, Reza; WALLACE, Corey D.; LABOLLE, Eric M.; DAI, Zhenxue; BARROS, Felipe P. J. de; SOLTANIAN, Mohamad R.. Evaluating the Effects of Multiscale Heterogeneous Sediments on Solute Mixing and Effective Dispersion. **Water Resources Research**, v. 58, n. 9, 2022. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1029/2021WR031886>>. Acesso em: 14 mai. 2023.

RIGBY, Sean P.; CHIGADA, Peter I.; WANG, Jiawei; WILKINSON, Sam K.; BATEMAN, Henry; AL-DURI, Bushra; WOOD, Joseph; BAKALIS, Serafim; MIRI, Taghi. Improving the interpretation of mercury porosimetry data using computerised X-ray tomography and mean-field DFT. **Chemical Engineering Science**, v. 66, n. 11, p. 2328–2339, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.02.031>>. Acesso em: 1 mai. 2023.

ROUQUEROL, Jean; BARON, Gino; DENOYEL, Renaud; GIESCHE, Hebert; GROEN, Johan; KLOBES, Peter; LEVITZ, Pierre; NEIMARK, Alexander V.; RIGBY, Sean; SKUDAS, Romas; SING, Kenneth; THOMMES, Matthias; UNGER, Klaus. Liquid intrusion and alternative methods for the characterization of macroporous materials (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 84, n. 1, p. 107–136, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1351/PAC-REP-10-11-19>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

SACRAMENTO, Rebeca N.; YANG, Yulong; YOU, Zhenjiang; WALDMANN, Alex; MARTINS, André L.; VAZ, Alexandre S. L.; ZITHA, Pacelli L. J.; BEDRIKOVETSKY, Pavel. Deep bed and cake filtration of two-size particle suspension in porous media. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 126, p. 201–210, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.12.001>>. Acesso em: 14 mai. 2023.

SADEGHNEJAD, Saeid; ENZMANN, Frieder; KERSTEN, Michael. Numerical Simulation of Particle Retention Mechanisms at the Sub-Pore Scale. **Transport in Porous Media**, v. 145, n. 1, p. 127–151, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11242-022-01843-y>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

SAHIMI, Muhammad. **Flow and transport in porous media and fractured rock: from classical methods to modern approaches**. Weinheim ; New York: VCH, 1995.

SILVA, Marly Terezinha Quadri Simões da; PERRETTO, Felipe; ROCIO CARDOSO, Marianna do; MAZER, Wellinton. Porosity: Some characterization techniques. **Materials Today: Proceedings**, p. S2214785323017832, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.716>>. Acesso em: 29 abr. 2023.

SONG, Shuang; LE-CLECH, Pierre; SHEN, Yansong. Microscale fluid and particle dynamics in filtration processes in water treatment: A review. **Water Research**, v. 233, p. 119746, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119746>>. Acesso em: 15 abr. 2023.

SONG, Yu; SHIM, Eunkyong. 3D X-ray tomographic microstructure analysis of dust-clogging inside nonwoven fibrous filter media. **Journal of Membrane Science**, v. 664, p. 121067, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121067>>. Acesso em: 14 mai. 2023.

SPURIN, Catherine; ARMSTRONG, Ryan T.; MCCLURE, James; *et al.* Dynamic mode decomposition for analysing multi-phase flow in porous media. **Advances in Water Resources**, v. 175, p. 104423, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2023.104423>>. Acesso em: 25 mar. 2024.

SUN, Chengyu; CHEN, Kun; BINEY, Bernard Wiafe; WANG, Kunin; LIU, He; GUO, Aijun; XIA, Wei. Switchable wettability of grain-stacked filter layers from polyurethane plastic waste for oil/water separation. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 610, p. 970–981, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.11.158>>. Acesso em: 5 mai. 2023.

SUN, Jianmeng; DONG, Xu; WANG, Jinjie; SCHMITT, Douglas R.; XU, Chunlu; MOHAMMED, Tariq; CHEN, Dewen. Measurement of total porosity for gas shales by gas injection porosimetry (GIP) method. **Fuel**, v. 186, p. 694–707, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.09.010>>. Acesso em: 1 mai. 2023.

SUNWISE CHEM. Dióxido de zircônio OZ-P20 (CAS 1314-23-4). **Site Sunwise Chem**. 2023. Disponível em:

<https://www.sunwisechem.com/Zirconium-Dioxide-OZ-P20-CAS-1314-23-4-pd46731122.html?gclid=EAlalQobChMIoO3U9OTmgwMVI1hIAB0TIQLhEAAYASAAEgLLwfD_BwE>. Acesso em: 06 jun. 2024.

SZILVÍ-NAGY, M.; MÁTYÁSI, Gy. Analysis of STL files. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 38, n. 7–9, p. 945–960, 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(03\)90079-3](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(03)90079-3)>. Acesso em: 22 abr. 2024.

TSEKLEVES, Emmanuel; COOPER, Rachel; SPENCER, Jak (Orgs.). **Design for Global Challenges and Goals**. 1. ed. Abingdon, Oxon ; New York, NY : Routledge, 2021. | Series: Design for social responsibility: Routledge, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.4324/9781003099680>>. Acesso em: 14 abr. 2023.

TU, Jiyuan; YEOH, Guan Heng; LIU, Chaoqun. **Computational fluid dynamics: a practical approach**. 2nd ed. Amsterdam ; Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2013.

TULI, Atac; HOPMANS, Jan W.; ROLSTON, Dennis E.; MOLDRUP, Per. Comparison of Air and Water Permeability between Disturbed and Undisturbed Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 5, p. 1361–1371, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0332>>. Acesso em: 7 mai. 2023.

TURNER, J. E. **Atoms, radiation, and radiation protection**. 3rd completely rev. and enl. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2007.

VAFAI, K. (Org.). **Handbook of porous media**. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.

VAFAI, Kambiz. Preface: Porous Media and Its Applications in Science, Engineering, and Industry. *In*: Potsdam, Germany: [s.n.], 2012, p. 1–7. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.4711145>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

VAN DE WALLE, Arjen; KIM, Minseok; ALAM, Md Kawser; WANG, Xiaofei; WU, Di; DASH, Smruti Ranjan; RABAEY, Korneel; KIM, Joenghwan. Greywater reuse as a key enabler for improving urban wastewater management. **Environmental Science**

and **Ecotechnology**, p. 100277, 2023. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100277>>. Acesso em: 14 abr. 2023.

VAZ, C. M. P.; CRESTANA, S.; NAIME, J. dse M.; CRUVINEL, P. E.. Tomografia computadorizada de raios X ou gama. *In: Conceitos e aplicações da instrumentação para o avanço da agricultura*. [s.l.]: Embrapa, 2014.

VILA NOVA, Abraão Alves. **Quantificação da porosidade em rochas calcárias por meio de Tomografia Computadorizada de Raios X e de Raios Gama**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 81. 2020.

WANG, Lichun; CARDENAS, M. Bayani; WANG, Tiejun; ZHOU, Jia-Qing; ZHENG, Lizhi; CHEN, Yi-Feng; CHEN, Xi. The effect of permeability on Darcy-to-Forchheimer flow transition. **Journal of Hydrology**, v. 610, p. 127836, 2022a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127836>>. Acesso em: 9 abr. 2023.

WANG, Xianglong; PAN, Jienan; WANG, Kai; GE, Taoyuan; WEI, Jiang; WU, Wei. Characterizing the shape, size, and distribution heterogeneity of pore-fractures in high rank coal based on X-ray CT image analysis and mercury intrusion porosimetry. **Fuel**, v. 282, p. 118754, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118754>>. Acesso em: 1 mai. 2023.

WANG, Yiyao; HE, Wei; CHEN, Chao; ZHANG, Xianqin; TANG, Hong; LI, Penghui; TONG, Yingdong; LI, Ming; LIN, Yan; YU, Jiang; XU, Fuli; JIA, Xu. Different countries need strengthen water management to improve human health. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, p. 134998, 2022b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134998>>. Acesso em: 14 abr. 2023.

WANTANAPHONG, J.; MOONEY, S.J.; BAILEY, E.H. Quantification of pore clogging characteristics in potential permeable reactive barrier (PRB) substrates using image analysis. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 86, n. 3–4, p. 299–320, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2006.04.003>>. Acesso em: 28 fev. 2023.

WARSAME, Abdimalik Ali; ABDI, Abdikafi Hassan; AMIR, Amir Yahya; AZMAN-SAINI, W. N. W. Towards sustainable environment in Somalia: The role of

conflicts, urbanization, and globalization on environmental degradation and emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 406, p. 136856, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136856>>. Acesso em: 14 abr. 2023.

WEBER, E.; FERNANDEZ, M.; WAPNER, P.; HOFFMAN, W.. Comparison of X-ray micro-tomography measurements of densities and porosity principally to values measured by mercury porosimetry for carbon-carbon composites. **Carbon**, v. 48, n. 8, p. 2151–2158, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.11.047>>. Acesso em: 1 mai. 2023.

WHITE, Frank M. **Fluid mechanics**. 6th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2009. (Mcgraw-Hill series in mechanical engineering).

XIAO, Boqi; WANG, Wei; ZHANG, Xian; LONG, Gongbo; FAN, Jintu; CHEN, Hanxin; DENG, Lin. A novel fractal solution for permeability and Kozeny-Carman constant of fibrous porous media made up of solid particles and porous fibers. **Powder Technology**, v. 349, p. 92–98, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.03.028>>. Acesso em: 1 mai. 2023.

XIAO, Boqi; ZHU, Huaizhi; CHEN, Fengye; LONG, Gongbo; LI, Yi. A fractal analytical model for Kozeny-Carman constant and permeability of roughened porous media composed of particles and converging-diverging capillaries. **Powder Technology**, v. 420, p. 118256, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118256>>. Acesso em: 1 mai. 2023.

XU, Jinwei; XIAO, Xin; ZHANG, Wenbo. Air-Filtering Masks for Respiratory Protection from PM2.5 and Pandemic Pathogens. **One Earth**, v. 3, n. 5, p. 574–589, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.014>>. Acesso em: 5 mai. 2023.

YE, Xueyan; CUI, Ruijuan; DU, Xinqiang; *et al.* Mechanism of Suspended Kaolinite Particle Clogging in Porous Media During Managed Aquifer Recharge. **Groundwater**, v. 57, n. 5, p. 764–771, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/gwat.12872>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

ZHANG, Wei; MEHRABIAN, Amin. Nonlinear and non-local analytical solution for Darcy–Forchheimer flow through a deformable porous inclusion within a semi-infinite elastic medium. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 911, p. A49, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/jfm.2020.1024>>. Acesso em: 27 abr. 2023.

ZHENG, Lang; LU, Weisheng; WU, Liupengfei; *et al.* A review of integration between BIM and CFD for building outdoor environment simulation. **Building and Environment**, v. 228, p. 109862, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109862>>. Acesso em: 25 mar. 2024.

ZHOU, Shunhua; ZHANG, Xiaohui; WU, Di. Mathematical Modeling of Slurry Infiltration and Particle Dispersion in Saturated Sand. **Transport in Porous Media**, v. 124, p. 1–26, 2018a.

ZHOU, Zilong; ZANG, Haizhi; WANG, Shanyong; DU, Xueming; MA, Dan; ZHANG, Jing. Filtration Behaviour of Cement-Based Grout in Porous Media. **Transport in Porous Media**, v. 125, n. 3, p. 435–463, 2018b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11242-018-1127-x>>. Acesso em: 14 mai. 2023.

ZU, Xuan; LI, Yun; YIN, Baoqun. Consecutive layer collaborative filter similarity for differentiable neural network pruning. **Neurocomputing**, v. 533, p. 35–45, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.02.063>>. Acesso em: 3 mai. 2023.