

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

RODOLPHO KADES DE OLIVEIRA E SILVA

**CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA DA PERMEABILIDADE E TORTUOSIDADE DE
MEIOS POROSOS FORMADOS POR FILAMENTOS ELÍPTICOS**

CURITIBA

2022

RODOLPHO KADES DE OLIVEIRA E SILVA

**CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA DA PERMEABILIDADE E TORTUOSIDADE DE
MEIOS POROSOS FORMADOS POR FILAMENTOS ELÍPTICOS**

**Permeability and Tortuosity Numerical Characterization of Porous Samples
Formed by Elliptical Fibers**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia Térmica..

Orientador: Prof. Dr. Silvio Luiz De Mello Junqueira

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



RODOLPHO KADES DE OLIVEIRA E SILVA

**CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA DA PERMEABILIDADE E TORTUOSIDADE DE MEIOS POROSOS
FORMADOS POR FILAMENTOS ELÍPTICOS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia Térmica.

Data de aprovação: 20 de Maio de 2022

Dr. Silvio Luiz De Mello Junqueira, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Christian Naaktgeboren, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Neri Volpato, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Viviana Cocco Mariani, Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Pucpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 20/05/2022.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas e/ou instituições às quais presto minha homenagem. Certamente esses parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre estas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

A minha família, pelo carinho, incentivo e total apoio em todos os momentos da minha vida, mas em especial neste difícil momento.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Silvio L. M. Junqueira, que me mostrou os caminhos a serem seguidos, pela paciência nestes tempos difíceis e pela confiança depositada.

A todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Descobri que são as pequenas coisas, as tarefas diárias de pessoas comuns que mantêm o mal afastado. Ações simples de amor e de bondade. (TOLKIEN, John R.R., 1955).

RESUMO

A obtenção de amostras de formações rochosas contribui de diversas formas para a produção de petróleo, mas é complexa e possui alto custo. Desta forma, a fabricação de meios porosos que representem adequadamente as propriedades das rochas é estudada como alternativa. No presente trabalho, propõe-se o estudo numérico para caracterização da permeabilidade e da tortuosidade de meios porosos com filamentos de secção transversal elíptica, com comparação a resultados experimentais para analisar a viabilidade da produção de amostras com propriedades permoporosas projetadas. Neste estudo, o Volume Elementar Representativo (REV) é aplicado aos meios porosos para simplificá-los, as simulações dos escoamentos são realizadas pelo Método dos Volumes Finitos (MVF), utilizando fluido Newtoniano em regime permanente, e a permeabilidade é calculada pela equação de Hazen-Darcy. Uma verificação e validação do método é realizada pela reprodução de estudos da literatura. Os resultados mostram a influência da porosidade (entre 0,23 e 0,75), do desalinhamento entre camadas (0%, 25%, 50%), do ângulo de varredura (60°, 90°) e do número de filamentos unidos (1, 2). Constatou-se que a porosidade e o número de filamentos unidos são os parâmetros de maior influência sobre a permeabilidade. Em seguida, a análise de escala é conduzida para os meios de filamentos elípticos, obtendo-se a correlação para a permeabilidade em função do diâmetro de poro, da porosidade e da tortuosidade. Comparações mostram como o diâmetro de poro possui maior influência sobre a permeabilidade do que a tortuosidade. Por fim, a comparação com resultados experimentais mostra que é possível estimar a ordem de valores das permeabilidades de amostras fabricadas.

Palavras-chave: recuperação de petróleo; meios porosos; permeabilidade; tortuosidade; simulao numérica.

ABSTRACT

Obtaining core samples from rock formations contributes in several ways to oil production, but it is complex and expensive. Therefore, the manufacture of porous media that properly represent the properties of the reservoir structure is studied as an alternative. In the present work, a numerical study is proposed for the characterization of the permeability and tortuosity of porous media with elliptical cross-section filaments, with comparison to experimental results to analyze the viability of producing samples with designed permoporous properties. In this study, the Representative Elementary Volume (REV) is utilized to simplify the porous medium. The simulations are done using the Finite Volume Method and the permeability is calculated by the Hazen-Darcy Equation. The method validation is done by reproducing the results of studies from literature. Results show the influence of porosity (between 0,23 and 0,75), the layers staggering (0%, 25%, 50%), the raster angle (60°, 90°) and the lines of fibers in set (1, 2). The porosity and the lines of fibers are the highest influence parameters of permeability, while the raster angle has higher influence on tortuosity. A scale analysis is conducted on the porous medium, which leads to a correlation for the permeability as a function of the pore throat, the porosity and the tortuosity. The analysis show how the pore throat has the highest influence on permeability than tortuosity. Lastly, a comparison with experimental results shows that its possible to estimate the permeability values order of manufactured samples.

Keywords: oil recovery; porous medium; permeability; tortuosity; numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1– Processo de coleta de diâmetro completo: a) Exemplos de brocas para perfuração e para coleta e b) esquema do processo ocorrendo.	21
Figura 1.2– Exemplos de amostras de estruturas rochosas a) recém obtidas e b) limpas e prontas para análises.	21
Figura 1.3– Processo de amostras recuperáveis por cabo de aço: a) Broca em configuração de perfuração, com <i>plug</i> ocupando o centro, b) broca em configuração de coleta, com a cápsula vazia ocupando o centro e c) exemplo de broca com o <i>plug</i>	22
Figura 1.4– Processo de coleta em paredes laterais: a) esquema representativo de coleta por percussão, b) exemplos de brocas retráteis para coleta por forma rotativa e c) exemplos de amostras obtidas por percussão (esquerda) e de forma rotativa (direita).	23
Figura 1.5– Exemplos de meios porosos fabricados por processos de MA com materiais a) poliméricos e b) cerâmicos.	24
Figura 1.6– Amostra porosa representada em diferentes níveis de resolução: a) meio poroso fabricado, b) modelo produzido em CAD, c) estrutura periódica da matriz e d) REV proposto.	25
Figura 2.1– Representação de rocha reservatório nas escalas: a) macroscópica para a fratura, b) micro-fratura ou bi-disperso, c) macroscópica do poro e d) microscópica do poro.	28
Figura 2.2– Ilustração de como o comprimento efetivo percorrido é definido em um escoamento com desvio.	31
Figura 2.3– Escoamento transversal sobre cilindro: a) campo de vetores de velocidade e b) decomposição do vetor velocidade na direção x	32
Figura 2.4– Ilustração de campo de vetores em malha computacional: a) exemplo de malha, b) detalhe da malha e vetores de velocidade e c) detalhe para ilustrar u_i e $u_{i,x}$	33
Figura 3.1– Meios porosos estudados por Skibinski <i>et al.</i> (2015): a) modelo em 3D para simulações e b) amostra produzida por fusão seletiva a laser.	36

Figura 3.2– Meios porosos estudados por Zhianmanesh, Varmazyar e Montazerian (2019): a) célula unitária que compõe o meio poroso e b) meios porosos obtidos pela replicação das células unitárias.	37
Figura 3.3– Meios porosos estudados por Truscello <i>et al.</i> (2012): a) modelo em 3D do volume representativo do meio poroso e b) condições de contorno utilizadas.	38
Figura 3.4– Meios porosos estudados por Tamayol e Bahrami (2011): a) unidirecional, b) bidirecional e c) tridirecional.	40
Figura 3.5– Meios porosos estudados por Montazerian <i>et al.</i> (2017): a) hexagonal e b) dodecaedro rômbo.	41
Figura 4.1– Amostra porosa representada em diferentes níveis de resolução: a) matriz manufaturada, b) modelo produzido em CAD, c) estrutura periódica da matriz e d) REV utilizado.	44
Figura 4.2– Diferentes valores de N_f para meios porosos com $\phi = 0,65$: a) o REV para $N_f = 1$, b) meio poroso para $N_f = 1$, c) o REV para $N_f = 2$ e d) o meio poroso para $N_f = 2$.	45
Figura 4.3– Ilustração de meios porosos com $\phi = 0.65$, sendo a) o REV para $\theta = 90^\circ$, b) o meio poroso para $\theta = 90^\circ$, c) o REV para $\theta = 60^\circ$ e d) o meio poroso para $\theta = 60^\circ$.	46
Figura 4.4– Meio poroso com $\phi = 0.65$ e $\theta = 60^\circ$ em diferentes níveis de resolução: a) meio poroso idealizado, b) simplificação periódica do meio e c) o REV utilizado.	46
Figura 4.5– Comparação pelas vistas em corte com ampliação da seção transversal e pelas vistas frontais dos meios porosos com $\phi = 0.65$ e com De: a) 0%, b) 25% e c) 50%.	47
Figura 4.6– REVs com $N_f = 01$ e $\theta = 90^\circ$: a) $L01 A90 S00$, b) $L01 A90 S25$ e c) $L01 A90 S50$.	48
Figura 4.7– REVs com $N_f = 02$ e $\theta = 90^\circ$: a) $L02 A90 S00$, b) $L02 A90 S25$ e c) $L02 A90 S50$.	48
Figura 4.8– REVs com $N_f = 01$ e $\theta = 60^\circ$: a) $L01 A60 S00$, b) $L01 A60 S25$ e c) $L01 A60 S50$.	49

Figura 4.9– REVs com $N_f = 02$ e $\theta = 60^\circ$: a) $L02 A60 S00$, b) $L02 A60 S25$ e c) $L02 A60 S50$	49
Figura 4.10–REVs para o meio $L01 A90 S00$: a) $\phi = 0,65$ e b) $\phi = 0,35$	50
Figura 4.11–Ilustração de superfícies nomeadas para o meio $L01 A90 S00$ com $\phi = 0,65$, tem-se: a) a vista isométrica, b) vista do plano $x - y$ e c) vista do plano $x - z$	52
Figura 4.12–Ilustração de como o REV do meio $L01 A90 S25$ com $\phi = 0,65$ é replicado pelas condições a) Periodicidade em x , b) Periodicidade em y e c) Periodicidade em z	53
Figura 4.13–Malha computacional para o meio poroso $L01 A90 S00$ com $\phi = 0,65$: a) o REV do meio e b) a malha com 130.114 elementos.	54
Figura 4.14–Permeâmetro de fluido em regime permanente utilizado nos experimentos: a) o permeâmetro real e b) o esquema de funcionamento com: (1) o tanque 1, (2) a bomba, (3) o <i>coreholder</i> , (4) o meio poroso, (5) o transdutor de pressão diferencial, e (6) o tanque 2.	56
Figura 5.1– Simplificação ao REV do meio poroso unidirecional com $\phi = 0,65$: a) REV, b) plano bidimensional representativo e c) idealização do meio poroso.	58
Figura 5.2– Simplificação ao REV do meio poroso bidirecional com $\phi = 0,65$: a) REV, b) simplificação periódica e c) idealização do meio poroso.	59
Figura 5.3– Simplificação ao REV do meio poroso tridirecional com $\phi = 0,65$: a) REV, b) simplificação periódica do meio e c) idealização do meio poroso.	59
Figura 5.4– Ilustração de malhas para meios porosos com filamentos cilíndricos a) unidirecional, b) bidirecional e c) tridirecional.	60
Figura 5.5– Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para meio poroso unidirecional.	62
Figura 5.6– Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para meio poroso bidirecional.	63
Figura 5.7– Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para meio poroso tridirecional.	64
Figura 5.8– Campos de vetores de velocidade para os meios com $\phi = 0,35$: a) Unidirecional, b) Bidirecional, c) Tridirecional, e os meios com $\phi = 0,65$: d) Unidirecional, e) Bidirecional e f) Tridirecional.	66
Figura 5.9– Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) $L01 A90 S00$, b) $L01 A90 S25$, c) $L01 A90 S50$ e d) comparação entre os três.	69

Figura 5.10 –Campos de vetores de velocidade para os meios com $\phi = 0,65$: a) <i>L01 A90 S00</i> , b) <i>L01 A90 S25</i> , c) <i>L01 A90 S50</i> , e os meios com $\phi = 0,30$: d) <i>L01 A90 S00</i> , e) <i>L01 A90 S25</i> e f) <i>L01 A90 S50</i>	71
Figura 5.11 –Permeabilidae (K) por porosidade (ϕ) para os meios porosos bidirecional (filamento cilíndrico) e <i>L01 A90 S00</i> (filamento elíptico).	71
Figura 5.12 –Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) <i>L02 A90 S00</i> , b) <i>L02 A90 S25</i> , c) <i>L02 A90 S50</i> e d) comparação entre os três.	72
Figura 5.13 –Campos de vetores de velocidade para os meios com $\phi = 0,65$: a) <i>L02 A90 S00</i> , b) <i>L02 A90 S25</i> , c) <i>L02 A90 S50</i> , e os meios com $\phi = 0,30$: d) <i>L02 A90 S00</i> , e) <i>L02 A90 S25</i> e f) <i>L02 A90 S50</i>	74
Figura 5.14 –Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) <i>L01 A60 S00</i> , b) <i>L01 A60 S25</i> , c) <i>L01 A60 S50</i> e d) comparação entre os três.	75
Figura 5.15 –Campos de vetores de velocidade para os meios com $\phi = 0,50$: a) <i>L01 A60 S00</i> , b) <i>L01 A60 S25</i> , c) <i>L01 A60 S50</i> , e os meios com $\phi = 0,30$: d) <i>L01 A60 S00</i> , e) <i>L01 A60 S25</i> e f) <i>L01 A60 S50</i>	76
Figura 5.16 –Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) <i>L02 A60 S00</i> , b) <i>L02 A60 S25</i> , c) <i>L02 A60 S50</i> e d) comparação entre os três.	77
Figura 5.17 –Campos de vetores de velocidade para os meios com $\phi = 0,50$: a) <i>L02 A60 S00</i> , b) <i>L02 A60 S25</i> e c) <i>L02 A60 S50</i>	78
Figura 5.18 –Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para todos os meios porosos simulados.	79
Figura 5.19 –Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para meios porosos <i>L01 A90 S</i> (De): a) adimensionalizados por b^2 e b) adimensionalizados por δ_{min}^2	80
Figura 5.20 –Número de Darcy (Da) por δ_{min} para todos os meios porosos simulados.	81
Figura 5.21 –Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) <i>L01 A90 S00</i> , b) <i>L01 A90 S25</i> , c) <i>L01 A90 S50</i> e d) comparação entre as três correlações escolhidas para cada meio ($Da_{Tomadakis-Sotirchos}$).	85
Figura 5.22 –Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) <i>L02 A90 S00</i> , b) <i>L02 A90 S25</i> , c) <i>L02 A90 S50</i> e d) comparação entre as três correlações escolhidas para cada meio ($Da_{Tomadakis-Sotirchos}$).	87

Figura 5.23 –Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) $L01 A60 S00$, b) $L01 A60 S25$, c) $L01 A60 S50$ e d) comparação entre as três correlações escolhidas para cada meio ($Da_{Tomadakis-Sotirchos}$).	89
Figura 5.24 –Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) $L02 A60 S00$, b) $L02 A60 S25$, c) $L02 A60 S50$ e d) comparação entre as três correlações escolhidas para cada meio ($Da_{Tomadakis-Sotirchos}$).	91
Figura 5.25 –Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para todos os meios porosos simulados.	92
Figura 5.26 –Tortuosidade (τ) por porosidade (ϕ) para todos os meios porosos simulados.	92
Figura 5.27 –Tortuosidade (τ) por número de Darcy (Da) para todos os meios porosos simulados.	93
Figura 5.28 –Permeabilidade (K) por porosidade (ϕ) para os meios porosos: a) $L01 A90 S(De)$, b) $L02 A90 S(De)$ e c) $L01 A60 S00$ e $L02 A60 S00$	94
Figura 5.29 –Permeabilidade (K) por porosidade (ϕ) para comparação de resultados com rochas reais.	96
Figura A.1 – Malhas utilizadas no teste de malha com: a) $\phi = 0,75$ e 400 elementos, b) $\phi = 0,75$ e 800 elementos, c) $\phi = 0,75$ e 1.600 elementos, d) $\phi = 0,23$ e 400 elementos, e) $\phi = 0,23$ e 800 elementos e f) $\phi = 0,23$ e 1.600 elementos.	106
Figura A.2 – Malhas utilizadas no teste de malha com: a) $\phi = 0,75$ e 2.766 elementos, b) $\phi = 0,75$ e 5413 elementos, c) $\phi = 0,75$ e 10.528 elementos, d) $\phi = 0,23$ e 2.766 elementos, e) $\phi = 0,23$ e 5.540 elementos e f) $\phi = 0,23$ e 10.132 elementos.	108
Figura A.3 – Malhas utilizadas no teste de malha com: a) $\phi = 0,75$ e 9.042 elementos, b) $\phi = 0,75$ e 18.057 elementos, c) $\phi = 0,75$ e 38.270 elementos, d) $\phi = 0,23$ e 9.981 elementos, e) $\phi = 0,23$ e 19.034 elementos e f) $\phi = 0,23$ e 38.021 elementos.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1– Tabela de resumo dos artigos revisados.	42
Tabela 4.1– Resumo dos valores estudados para as variáveis que compõem a modelagem.	47
Tabela 5.1– Velocidade média (U_D), permeabilidade (K) e número de Reynolds local máximo (Re_{max}) para diferentes valores de ΔP com $\phi = 0,75$	61
Tabela 5.2– Diferenças Percentuais entre Da_d obtidos por correlações e por MVF.	65
Tabela 5.3– Velocidade média (U_D), permeabilidade (K) e Número de Reynolds máximo (Re_{max}) para valores de ΔP com $\phi = 0,75$ no meio poroso L01 A90 S00.	67
Tabela 5.4– Comparação entre valores de K (mD) obtidos por MVF e por LBM para $N_f = 1$ e $\theta = 90^\circ$	70
Tabela 5.5– Comparação entre valores de K (mD) obtidos por MVF e por LBM para $N_f = 2$ e $\theta = 90^\circ$	73
Tabela 5.6– Comparação entre valores de K (mD) obtidos por MVF e por LBM para $N_f = 1$ e $\theta = 60^\circ$	76
Tabela 5.7– Comparação entre valores de K (mD) obtidos por MVF e por LBM para $N_f = 2$ e $\theta = 60^\circ$	78
Tabela 5.8– Coeficientes de ajuste, $E_{K,max}$ e ϕ_{max} para correlações dos meios porosos L01 A90 S(De).	83
Tabela 5.9– Coeficientes de ajuste, $E_{K,max}$ e ϕ_{max} para correlações dos meios porosos L02 A90 S(De).	86
Tabela 5.10– Coeficientes de ajuste, $E_{K,max}$ e ϕ_{max} para correlações dos meios porosos L01 A60 S(De).	88
Tabela 5.11– Coeficientes de ajuste, $E_{K,max}$ e ϕ_{max} para correlações dos meios porosos L02 A60 S(De).	90
Tabela 5.12– Coeficientes C_K e c_2 da Equação 5.13 para cada configuração de meio poroso.	90
Tabela 5.13– Comparação entre valores de K (mD) obtidos por experimentos e pela análise de escala.	95
Tabela A.1– Resultado do teste de malha para meio poroso unidirecional.	105

Tabela A.2– Resultado do teste de malha para meio poroso bidirecional.	107
Tabela A.3– Resultado do teste de malha para meio poroso tridirecional.	108
Tabela A.4– Número de Elementos de malha utilizados para geometrias de validação.	110
Tabela A.5– Resultados dos testes de malha para os meios $L01 A90 S(De)$ em	
$\phi = 0,23$	110
Tabela A.6– Resultados dos testes de malha para os meios $L02 A90 S(De)$ em	
$\phi = 0,23$	111
Tabela A.7– Números de elementos de malha para cada valor de ϕ dos meios porosos	
de filamentos elípticos.	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
EOR	<i>Enhanced Oil Recovery</i>
LBM	<i>Lattice Boltzmann Method</i>
MA	Manufatura Aditiva
MVF	Método dos Volumes Finitos
REV	<i>Representative Elementary Volume</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

a	Raio Maior da elipse	[m]
A_S	Área Superficial Específica	[m ²]
b	Raio Menor da elipse	[m]
d	Diâmetro	[m]
De	Deslocamento entre camadas	[-]
K	Permeabilidade	[m ²]
ℓ_{REV}	Comprimento do REV	[m]
L	Comprimento	[m]
N_f	Número de filamentos	[-]
P	Pressão	[Pa]
Re	Número de Reynolds	[-]
S	Distância entre centros dos filamentos	[m]
u	Velocidade	[-]
U_d	Velocidade Média	[m/s]
x	Eixo cartesiano x	[-]
y	Eixo cartesiano y	[-]
z	Eixo cartesiano z	[-]

Letras Gregas

α	Coefficiente de ajuste da equação de Archie	[-]
β	Fator de Forma	[-]
δ	Distância entre filamentos	[m]
Δ	Variação	[-]
θ	Ângulo entre camadas	[°]
μ	Viscosidade dinâmica	[kg/(m·s)]
π	Pi (constante circular)	[rad]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
τ	Tortuosidade	[-]
ϕ	Porosidade	[-]
ψ	Propriedade genérica	[-]

Sobrescritos

\rightarrow Vetor

Subscritos

ef	Valor efetivo
max	Valor máximo da variável
min	Valor mínimo da variável

REV	Valor da variável no REV
x	Valor da variável no eixo x
0	Valor de referência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Caracterização do Problema	24
1.2	Objetivos	25
1.3	Síntese do Capítulo 1	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	Meios Porosos	27
2.1.1	Escalas de Abordagem	27
2.1.2	Conceito de Volume Elementar Representativo	28
2.2	Propriedades dos meios porosos	29
2.2.1	Porosidade	29
2.2.2	Permeabilidade	29
2.2.3	Tortuosidade	31
2.3	Síntese do Capítulo 2	34
3	REVISÃO DA LITERATURA	35
3.1	Caracterização da Permeabilidade	35
3.2	Caracterização da Tortuosidade	36
3.3	Caracterização Numérica em Meios Porosos Organizados	37
3.4	Análise de Escala em Meios Porosos	39
3.5	Caracterização de Meios Porosos Manufaturados	40
3.6	Substituição de Testemunhos por Meios Porosos Manufaturados	41
3.7	Síntese do Capítulo 3	42
4	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	44
4.1	Geometria do Problema	44
4.2	Equações de balanço para o problema	51
4.3	Modelagem Numérica	53
4.4	Procedimento Experimental	55
4.5	Síntese do Capítulo 4	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1	Validação e verificação	58

5.2	Resultados para Meios Porosos de Filamentos Elípticos	67
5.2.1	Verificação do regime de Darcy	67
5.2.2	Resultados de Permeabilidade	68
5.2.3	Análise de Escala	79
5.2.4	Validação dos Resultados Numéricos	94
5.3	Síntese do Capítulo 5	97
6	CONCLUSÕES	98
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	98
	REFERÊNCIAS	100
	APÊNDICE A TESTES DE MALHAS	105
	APÊNDICE B ADIMENSIONALIZAÇÃO DO PROBLEMA	114

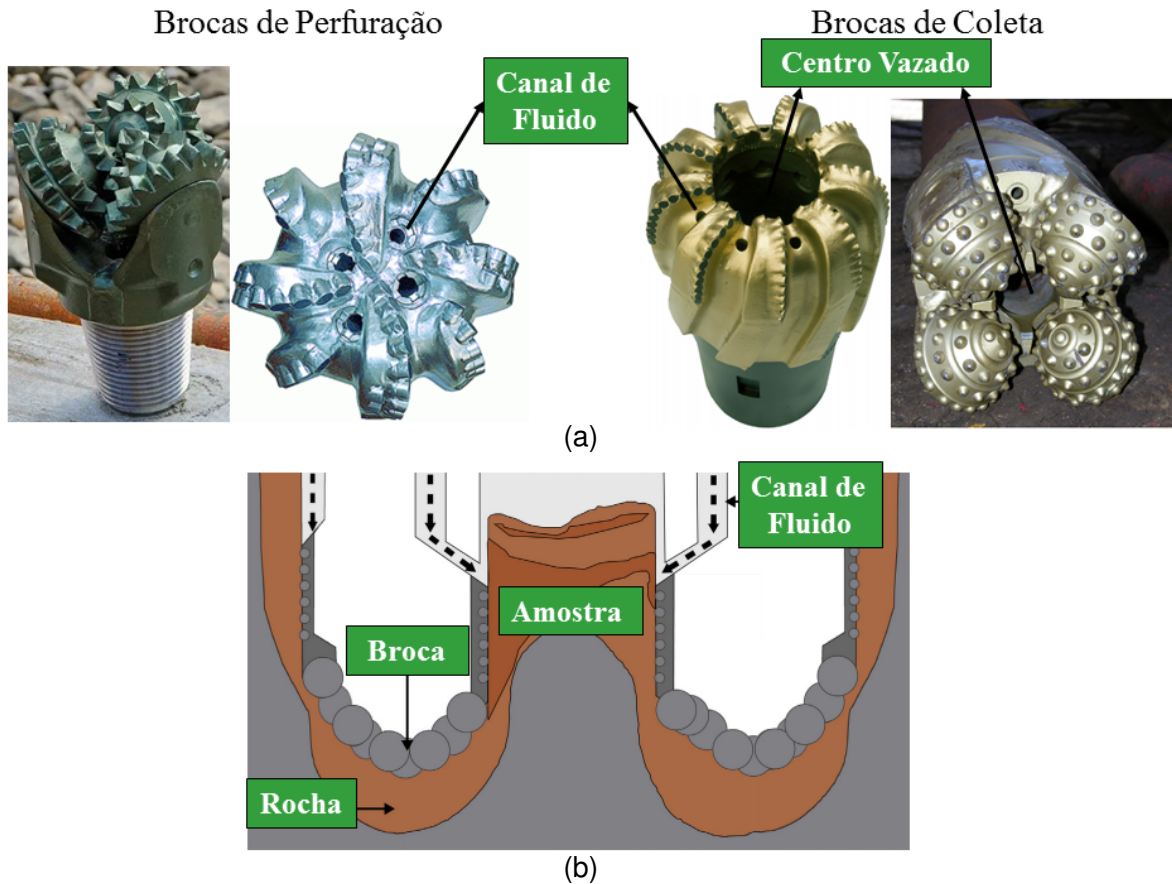
1 INTRODUÇÃO

A coleta de amostras ou testemunhos de formações rochosas como as encontradas em reservatórios de petróleo é de suma importância para estudos na área de engenharia de petróleo. Os testemunhos coletados são úteis não somente para a determinação de propriedades geomecânicas (resistência ao cisalhamento e módulo de elasticidade) e permoporosas (porosidade, permeabilidade e tortuosidade) das rochas de reservatórios, mas também para a estimativa da quantidade de petróleo disponível no reservatório e, sobretudo, para o aprimoramento das técnicas de Recuperação Avançada de Petróleo. (*Enhanced Oil Recovery – EOR*) (MUGGERIDGE *et al.*, 2014; MCPHEE; REED; ZUBIZARRETA, 2015; LIFTON, 2016; GAO; LI, 2016; MONTAZERIAN *et al.*, 2017).

Contudo, o alto custo associado à coleta limita a quantidade de testemunhos obtidos e, conseqüentemente, impede a execução de testes diversificados para estudos na área de recuperação de petróleo, visto que após os testes as amostras tornam-se inutilizáveis. Adicionalmente, processos e ferramentas envolvidas, assim como em menor nível a limpeza, preparo e transporte das amostras, são fatores que elevam o custo da coleta de testemunhos. (ANDERSON, 1975; API, 1998; MCPHEE; REED; ZUBIZARRETA, 2015; TAVAKOLI, 2018).

Entre os procedimentos existentes para a extração de amostras estão os processos de coleta de diâmetro completo, o de amostras recuperáveis por cabo de aço e o de coleta em paredes laterais. O processo de coleta de diâmetro completo é o principal por permitir a coleta de amostras com os maiores comprimentos e diâmetros, além de apresentar melhor preservação da estrutura das formações rochosas (ANDERSON, 1975; API, 1998; MCPHEE; REED; ZUBIZARRETA, 2015). Para a coleta de diâmetro completo ocorrer a perfuração precisa ser interrompida, a coluna de perfuração deve ser retirada do poço e a broca substituída. Na Figura 1.1 (a) é possível notar a diferença entre as brocas para perfuração, que possuem furos denominados canais de fluido e as brocas para coleta, que possuem os canais de fluido e o centro vazado, onde acomodam-se as amostras. Após a troca, a coluna volta ao poço com a broca para coleta e o processo ocorre conforme a broca atinge a estrutura rochosa, perfurando enquanto parte da rocha é mantida intacta dentro da broca. A Figura 1.1 (b) representa esquematicamente como o testemunho se acomoda no centro vazado da broca. Concluindo a etapa de coleta, a coluna de perfuração é retirada do poço para que a broca seja removida com a amostra no seu interior. De acordo com McPhee, Reed e Zubizarreta (2015) a necessidade da remoção da coluna de perfuração para a coleta dos testemunhos é o principal motivo para o alto custo do processo. A Figura 1.2 apresenta amostras coletadas por este processo de diâmetro completo recém obtidas e após a preparação para análises.

Figura 1.1 – Processo de coleta de diâmetro completo: a) Exemplos de brocas para perfuração e para coleta e b) esquema do processo ocorrendo.



Fonte: Adaptado de McPhee, Reed e Zubizarreta (2015) e Cintra (2016).

Figura 1.2 – Exemplos de amostras de estruturas rochosas a) recém obtidas e b) limpas e prontas para análises.

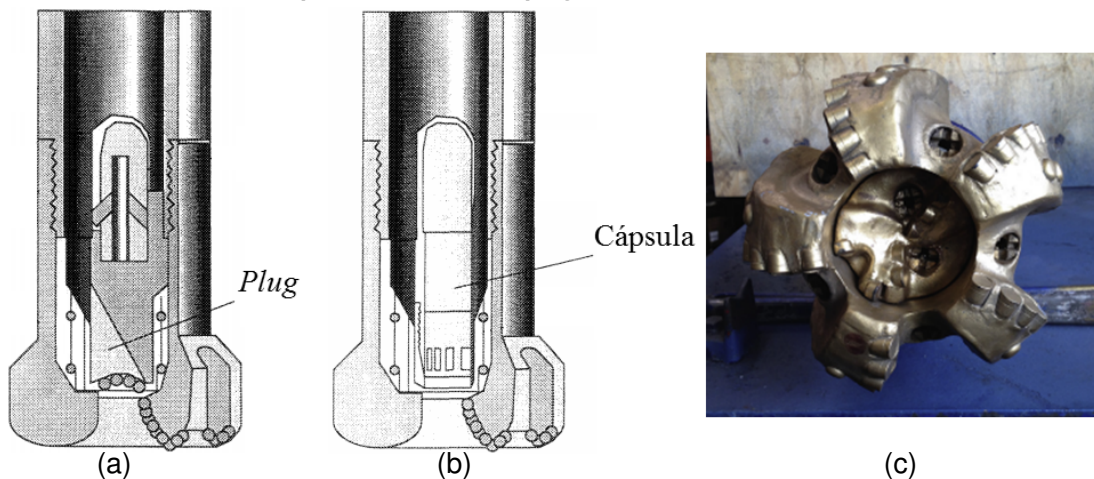


Fonte: Adaptado de McPhee, Reed e Zubizarreta (2015).

No procedimento onde as amostras são obtidas por cabo de aço, a broca utilizada pode tanto perfurar quanto coletar amostras, sendo desnecessária a remoção da coluna de perfuração. Simplificadamente, a broca possui o centro removível, denominado *plug*, o qual é utilizado

durante a etapa de perfuração, sendo posteriormente removido para a coleta. A Figura 1.3 (a) apresenta a broca em corte com o *plug* ocupando o centro. Para este processo ocorrer o *plug* deve ser removido por dentro da coluna de perfuração e substituído pela cápsula que acomodará o testemunho. Na Figura 1.3 (b) observa-se a broca em configuração para coleta, com a cápsula vazia ocupando o centro, o que permite a retirada das amostras de forma similar ao processo de diâmetro completo. Após a coleta, a cápsula contendo o testemunho é levada à superfície por cabos de aço por dentro da coluna de perfuração e é substituída pelo *plug* para a perfuração continuar (SKOPEC; COLLEE; TYLER, 1996). Não obstante, ressalta-se que este método de coleta apresenta a desvantagem de obter testemunhos com tamanhos relativamente pequenos. Tal fato torna necessária a aquisição de equipamentos específicos que encarecem o processo. Além disso, a recuperação da cápsula pode causar a expansão de gases do reservatório, o que pode fraturar e inutilizar a amostra (API, 1998; MCPHEE; REED; ZUBIZARRETA, 2015). A Figura 1.3 (c) apresenta um exemplo de uma broca real com o *plug* em seu interior.

Figura 1.3 – Processo de amostras recuperáveis por cabo de aço: a) Broca em configuração de perfuração, com *plug* ocupando o centro, b) broca em configuração de coleta, com a cápsula vazia ocupando o centro e c) exemplo de broca com o *plug*.

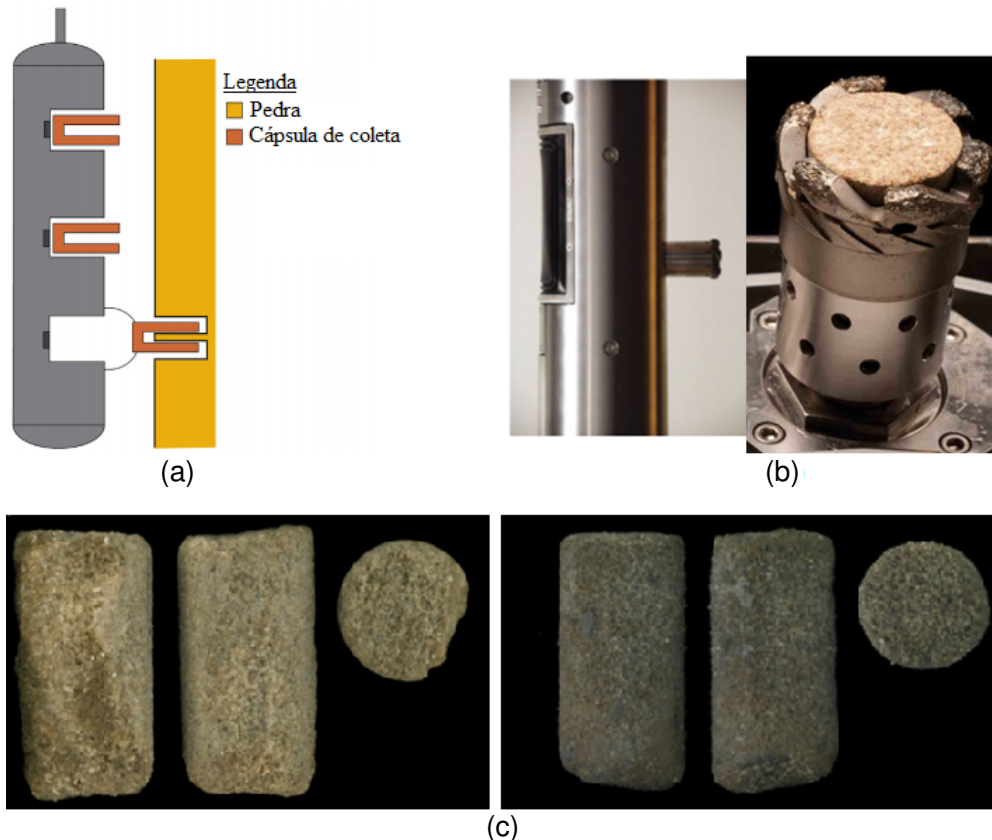


Fonte: Adaptado de Skopec, Collee e Tyler (1996) e McPhee, Reed e Zubizarreta (2015).

O processo de coleta em paredes laterais, o qual ocorre em áreas que já foram perfuradas, é o de menor custo entre os apresentados, podendo ocorrer tanto por percussão como de forma rotativa. No processo por percussão, as cápsulas de extração vazias são atiradas contra a formação rochosa com auxílio de explosivos, quebrando a rocha e prendendo a amostra dentro da cápsula que é puxada de volta para a máquina por correntes de arame. A Figura 1.4 (a) apresenta o esquema de cápsula presa por arames durante a coleta por percussão. Por outro lado, no processo de coleta por forma rotativa são utilizadas pequenas brocas rotativas retráteis que perfuraram e retiraram amostras das paredes laterais da estrutura rochosa, como os exemplos da Figura 1.4 (b). Na Figura 1.4 (c) estão expostos exemplos de testemunhos obtidos pelo processo de coleta em paredes laterais por percussão (esquerda) e de forma rotativa (direita). Como desvantagens, a força exercida pela explosão nas cápsulas no processo de percussão pode fraturar as amostras, tornando inválidos os dados de caracterização obtidos nas análises.

Quanto ao processo rotativo, é comum a obtenção de testemunhos disformes, o que dificulta o posicionamento das amostras em equipamentos padrões. Ambos os métodos possuem a extensão bem limitada para os tamanhos das amostras, não passando de 1 polegada de diâmetro e 1,5 polegadas de comprimento (API, 1998; MCPHEE; REED; ZUBIZARRETA, 2015).

Figura 1.4 – Processo de coleta em paredes laterais: a) esquema representativo de coleta por percussão, b) exemplos de brocas retráteis para coleta por forma rotativa e c) exemplos de amostras obtidas por percussão (esquerda) e de forma rotativa (direita).



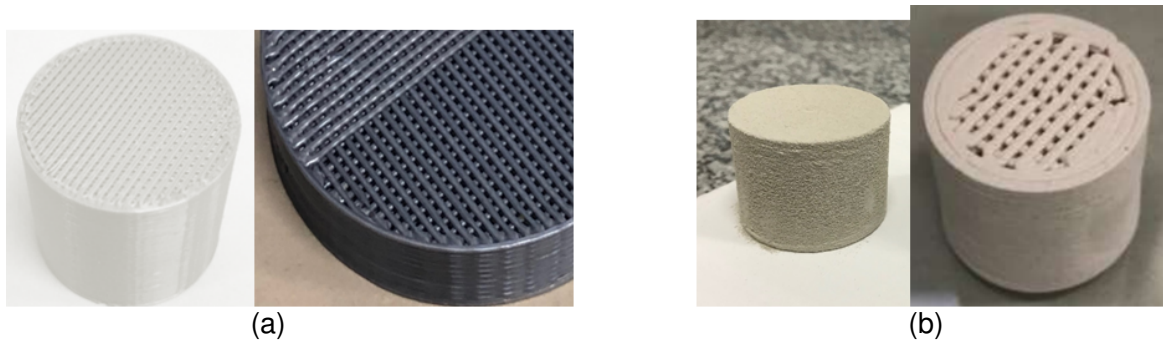
Fonte: Adaptado de McPhee, Reed e Zubizarreta (2015).

Devido à complexidade e aos elevado custo dos processos de obtenção de testemunhos, a alternativa de fabricar meios porosos que representem adequadamente as características das formações rochosas é promissora. Desta forma, espera-se que o projeto e a fabricação de matrizes porosas possibilite controlar propriedades como a porosidade, a permeabilidade, o diâmetro de poro e a tortuosidade, de modo a obter amostras com características próximas às reais.

Nesse contexto, os processos de fabricação por Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing* - AM), também conhecida como Impressão 3D, têm se destacado por permitirem a construção de meios porosos a partir de materiais alternativos, a exemplo dos cerâmicos e poliméricos, com custos relativamente baixos. Exemplos de processos de AM são os conhecidos como *three dimensional printing* (3DP), *stereolithography* (SL), *selective laser melting* (SLM), *fused deposition modeling* (FDM) e *electron beam melting* (EBM) (ZHANG *et al.*, 2013; FURUMOTO *et al.*, 2015; MONTAZERIAN *et al.*, 2017). Na literatura, encontram-se diversos os estudos

numéricos e experimentais que caracterizam a permeabilidade de meios porosos obtidos por MA em aplicações relacionadas à caracterização de amostras porosas metálicas (FURUMOTO *et al.*, 2015; MONTAZERIAN *et al.*, 2017; MONTAZERIAN *et al.*, 2019) e também na utilização de próteses de titânio, área de bioengenharia (DIAS *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2013). Tais estudos têm em comum o objetivo de analisar a viabilidade da substituição de amostras reais pelas impressas. Na Figura 1.5 estão exemplos de meios porosos sintetizados com materiais poliméricos e cerâmicos.

Figura 1.5 – Exemplos de meios porosos fabricados por processos de MA com materiais a) poliméricos e b) cerâmicos.



Fonte: Adaptado de RepSol-UTFPR (2020).

Com relação à área de engenharia de petróleo, Lifton (2016) observou que a escassez de estudos sobre a utilização de amostras manufaturadas resulta de diversos motivos, a exemplo das ferramentas disponíveis comercialmente serem limitadas quanto à precisão de fabricação e aos tipos de materiais disponíveis.

Assim, no presente trabalho tem-se como motivação analisar a viabilidade da substituição de testemunhos de rochas por meios porosos projetados. Para isto, a permeabilidade e a tortuosidade de diferentes meios porosos compostos de filamentos elípticos serão caracterizadas numericamente, visando a comparação com resultados experimentais obtidos em meios porosos manufaturados.

Espera-se que a determinação de correlações para a permeabilidade dos meios porosos considerados neste trabalho auxilie o projeto de matrizes com propriedades permoporosas previamente estabelecidas em função de parâmetros construtivos.

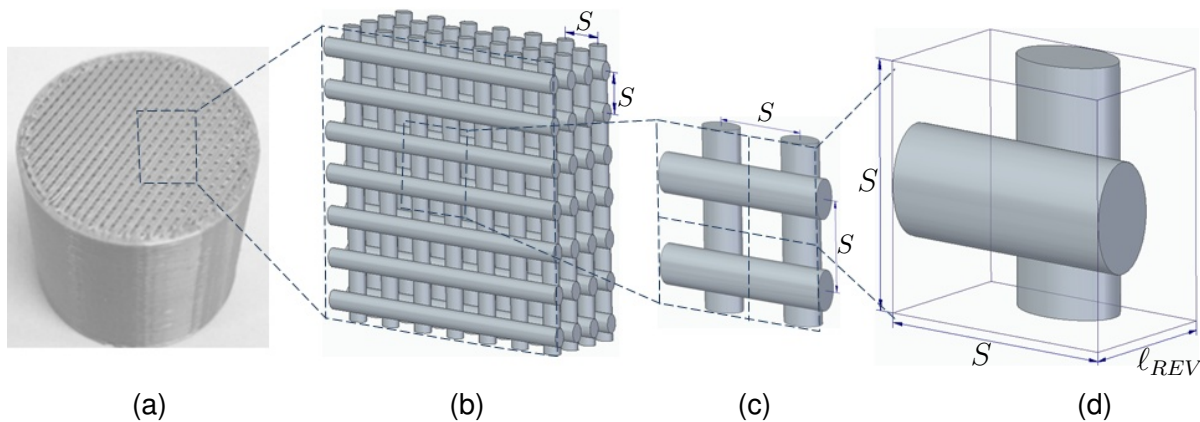
1.1 Caracterização do Problema

A Figura 1.6 (a) exemplifica uma das amostras obtidas por AM, fabricadas pelo grupo NUFER UTFPR. A figura mostra uma matriz formada por filamentos simples com seção transversal elíptica, dispostos em camadas. Mais detalhes dos parâmetros estruturais e demais configurações destes meios são apresentados na Seção 4.1. Note que o aumento da resolução visual permite obter as Figuras 1.6 (b), (c) e (d), as quais mostram respectivamente o modelo em CAD, a estrutura periódica da matriz e volume elementar representativo (*Representative Elementary*

Volume - REV) propriamente dito, o qual corresponde à geometria do domínio computacional do problema a ser investigado, conforme definição na Seção 2.1.2.

A Figura 1.6 apresenta os parâmetros geométricos denominados comprimento do REV (ℓ_{REV}), obtido a partir dos diâmetros menores das elipses, e a distância entre os centros dos filamentos (S), que é igual às dimensões da área frontal do REV. Outros parâmetros que definem o REV são a porosidade (ϕ), o desalinhamento entre camadas (De), o ângulo de varredura (θ) e número de filamentos unidos na estrutura (N_f). A Seção 4.1 define com detalhes estes parâmetros.

Figura 1.6 – Amostra porosa representada em diferentes níveis de resolução: a) meio poroso fabricado, b) modelo produzido em CAD, c) estrutura periódica da matriz e d) REV proposto.



Fonte: Autoria própria (2022).

A caracterização do escoamento na geometria representada pelo REV acima mostrado é obtida pela solução numérica das equações de balanço da massa e de quantidade de movimento, cujas hipóteses e condições de contorno são apresentadas na Seção 4.2. As permeabilidades (K) são calculadas pela equação de Hazen-Darcy, e as tortuosidades (τ) são calculadas pelas equações de Archie (1942), de Tomadakis e Sotirchos (1993) e de Duda, Koza e Matyka (2011) para comparação entre os modelos de cálculo.

1.2 Objetivos

No presente trabalho, o principal objetivo é investigar a viabilidade de estimar numericamente a permeabilidade e a tortuosidade de meios porosos compostos por filamentos de seções transversais elípticas. Nesse sentido, tem-se como objetivos específicos:

- Avaliar a influência da porosidade (ϕ), do desalinhamento entre camadas (De), do ângulo de varredura (θ) e do número de filamentos unidos na estrutura (N_f) sobre a permeabilidade e a tortuosidade das matrizes porosas.

- Utilizar análise de escala nas equações que descrevem o problema para determinar, com base nos resultados numéricos, uma correlação para a permeabilidade em função dos parâmetros de maior influência.
- Avaliar diferentes modelos de cálculo de tortuosidade, visando escolher o mais apropriado ao presente problema.
- Comparar a correlação para a permeabilidade e os resultados numéricos com permeabilidades de rochas reais da literatura.

1.3 Síntese do Capítulo 1

Neste capítulo, a contextualização quanto à coleta de testemunhos de formações rochosas foi realizada. Alguns exemplos de procedimentos de coleta foram apresentados para ilustrar a complexidade e o custo envolvidos no processo de obtenção de testemunhos. Como motivação e justificativa para o presente estudo, observou-se que a fabricação de amostras é uma possível alternativa à coleta, sendo que os processos de AM se destacaram em estudos recentes.

Na seção de caracterização do problema resumiu-se as principais características dos meios porosos estudados e das simulações realizadas. Por fim, os objetivos do presente trabalho foram definidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados conceitos sobre meios porosos com intuito de permitir uma melhor compreensão da elaboração do problema e dos resultados nas seções seguintes. As definições de porosidade, permeabilidade e tortuosidade estão inclusas nesta seção.

2.1 Meios Porosos

Os meios porosos são usualmente definidos como regiões no espaço com pequenas aberturas, denominadas poros. Nield e Bejan (2006) definiram meios porosos como materiais constituídos por uma matriz sólida com espaços interconectados, sendo que a matriz usualmente é rígida, mas pode sofrer deformações em casos específicos. Os poros são definidos pela existência da fronteira que divide os materiais, denominada interface (KAVIANY, 1995; BEJAN; KRAUS, 2003; NIELD; BEJAN, 2006).

Assim, os materiais em que não se observam as interfaces são denominados meios homogêneos. Os materiais homogêneos possuem propriedades como a massa específica, a temperatura e a pressão independentes do volume, isto é, propriedades que não variam com a localização no espaço ou com as dimensões da porção de material escolhida para medição (KAVIANY, 1995; BEJAN; KRAUS, 2003; NIELD; BEJAN, 2006).

Isto posto, definem-se de forma mais abrangente os meios porosos como materiais compostos por dois ou mais materiais homogêneos separados visivelmente por interfaces e sendo pelo menos um sólido e fixo (BEJAN; KRAUS, 2003; NIELD; BEJAN, 2006).

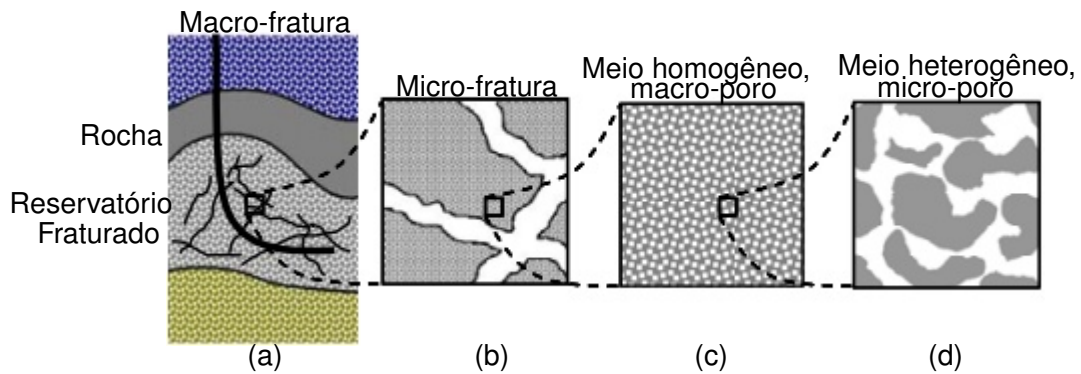
2.1.1 Escalas de Abordagem

A escala de observação ou resolução visual define aspectos importantes da modelagem do escoamento em meios porosos (BEJAN; KRAUS, 2003).

A Figura 2.1 apresenta esquematicamente a formação rochosa de reservatórios de óleo e gás onde observa-se diferentes escalas dimensionais.

O modelo macro-fratura mostrado na Figura 2.1 (a) representa um substrato poroso com grande quantidade de fraturas, cujas características das interfaces entre os constituintes do meio são desconsideradas. Nesta abordagem, o meio poroso encontra-se na escala macroscópica da ordem de grandeza das fraturas, sendo suas propriedades representadas por uma única fase homogênea.

Figura 2.1 – Representação de rocha reservatório nas escalas: a) macroscópica para a fratura, b) micro-fratura ou bi-disperso, c) macroscópica do poro e d) microscópica do poro.



Fonte: Adaptado de De Lai (2013).

A Figura 2.1 (b) apresenta o modelo micro-fratura, o qual considera as fraturas segundo uma abordagem microscópica. Este modelo, também chamado de bi-disperso, apresenta propriedades como permeabilidade e porosidade em dois níveis de resolução visual: macroscópico para o meio poroso e microscópico para a fratura.

A abordagem para o meio poroso homogêneo, mostrado na Figura 2.1 (c) e também denominada modelo macro-poro ou poro-contínuo, desconsidera as nuances geométricas que descrevem a interface entre os domínios sólido e fluido. Por ser representado por uma única fase homogênea, as equações de balanço que modelam o escoamento neste meio incluem as propriedades permoposivas, a exemplo da permeabilidade e da porosidade, assim como no modelo macro-fratura.

A Figura 2.1 (d) ilustra a escala do modelo de meio poroso heterogêneo, também denominado contínuo, microscópico ou micro-poro. Tal abordagem permite distinguir a interface sólido-fluido e conseqüentemente modelar o escoamento no nível dos poros a partir das equações de balanço de massa e de quantidade de movimento. Não obstante, enquanto tem sido amplamente utilizada na simulação numérica do escoamento em meios porosos de estrutura periódica ou organizada, esta abordagem é de difícil aplicação em meios porosos com geometrias complexas.

2.1.2 Conceito de Volume Elementar Representativo

O conceito de Volume Elementar Representativo (*Representative Elementary Volume* – REV) é utilizado para representar os meios porosos por um volume de referência menor do que o volume total. Em estudos numéricos, o REV é utilizado para simplificar meios porosos para a aplicação de métodos de CFD, visto que simular o escoamento num domínio simplificado significa economia significativa de tempo de simulação.

O REV é definido como o volume de referência no qual a média volumétrica de certa propriedade ψ é constante independente da posição do REV no meio e igual a média volumétrica de ψ sobre o volume total. Além disso, o tamanho do REV deve ser substancialmente maior que

o tamanho dos poros e menor que o tamanho total do meio poroso (WHITAKER, 1999; BEJAN; KRAUS, 2003; BEAR; BACHMAT, 2012; BAZARIN *et al.*, 2020).

2.2 Propriedades dos meios porosos

Nesta seção são apresentadas as definições e os modelos para a caracterização de propriedades como a porosidade, o diâmetro de poro, a permeabilidade e a tortuosidade de meios porosos.

2.2.1 Porosidade

A porosidade representa a fração volumétrica ocupada pelos poros de um substrato poroso e pode ser calculada pela razão entre o volume dos poros (V_P) e o volume total do meio (V_T):

$$\phi = \frac{V_P}{V_T}, \quad (2.1)$$

sendo ϕ a porosidade do meio. Trata-se de um valor adimensional mas que pode aparecer em porcentagem na literatura (BEJAN; KRAUS, 2003).

Pela definição volumétrica a porosidade não depende explicitamente de como é o formato ou a distribuição, apenas do espaço ocupado por cada constituinte do meio. Portanto, poros sem conectividade com os demais adjacentes, comumente denominados poros mortos, ainda são considerados para o cálculo da porosidade. Em contraste à porosidade, alguns autores utilizam a fração volumétrica de sólido (ϵ) para conduzir os estudos em meios porosos, a exemplo de Tamayol e Bahrami (2011). Sendo o volume da matriz (V_M) representado pelo volume de sólido presente no meio poroso, define-se a fração volumétrica de sólido pela expressão:

$$\epsilon = \frac{V_M}{V_T}. \quad (2.2)$$

Segundo a definição de volume total, os volumes referentes aos domínios ocupados pelos poros e matriz sólida, utilizados nas Equações 2.1 e 2.2, são relacionados por $V_T = V_P + V_M$, o que implica que a porosidade e a fração volumétrica de sólido são relacionados pela expressão $\phi + \epsilon = 1$.

2.2.2 Permeabilidade

Permeabilidade ou condutividade hidráulica é uma forma de quantificar a resistência ao escoamento de certo meio poroso, sendo foco de estudo em áreas como a engenharia civil, têxtil, de alimentos, química, mecânica, ambiental, geotécnica e de petróleo, sendo que alguns

exemplos de aplicações são: em cálculos da dissipação de calor em fibras têxteis, em gabinetes e trocadores de calor, na verificação de estabilidade de solos, na filtragem de água em aquíferos e derivados, em reações de células de combustíveis e na produção de petróleo (NIELD; BEJAN, 2006; SOLTANI; JOHARI; ZARREBINI, 2014; MCPHEE; REED; ZUBIZARRETA, 2015; LIFTON, 2016).

A permeabilidade dos meios porosos possui a unidade m^2 ou Darcy (D), encontrada muitas vezes na ordem mili-Darcy ($1mD = 1 \times 10^{-15}m^2$), que remete à Lei de Darcy, definida primeiramente por Darcy (1856) em estudos experimentais. Comumente, a permeabilidade é calculada em trabalhos da literatura pela Equação de Hazen-Darcy, que tem a forma:

$$K = \frac{\mu U_D}{-dP/dx}, \quad (2.3)$$

com μ sendo a viscosidade do fluido, U_D a velocidade média do fluido, e dP/dx o gradiente de pressão (LAGE, 1998).

Para calcular a permeabilidade pela Equação de Hazen-Darcy é necessário que o escoamento esteja em regime de Darcy, de modo que o número de Reynolds (Re) seja baixo o suficiente para que os efeitos viscosos sejam predominantes no escoamento (BEJAN; KRAUS, 2003; TAMAYOL; BAHRAMI, 2011; MONTAZERIAN *et al.*, 2017).

Outra forma de calcular a permeabilidade é pela Equação de Hazen-Dupuit-Darcy, que adiciona à Equação 2.3 um termo quadrático de velocidade para considerar efeitos da forma do meio poroso, isto é, a força de resistência que o sólido impõe sobre o fluido ao obstruir o escoamento. A Equação de Hazen-Dupuit-Darcy tem a forma:

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{K}U_D + C\rho U_D^2 \quad (2.4)$$

sendo ρ a densidade do fluido e C o coeficiente de forma relacionado à geometria do meio poroso (LAGE, 1998). Na literatura, o segundo termo da equação aparece por vezes como o termo de resistência viscosa e o terceiro termo como o termo de resistência devido à forma do meio.

Uma terceira forma de calcular a permeabilidade é pela equação semi empírica de Carman-Kozeny, que a relaciona com quatro diferentes parâmetros geométricos, definida por:

$$K = \frac{\phi^3}{\beta\tau^2 A_S^2} \quad (2.5)$$

sendo β um fator de forma, A_S a área superficial específica e τ a tortuosidade do meio (MATYKA; KOZA, 2012). A Equação de Carman-Kozeny é utilizada comumente em estudos de meios porosos heterogêneos em que seja possível definir A_S . Contudo, a tortuosidade dos meios

porosos é complexa de ser definida e por isto diversos modelos de cálculo são encontrados na literatura.

Observa-se pelos modelos citados que diferentes fatores influenciam a permeabilidade de meios porosos, como as propriedades do escoamento e os parâmetros geométricos da microestrutura do meio.

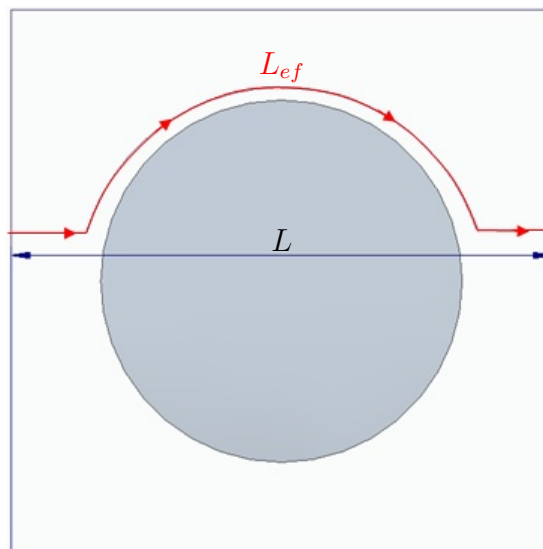
2.2.3 Tortuosidade

A tortuosidade (τ) dos meios porosos é uma forma de quantificar quanto desvio é necessário para o fluido atravessar o meio poroso. Carman (1937) estabelece a tortuosidade como sendo a razão entre o comprimento efetivo percorrido pelo fluido no meio poroso (L_{ef}) e o comprimento do meio (L).

$$\tau = \frac{L_{ef}}{L} \quad (2.6)$$

A Figura 2.2 ilustra a diferença entre o comprimento efetivo percorrido e o comprimento do meio que são utilizados na Equação 2.6.

Figura 2.2 – Ilustração de como o comprimento efetivo percorrido é definido em um escoamento com desvio.



Fonte: A autoria própria (2022).

Embora a definição de tortuosidade seja intuitiva em meios simples, é complexo calcular o comprimento efetivo em meios porosos tridimensionais, o que leva à diversas equações para o cálculo de tortuosidade na literatura, devido a diferentes interpretações da Equação 2.6 (GOSTICK *et al.*, 2006; DUDA; KOZA; MATYKA, 2011; MATYKA; KOZA, 2012).

Archie (1942) em estudo sobre a condutividade elétrica em meios porosos elaboraram o modelo que relaciona a tortuosidade à porosidade da forma:

$$\tau = \left(\frac{1}{\phi} \right)^\alpha, \quad (2.7)$$

sendo que α é uma constante de ajuste que depende da geometria do meio poroso. A Equação 2.7 é amplamente utilizada na literatura por sua simplicidade (GOSTICK *et al.*, 2006; TAMAYOL; BAHRAMI, 2011; MATYKA; KOZA, 2012).

Ao investigar o escoamento sobre meios porosos compostos de filamentos, Tomadakis e Sotirchos (1993) definiram uma expressão para a tortuosidade da seguinte forma:

$$\tau = \left(\frac{1 - c_1}{\phi - c_1} \right)^{c_2} \quad (2.8)$$

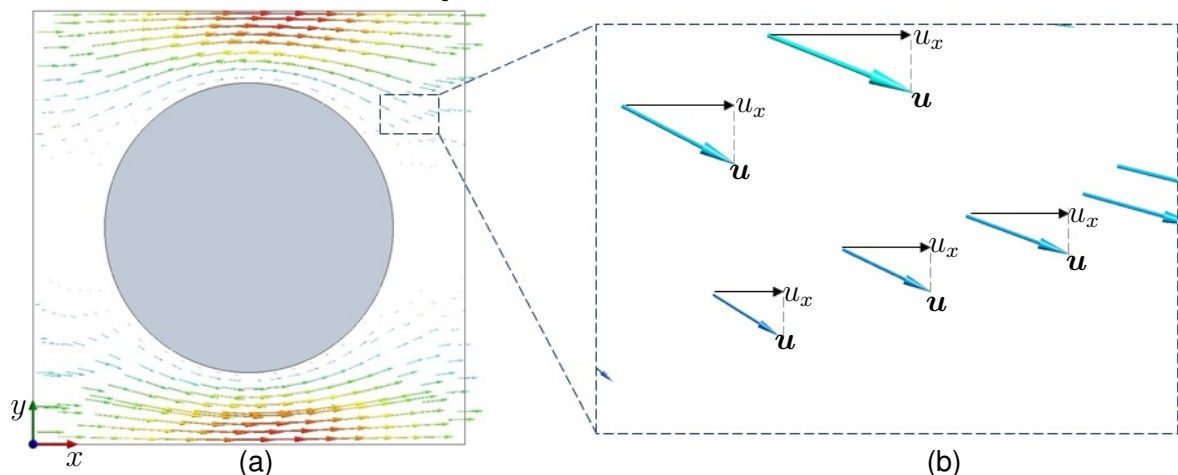
onde c_1 e c_2 são constantes de ajuste dependentes, respectivamente, da geometria do meio poroso e da direção do escoamento. A principal vantagem de utilizar a Equação 2.8 ao invés da Equação 2.7 é a capacidade de avaliar a influência da anisotropia do meio poroso na tortuosidade e na permeabilidade.

Considerando que modelos de Archie (1942) e Tomadakis e Sotirchos (1993) são métodos de calcular uma tortuosidade "geométrica", Duda, Koza e Matyka (2011) propuseram uma forma de calcular a tortuosidade "hidráulica", através do desvio do escoamento nos poros. Assim, os autores utilizaram o campo de velocidades do escoamento e elaboraram uma razão entre as médias da velocidade do fluido e das componentes da velocidade na direção x . O modelo de Duda, Koza e Matyka (2011) é definido pela equação:

$$\tau = \frac{\langle \mathbf{u} \rangle}{\langle u_x \rangle} \quad (2.9)$$

sendo \mathbf{u} a velocidade do fluido nos poros, u_x a componente da velocidade na direção da força externa, escolhida como a direção x no presente trabalho, com o símbolo $\langle \rangle$ representando a média volumétrica da variável. A Figura 2.3 (a) apresenta um exemplo de campo de vetores de velocidade e a Figura 2.3 (b) ilustra as velocidades utilizadas na Equação 2.9.

Figura 2.3 – Escoamento transversal sobre cilindro: a) campo de vetores de velocidade e b) decomposição do vetor velocidade na direção x .



Fonte: Autoria própria (2022).

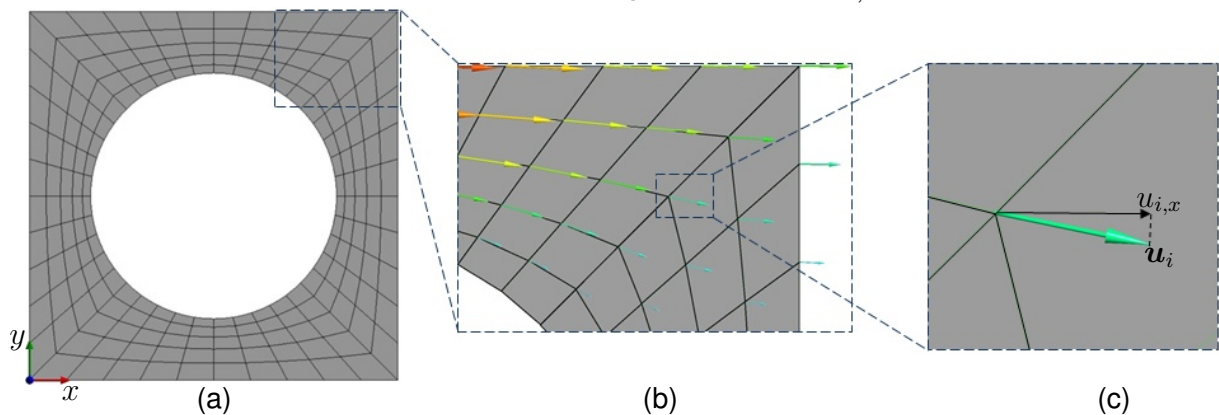
De acordo com Duda, Koza e Matyka (2011), a tortuosidade hidráulica calculada pela Equação 2.9 apresenta vantagens em relação às tortuosidades geométricas, como, por exemplo, as possíveis áreas de recirculação e os poros mortos não influenciarem nos resultados.

Matyka e Koza (2012) adaptaram a Equação 2.9 para estudos numéricos e verificaram a equação com outros modelos da literatura, tanto para meios bidimensionais quanto tridimensionais. Os autores simplificam a equação para uma razão entre somatórios das velocidades e suas componentes na direção x , calculadas em cada vértice, também denominados nós, da malha computacional. Portanto, a Equação 2.9 se torna:

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{u}_i}{\sum_{i=1}^n u_{i,x}} \quad (2.10)$$

onde n representa a quantidade de vértices na malha, \mathbf{u}_i o i -ésimo vetor de velocidade e $u_{i,x}$ a componente x do i -ésimo vetor de velocidade. A Figura 2.4 (a) apresenta um exemplo de malha computacional com 680 vértices, em um escoamento similar ao da Figura 2.3, a Figura 2.4 (b) ilustra o campo de vetores nos vértices da malha e a Figura 2.4 (c) as velocidades utilizadas na Equação 2.10.

Figura 2.4 – Ilustração de campo de vetores em malha computacional: a) exemplo de malha, b) detalhe da malha e vetores de velocidade e c) detalhe para ilustrar \mathbf{u}_i e $u_{i,x}$.



Fonte: Autoria própria (2022).

Alguns softwares como o CFD-POST da ANSYS Inc. (2009) facilitam a solução da Equação 2.10, uma vez que neste software as velocidades já são calculadas nos vértices da malha, sem necessidade de interpolações. Isto permite o cálculo da tortuosidade hidráulica de forma tão simples quanto nos modelos de tortuosidades geométricas apresentados. Contudo, atenta-se ao fato de que são diferentes interpretações para a tortuosidade do meio poroso, e, portanto, os métodos podem apresentar resultados diferentes.

2.3 Síntese do Capítulo 2

No capítulo 2 foram definidos principais conceitos sobre meios porosos, as possíveis escalas de estudo e as propriedades permoporosas denominadas porosidade, permeabilidade e tortuosidade. Foram apresentados diferentes modelos da literatura para o cálculo da permeabilidade e da tortuosidade. Estes conceitos são importantes para o entendimento do escoamento em meios porosos, e as equações discutidas são importantes para a formulação do problema.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo realiza-se uma revisão da literatura sobre aspectos importantes para o problema investigado. A revisão aborda não somente a caracterização numérica e experimental da permeabilidade e da tortuosidade, mas também a importância da utilização de meios porosos manufaturados em substituição dos testemunhos de formações rochosas. A maioria dos artigos apresenta estudos onde o escoamento é representado pela equação de Hazen-Darcy. Os estudos são descritos brevemente, apresentando resumidamente os resultados e conclusões relevantes para o presente trabalho.

3.1 Caracterização da Permeabilidade

Os estudos experimentais e numéricos apontados a seguir mostram os diversos parâmetros que podem influenciar a estimativa da permeabilidade e que diferentes métodos podem apresentar resultados equivalentes.

Gostick *et al.* (2006) realizaram experimentos em eletrodos de difusão de gás utilizados em células de combustível compostas de filamentos cilíndricos. Considerando amostras com diferentes espessuras, os autores estimaram a permeabilidade na faixa entre 10^3 e 10^5 mD utilizando a equação de Hazen-Dupuit-Darcy para três direções distintas e porosidades entre 0,60 e 0,90 com um porosímetro de mercúrio. Bons resultados foram obtidos quando comparados com a equação de Carman-Kozeny e com o modelo de Tomadakis-Sotirchos.

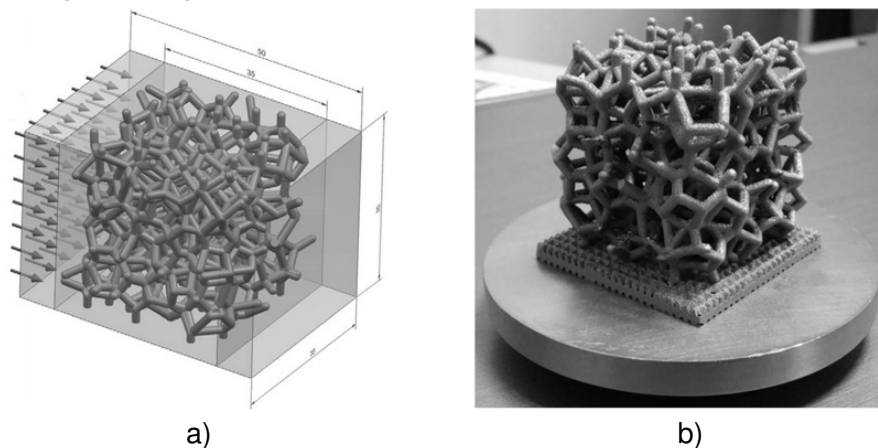
Zhang *et al.* (2013) estudaram numericamente a permeabilidade de meios porosos organizados e não organizados para uma porosidade fixa. As permeabilidades foram calculadas pelas equações de Hazen-Darcy e de Hazen-Dupuit-Darcy, encontrando valores entre 10^5 e 10^6 mD para a porosidade de 0,65. Os autores concluíram que a equação de Hazen-Darcy resulta em valores pouco maiores de permeabilidade e ambas equações se ajustam satisfatoriamente aos resultados de validação.

Num estudo numérico e experimental, Sandino *et al.* (2014) caracterizaram a permeabilidade de amostras porosas de tecidos ósseos, empregando a técnica de tomografia micro-computadorizada para obter o modelo de meio poroso com permeabilidades entre 10^4 a 10^6 mD . Os autores concluíram que para os meios porosos de tecidos ósseos a variação na microestrutura é exponencialmente proporcional à permeabilidade e o método de elementos finitos utilizado representou os dados adequadamente.

Soltani, Johari e Zarrebini (2014) utilizaram a técnica de microtomografia computadorizada para gerar modelos de meios porosos não organizados compostos de filamentos, para simular por método de volumes finitos os escoamentos viscosos em duas direções. Os autores obtiveram as permeabilidades e as compararam com valores experimentais e analíticos da literatura, concluindo que o método representa adequadamente os dados e permite demonstrar a anisotropia da permeabilidade.

Utilizando o método de volumes finitos, Skibinski *et al.* (2015) simularam o escoamento em meios porosos modelados pelo diagrama de Laguerre-Voronoi com filamentos cilíndricos para diferentes tamanhos de poro e porosidades. Utilizando a equação de Hazen-Dupuit-Darcy e comparando com resultados experimentais, os autores determinaram permeabilidades entre 10^8 e 10^9 *mD* e porosidade variando de 0,74 a 0,84. Além de ajustarem-se adequadamente aos experimentais, seus resultados mostraram que a porosidade influencia significativamente a permeabilidade. A Figura 3.1 (a) apresenta um modelo em 3D dos meios porosos utilizados pelos autores, enquanto a Figura 3.1 (b) apresenta um meio poroso fabricado a partir do modelo.

Figura 3.1 – Meios porosos estudados por Skibinski *et al.* (2015): a) modelo em 3D para simulações e b) amostra produzida por fusão seletiva a laser.



Fonte: Adaptado de Skibinski *et al.* (2015).

3.2 Caracterização da Tortuosidade

Gostick *et al.* (2006) utilizaram o modelo de Tomadakis e Sotirchos (1993) para estimar a tortuosidade em função da porosidade para diferentes tipos de distribuição dos filamentos. A consideração da direção do escoamento apresentada no modelo permitiu incluir o efeito da anisotropia, diferentemente dos demais modelos que apenas consideraram a porosidade.

O trabalho de Melchels *et al.* (2010) comparou experimentalmente a permeabilidade de dois meios porosos: um organizado com estrutura do tipo *gyroid* e outro aleatório, gerado por técnica de secagem de sais. Os autores concluíram que o aumento na tortuosidade do meio devido à desorganização da estrutura reduz o valor da permeabilidade, visto que se obtiveram permeabilidades 5×10^8 *mD* para a estrutura organizada com porosidade de 0,68 e 5×10^7 *mD* para a configuração desorganizada com porosidade de 0,69.

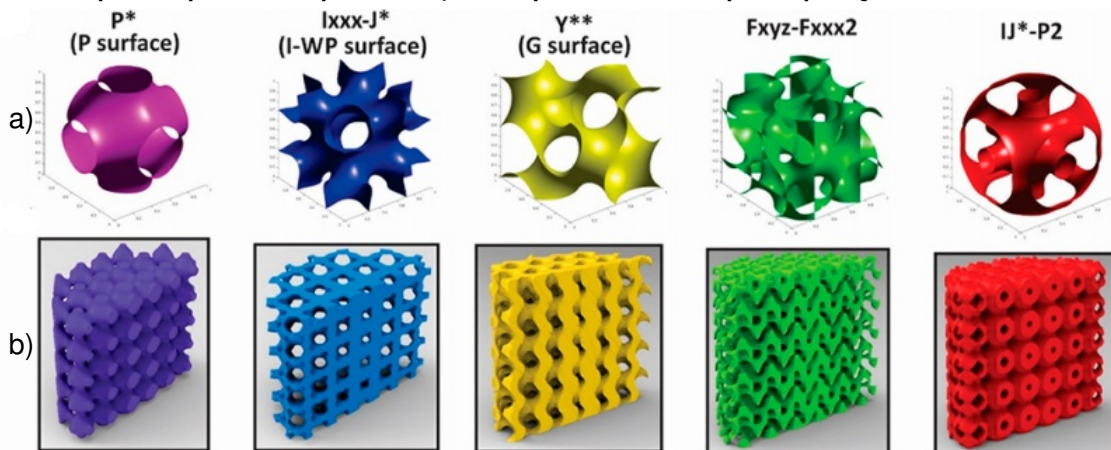
Tamayol e Bahrami (2011) utilizaram as relações de Archie (1942) tomando a tortuosidade inversamente proporcional à raiz quadrada da porosidade para meios porosos compostos de filamentos em camadas e inversamente proporcional à raiz cúbica da porosidade para meios com filamentos dispostos nas três direções.

Matyka e Koza (2012) discutiram a importância e a dificuldade de calcular numérica e experimentalmente a tortuosidade, revisando os métodos comumente encontrados na literatura. Os autores utilizaram o modelo de Duda, Koza e Matyka (2011) para o cálculo da tortuosidade comparando seus resultados com os da literatura.

Embora não tenham abordado quantitativamente a tortuosidade, os resultados de Ali e Sen (2017), Montazerian *et al.* (2017) e Li *et al.* (2018) demonstraram como desvios do escoamento devido à variação na microestrutura dos meios porosos resulta em menor permeabilidade.

Alterando a porosidade e a uniformidade do meio, Zhianmanesh, Varmazyar e Montazerian (2019) avaliaram a influência do formato dos poros na permeabilidade em substratos gerados pelo método de superfícies mínimas triplamente periódicas. A Figura 3.2 ilustra algumas estruturas de meios porosos estudados pelos autores.

Figura 3.2 – Meios porosos estudados por Zhianmanesh, Varmazyar e Montazerian (2019): a) célula unitária que compõe o meio poroso e b) meios porosos obtidos pela replicação das células unitárias.



Fonte: Adaptado de Zhianmanesh, Varmazyar e Montazerian (2019).

Zhianmanesh, Varmazyar e Montazerian (2019) calcularam numérica e experimentalmente a permeabilidade pela equação de Hazen-Darcy, resultando em valores entre 10^6 e 10^7 mD para porosidades entre 0,15 e 0,85. Os autores concluíram que o meio P* da Figura 3.2, cuja estrutura foi considerada a mais simples, apresentou maior permeabilidade entre os meios porosos estudados, reforçando que o aumento da tortuosidade reduz a permeabilidade.

3.3 Caracterização Numérica em Meios Porosos Organizados

Utilizando o método dos elementos espectrais, Higdon e Ford (1996) realizaram o estudo do escoamento viscoso em meios porosos organizados e compostos de filamentos cilíndricos dispostos em três direções e perpendiculares. Os autores compararam a permeabilidade com resultados da literatura para meios bidimensionais e compostos de esferas, e obtiveram resultados satisfatórios.

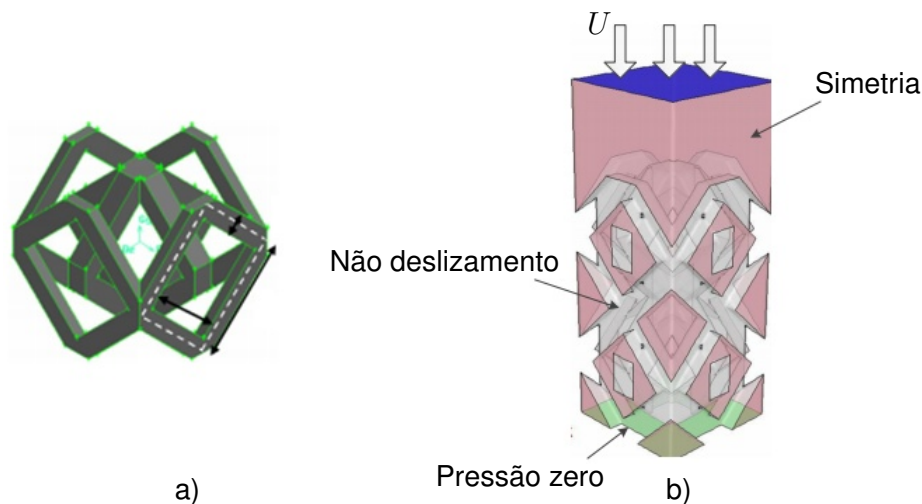
Vossenber *et al.* (2009) estudaram pelo método dos resíduos mínimos generalizados (GMRES) o escoamento em meios porosos compostos de filamentos cilíndricos dispostos em

camadas, como o meio poroso da Figura 1.6, e obtiveram permeabilidades entre 10^5 e 10^6 mD para porosidades acima de 0,40. Os resultados destes autores foram utilizados no presente trabalho no Capítulo 5 para verificação do modelo.

Dias *et al.* (2012) realizaram simulações pelo método dos elementos finitos em meios porosos organizados compostos de filamentos cilíndricos, alterando o tamanho dos poros para porosidade fixa e calculando a permeabilidade pela equação de Hazen-Darcy. As simulações foram validadas por resultados experimentais, resultando em valores de permeabilidade entre 10^5 e 10^7 mD para porosidades de 0,30, 0,50 e 0,70. Os autores apontam que com a variação do tamanho de poro, meios porosos com mesma geometria e porosidade podem apresentar diferentes permeabilidades. Este comportamento demonstra que a permeabilidade depende de mais de um fator.

Truscillo *et al.* (2012) validaram resultados numéricos, obtidos pelo método dos volumes finitos, para meios porosos compostos de filamentos de seção transversal quadrada, encontrando permeabilidades de 10^5 a 10^6 mD para porosidades entre 0,20 e 0,80. Os autores concluíram que os resultados numéricos ficaram bem próximos dos experimentais e, portanto, foi possível estimar a permeabilidade dos meios porosos pelo método dos volumes finitos. A Figura 3.3 apresenta os meios porosos estudados pelos autores e as condições de contorno utilizadas pelos autores nas simulações.

Figura 3.3 – Meios porosos estudados por Truscillo *et al.* (2012): a) modelo em 3D do volume representativo do meio poroso e b) condições de contorno utilizadas.



Fonte: Adaptado de Truscillo *et al.* (2012).

A Figura 3.3 (a) apresenta o padrão de repetição do meio poroso. Na Figura 3.3 (b), a condição de simetria apresentada é comumente utilizada em estudos numéricos para representar meios porosos organizados. Todavia, não é possível utilizá-la nos meios porosos com desalinhamento entre camadas descritos na Seção 4.1, que são organizados porém não são simétricos. Portanto, no presente trabalho é utilizada a condição de periodicidade ao invés da simetria, conforme definido na Seção 4.2.

Investigando meios com estrutura denominada *gyroid* e meios compostos de filamentos cilíndricos, Ali e Sen (2017) utilizaram o método dos elementos finitos para caracterizar numericamente a influência dos formatos dos poros na permeabilidade e nas propriedades mecânicas destes meios. Para permeabilidades e porosidades situadas na faixa de 10^6 a 10^7 *mD* e 0,65 a 0,90, respectivamente, os autores concluíram que a permeabilidade é menor para a estrutura *gyroid* em todos os pontos de porosidade, demonstrando a influência dos formatos dos poros sobre a permeabilidade.

De forma similar, Li *et al.* (2018) empregaram o método dos volumes finitos para investigar os efeitos da porosidade e dos formatos dos poros na permeabilidade de meios porosos compostos por filamentos cilíndricos dispostos em duas diferentes estruturas: a "treliça em octeto" e o "dodecaedro rômico". Para permeabilidades entre 10^6 e 10^9 *mD* e porosidades na faixa de 0,56 a 0,92, os autores também constataram a influência da forma dos poros ao observar valores menores de permeabilidade na estrutura de treliça em octeto.

3.4 Análise de Escala em Meios Porosos

Aplicando análise de escala em meios porosos compostos de filamentos cilíndricos, Clague *et al.* (2000) observaram que a permeabilidade é proporcional ao quadrado da menor distância entre filamentos. Como conclusão, os autores afirmam que a geometria do meio é o fator dominante para analisar a tendência da permeabilidade conforme a porosidade varia.

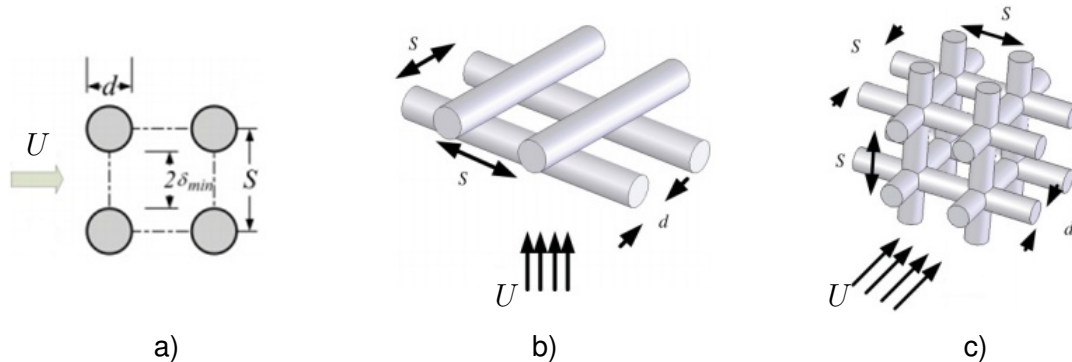
Sobera e Kleijn (2006) modificaram o método de Clague *et al.* (2000) e observaram que permeabilidade é diretamente proporcional ao quadrado da menor distância entre filamentos e ao fator de forma do meio. A comparação de resultados numéricos em meios organizados e desorganizados com os de análise de escala, com e sem a modificação, mostrou bons resultados para a relação obtida pelo acréscimo do fator de forma.

Utilizando o método de Lattice Boltzman, Van Doormaal e Pharoah (2009) simularam meios porosos de estrutura desorganizada utilizados em células de combustível, como os de Gostick *et al.* (2006). Calculando a permeabilidade em diferentes direções de escoamento para porosidades entre 0,6 e 0,8, os autores elaboraram correlações entre a permeabilidade e a porosidade em cada direção, considerando a anisotropia da permeabilidade em meios porosos.

Num estudo que investiga três modelos de meios porosos compostos por filamentos cilíndricos, Tamayol e Bahrami (2011) aplicaram a análise de escala seguindo a metodologia de Sobera e Kleijn (2006). Como resultado, foram obtidas correlações para a permeabilidade em função da porosidade, do diâmetro do filamento e da tortuosidade dos meios. A Figura 3.4 ilustra as três configurações estudadas pelos autores.

Na Figura 3.4 (a) os filamentos são todos paralelos, na Figura 3.4 (b) os filamentos são distribuídos em camadas e na Figura 3.4 (c) os filamentos são distribuídos nas três direções. As correlações obtidas se ajustaram adequadamente à resultados da literatura e mostraram que

Figura 3.4 – Meios porosos estudados por Tamayol e Bahrami (2011): a) unidirecional, b) bidirecional e c) tridirecional.



Fonte: Adaptado de Tamayol e Bahrami (2011).

variações na microestrutura dos meios estudados possuem maior influência na permeabilidade em porosidades abaixo de 0,70.

3.5 Caracterização de Meios Porosos Manufaturados

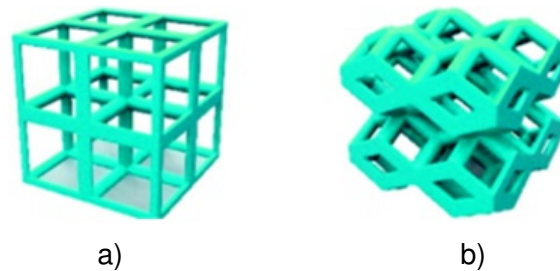
Zhang *et al.* (2013) validaram os resultados numéricos citados anteriormente a partir de experimentos em amostras fabricadas com pó de titânio por fusão seletiva a laser (do inglês *Selective Laser Melting* - SLM). Os autores avaliaram o efeito da rugosidade sobre a permeabilidade, concluindo que meios porosos com maior rugosidade apresentam menor permeabilidade.

O trabalho experimental de Furumoto *et al.* (2015) caracterizou as permeabilidades de meios porosos metálicos obtidos por SLM em diferentes porosidades, considerando efeitos dos parâmetros de fabricação como a velocidade de impressão, a potência do laser e a direção de consolidação. As permeabilidades e porosidades obtidas se encontram nas faixas de 10^1 a 10^2 mD e 0,05 a 0,30, respectivamente. Os autores concluíram que meios com mesma porosidade apresentam diferentes permeabilidades ao serem fabricados de formas diferentes, reafirmando as conclusões de Zhang *et al.* (2013).

Considerando duas direções de escoamento, Montazerian *et al.* (2017) analisaram numericamente a permeabilidade em função do formato dos poros e da porosidade do meio. Os dados numéricos foram validados para duas configurações de meios, denominados geometria hexagonal e o dodecaedro rômbo, com diferentes porosidades e fabricados com resina por uma impressora 3D que utiliza o princípio de fotopolimerização em cuba, conhecida como *Digital Light Processing* (DLP).

As Figuras 3.5 (a) e (b) a seguir ilustram os meios porosos estudados pelos autores.

Figura 3.5 – Meios porosos estudados por Montazerian *et al.* (2017): a) hexagonal e b) dodecaedro rômico.



Fonte: Adaptado de Montazerian *et al.* (2017).

Os autores encontraram resultados para a permeabilidade entre 10^5 e 10^7 mD com porosidades de 0,35 a 0,65 e fizeram uma comparação com a equação de Carman-Kozeny. Para as porosidades estudadas, a permeabilidade mostrou significativa anisotropia e dependência dos formatos dos poros, uma vez que a geometria hexagonal da Figura 3.5 (a) apresentou maiores valores de permeabilidade do que o dodecaedro rômico da Figura 3.5 (b). Além disso, os autores encontraram uma concordância satisfatória entre resultados numéricos, experimentais e analíticos da equação de Carman-Kozeny.

Em outro trabalho, Montazerian *et al.* (2019) avaliaram experimentalmente a permeabilidade de meios porosos com diferentes formatos de poro, modelados pela técnica de superfícies mínimas triplamente periódicas. Para permeabilidades na faixa de 10^6 a 10^7 mD e porosidades entre 0,28 e 0,77, resultados mostraram que, para porosidade fixa, é possível alterar a permeabilidade dos meios porosos ao alterar o formato dos poros.

No contexto de amostras produzidas por MA, o principal diferencial do presente trabalho, em comparação aos trabalhos apresentados nesta seção, é justamente a consideração de filamentos elípticos. Como discutido nos trabalhos de Bazarin *et al.* (2020) e de Shigueoka e Volpato (2021), esta é uma aproximação mais realista visto que o método de impressão 3D pela extrusão de material, não produz filamentos cilíndricos como a maioria dos autores consideram.

3.6 Substituição de Testemunhos por Meios Porosos Manufaturados

Especificamente quanto aos testemunhos das formações rochosas e a substituição por meios porosos manufaturados, os dois artigos citados a seguir foram importantes para a compreensão do problema e para a motivação do presente trabalho.

O trabalho de Gao e Li (2016) comparou técnicas para caracterização dos formatos, tamanhos e conectividade dos poros e da permeabilidade de testemunhos de reservatórios, incluindo técnicas qualitativas, semi-quantitativas e quantitativas. Resultados mostraram que a caracterização adequada requer uma combinação das técnicas disponíveis, o que significa que mais de um testemunho pode ser necessário, uma vez que alguns testes danificam ou contaminam os testemunhos. As conclusões de Gao e Li (2016), em conjunto às complexidades

e custos da coleta discutidos anteriormente, bem como a escassez de testemunhos, tornaram inviável a caracterização das formações rochosas.

Num estudo sobre a viabilidade da utilização de meios porosos manufacturados que representem adequadamente os testemunhos, Lifton (2016) discutiu as vantagens e limitações dos processos de AM para estudos em técnicas de recuperação avançada de petróleo. O autor ressalta que a dificuldade de se manufacturar amostras com resoluções menores que 1μ e a baixa variedade de materiais à disposição são fatores que impedem a produção de amostras adequadas em larga escala.

3.7 Síntese do Capítulo 3

A revisão da literatura realizada no presente capítulo apresentou alguns trabalhos que auxiliaram na compreensão do problema, resumindo os resultados e principais conclusões dos autores citados. Destacou-se ainda as principais diferenças entre o presente trabalho e os estudos da literatura.

A Tabela 3.1 apresenta brevemente os artigos revisados, em ordem cronológica e categorizando-os em estudos numéricos, experimentais e analíticos.

Tabela 3.1 – Tabela de resumo dos artigos revisados.

Autor(es)	Tipo de trabalho	Descrição
Higdon e Ford (1996)	Numérico	Estudo da permeabilidade de meios porosos organizados com filamentos cilíndricos.
Clague <i>et al.</i> (2000)	Numérico e analítico	Estudo da permeabilidade de meios porosos com filamentos regulares e irregulares e análise de escala do problema, com validação com resultados da literatura.
Gostick <i>et al.</i> (2006)	Experimental	Avaliação da permeabilidade e da tortuosidade de eletrodos de difusão de gás variando a porosidade e a direção de escoamento.
Sobera e Kleijn (2006)	Numérico e analítico	Modificação da análise de escala de Clague <i>et al.</i> (2000) com verificação da permeabilidade por simulações em meios porosos regulares e irregulares de filamentos cilíndricos.
Van Doormaal e Pharoah (2009)	Numérico e analítico	Caracterização da permeabilidade anisotrópica de membranas para células de combustível e obtenção de novas correlações para a permeabilidade em função da porosidade.
Vossenbergh <i>et al.</i> (2009)	Numérico e analítico	Estudo da permeabilidade em meios porosos modelados e comparação com relações empíricas da literatura.
Melchels <i>et al.</i> (2010)	Experimental	Caracterização da permeabilidade de meios porosos organizados denominados <i>Gyroids</i> e meios porosos aleatórios gerados por secagem de sais (<i>Salt Leaching Technique</i>).
Tamayol e Bahrami (2011)	Analítico e experimental	Avaliação da permeabilidade e da tortuosidade de meios porosos organizados com filamentos cilíndricos.
Dias <i>et al.</i> (2012)	Numérico e experimental	Caracterização da permeabilidade de meios porosos pela equação de Hazen-Darcy.
Matyka e Koza (2012)	Analítico	Estudo de relação para cálculo da tortuosidade em função do campo de velocidades do escoamento.
Truscillo <i>et al.</i> (2012)	Numérico e experimental	Estudo da permeabilidade de meios porosos organizados compostos de filamentos quadrados.
Zhang <i>et al.</i> (2013)	Numérico e experimental	Comparação da tortuosidade e da permeabilidade entre meios produzidos por MA, através das equações de Hazen-Darcy e de Hazen-Dupuit-Darcy.

Sandino <i>et al.</i> (2014)	Numérico e experimental	Caracterização da permeabilidade de meios porosos provenientes de tecidos ósseos.
Soltani, Johari e Zarrebini (2014)	Numérico	Avaliação da influência da orientação dos filamentos na permeabilidade de meios porosos reais obtidos por microtomografia computadorizada.
Furumoto <i>et al.</i> (2015)	Experimental	Análise da influência dos parâmetros de fabricação na permeabilidade de meios porosos fabricados por MA.
Skibinski <i>et al.</i> (2015)	Numérico e experimental	Estudo da influência dos tamanhos e formatos de poros na permeabilidade dos meios porosos.
Ali e Sen (2017)	Numérico	Estudo da permeabilidade e das propriedades mecânicas de meios porosos.
Montazerian <i>et al.</i> (2017)	Numérico e experimental	Estudo das permeabilidades nas direções longitudinal e radial de meios porosos com diferentes formatos de poros e porosidades.
Li <i>et al.</i> (2018)	Numérico	Estudo da influência dos formatos de poros na porosidade e na permeabilidade de meios porosos com filamentos dispostos nas formas denominadas “treliça de octeto” e “dodecaedro rômbo”.
Montazerian <i>et al.</i> (2019)	Experimental	Caracterização da permeabilidade de meios porosos com diferentes formatos dos poros e porosidades obtidos via MA.
Zhianmanesh, Varmazyar e Montazerian (2019)	Numérico e experimental	Caracterização da permeabilidade de meios porosos para diferentes formatos dos poros e porosidades.

Fonte: Autoria própria (2022).

O presente trabalho utiliza a análise de escala conforme descrito por Sobera e Kleijn (2006) e Tamayol e Bahrami (2011) para avaliar teoricamente o comportamento das permeabilidades dos meios porosos. Como contribuição, busca-se comparar os modelos de tortuosidade de Archie (1942), de Tomadakis e Sotirchos (1993) e de Duda, Koza e Matyka (2011), uma vez que na literatura comumente se utiliza a equação de Archie (1942) devido à sua simplicidade.

Ressalta-se que, diferentemente do que indica a literatura, que aborda meios porosos compostos por filamentos cilíndricos ou retangulares, no presente trabalho investiga-se meios cujos filamentos apresentam seção transversal elíptica. Além de permitir o controle de parâmetros como ângulo de varredura, desalinhamento entre camadas e quantia de filamentos unidos, a opção por filamentos com seção elíptica permite melhor controle do processo de manufatura de meios porosos sintetizados a partir de materiais poliméricos (BAZARIN *et al.*, 2020; SHIGUEOKA; VOLPATO, 2021).

Considerando os estudos, o presente trabalho utiliza a equação de Hazen-Darcy para o cálculo da permeabilidade, tendo em vista sua menor complexidade com relação as outras equações e por apresentar resultados satisfatórios. Realiza-se ainda no presente trabalho a verificação de regime de Darcy para garantir um baixo número de Reynolds no escoamento. Esta verificação não é apresentada pelos autores citados na revisão.

4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

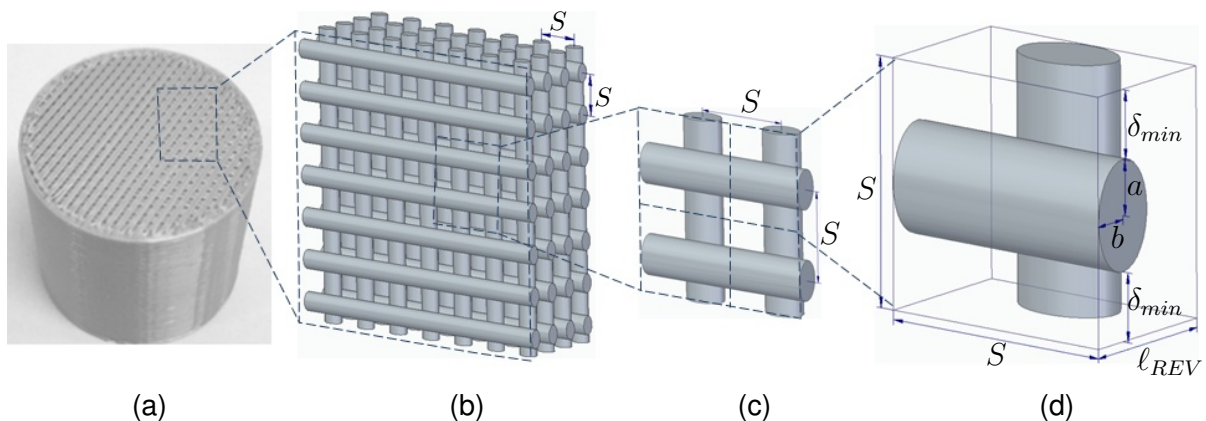
No presente capítulo, as configurações geométricas dos meios, as equações de balanço e condições de contorno, bem como a modelagem numérica para a solução do escoamento são apresentadas. Além disto, é apresentado o procedimento experimental para obtenção da permeabilidade de meios porosos manufacturados.

4.1 Geometria do Problema

O modelo dos meios porosos de estrutura organizada investigados neste trabalho é elaborado a partir da construção em camadas, com filamentos de seção transversal elíptica e igualmente espaçados. A Figura 4.1 (a) apresenta um exemplo de amostra manufacturada seguindo esta descrição de meio poroso e a Figura 4.1 (b) ilustra o modelo idealizado em 3D. O software CAD (*computer-aided design*) denominado SOLID EDGE da empresa SIEMENS Inc. (2020) foi utilizado para elaboração das figuras em 3D.

A distância entre os centros dos filamentos (S), observada nas Figuras 4.1 (b), (c) e (d), varia com a porosidade do meio e, conseqüentemente, altera a menor distância entre filamentos ($2\delta_{min}$). A distância $2\delta_{min}$ da Figura 4.1 (d) define o diâmetro de poro ou, no inglês, "pore throat".

Figura 4.1 – Amostra porosa representada em diferentes níveis de resolução: a) matriz manufacturada, b) modelo produzido em CAD, c) estrutura periódica da matriz e d) REV utilizado.



Fonte: Autoria própria (2022).

A seção transversal elíptica, apresentada na Figura 4.1 (d), possui o raio maior (a) e o raio menor (b) relacionados pela proporção $a = C_{ab}b$, sendo que C_{ab} é a constante de proporção entre os raios. Define-se $C_{ab} = 22/15$ para o problema, visando meios porosos próximos dos meios caracterizados experimentalmente em Bazarin *et al.* (2020) e em RepSol-UTFPR (2020).

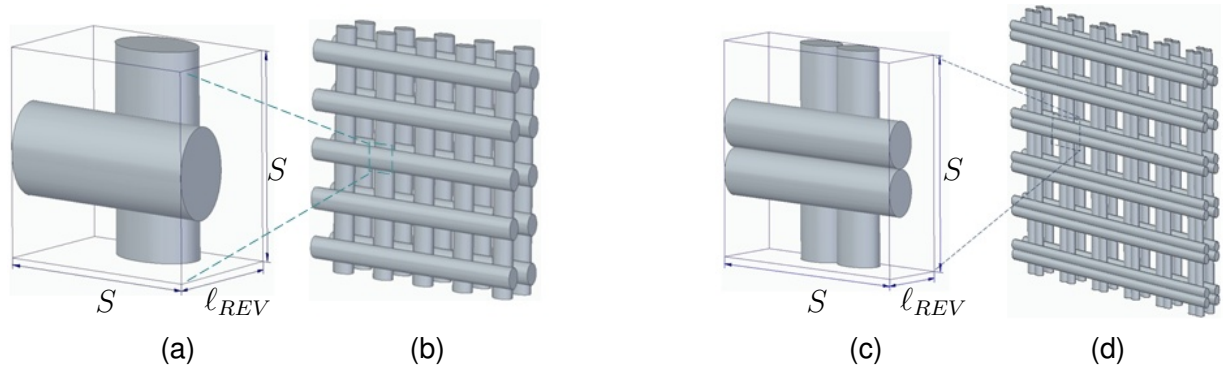
A Figura 4.1 (d) mostra o REV considerado para o meio poroso de filamentos elípticos com $\phi = 0,65$, apresentando o menor volume possível que representa o padrão de repetição dos filamentos no meio poroso. O ℓ_{REV} da Figura 4.1 (d) representa o comprimento do REV.

Define-se N_{REV} como o número de camadas de filamentos no REV, para que seja possível descrever o comprimento como função de b da seguinte forma:

$$\ell_{REV} = 2b \cdot N_{REV} \quad (4.1)$$

Outro parâmetro para a modelagem dos meios porosos é a quantidade de filamentos unidos que compõem a estrutura (N_f). No meio poroso da Figura 4.1 cada camada é composta de filamentos igualmente separados por S . Sendo assim, propõem-se meios porosos com N_f filamentos unidos separados por S . As Figuras 4.2 (a) e (b) ilustram os meios porosos com $N_f = 1$ e as Figuras 4.2 (c) e (d) ilustram os meios com $N_f = 2$.

Figura 4.2 – Diferentes valores de N_f para meios porosos com $\phi = 0,65$: a) o REV para $N_f = 1$, b) meio poroso para $N_f = 1$, c) o REV para $N_f = 2$ e d) o meio poroso para $N_f = 2$.

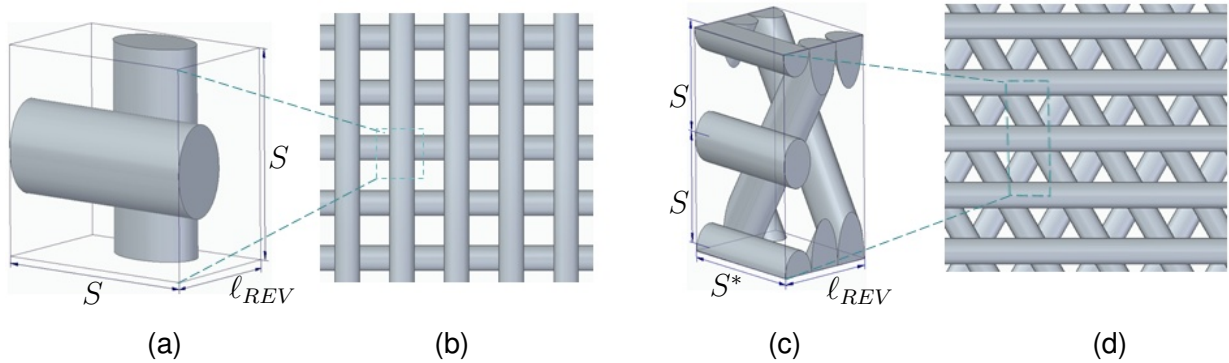


Fonte: Autoria própria (2022).

A variação angular da deposição das camadas é controlada pelo parâmetro ângulo de varredura (θ). Observe que nas Figuras 4.1 e 4.2, onde $\theta = 90^\circ$, os filamentos depositados são perpendiculares. Desta forma, cada camada de filamentos possui deslocamento angular de θ em relação a camada anterior. Um exemplo de como θ altera a estrutura dos meios é a Figura 4.3, a qual apresenta a visão frontal e os REVs de meios porosos com ângulos de 90° nas Figuras 4.3 (a) e (b) e de 60° nas Figuras 4.3 (c) e (d), ambos com $\phi = 0,65$.

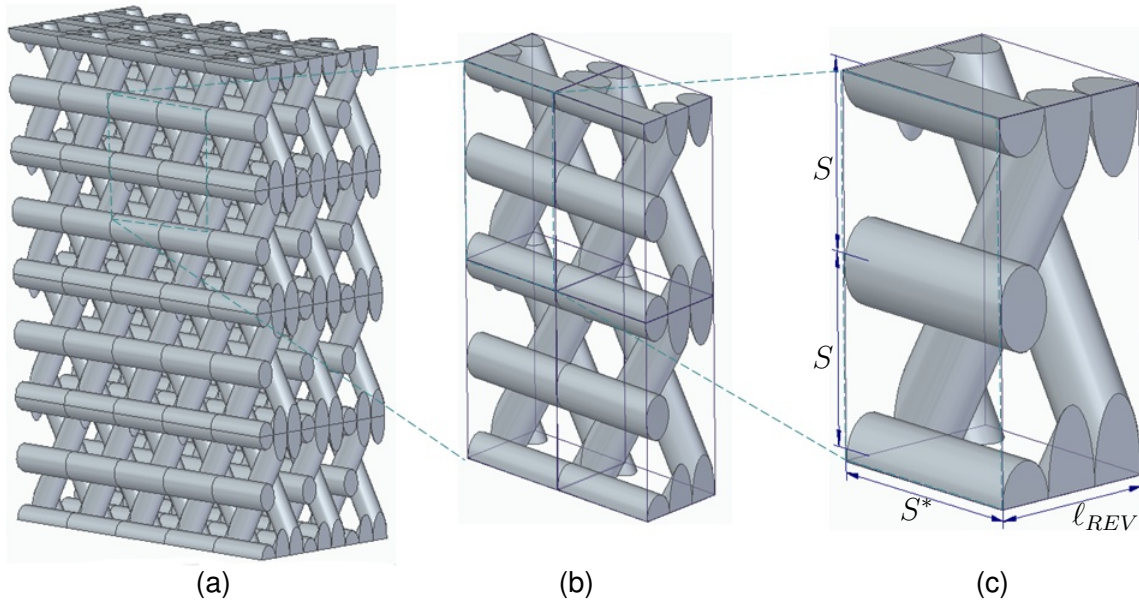
Para representar adequadamente o meio poroso com $\theta = 60^\circ$ como o da Figura 4.4 (a), o REV requer maior volume, com altura de $2S$ e largura S^* , sendo que $S^* = 2S/\sqrt{3}$. Sendo assim, a Figura 4.4 (b) representa a simplificação periódica realizada para obter o REV para $\theta = 60^\circ$ com $\phi = 0,65$. Ademais, três camadas de filamentos são representadas no REV, ou seja, $N_{REV} = 3$, como mostra a Figura 4.4 (c). Portanto, pela Equação 4.1, o comprimento do REV para $\theta = 60^\circ$ é maior do que para $\theta = 90^\circ$.

Figura 4.3 – Ilustração de meios porosos com $\phi = 0.65$, sendo a) o REV para $\theta = 90^\circ$, b) o meio poroso para $\theta = 90^\circ$, c) o REV para $\theta = 60^\circ$ e d) o meio poroso para $\theta = 60^\circ$.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 4.4 – Meio poroso com $\phi = 0.65$ e $\theta = 60^\circ$ em diferentes níveis de resolução: a) meio poroso idealizado, b) simplificação periódica do meio e c) o REV utilizado.



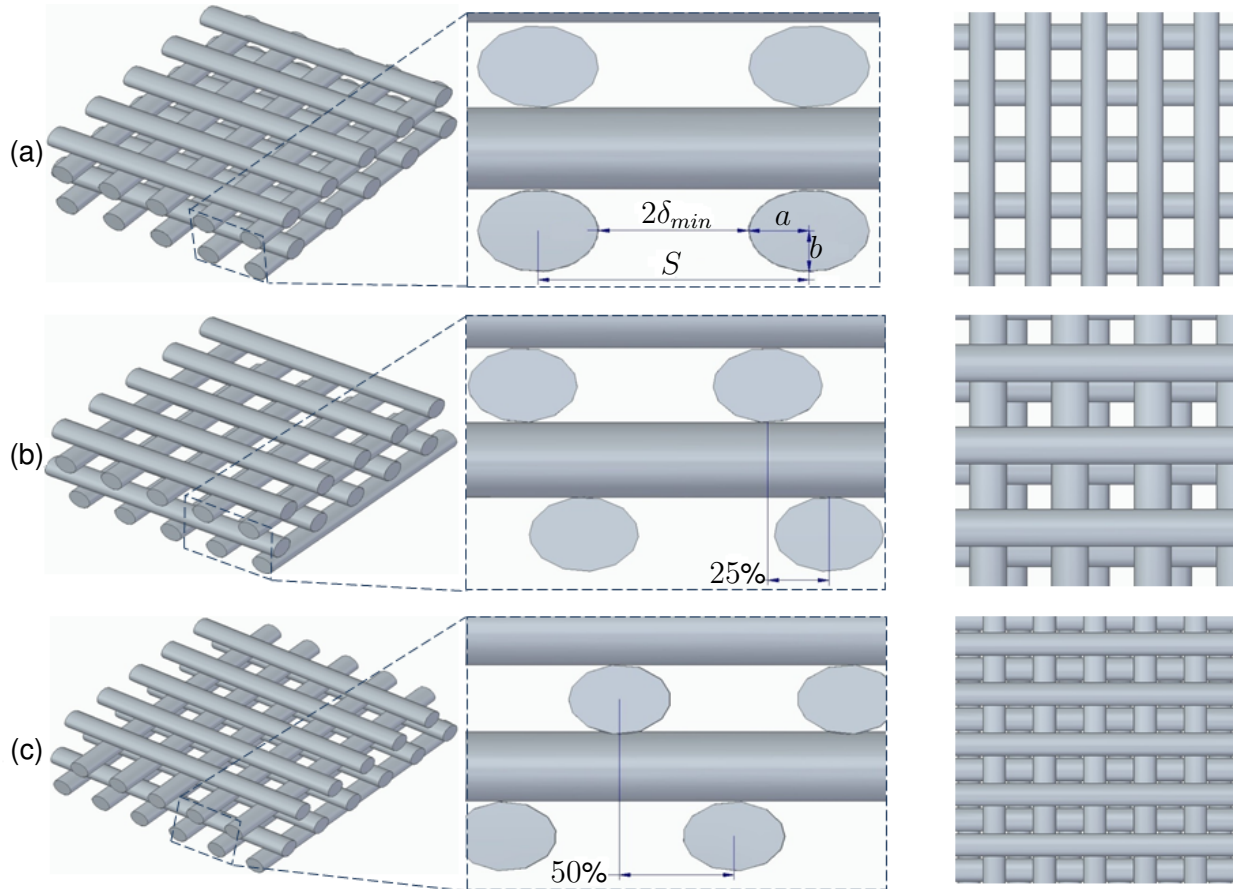
Fonte: Autoria própria (2022).

O último parâmetro variado é denominado desalinhamento entre camadas (De). Duas camadas de filamentos são desalinhadas em $De \times S$ na direção do raio maior, gerando o padrão com quatro camadas sendo que duas são consideradas “deslocadas”. As Figuras 4.5 (a), (b) e (c) representam, respectivamente, três meios porosos com desalinhamentos de 0%, 25% e 50%, todos com $\phi = 0,65$.

Para melhor organização, os meios porosos são nomeados com base nos parâmetros definidos. Com o número de filamentos unidos, o ângulo de varredura e o desalinhamento entre camadas os meios são nomeados da forma: $L(N_f)A(\theta)S(De)$, sendo L do inglês “lines in set”, A de ângulo e S do inglês “stagger factor”.

A Tabela 4.1 apresenta o resumo dos valores simulados para cada parâmetro.

Figura 4.5 – Comparação pelas vistas em corte com ampliação da seção transversal e pelas vistas frontais dos meios porosos com $\phi = 0.65$ e com De : a) 0%, b) 25% e c) 50%.



Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 4.1 – Resumo dos valores estudados para as variáveis que compõem a modelagem.

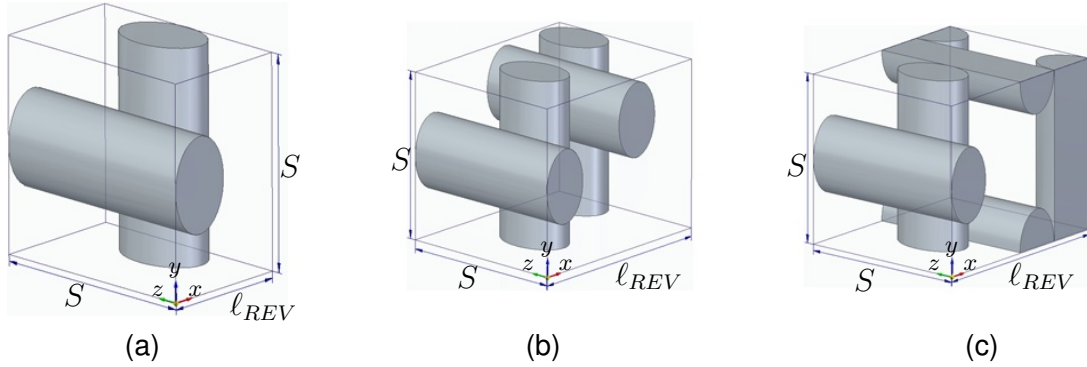
Grandeza	Valores
N_f	[1, 2]
θ	[60°, 90°]
De	[0%, 25%, 50%]

Fonte: Autoria própria (2022).

Definidos os nomes dos meios porosos, as Figuras 4.6 a 4.9 apresentam os REVs para $\phi = 0,65$ e para cada configuração de N_f , θ e De da Tabela 4.1, com seus respectivos nomes. Primeiramente, as Figuras 4.6 (a), (b) e (c) ilustram, respectivamente, os meios com nomes $L01 A90 S00$, $L01 A90 S25$ e $L01 A90 S50$. Em sequência, as Figuras 4.7 (a), (b) e (c) ilustram os meios com nomes $L02 A90 S00$, $L02 A90 S25$ e $L02 A90 S50$, por essa ordem.

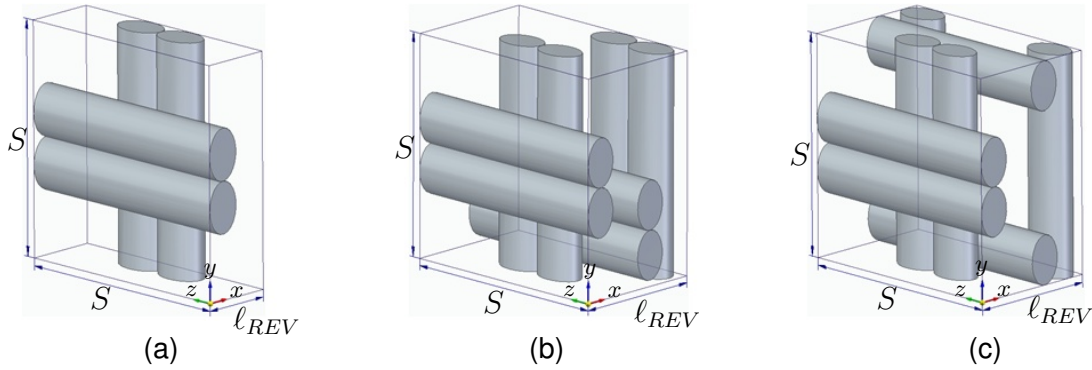
O ℓ_{REV} é notavelmente maior para certos REVs devido a necessidade de ter o padrão de repetição completo representado. Nas Figuras 4.6 (a) e 4.7 (a), para $De = 0\%$, tem-se $N_{REV} = 2$, enquanto nas Figuras 4.6 (b) e (c) e 4.7 (b) e (c), para $De \neq 0\%$, tem-se $N_{REV} = 4$. Pela Equação 4.1, quanto maior N_{REV} maior é ℓ_{REV} .

Figura 4.6 – REVs com $N_f = 01$ e $\theta = 90^\circ$: a) $L01 A90 S00$, b) $L01 A90 S25$ e c) $L01 A90 S50$.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 4.7 – REVs com $N_f = 02$ e $\theta = 90^\circ$: a) $L02 A90 S00$, b) $L02 A90 S25$ e c) $L02 A90 S50$.



Fonte: Autoria própria (2022).

Com as variáveis do problema definidas, calcula-se o volume total do REV, V_T , e o volume dos poros no REV, V_P , para calcular a porosidade dos meios pela Equação 2.1. Para $\theta = 90^\circ$ como nas Figuras 4.6 e 4.7, o volume total do REV é dado por:

$$V_T = S^2 \cdot l_{REV} = S^2 \cdot 2b \cdot N_{REV} \quad (4.2)$$

O volume total depende do desalinhamento entre camadas, uma vez que depende de N_{REV} . Já o volume dos poros inclui também a quantidade de filamentos unidos, N_f , e é encontrado considerando o volume de sólido no REV.

$$V_P = V_T - \pi ab \cdot S \cdot N_{REV} \cdot N_f \quad (4.3)$$

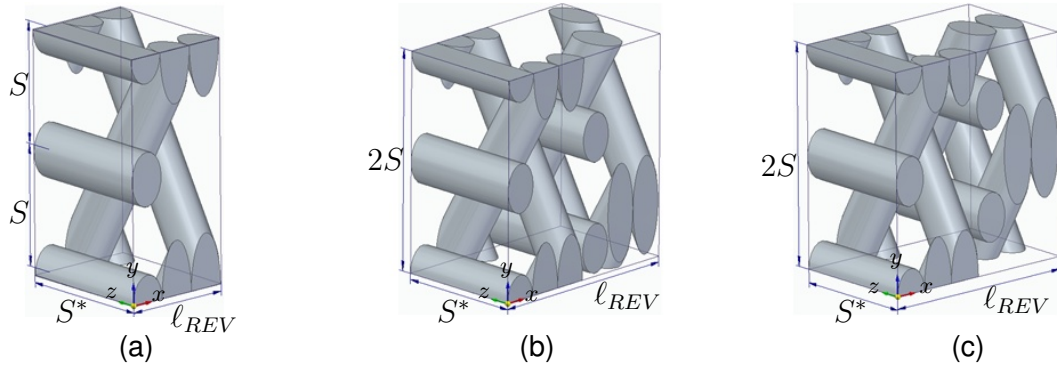
Substituindo as Equações 4.2 e 4.3 na Equação 2.1 para encontrar a porosidade do REV:

$$\phi = 1 - \frac{\pi ab \cdot S \cdot N_{REV} \cdot N_f}{S^2 \cdot 2b \cdot N_{REV}} \quad (4.4)$$

e resolvendo para S , têm-se:

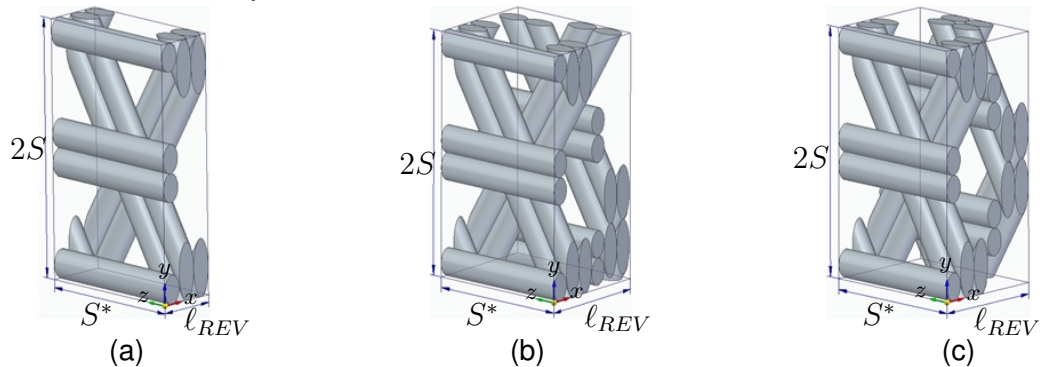
$$\frac{S}{a} = \frac{\pi N_f}{2(1 - \phi)} \quad (4.5)$$

Figura 4.8 – REVs com $N_f = 01$ e $\theta = 60^\circ$: a) $L01 A60 S00$, b) $L01 A60 S25$ e c) $L01 A60 S50$.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 4.9 – REVs com $N_f = 02$ e $\theta = 60^\circ$: a) $L02 A60 S00$, b) $L02 A60 S25$ e c) $L02 A60 S50$.



Fonte: Autoria própria (2022).

A seguir, as Figuras 4.8 (a), (b) e (c) ilustram os meios com nomes $L01 A60 S00$, $L01 A60 S25$ e $L01 A60 S50$, nesta ordem, e as Figuras 4.9 (a), (b) e (c) ilustram os meios com nomes $L02 A60 S00$, $L02 A60 S25$ e $L02 A60 S50$.

Nas Figuras 4.8 (a) e 4.9 (a), para $De = 0\%$, tem-se $N_{REV} = 3$. Já para $De \neq 0\%$, nas Figuras 4.8 (b) e (c) e 4.9 (b) e (c), tem-se $N_{REV} = 6$. Para $\theta = 60^\circ$, o volume total do REV é calculado por:

$$V_T = (2S) \cdot S^* \cdot 2b \cdot N_{REV} = \frac{4}{\sqrt{3}} S^2 \cdot 2b \cdot N_{REV} \quad (4.6)$$

e o volume de poros no REV é calculado por:

$$V_P = V_T - \frac{4}{\sqrt{3}} \pi ab \cdot S \cdot N_{REV} \cdot N_f \quad (4.7)$$

Substituindo as Equações 4.6 e 4.7 na Equação 2.1 para encontrar a porosidade do REV:

$$\phi = 1 - \frac{\frac{4}{\sqrt{3}} \pi ab \cdot S \cdot N_{REV} \cdot N_f}{\frac{4}{\sqrt{3}} S^2 \cdot 2b \cdot N_{REV}} \quad (4.8)$$

resolvendo para S têm-se:

$$\frac{S}{a} = \frac{\pi N_f}{2(1 - \phi)} \quad (4.9)$$

que é exatamente igual a Equação 4.5, ou seja, a proporção entre o raio a e a distância S não depende de De e nem de θ , apenas de N_f e ϕ . Como N_f e ϕ são variáveis de entrada para o problema, define-se um valor fixo para S para encontrar o valor de a , b e δ_{min} .

O diâmetro de poro pode ser calculado para todas as configurações definidas para os meios porosos pela equação:

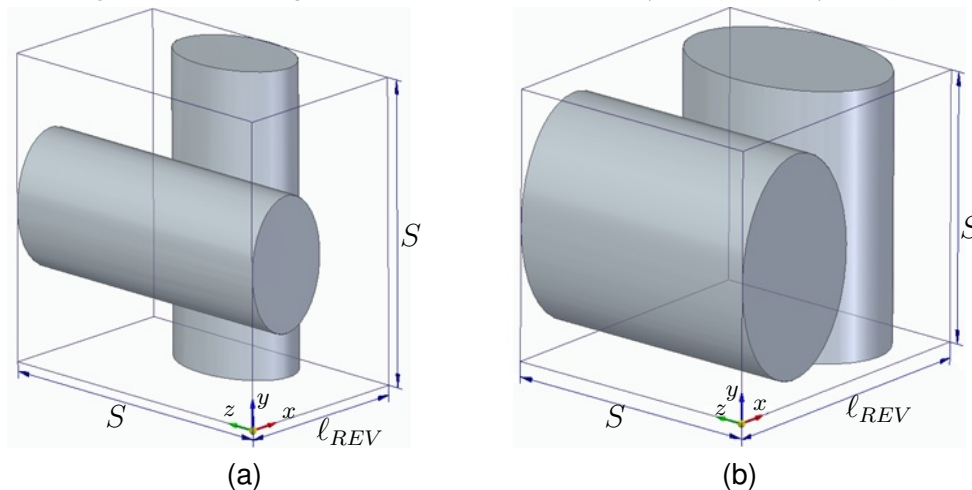
$$2\delta_{min} = S - 2aN_f \quad (4.10)$$

e substituindo a Equação 4.5 na Equação 4.10, tem-se:

$$\frac{\delta_{min}}{a} = N_f \left[\frac{\pi}{4(1-\phi)} - 1 \right] \quad (4.11)$$

Escrever os parâmetros desta forma auxilia no desenho do modelo e no desenvolvimento da análise de escala no Capítulo 5. As distâncias S e δ_{min} diminuem com o decréscimo de ϕ , enquanto o raio a aumenta. Para ilustrar a influência de ϕ na geometria, as Figuras 4.10 (a) e (b) apresentam, respectivamente, os REVs para o meio $L01 A90 S00$ com $\phi = 0,65$ e $\phi = 0,35$.

Figura 4.10 – REVs para o meio $L01 A90 S00$: a) $\phi = 0,65$ e b) $\phi = 0,35$.



Fonte: Autoria própria (2022).

No presente trabalho, definiu-se primeiramente um valor fixo para S e os valores de a , b e δ_{min} foram calculados ao variar o valor de ϕ para cada meio poroso obtido pelas configurações da Tabela 4.1. Os valores de ϕ planejados são: [0,23; 0,24; 0,25; 0,275; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,70; 0,75].

Ademais, considerando a proporcionalidade mantida entre os raios a e b dos filamentos e entre a , S e δ_{min} , é possível trabalhar com a geometria adimensionalizada, visto que a porosidade que controla os parâmetros é adimensional. Em outras palavras, o problema apresenta os mesmos resultados, independente das unidades de medida do REV, desde que todas as proporções sejam mantidas.

4.2 Equações de balanço para o problema

As equações de balanço que representam o problema foram simplificadas considerando as seguintes hipóteses:

- Escoamento em regime laminar.
- Escoamento em regime permanente.
- Escoamento isotérmico.
- Fluido newtoniano com propriedades constantes.
- Ausência de forças gravitacionais.

As equações que representam o escoamento no REV são a equação de balanço da massa e a equação de Navier-Stokes, que podem ser representadas na forma vetorial da seguinte forma:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (4.12)$$

$$\rho \vec{\nabla} \cdot (\vec{u} \vec{u}) = \vec{\nabla} p + \mu (\nabla^2 \vec{u}) \quad (4.13)$$

sendo ρ a massa específica do fluido, \vec{u} é o vetor velocidade e p a pressão. O APÊNDICE B apresenta a adimensionalização das equações de balanço.

As superfícies do REV foram numeradas para a aplicação das condições de contorno. As superfícies normais ao eixo x são (1) em $x = 0$ e (2) em $x = \ell_{REV}$, as superfícies normais ao eixo y são (3) em $y = 0$ e (4) em $y = S$, as superfícies normais ao eixo z são (5) em $z = 0$ e (6) em $z = S$ e as superfícies dos filamentos são as superfícies (7). A Figura 4.11 (a) ilustra as superfícies numeradas para o meio poroso $L01 A90 S00$ com $\phi = 0,65$, com vistas frontal e superior nas Figuras 4.11 (b) e (c), respectivamente.

As condições de contorno do problema são:

- (1) Condição de pressão (Entrada): Define-se a superfície (1) como a entrada e a pressão P_1 na entrada do REV.

$$p(x = 0) = P_1 \quad (4.14)$$

- (2) Condição de pressão (Saída): Define-se a superfície (2) como a saída e a pressão P_2 na saída do REV.

$$p(x = \ell_{REV}) = P_2 \quad (4.15)$$

- (1) – (2) Periodicidade em x : Define-se a periodicidade nas superfícies numeradas (1) e (2) que são normais ao eixo x .

$$\begin{aligned}\vec{u}(x=0) &= \vec{u}(x=\ell_{REV}) \\ \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} \Big|_{x=\ell_{REV}}\end{aligned}\quad (4.16)$$

- (3) – (4) Periodicidade em y : Define-se a periodicidade nas superfícies numeradas (3) e (4) que são normais ao eixo y .

$$\begin{aligned}\vec{u}(y=0) &= \vec{u}(y=S) \\ \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} \Big|_{y=S}\end{aligned}\quad (4.17)$$

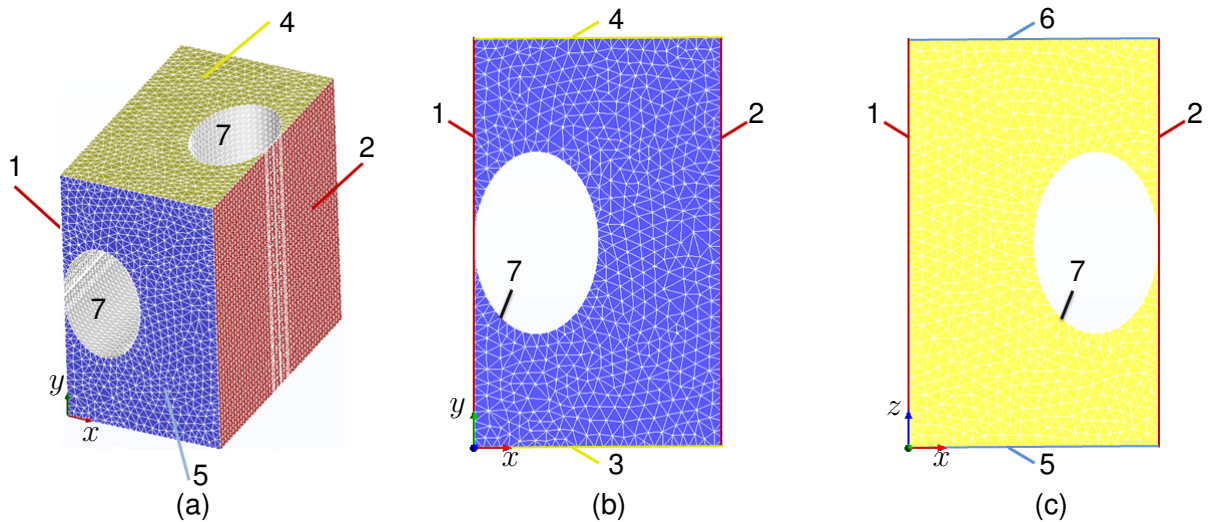
- (5) – (6) Periodicidade em z : Define-se a periodicidade nas superfícies numeradas (5) e (6) que são normais ao eixo z .

$$\begin{aligned}\vec{u}(z=0) &= \vec{u}(z=S) \\ \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} \Big|_{z=S}\end{aligned}\quad (4.18)$$

- (7) Condição de Parede: Aplica-se a condição de não deslizamento nas superfícies dos filamentos.

$$\vec{u} \Big|_{\text{Parede}} = 0 \quad (4.19)$$

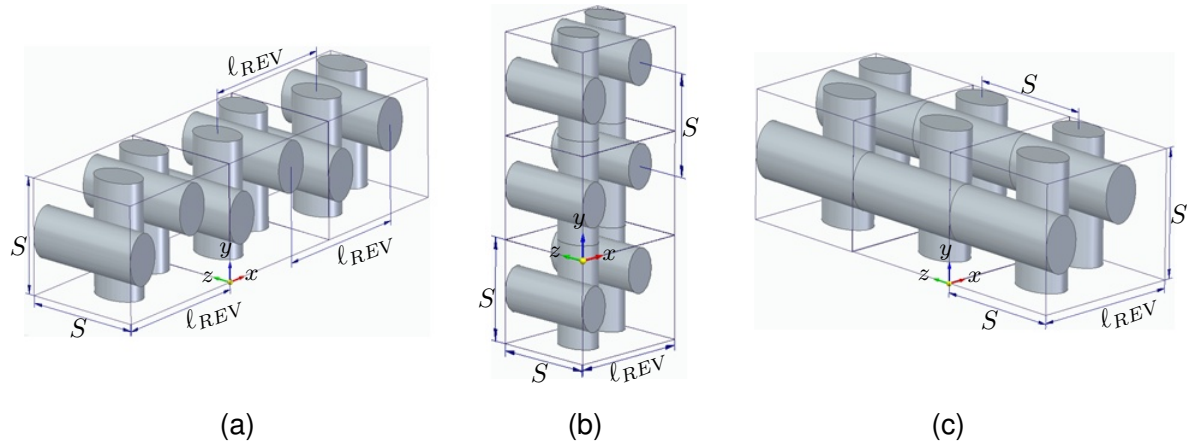
Figura 4.11 – Ilustração de superfícies nomeadas para o meio L01 A90 S00 com $\phi = 0,65$, tem-se: a) a vista isométrica, b) vista do plano $x - y$ e c) vista do plano $x - z$.



Fonte: Autoria própria (2022).

Definiu-se a diferença de pressão como $\Delta P = P_1 - P_2$. As Figuras 4.12 (a), (b) e (c) ilustram como as periodicidades das Equações 4.16, 4.17 e 4.18, nesta ordem, foram aplicadas ao REV para o meio poroso L01 A90 S25.

Figura 4.12 – Ilustração de como o REV do meio L01 A90 S25 com $\phi = 0,65$ é replicado pelas condições a) Periodicidade em x , b) Periodicidade em y e c) Periodicidade em z .



Fonte: Autoria própria (2022).

É importante ressaltar que a condição de periodicidade foi aplicada, visto que a condição de simetria é usualmente utilizada para replicar meios porosos organizados. Entretanto, faz-se necessário o uso da periodicidade em REV's como o da Figura 4.12, devido à simetria gerar a imagem espelhada do REV ao invés de replicá-lo (ANSYS INC., 2020), o que leva à distâncias entre filamentos incorretas para as camadas que estão desalinhadas.

Por fim, além das equações de balanço e as condições de contorno, a Equação de Hazen-Darcy foi utilizada para o cálculo das permeabilidades dos meios porosos. O gradiente de pressão da Equação 2.3 foi calculado pela razão entre a ΔP e o l_{REV} . A equação utilizada pode ser escrita da forma:

$$K = \frac{\mu U_D l_{REV}}{\Delta P} \quad (4.20)$$

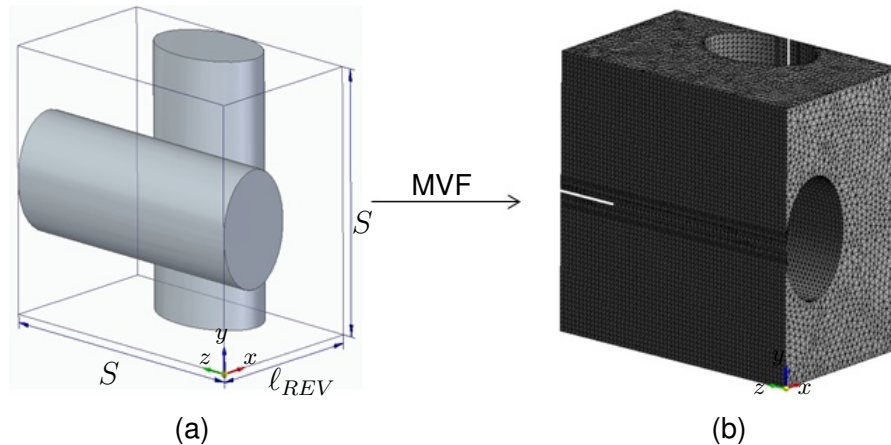
Com as equações do problema e as condições de contorno definidas, a modelagem numérica foi elaborada para a solução do escoamento por CFD.

4.3 Modelagem Numérica

O método de CFD utilizado no presente trabalho é o Método dos Volumes Finitos (MVF). O software ANSYS MESHING (ANSYS INC., 2020) foi utilizado para a primeira parte da aplicação do MVF, que consiste em dividir o domínio computacional em diversos volumes de controle, dando forma à malha.

A quantidade de elementos da malha foi controlada pelo comprimento médio dos volumes de controle, sendo que um fator de adaptação de tamanho foi utilizado para obter menores elementos em regiões próximas das superfícies dos sólidos. Em geral, o fator de adaptação de tamanho 7 foi utilizado, porém em $\phi > 0,30$ nos meios mais complexos, como nos meios com $\theta = 60^\circ$ e $De \neq 0$, o fator de adaptação pôde ser reduzido a até 3 sem prejudicar a precisão do método, para economizar tempo computacional.

Figura 4.13 – Malha computacional para o meio poroso L01 A90 S00 com $\phi = 0,65$: a) o REV do meio e b) a malha com 130.114 elementos.



Fonte: Autoria própria (2022).

Além disto, a transição entre os elementos normais e os reduzidos pelo fator de adaptação pode ser realizada em três velocidades pelo software: lenta, média ou rápida. A transição rápida foi utilizada na maioria dos meios porosos, uma vez que em baixas porosidades o pouco espaço entre filamentos requer um refino da malha grande para evitar divergências. Contudo, em meios com maiores ϕ a transição rápida pode levar a uma diferença muito grande no tamanho entre volumes de controle adjacentes, o que por sua vez pode causar divergências e aumentar excessivamente o tempo computacional. Portanto, as transições média ou lenta foram utilizadas quando necessário, em específico nos meios com $\theta = 60^\circ$, que foram os últimos a serem simulados.

A Figura 4.13 (b) a seguir ilustra a malha computacional utilizada sobre o escoamento do REV da Figura 4.13 (a), com $\phi = 0,65$.

Existe certa dificuldade para definir os volumes de controle, principalmente nas proximidades do ponto de contato entre os filamentos. Após diversas falhas, notou-se que a malha regular e estruturada requer alto número de elementos, mais de cem vezes a quantia de elementos apresentada na Figura 4.13 (b). Por conseguinte, utilizou-se a malha não estruturada, visto que o menor número de volumes permite menor tempo computacional para solução.

Os testes de malha foram realizados com intuito de avaliar a sensibilidade dos resultados à malha. Nestes testes a permeabilidade foi calculada para certa malha com número de elementos arbitrário, a quantia de elementos foi dobrada, a permeabilidade foi calculada novamente e o processo se repetiu até certo critério ser atingido. No presente trabalho o critério escolhido foi a diferença percentual entre valores da permeabilidade de no máximo 10%.

Utilizou-se o esquema QUICK para discretização das equações de balanço e o algoritmo SIMPLE para correção do campo de pressão (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). O software ANSYS FLUENT (ANSYS INC., 2020) que possui os métodos implementados foi utilizado. Os fatores de relaxação utilizados foram de 0,3 para a pressão e 0,7 para a velocidade nos primeiros meios simulados, mas para casos mais complexos e/ou com porosidade abaixo de 0,30 estes

valores foram reduzidos de dez a até mil vezes conforme necessário para evitar as flutuações que levam à divergência, apesar de aumentar significativamente o tempo computacional.

O controle de resíduos foi utilizado como critério de convergência. O resíduo é calculado ao substituir nas equações de balanço os campos de velocidade e de pressão obtidos por simulações com seus respectivos fatores de relaxação, uma vez que as equações não são satisfeitas a não ser que o resultado exato tenha sido obtido (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

O cálculo do resíduo é realizado em cada volume de controle e a soma dos valores absolutos dos resíduos foi monitorada. Se o cálculo numérico for convergente, a soma dos resíduos absolutos decresce à medida que as iterações ocorrem até atingir uma estabilização, indicando que a diferença entre resultado deliberado e resultado exato está suficientemente baixa.

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), a estabilização da soma dos resíduos absolutos pode não ser o critério de convergência adequado, pois a soma absoluta pode diminuir mesmo que o resíduo não diminua em todos os volumes de controle. Em malhas com grandes números de elementos é possível que existam volumes de controle com pequenos acréscimos de resíduos encobertos, não perceptíveis na soma absoluta.

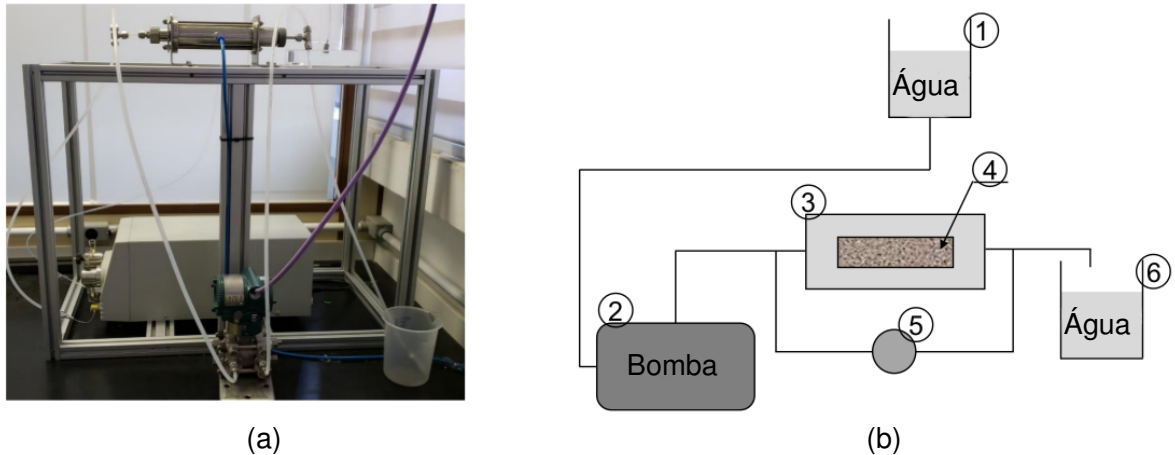
Por conseguinte, escolheu-se a estabilização dos resíduos absolutos como critério de convergência, porém a velocidade média do escoamento, a velocidade máxima no REV e a permeabilidade foram monitoradas a cada iteração para garantir a convergência a resultados coerentes.

4.4 Procedimento Experimental

As amostras utilizadas no procedimento experimental foram fabricadas pelo NUFER com material polimérico (PLA), pela impressão 3D por método de extrusão de material com os seguintes parâmetros: 0,3mm de espessura das camadas, velocidade de impressão de 25 mm/s, temperatura do bico extrusor de 205°C e temperatura da mesa de 50°C (REPSOL-UTFPR, 2020; SHIGUEOKA; VOLPATO, 2021).

As porosidades das amostras foram medidas por um porosímetro pelo método de densidade de grão (MCPHEE; REED; ZUBIZARRETA, 2015). Já os resultados experimentais para as permeabilidades foram obtidos por um permeâmetro de fluido em regime permanente (*steady-state liquid permeameter*), que consiste basicamente de dois tanques, uma bomba, um *coreholder* e um transdutor de pressão diferencial (BAZARIN *et al.*, 2020; REPSOL-UTFPR, 2020). As Figuras 4.14 (a) e (b) apresentam respectivamente o permeâmetro utilizado e um esquema de funcionamento dos componentes.

Figura 4.14 – Permeâmetro de fluido em regime permanente utilizado nos experimentos: a) o permeâmetro real e b) o esquema de funcionamento com: (1) o tanque 1, (2) a bomba, (3) o *coreholder*, (4) o meio poroso, (5) o transdutor de pressão diferencial, e (6) o tanque 2.



Fonte: Adaptado de RepSol-UTFPR (2020).

O processo de medição foi realizado da seguinte forma: a bomba introduziu ao sistema uma vazão constante de água destilada em temperatura ambiente entre 1 e 10 ml/min a partir do tanque 1 em direção ao tanque 2. Vários valores de vazão foram testados nesta faixa para calibrar o equipamento. Entre a bomba e tanque 2 o fluido escoou através do meio poroso posicionado na direção longitudinal no *coreholder*. Enquanto o fluido escoava pelo meio poroso, o transdutor de pressão diferencial mediu a diferença de pressão entre a saída e a entrada do *coreholder*, armazenando digitalmente os valores por meio do software de aquisição de dados LabView (REPSOL-UTFPR, 2020).

Deu-se como encerrado o processo de medição quando a diferença de pressão atingiu certa estabilidade na qual foi possível considerar o regime como permanente. Por fim, utilizou-se a diferença de pressão encontrada para calcular a permeabilidade da amostra pela Equação 2.3.

As permeabilidades das amostras encontradas pelo procedimento experimental descrito foram utilizadas para validar os resultados numéricos obtidos por MVF no presente trabalho.

4.5 Síntese do Capítulo 4

A modelagem do problema foi elaborada neste capítulo, iniciando pela geometria do meio poroso que consiste de filamentos dispostos em camadas, e os parâmetros geométricos introduzidos foram: o raio maior, o raio menor, a distância entre centros dos filamentos, e o diâmetro de poro. O conceito de REV foi aplicado ao meio poroso. As variáveis de estudo foram definidas: a porosidade, o desalinhamento entre camadas, o ângulo de varredura e a quantia de filamentos unidos.

As equações de balanço do problema foram definidas com as hipóteses para a solução. As condições de contorno de não deslizamento, de pressão constante e de periodicidade foram

definidas. Na modelagem numérica, as malhas foram geradas sobre o escoamento, o controle de resíduos foi definido como critério de convergência para solução e os problemas que foram contornados durante este processo foram discutidos.

Por fim, o procedimento experimental realizado pelo grupo para obter resultados experimentais foi resumido, mostrando o permeâmetro utilizado, seus componentes e os parâmetros utilizados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

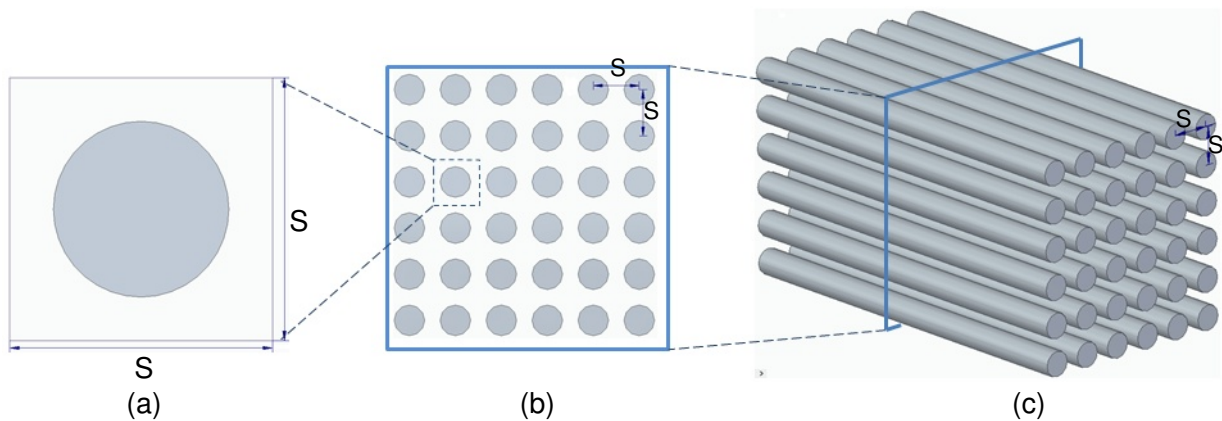
Neste capítulo são apresentados os resultados de verificação e validação do método, utilizando o estudo de Tamayol e Bahrami (2011), e os resultados de simulação dos meios porosos com filamentos elípticos. A análise de escala do problema é realizada e os resultados numéricos são validados.

5.1 Validação e verificação

Nesta seção, utiliza-se o método descrito nas Seções 4.2 e 4.3 para reproduzir os resultados de Tamayol e Bahrami (2011) afim de avaliar a viabilidade desta metodologia para simular escoamentos em meios porosos compostos de filamentos. Três configurações de meios porosos compostos por filamentos cilíndricos são estudadas.

O primeiro arranjo de meio poroso, denominado "unidirecional", é composto por filamentos cilíndricos com eixos paralelos, diâmetro d e distância S entre os centros dos filamentos. O escoamento ocorre em direção perpendicular ao eixo dos filamentos. A Figura 5.1 mostra o REV, partindo da matriz de filamentos original.

Figura 5.1 – Simplificação ao REV do meio poroso unidirecional com $\phi = 0,65$: a) REV, b) plano bidimensional representativo e c) idealização do meio poroso.



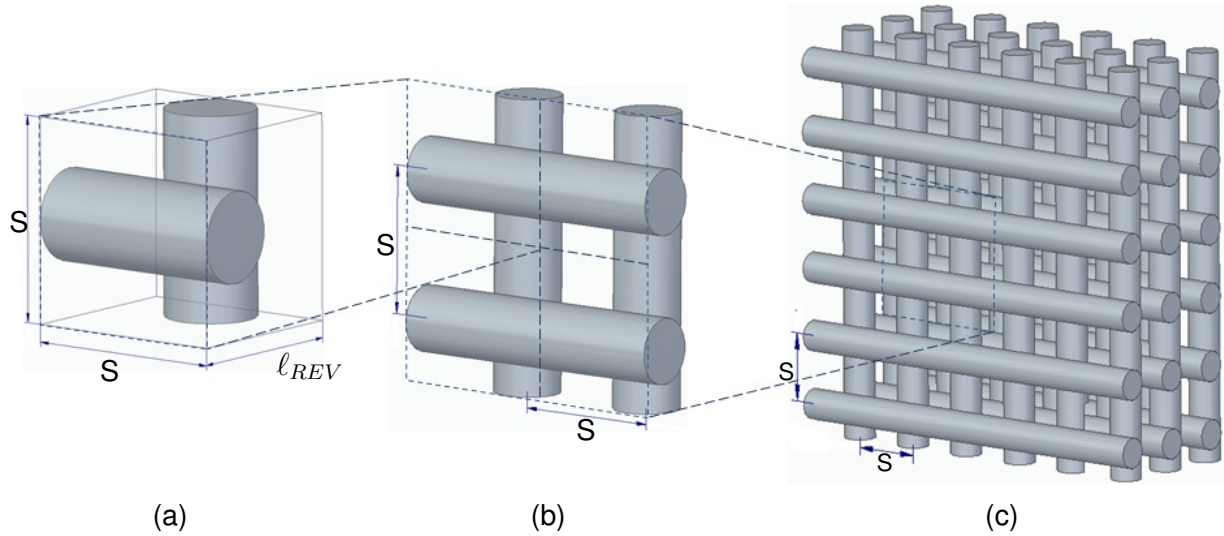
Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 5.1 (a) ilustra o REV utilizado de fato nas simulações, com comprimento e altura iguais a S . A Figura 5.1 (b) representa uma simplificação dimensional dos filamentos e a Figura 5.1 (c) é o modelo em 3D idealizado do meio poroso unidirecional.

O arranjo "bidirecional", representado na Figura 5.2, apresenta filamentos cilíndricos disposto perpendicularmente em camadas. O escoamento ocorre em direção perpendicular aos eixos dos filamentos.

A Figura 5.2 (a) ilustra o REV utilizado nas simulações, que é similar ao REV da Figura 4.6 (a), apesar dos diferentes formatos de filamentos. Ao invés de uma simplificação dimensional,

Figura 5.2 – Simplificação ao REV do meio poroso bidirecional com $\phi = 0,65$: a) REV, b) simplificação periódica e c) idealização do meio poroso.

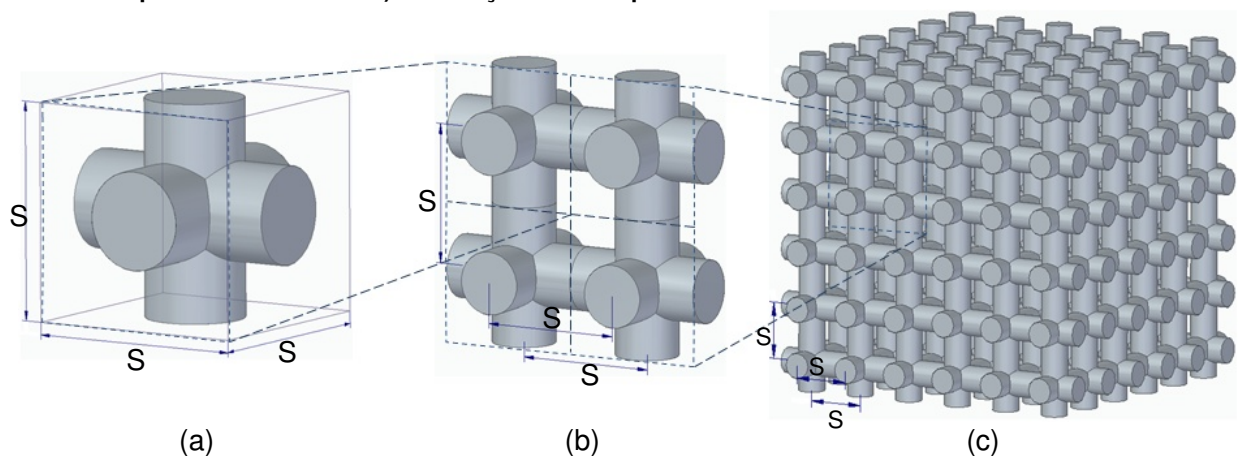


Fonte: Autoria própria (2022).

a Figura 5.2 (b) representa uma simplificação periódica do meio poroso, realizada para identificar o padrão de repetição. A Figura 5.2 (c) é o modelo em 3D idealizado do meio poroso bidirecional.

A configuração "tridirecional", cujo REV é ilustrado na Figura 5.3, é composta por filamentos cilíndricos dispostos nas três direções, com espaçamento de S entre centros dos filamentos. O escoamento ocorre em paralelo aos filamentos em uma das direções e, conseqüentemente, perpendicular às outras direções.

Figura 5.3 – Simplificação ao REV do meio poroso tridirecional com $\phi = 0,65$: a) REV, b) simplificação periódica do meio e c) idealização do meio poroso.



Fonte: Autoria própria (2022).

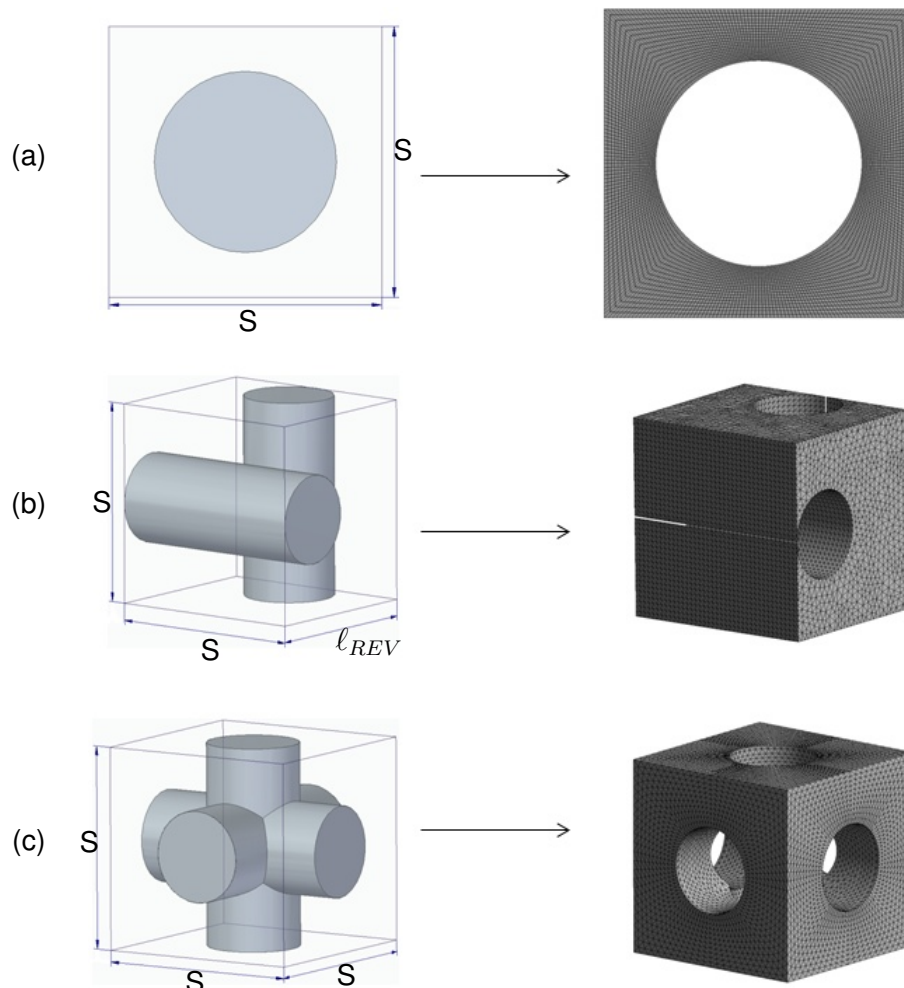
A Figura 5.3 (a) ilustra o REV utilizado nas simulações, de formato cúbico com dimensões iguais a S . Da mesma forma que no meio poroso anterior, uma simplificação periódica é apresentada na Figura 5.3 (b) para identificar o padrão de repetição. A Figura 5.3 (c) apresenta o meio poroso tridirecional idealizado.

Tanto a geometria unidirecional quanto a bidirecional apresentam um valor limite de porosidade, $\phi_{\text{limite}} = 0,215$, visto que δ_{min} tende a zero, isto é, os filamentos em mesma camada encostam e, portanto, não existe escoamento para valores menores de ϕ (TAMAYOL; BAHRAMI, 2011).

Visando a solução numérica nos meios propostos, testes de malha foram realizados utilizando os mesmos parâmetros das malhas descritas na Seção 4.3. Resultados foram discutidos no APÊNDICE A.

As Figuras 5.4 (a), (b) e (c) ilustram as malhas geradas sobre os escoamentos dos REVs dos meios, respectivamente, unidirecional, bidirecional e tridirecional, para $\phi = 0,65$. As malhas apresentadas possuem 12.800 elementos no REV unidirecional, 57.354 elementos no REV bidirecional e 73.305 elementos no REV tridirecional.

Figura 5.4 – Ilustração de malhas para meios porosos com filamentos cilíndricos a) unidirecional, b) bidirecional e c) tridirecional.



Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 5.4 (a), o REV obtido para o meio poroso unidirecional refere-se a uma orientação bidimensional, o que simplifica a solução por permitir o uso da malha estruturada. A malha da Figura 5.4 (b) para o meio bidirecional tem forma similar à malha da Figura 4.13 (b), conforme esperado dada a semelhança dos REVs. A malha utilizada no meio tridirecional, na

Figura 5.4 (c), também não é regular, visto a necessidade de um alto número de elementos para obter tal disposição em REV's tridimensionais.

Para as simulações das três geometrias, definiu-se $\rho = 1$ e $\mu = 1$ para o fluido, a distância entre centros dos filamentos $S = 1$ e os valores de d foram calculados para cada ϕ de acordo com as equações de Tamayol e Bahrami (2011). Embora o problema seja adimensional, unidades de medidas foram utilizadas para trabalhar com o software FLUENT (ANSYS INC., 2009). Por este motivo, os resultados nesta seção são apresentados no Sistema Internacional de Unidades (SI), sendo, por exemplo, a massa específica em (kg/m^3), a viscosidade em ($kg/m.s$), a velocidade em (m/s) e a pressão em (Pa).

A verificação do regime de Darcy foi realizada para os três meios porosos estudados. Para que o escoamento esteja em regime de Darcy, é necessário que a relação entre ΔP e U_D seja linear e o número de Reynolds seja baixo. Portanto, definiu-se como critério que o número de Reynolds local máximo (Re_{max}), conforme definido no APÊNDICE B, deve ser menor que 0,1 para garantir o regime de Darcy.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados das verificações do regime de Darcy para os meios porosos unidirecional, bidirecional e tridirecional com $\phi = 0,75$, que é o maior valor de ϕ simulado. Como observado na literatura, para as condições de contorno de periodicidade e ΔP constante, U_D diminui com a redução de ϕ , e por isto o teste é realizado em $\phi = 0,75$ visando o maior Re_{max} .

Tabela 5.1 – Velocidade média (U_D), permeabilidade (K) e número de Reynolds local máximo (Re_{max}) para diferentes valores de ΔP com $\phi = 0,75$.

Tipo de Meio Poroso	ΔP (Pa)	U_D (m/s)	K (m^2)	Re_{max}
Unidirecional	0,12	$1,56891 \times 10^{-3}$	$1,30742 \times 10^{-2}$	$5,40511 \times 10^{-3}$
	1,2	$1,56892 \times 10^{-2}$	$1,30743 \times 10^{-2}$	$5,40514 \times 10^{-2}$
	12	$1,56905 \times 10^{-1}$	$1,30754 \times 10^{-2}$	$5,40541 \times 10^{-1}$
	120	$1,56855 \times 10^0$	$1,30712 \times 10^{-2}$	$5,40164 \times 10^0$
	1.200	$1,46933 \times 10^1$	$1,22444 \times 10^{-2}$	$5,00130 \times 10^1$
Bidirecional	0,12	$2,55409 \times 10^{-3}$	$1,35499 \times 10^{-2}$	$5,13521 \times 10^{-3}$
	1,2	$2,55406 \times 10^{-2}$	$1,35497 \times 10^{-2}$	$5,13513 \times 10^{-2}$
	12	$2,55377 \times 10^{-1}$	$1,35482 \times 10^{-2}$	$5,13444 \times 10^{-1}$
	120	$2,54714 \times 10^0$	$1,35130 \times 10^{-2}$	$5,12513 \times 10^0$
	1.200	$2,40567 \times 10^1$	$1,27625 \times 10^{-2}$	$4,99044 \times 10^1$
Tridirecional	0,12	$1,63082 \times 10^{-3}$	$1,35902 \times 10^{-2}$	$6,28770 \times 10^{-3}$
	1,2	$1,63082 \times 10^{-2}$	$1,35902 \times 10^{-2}$	$6,28765 \times 10^{-2}$
	12	$1,63077 \times 10^{-1}$	$1,35897 \times 10^{-2}$	$6,28674 \times 10^{-1}$
	120	$1,62660 \times 10^0$	$1,35550 \times 10^{-2}$	$6,25099 \times 10^0$
	1.200	$1,47783 \times 10^1$	$1,23152 \times 10^{-2}$	$5,33953 \times 10^1$

Fonte: Autoria própria (2022).

Nos arranjos estudados, observou-se que a partir de $\Delta P \geq 120 Pa$ a relação entre ΔP e U_D deixa de ser linear, indicando que a equação de Hazen-Darcy não é apropriada nestes casos. Além disto, o fato de $Re_{max} > 0,1$ a partir de $\Delta P \geq 12 Pa$ nos três casos, ultrapassa o critério estabelecido anteriormente. Portanto, os três tipos de arranjos foram simulados com $\Delta P = 1,2 Pa$.

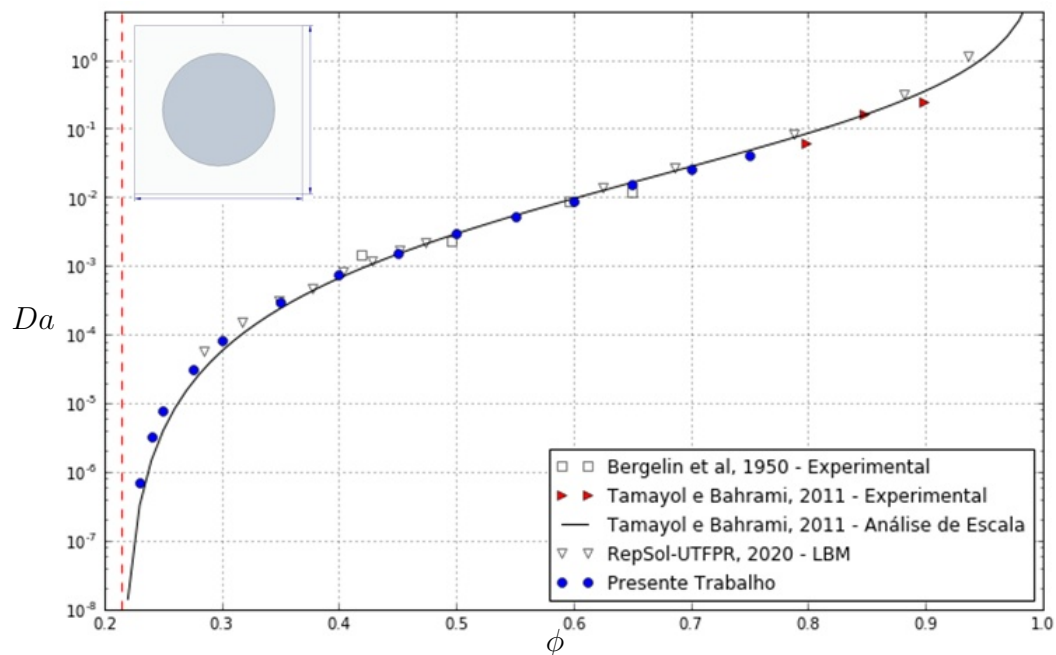
Apesar dos resultados similares, mais estudos seriam necessários para afirmar que meios porosos compostos por filamentos apresentam escoamento em regime de Darcy para $\Delta P = 1,2 Pa$ independente da disposição dos filamentos no espaço. Não obstante, a mesma metodologia será estendida para meios porosos compostos por filamentos elípticos.

As permeabilidades obtidas foram adimensionalizadas pelos diâmetros dos filamentos resultando no grupo adimensional de Darcy (Da), definido como:

$$Da_d = \frac{K}{d^2}, \quad (5.1)$$

Os resultados para o meio poroso unidirecional foram comparados com resultados experimentais de Bergelin *et al.* (1950), experimentais e analíticos de Tamayol e Bahrami (2011) e com os do método de Lattice Boltzmann - LBM, obtido no Laboratório de Meios Porosos (REPSOL-UTFPR, 2020). A Figura 5.5 apresenta o gráfico de Da por ϕ para o meio poroso unidirecional. O tracejado em vermelho nos gráficos a seguir representam ϕ_{limite} , i.e., valor de porosidade no qual os filamentos encostam e a permeabilidade se torna zero.

Figura 5.5 – Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para meio poroso unidirecional.



Fonte: Autoria própria (2022).

A correlação obtida via análise de escala por Tamayol e Bahrami (2011) que está representada na Figura 5.5 é dada por:

$$Da_d = \frac{0,16}{\sqrt{\phi}} \left\{ \frac{\pi}{[4(1-\phi)]} - 3\sqrt{\frac{\pi}{[4(1-\phi)]}} + 3 - \sqrt{\frac{[4(1-\phi)]}{\pi}} \right\} \quad (5.2)$$

sendo que a constante 0,16 é o coeficiente de ajuste escolhido pelos autores via comparação com os resultados disponíveis na literatura.

A permeabilidade obtida por MVF decresce conforme a porosidade diminui, de acordo com o esperado pelos trabalhos da literatura, além de apresentar valores próximos aos resultados de referência. Os valores de K obtidos variam de 10^8 a $10^{13} mD$ para a porosidade variando de 0,23 a 0,75.

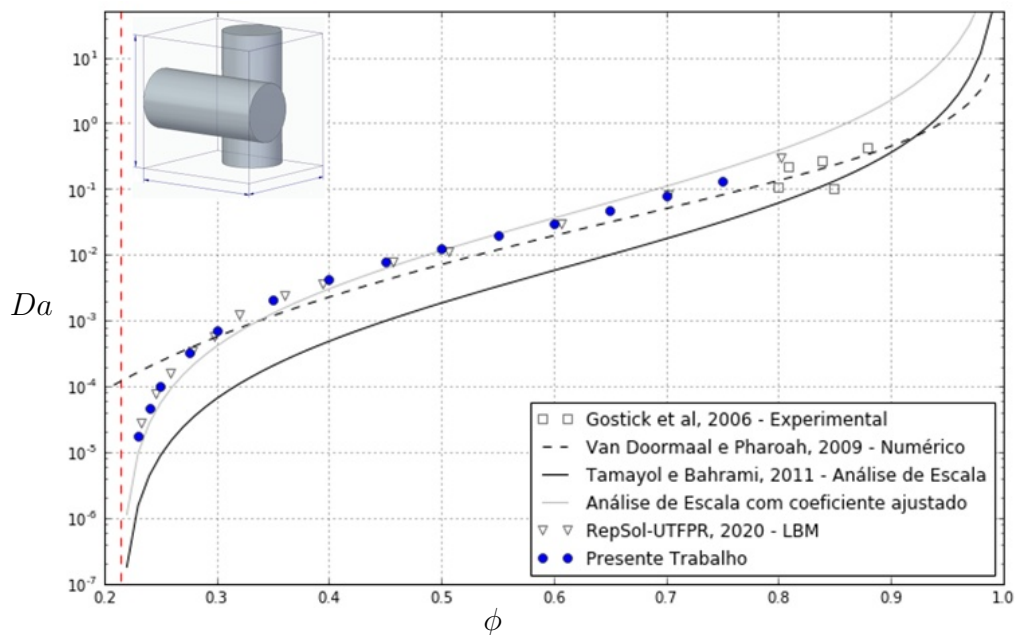
Embora não tenham obtido resultados experimentais para o meio poroso bidirecional, Tamayol e Bahrami (2011) apresentaram a correlação abaixo, obtida via análise de escala:

$$Da_d = 0,008\sqrt{\phi} \left\{ \left[\frac{\pi}{4(1-\phi)} \right]^2 - 2\frac{\pi}{4(1-\phi)} + 1 \right\} \quad (5.3)$$

sendo que a constante 0,008 é o coeficiente de ajuste encontrado pelos autores via comparação com os resultados disponíveis na literatura.

A Figura 5.6 apresenta os resultados numéricos para Da em função de ϕ comparados com os resultados experimentais de Gostick *et al.* (2006), com as correlações de Van Doormaal e Pharoah (2009) e Tamayol e Bahrami (2011), e com os resultados de LBM (REPSOL-UTFPR, 2020).

Figura 5.6 – Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para meio poroso bidirecional.



Fonte: Autoria própria (2022).

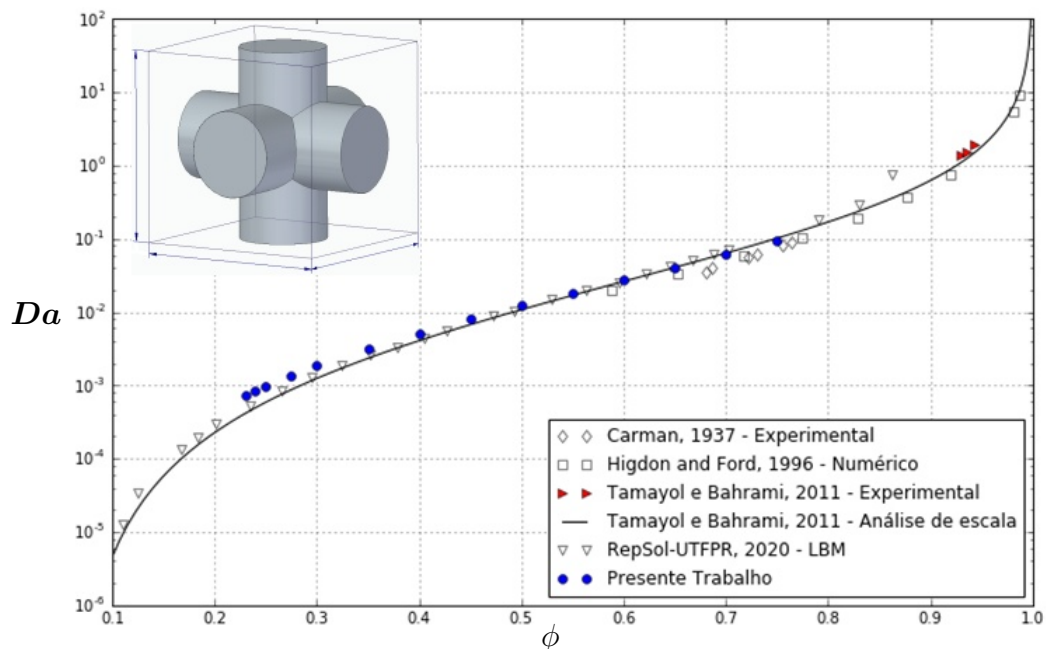
Os números de Darcy obtidos por MVF e LBM possuem valores distantes da correlação proposta por Tamayol e Bahrami (2011), mas possuem tendências similares. Sendo assim, alterar o coeficiente de ajuste da Equação 5.3 permite ajustar a curva aos resultados numéricos. Para demonstrar isto, a curva denominada Análise de Escala com coeficiente ajustado na Figura 5.6 é a representação da Equação 5.3 com coeficiente de ajuste igual a 0,05. Esta análise decorre principalmente de Tamayol e Bahrami (2011) terem definido o coeficiente de ajuste ao

comparar a curva preferencialmente a resultados experimentais, por isto alterar o coeficiente permite melhorar o ajuste a resultados numéricos.

Os valores de K obtidos por MVF variam de 10^9 a 10^{13} mD para a porosidade variando de 0,23 a 0,75. Vale ressaltar que, apesar dos resultados próximos, os trabalhos de Gostick *et al.* (2006) e de Van Doormaal e Pharoah (2009), diferente do apresentado neste estudo, caracterizam a permeabilidade de meios porosos formados por filamentos desorganizados nas camadas.

Com relação à configuração tridirecional, o gráfico da Figura 5.7 mostra os valores de Da em função de ϕ obtidos neste trabalho comparados com os resultados experimentais de Carman (1937), com o estudo numérico de Higdon e Ford (1996), com os experimentais e analíticos de Tamayol e Bahrami (2011) e os obtidos por LBM (REPSOL-UTFPR, 2020).

Figura 5.7 – Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para meio poroso tridirecional.



A correlação obtida via análise de escala para o meio poroso tridirecional por Tamayol e Bahrami (2011) é dada por:

$$Da_d = 0,08 \frac{(S - d)^4}{S^2 d^2 \phi^{0.3}} \quad (5.4)$$

sendo que a constante 0,08 é o coeficiente de ajuste determinado pelos autores via comparação com os resultados disponíveis na literatura.

Os resultados obtidos por MVF e LBM são próximos para porosidades acima de 0,40, com variação mais notável em porosidades abaixo de 0,30. Os valores de K obtidos por MVF variam de 10^{11} a 10^{13} mD para a porosidade variando de 0,23 a 0,75. Ademais, os números de Darcy obtidos são próximos dos resultados da literatura, apesar da falta de resultados experimentais para baixas porosidades.

Para quantificar quão próximos os resultados encontrados por MVF foram em comparação aos resultados de Tamayol e Bahrami (2011), calculou-se a diferença percentual entre resultados (E_K) da forma:

$$E_K = 1 - \frac{Da_{\text{Correlação}}}{Da_{\text{MVF}}} \quad (5.5)$$

sendo Da_{MVF} os resultados obtidos por MVF e $Da_{\text{Correlação}}$ os obtidos pelas Equações 5.2, 5.3 ou 5.4.

A Tabela 5.2 a seguir apresenta as diferenças percentuais calculadas para os meios unidirecional, bidirecional e tridirecional. Para o meio bidirecional, são apresentadas as diferenças calculadas para os coeficientes de ajuste 0,008 e 0,05 para demonstrar a melhoria ilustrada anteriormente na Figura 5.6.

Tabela 5.2 – Diferenças Percentuais entre Da_d obtidos por correlações e por MVF.

ϕ (%)	$E_{K,\text{Unidirecional}}$ (%)	$E_{K,\text{Bidirecional}}$ (%)		$E_{K,\text{Tridirecional}}$ (%)
		0,008	0,05	
75,0	16,53	74,71	31,20	4,58
70,0	10,58	75,25	28,37	4,48
65,0	8,93	76,35	22,69	1,67
60,0	6,87	77,87	14,82	2,60
55,0	4,22	79,54	6,13	8,00
50,0	0,89	81,27	2,82	14,03
45,0	3,51	82,96	11,59	20,38
40,0	9,34	84,41	19,11	16,15
35,0	17,33	85,48	24,67	22,18
30,0	29,26	85,87	26,70	27,22
27,5	37,30	85,79	26,27	29,08
25,0	49,05	85,61	25,33	41,96
24,0	55,38	84,92	21,76	44,74
23,0	52,90	82,26	7,99	47,36

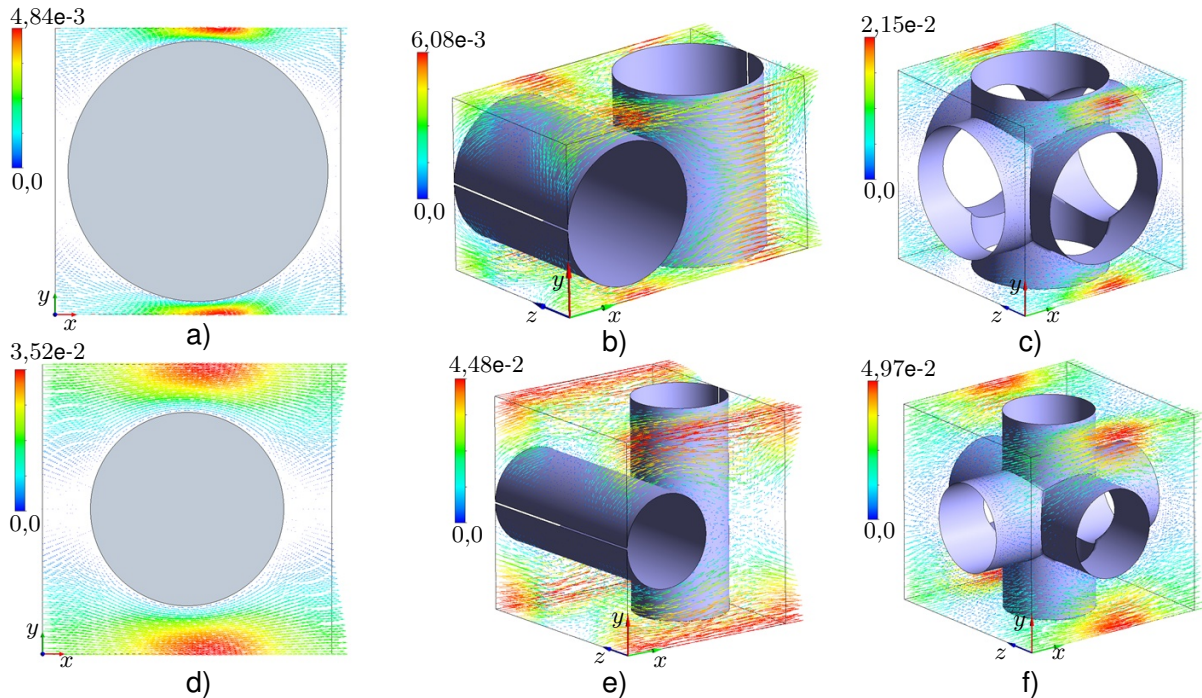
Fonte: Autoria própria (2022).

Notou-se para os meios unidirecional e tridirecional um acréscimo da diferença percentual ao diminuir a porosidade, sendo 55,38% a maior diferença obtida. Entretanto, a diferença de 55,38% representa uma alteração da permeabilidade na ordem de $10^{-8} m^2$ e, portanto, pode ser considerada satisfatória. Quanto ao meio bidirecional, a Tabela 5.2 mostrou uma redução significativa de E_K ao alterar o coeficiente, permitindo melhor ajuste da curva, conforme discutido anteriormente.

Para complementar, a Figura 5.8 apresenta os campos de vetores para os meios porosos discutidos para ilustrar os escoamentos simulados por MVF. As Figuras 5.8 (a), (b) e (c) apresentam os campos de vetores em $\phi = 0,35$ dos meios, respectivamente, unidirecional, bidirecional e tridirecional, enquanto as Figuras 5.8 (d), (e) e (f) apresentam os campos de vetores em $\phi = 0,65$ dos meios unidirecional, bidirecional e tridirecional, nesta ordem.

Observou-se nas Figuras 5.8 (a) e (d) como aumentar ϕ do meio unidirecional leva a maiores velocidades e, conseqüentemente, a maiores Da , como mostra a Figura 5.5. Como discutido anteriormente, este comportamento é esperado devido a condição de contorno de ΔP

Figura 5.8 – Campos de vetores de velocidade para os meios com $\phi = 0,35$: a) Unidirecional, b) Bidirecional, c) Tridirecional, e os meios com $\phi = 0,65$: d) Unidirecional, e) Bidirecional e f) Tridirecional.



Fonte: Autoria própria (2022).

constante, uma vez que impor o mesmo ΔP nos diferentes meios porosos leva a uma maior perda de carga nos meios com mais sólido, resultando em uma redução da velocidade.

Da mesma forma, no meio bidirecional das Figuras 5.8 (b) e (e) foi observado um aumento das velocidades ao aumentar ϕ . Para o meio tridirecional das Figuras 5.8 (c) e (f), observou-se um aumento menor das velocidades em relação aos outros meios. Isto decorre da inclinação da curva mostrada na Figura 5.7 ser um pouco menor do que as curvas para os meios unidirecional e bidirecional, Figuras 5.5 e 5.6.

Apesar das diferenças destacadas, especialmente no caso do meio poroso bidirecional, os resultados de validação e verificação foram satisfatórios para os meios porosos estudados, visto que foi possível ajustar os resultados por MVF aos resultados de Tamayol e Bahrami (2011).

Para a análise de escala do meio poroso bidirecional foi necessário mudar o coeficiente de ajuste definido por Tamayol e Bahrami (2011) para verificar os resultados por MVF satisfatoriamente, o que é justificável uma vez que o coeficiente de ajuste é definido a partir de resultados de referência escolhidos pelos autores.

Concluiu-se a partir destes resultados que o método de CFD escolhido é adequado para as simulações dos escoamentos em meios porosos formados por filamentos sólidos. Além disto, verificou-se como a metodologia de escolha de REV's para os meios porosos é adequada, permitindo obter resultados coerentes sem a necessidade de simular o meio poroso inteiro. A partir disto, a metodologia é então empregada para meios porosos compostos de filamentos elípticos.

5.2 Resultados para Meios Porosos de Filamentos Elípticos

Esta seção apresenta os resultados de permeabilidade e tortuosidade para meios porosos compostos por filamentos de seção transversal elíptica. Primeiramente a verificação do regime de Darcy é apresentada para escolha da diferença de pressão adequada para as simulações. Em seguida, os resultados numéricos de permeabilidade por MVF são apresentados e verificados por resultados numéricos obtidos pelo grupo por LBM. Com os resultados verificados, uma análise de escala é realizada para encontrar uma correlação para a permeabilidade, que por sua vez é utilizada para avaliar qual o modelo de cálculo de tortuosidade mais apropriado para o presente trabalho. Por fim, os resultados numéricos e teóricos são validados por resultados experimentais, seguido de uma comparação com valores de permeabilidade de rochas reais da literatura.

A massa específica e a viscosidade dinâmica foram $\rho = 1$ e $\mu = 1$ para o fluido de trabalho. Assumiu-se a distância entre centros dos filamentos como $S = 1$ para facilitar os cálculos. Realizou-se testes de malha para decidir os números de elementos de malha necessários em cada configuração. Estão expostos no APÊNDICE A os 58 principais testes de malha realizados.

5.2.1 Verificação do regime de Darcy

A Tabela 5.3 apresenta os resultados da verificação do regime de Darcy realizada ao variar ΔP e comparando os valores da velocidade média no meio U_D , da permeabilidade K e do número de Reynolds local máximo Re_{max} . O teste foi conduzido no meio poroso L01 A90 S00 (1 filamento na estrutura, 90 graus de ângulo de varredura e 0% de desalinhamento). Para garantir o regime de Darcy, escolheu-se novamente $Re_{max} < 0,1$ como critério.

Tabela 5.3 – Velocidade média (U_D), permeabilidade (K) e Número de Reynolds máximo (Re_{max}) para valores de ΔP com $\phi = 0,75$ no meio poroso L01 A90 S00.

ΔP (Pa)	U_D (m/s)	K (m ²)	Re_{max}
0,12	$3,0712 \times 10^{-3}$	$1,1109 \times 10^{-2}$	$4,8262 \times 10^{-3}$
1,2	$3,0712 \times 10^{-2}$	$1,1109 \times 10^{-2}$	$4,8261 \times 10^{-2}$
12	$3,0707 \times 10^{-1}$	$1,1107 \times 10^{-2}$	$4,8252 \times 10^{-1}$
120	$3,0637 \times 10^0$	$1,1082 \times 10^{-2}$	$4,8152 \times 10^0$
1.200	$2,9386 \times 10^1$	$1,0629 \times 10^{-2}$	$4,6672 \times 10^1$

Fonte: Autoria própria (2022).

Verificou-se que não existe linearidade para $\Delta P \geq 120 Pa$ e que $Re_{max} > 0,1$ para $\Delta P \geq 12 Pa$. Portanto, escolheu-se $\Delta P = 1,2 Pa$ para as simulações em todas as configurações de meios porosos de filamentos elípticos.

5.2.2 Resultados de Permeabilidade

Tomando-se como comprimento característico o quadrado do raio menor da elipse (b), define-se um novo número de Darcy (Da):

$$Da_b = \frac{K}{b^2} \quad (5.6)$$

Os resultados de número de Darcy obtidos por MVF foram comparados com resultados obtidos pelo grupo por LBM (REPSOL-UTFPR, 2020). Bons resultados foram observados na verificação, como demonstra os gráficos de Da por ϕ a seguir. Como definido na Seção 4.1, os meios porosos nos gráficos são referenciados pelos nomes no formato $L(N_f) A(\theta) S(De)$, sendo $L(N_f)$ o número de filamentos unidos, $A(\theta)$ o ângulo de varredura e $S(De)$ o desalinhamento entre camadas.

As Figuras 5.9 (a), (b) e (c) apresentam e comparam aos resultados por LBM, os números de Darcy por ϕ para os meios porosos $L01 A90 S00$, $L01 A90 S25$ e $L01 A90 S50$, ou seja, os meios porosos com 1 filamento na estrutura, 90° de ângulo de varredura e diferentes desalinhamentos. A Figura 5.9 (d) compara os três meios porosos para avaliar o efeito do desalinhamento (De) sobre Da .

Os números de Darcy obtidos por MVF nas Figuras 5.9 (a), (b) e (c) diminuem com o decréscimo de ϕ do meio poroso, conforme esperado com base nos resultados da literatura e pelos resultados de validação do método. O tempo computacional para a convergência foi em média 12 horas¹ para $N_f = 1$ e $\theta = 90^\circ$.

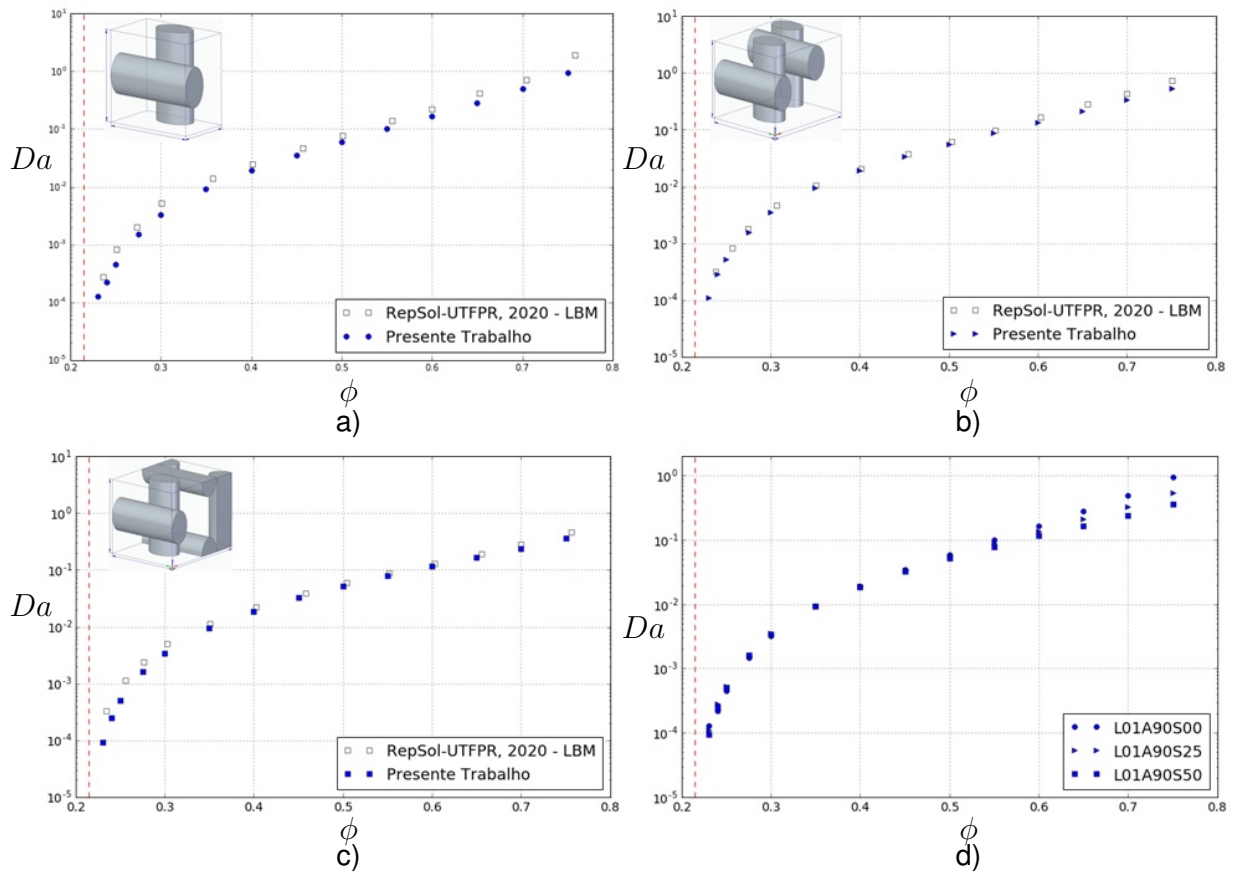
Notou-se na Figura 5.9 (d) uma diminuição das permeabilidades com o aumento de De , com variação mais notável em $\phi > 0,60$. De modo geral, considerou-se baixa a influência de De nos meios porosos com $N_f = 1$ e $\theta = 90^\circ$. Um possível fator que leva à baixa influência de De são as condições de regime permanente e de não deslizamento nas paredes, que limitam o escoamento em porosidades baixas, causando zonas de recirculação entre os filamentos que afetam a permeabilidade.

Quanto à verificação entre métodos de CFD nas Figuras 5.9 (a), (b) e (c), os resultados de Da obtidos por MVF foram pouco menores do que os resultados obtidos por LBM para os casos com $N_f = 1$ e $\theta = 90^\circ$, indicando um bom ajuste entre os métodos. Um aspecto importante do LBM é a utilização de malhas regulares e estruturadas para a solução, o que resulta em valores de porosidade não exatos devido à malha não contornar exatamente as superfícies dos filamentos no REV, ou seja, a permeabilidade obtida por MVF para $\phi = 0,75$, por exemplo, precisaria ser comparada à permeabilidade por LBM para $\phi = 0,758$.

Para contornar este problema, uma interpolação foi realizada nos resultados por LBM para obter as permeabilidades nos valores exatos de ϕ . A Tabela 5.4 apresenta os resultados para os meios porosos $L01 A90 S00$, $L01 A90 S25$ e $L01 A90 S50$, comparando as permeabili-

¹ CPU: Intel(R) Core(TM) i5-4210U; RAM: 8,00 GB.

Figura 5.9 – Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) $L01 A90 S00$, b) $L01 A90 S25$, c) $L01 A90 S50$ e d) comparação entre os três.



Fonte: Autoria própria (2022).

dades obtidas por MVF (K_{MVF}) e as permeabilidades obtidas por LBM (K_{LBM}) pela diferença percentual entre métodos (E_K), calculada por:

$$E_K = \frac{K_{LBM} - K_{MVF}}{K_{LBM}} \quad (5.7)$$

Além disto, a Tabela 5.4 apresenta as permeabilidades em unidade mD . Para realizar a conversão a partir dos resultados adimensionais, tomou-se $b = 0,75 \text{ mm}$.

Para os três meios porosos, a diferença E_K é maior para $\phi > 0,7$ e $\phi < 0,4$ em comparação com porosidades intermediárias, uma vez que a inclinação das curvas de Da aumentam nitidamente em baixas e altas porosidades. Nota-se uma exceção para $L01 A90 S25$ em $\phi = 0,23$, que apresenta valor baixo de E_K em comparação aos outros. A mais provável hipótese para justificar isto é que a interpolação ser linear leva a maiores erros em regiões de alta inclinação da curva.

O maior valor de E_K foi observado no meio poroso $L01 A90 S50$ em $\phi = 0,24$. É possível considerar a diferença 54,381% aceitável por a escala ser muito baixa no contexto de

Tabela 5.4 – Comparação entre valores de K (mD) obtidos por MVF e por LBM para $N_f = 1$ e $\theta = 90^\circ$.

ϕ (%)	L01A90S00			L01A90S25			L01A90S50		
	K_{MVF}	K_{LBM}	$E_K(\%)$	K_{MVF}	K_{LBM}	$E_K(\%)$	K_{MVF}	K_{LBM}	$E_K(\%)$
75,0	$7,121 \cdot 10^8$	$1,298 \cdot 10^9$	45,133	$4,008 \cdot 10^8$	$5,482 \cdot 10^8$	26,892	$2,675 \cdot 10^8$	$3,337 \cdot 10^8$	19,848
70,0	$3,722 \cdot 10^8$	$5,075 \cdot 10^8$	26,661	$2,490 \cdot 10^8$	$3,240 \cdot 10^8$	23,157	$1,806 \cdot 10^8$	$2,085 \cdot 10^8$	13,380
65,0	$2,113 \cdot 10^8$	$3,031 \cdot 10^8$	30,290	$1,601 \cdot 10^8$	$2,005 \cdot 10^8$	20,136	$1,251 \cdot 10^8$	$1,408 \cdot 10^8$	11,188
60,0	$1,238 \cdot 10^8$	$1,665 \cdot 10^8$	25,662	$1,024 \cdot 10^8$	$1,230 \cdot 10^8$	16,709	$8,675 \cdot 10^7$	$9,635 \cdot 10^7$	9,958
55,0	$7,577 \cdot 10^7$	$9,771 \cdot 10^7$	22,450	$6,581 \cdot 10^7$	$7,349 \cdot 10^7$	10,446	$5,864 \cdot 10^7$	$6,503 \cdot 10^7$	9,837
50,0	$4,423 \cdot 10^7$	$5,606 \cdot 10^7$	21,096	$4,155 \cdot 10^7$	$4,568 \cdot 10^7$	9,048	$3,870 \cdot 10^7$	$4,325 \cdot 10^7$	10,519
45,0	$2,593 \cdot 10^7$	$3,288 \cdot 10^7$	21,136	$2,523 \cdot 10^7$	$2,761 \cdot 10^7$	8,613	$2,421 \cdot 10^7$	$2,769 \cdot 10^7$	12,559
40,0	$1,433 \cdot 10^7$	$1,820 \cdot 10^7$	21,223	$1,426 \cdot 10^7$	$1,559 \cdot 10^7$	8,537	$1,404 \cdot 10^7$	$1,622 \cdot 10^7$	13,453
35,0	$6,953 \cdot 10^6$	$9,671 \cdot 10^6$	28,106	$7,036 \cdot 10^6$	$7,775 \cdot 10^6$	9,508	$7,034 \cdot 10^6$	$8,450 \cdot 10^6$	16,757
30,0	$2,448 \cdot 10^6$	$3,785 \cdot 10^6$	35,336	$2,666 \cdot 10^6$	$3,029 \cdot 10^6$	11,984	$2,559 \cdot 10^6$	$3,518 \cdot 10^6$	27,258
27,5	$1,117 \cdot 10^6$	$1,662 \cdot 10^6$	32,778	$1,190 \cdot 10^6$	$1,393 \cdot 10^6$	14,570	$1,215 \cdot 10^6$	$1,713 \cdot 10^6$	29,081
25,0	$3,373 \cdot 10^5$	$5,879 \cdot 10^5$	42,625	$3,944 \cdot 10^5$	$4,825 \cdot 10^5$	18,259	$3,786 \cdot 10^5$	$6,837 \cdot 10^5$	44,628
24,0	$1,649 \cdot 10^5$	$3,169 \cdot 10^5$	47,951	$2,114 \cdot 10^5$	$2,804 \cdot 10^5$	24,600	$1,873 \cdot 10^5$	$4,106 \cdot 10^5$	54,381
23,0	$9,674 \cdot 10^4$	$1,651 \cdot 10^5$	41,417	$8,396 \cdot 10^4$	$7,832 \cdot 10^4$	7,206	$7,007 \cdot 10^4$	$1,375 \cdot 10^5$	49,049
Média			31,562			14,976			22,992

Fonte: Autoria própria (2022).

permeabilidades, ou seja, uma diferença percentual de 54,381% representa uma mudança do valor de permeabilidade na ordem de $10^{-8} m^2$.

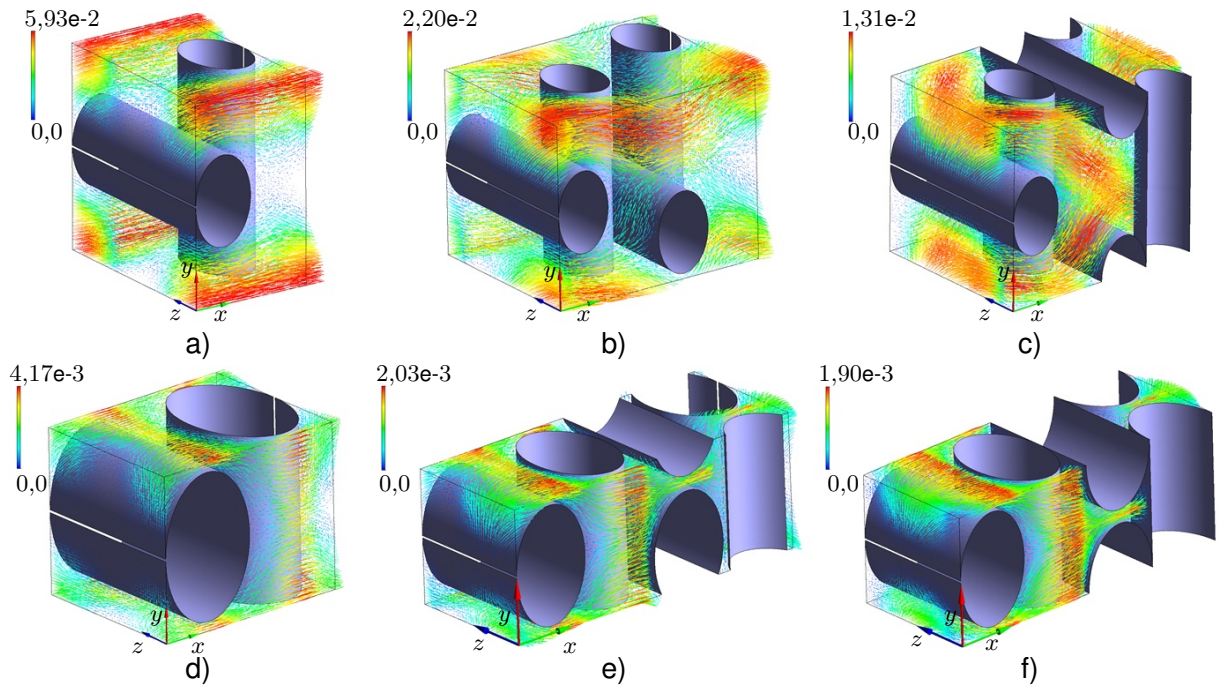
Os principais motivos para as diferenças entre os métodos estão relacionados às malhas computacionais utilizadas e à interpolação realizada nos resultados por LBM. Além da malha para o LBM ser regular e estruturada, as primeiras simulações possuíam uma limitação para quantia máxima de *lattices* de 8.000.000. Posteriormente, este problema foi contornado e uma quantia maior de *lattices* pôde ser utilizada.

Os campos de vetores de velocidade podem ilustrar o escoamento nos meios porosos. As Figuras 5.10 (a), (b) e (c) apresentam, respectivamente, os campos de vetores para $\phi = 0,65$ dos meios *L01 A90 S00*, *L01 A90 S25* e *L01 A90 S50*. Nas Figuras 5.10 (d), (e) e (f) são apresentados os campos de vetores para $\phi = 0,30$ dos meios *L01 A90 S00*, *L01 A90 S25* e *L01 A90 S50*, nesta ordem.

Notou-se nas Figuras 5.10 (a), (b) e (c) o desvio no escoamento com o aumento do desalinhamento De , além da diminuição da escala de velocidades, que leva a menores Da . Entre as Figuras 5.10 (d), (e) e (f), a diferença no escoamento é bem sutil, demonstrando a menor influência de De para baixos valores de ϕ . Além disto, a escala de velocidades reduz significativamente entre as Figuras 5.10 (a) e (d), demonstrando a influência de ϕ em Da , assim como entre as Figuras 5.10 (b) e (e) e as Figuras 5.10 (c) e (f).

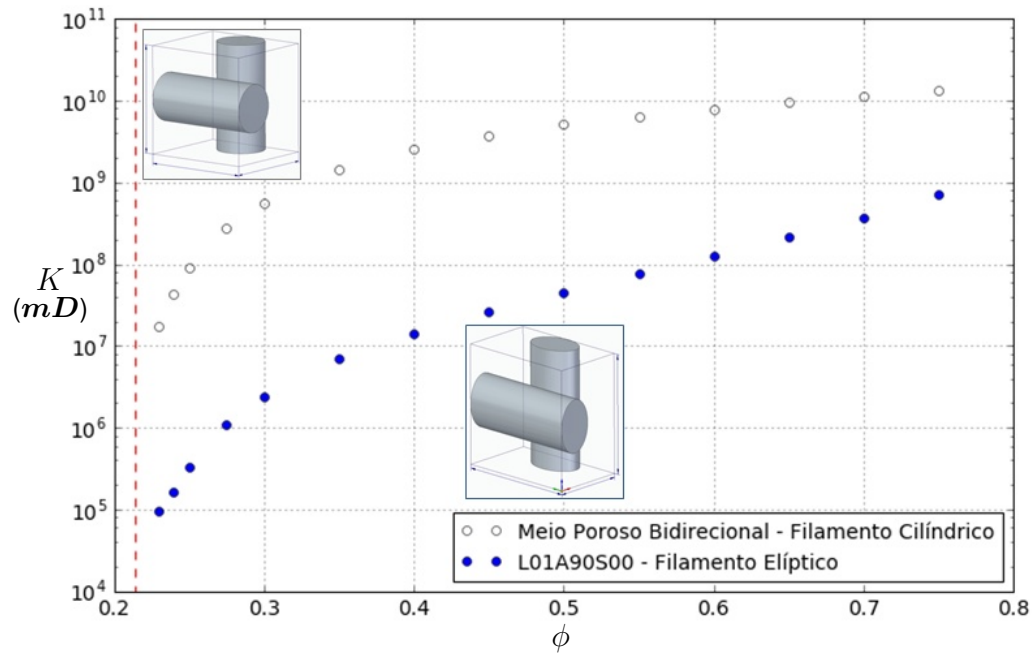
Como já mencionado, a única diferença entre o meio poroso *L01 A90 S00* e o meio poroso bidirecional estudado no trabalho de Tamayol e Bahrami (2011) é o formato da seção transversal dos filamentos. Para avaliar a influência do formato dos filamentos, a Figura 5.11 apresenta o gráfico de K por ϕ para os meios porosos bidirecional, com filamentos cilíndricos, e *L01 A90 S00*, com filamentos elípticos.

Figura 5.10 – Campos de vetores de velocidade para os meios com $\phi = 0,65$: a) *L01 A90 S00*, b) *L01 A90 S25*, c) *L01 A90 S50*, e os meios com $\phi = 0,30$: d) *L01 A90 S00*, e) *L01 A90 S25* e f) *L01 A90 S50*.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 5.11 – Permeabilidade (K) por porosidade (ϕ) para os meios porosos bidirecional (filamento cilíndrico) e *L01 A90 S00* (filamento elíptico).



Fonte: Autoria própria (2022).

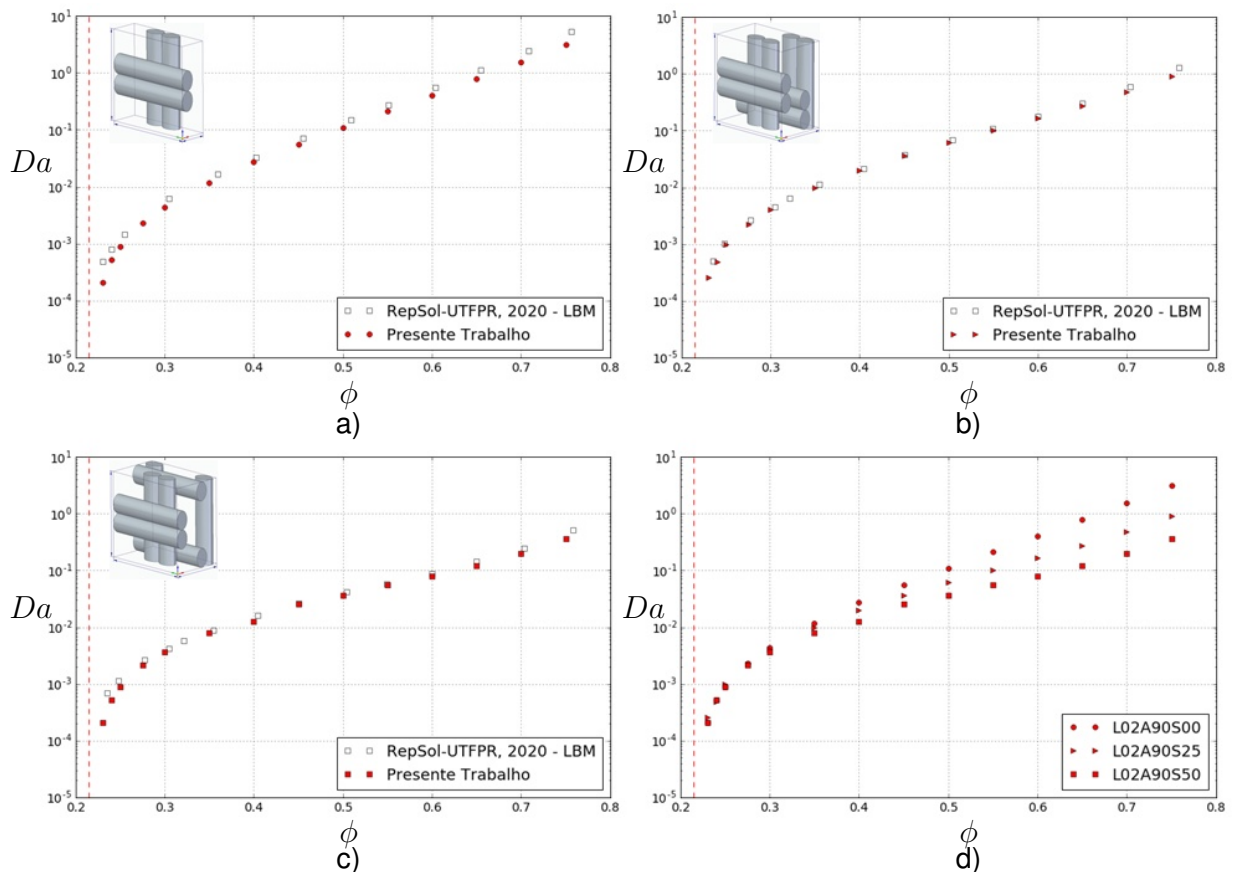
Observou-se menores valores de permeabilidade e uma maior inclinação da curva para os meios compostos de filamentos elípticos. A maior inclinação da curva para *L01 A90 S00* leva

a uma maior faixa de valores de permeabilidade, ou seja, K varia entre 10^5 e 10^9 mD para filamentos elípticos, enquanto varia entre 10^7 e 10^{10} mD para filamentos cilíndricos.

Portanto, os resultados da Figura 5.11 permitiram verificar a influência dos formatos dos poros sobre a permeabilidade, conforme foi discutido no Capítulo 3 pelos trabalhos de Ali e Sen (2017) e Li *et al.* (2018). Assim como na literatura, verificou-se que o meio poroso com menor K é o meio de geometria considerada mais complexa, isto é, o meio poroso com maior obstrução do escoamento devido aos filamentos elípticos. A seção transversal do filamento elíptico possui o diâmetro menor próximo do diâmetro do filamento cilíndrico, porém o diâmetro maior obstrui o escoamento criando zonas de recirculação, levando a menores velocidades.

As Figuras 5.12 (a), (b) e (c) apresentam, respectivamente, os números de Darcy por ϕ para os meios porosos $L02\ A90\ S00$, $L02\ A90\ S25$ e $L02\ A90\ S50$, comparando-os aos resultados do LBM. A Figura 5.12 (d) compara os três meios porosos para avaliar o efeito de De sobre Da para $N_f = 2$.

Figura 5.12 – Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) $L02\ A90\ S00$, b) $L02\ A90\ S25$, c) $L02\ A90\ S50$ e d) comparação entre os três.



Fonte: Autoria própria (2022).

O tempo computacional para convergência dos meios com $N_f = 2$ e $\theta = 90^\circ$ da Figura 5.12 foi em média 30 horas, chegando à pouco mais de 72 horas (3 dias) para os meios com $De = 50\%$ e $\phi < 0,35$. Nestes casos, alguns problemas de divergência foram contornados ao

reduzir os fatores de relaxação do método, o que permite reduzir as oscilações dos resíduos que levam à divergência, porém aumentam significativamente o tempo computacional do problema.

Para $De = 0\%$, nas Figuras 5.9 (a) e 5.12 (a), os números de Darcy são maiores para $N_f = 2$ em relação a $N_f = 1$. Isto ocorre devido a forma como os REV's são definidos, visto que a distância δ_{min} é maior nos meios com $N_f = 2$ para todas as porosidades simuladas. Observou-se ainda, na Figura 5.12 (d), que para $N_f = 2$ a influência de De para $\phi > 0.4$ foi mais significativa em comparação aos resultados para $N_f = 1$ da Figura 5.9 (d).

A Tabela 5.5 apresenta os resultados de $K (mD)$ para os meios porosos $L02 A90 S00$, $L02 A90 S25$ e $L02 A90 S50$, e E_K calculado entre os resultados obtidos por MVF e por LBM.

Tabela 5.5 – Comparação entre valores de $K (mD)$ obtidos por MVF e por LBM para $N_f = 2$ e $\theta = 90^\circ$.

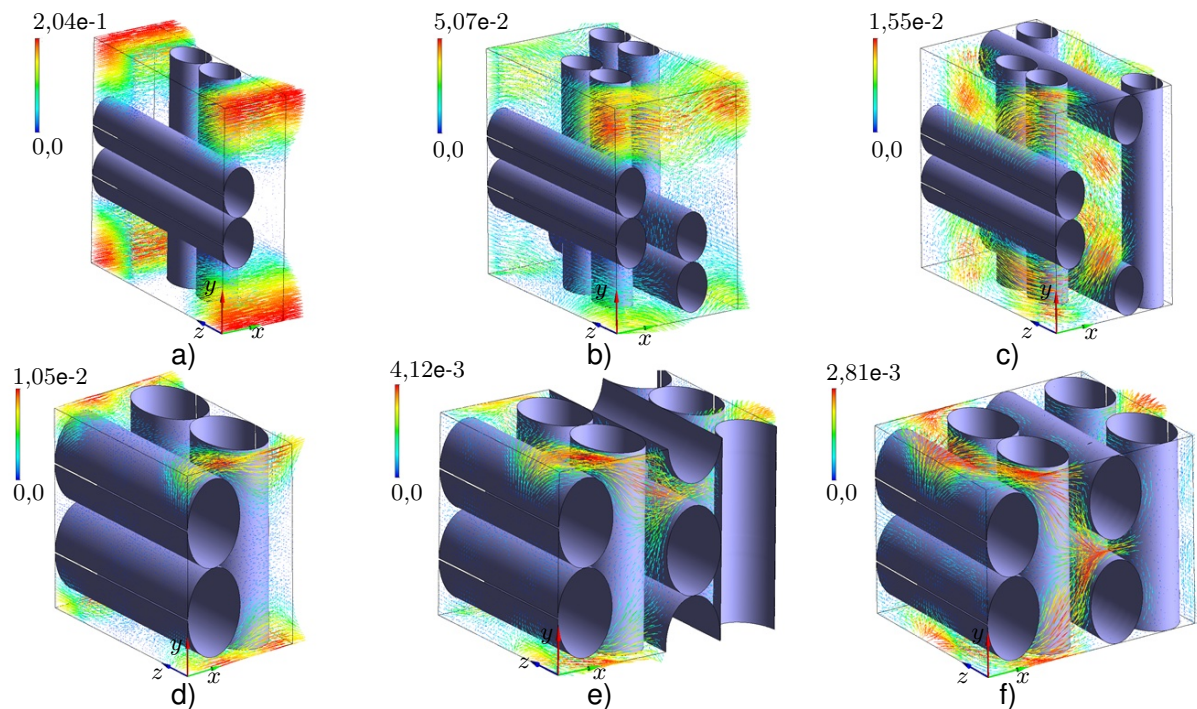
ϕ (%)	L02A90S00			L02A90S25			L02A90S50		
	K_{MVF}	K_{LBM}	$E_K(\%)$	K_{MVF}	K_{LBM}	$E_K(\%)$	K_{MVF}	K_{LBM}	$E_K(\%)$
75,0	2,334.10 ⁹	3,764.10 ⁹	38,004	6,856.10 ⁸	9,042.10 ⁸	24,177	2,707.10 ⁸	3,623.10 ⁸	25,290
70,0	1,145.10 ⁹	1,669.10 ⁹	31,389	3,570.10 ⁸	4,336.10 ⁸	17,654	1,483.10 ⁸	1,802.10 ⁸	17,680
65,0	5,876.10 ⁸	8,043.10 ⁸	26,940	2,047.10 ⁸	2,280.10 ⁸	10,200	9,097.10 ⁷	1,072.10 ⁸	15,178
60,0	3,062.10 ⁸	3,981.10 ⁸	23,091	1,234.10 ⁸	1,358.10 ⁸	9,119	6,008.10 ⁷	6,712.10 ⁷	10,492
55,0	1,598.10 ⁸	2,011.10 ⁸	20,532	7,580.10 ⁷	8,134.10 ⁷	6,803	4,145.10 ⁷	4,440.10 ⁷	6,653
50,0	8,274.10 ⁷	1,040.10 ⁸	20,460	4,598.10 ⁷	4,936.10 ⁷	6,839	2,717.10 ⁷	3,007.10 ⁷	9,642
45,0	4,189.10 ⁷	5,138.10 ⁷	18,478	2,685.10 ⁷	2,790.10 ⁷	3,753	1,940.10 ⁷	1,965.10 ⁷	1,286
40,0	2,028.10 ⁷	2,425.10 ⁷	16,370	1,472.10 ⁷	1,565.10 ⁷	5,937	9,454.10 ⁶	1,150.10 ⁷	17,765
35,0	8,922.10 ⁶	1,120.10 ⁷	20,348	7,267.10 ⁶	8,042.10 ⁶	9,634	5,978.10 ⁶	6,319.10 ⁶	5,391
30,0	3,299.10 ⁶	4,232.10 ⁶	22,041	3,023.10 ⁶	3,123.10 ⁶	3,219	2,744.10 ⁶	2,955.10 ⁶	7,127
27,5	1,743.10 ⁶	2,477.10 ⁶	29,613	1,665.10 ⁶	1,883.10 ⁶	11,577	1,619.10 ⁶	1,910.10 ⁶	15,237
25,0	6,661.10 ⁵	9,175.10 ⁵	27,405	7,281.10 ⁵	8,547.10 ⁵	14,817	6,713.10 ⁵	9,401.10 ⁵	28,593
24,0	3,871.10 ⁵	6,075.10 ⁵	36,278	3,695.10 ⁵	5,330.10 ⁵	30,665	3,947.10 ⁵	6,520.10 ⁵	39,469
23,0	1,546.10 ⁵	3,600.10 ⁵	57,069	1,904.10 ⁵	2,335.10 ⁵	18,486	1,576.10 ⁵	3,890.10 ⁵	59,484
Média			27,716			12,348			18,520

Fonte: Autoria própria (2022).

A maior diferença média encontrada foi no meio $L02 A90 S00$, mas o maior valor de E_K da Tabela 5.5 se encontra no meio $L02 A90 S50$ com $\phi = 0,23$. Apesar da diferença máxima $E_K = 59,484\%$ ser maior do que as diferenças encontradas na Tabela 5.4 para $N_f = 1$, ainda é possível considerar uma diferença aceitável pelo mesmo motivo discutido anteriormente, isto é, a diferença percentual de 59,484% ainda representa uma mudança na permeabilidade da ordem de $10^{-8} m^2$. Ademais, ressalta-se a necessidade de uma interpolação para obter K_{LBM} em $\phi = 0,23$ e, portanto, não é possível observar tal diferença na Figura 5.12 (c).

As Figuras 5.13 (a), (b) e (c) apresentam, respectivamente, os campos de vetores para $\phi = 0,65$ dos meios $L02 A90 S00$, $L02 A90 S25$ e $L02 A90 S50$. Nas Figuras 5.13 (d), (e) e (f) são apresentados os campos de vetores para $\phi = 0,30$ dos meios $L02 A90 S00$, $L02 A90 S25$ e $L02 A90 S50$, nesta ordem.

Figura 5.13 – Campos de vetores de velocidade para os meios com $\phi = 0,65$: a) *L02 A90 S00*, b) *L02 A90 S25*, c) *L02 A90 S50*, e os meios com $\phi = 0,30$: d) *L02 A90 S00*, e) *L02 A90 S25* e f) *L02 A90 S50*.



Fonte: Autoria própria (2022).

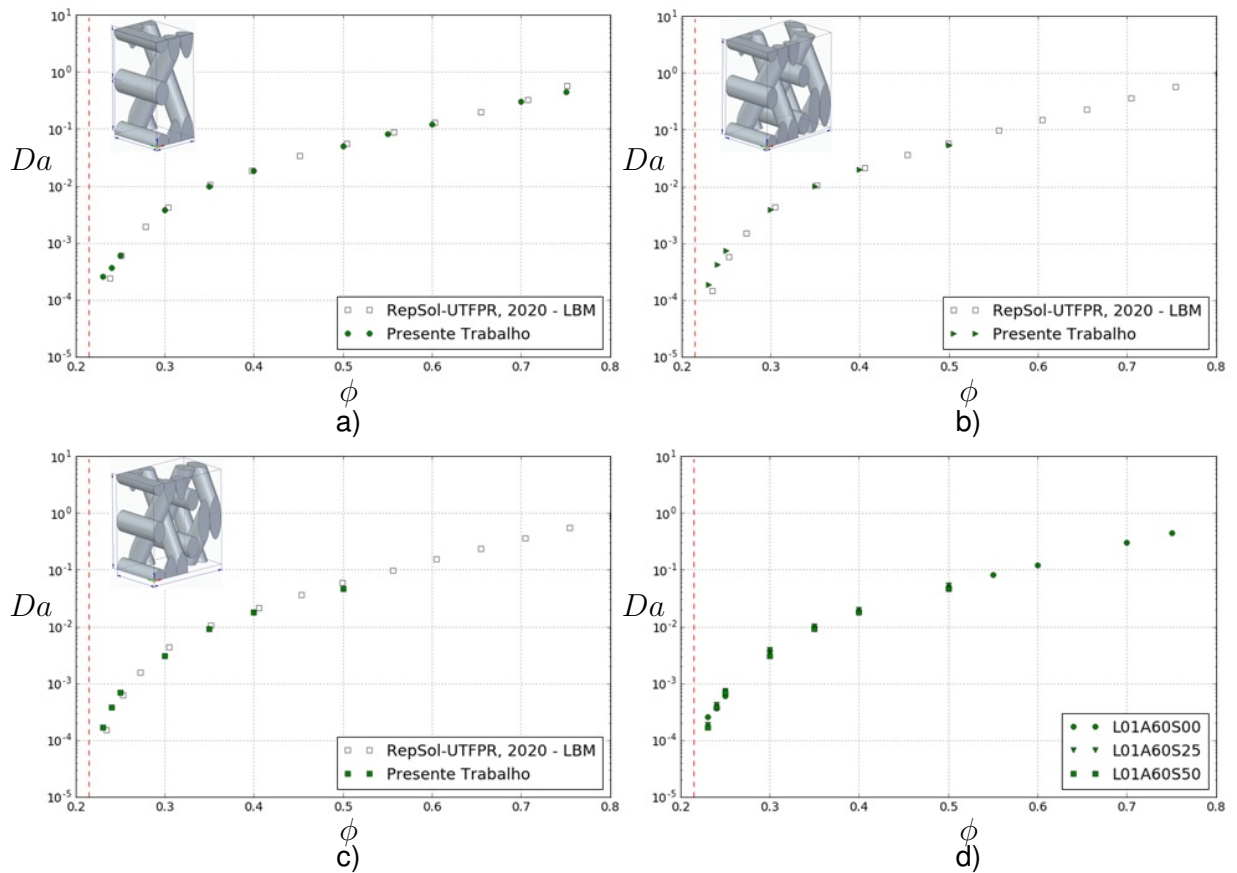
Novamente, nos meios com $\phi = 0,65$ das Figuras 5.13 (a), (b) e (c), observou-se com nitidez o desvio nos escoamentos e uma redução das velocidades que levam a menores permeabilidades. Diferente dos meios com $N_f = 1$ e $\phi = 0,30$, os meios da Figura 5.13 (d), (e) e (f) com $N_f = 2$ e $\phi = 0,30$ permitiram observar com clareza o desvio do escoamento. Isto ocorre devido ao maior δ_{min} quando $N_f = 2$, o que leva a maiores velocidades, e também ao aumento de tortuosidade, conforme será discutido na Seção 5.2.3.

As Figuras 5.14 (a), (b) e (c) apresentam, respectivamente, os números de Darcy por ϕ para os meios porosos *L01 A60 S00*, *L01 A60 S25* e *L01 A60 S50*, comparando-os aos resultados do LBM. A Figura 5.14 (d) compara os três meios porosos para avaliar o efeito de De sobre Da para $\theta = 60^\circ$.

Para $\theta = 60^\circ$, menos valores de ϕ foram simulados devido a necessidade de mais camadas no REV para representar o meio poroso, o que requer alta capacidade computacional. Como a geometria é mais complexa que as anteriores, os meios porosos com $\theta = 60^\circ$ necessitaram de tempo computacional bem maior para a conclusão. O tempo computacional médio foi em torno de 5 dias para $De = 0\%$, chegando a até 15 dias para $De \neq 0\%$, principalmente em valores críticos de ϕ .

A Tabela 5.6 apresenta os resultados de K (mD) para os meios porosos *L01 A60 S00*, *L01 A60 S25* e *L01 A60 S50*, e E_K calculado entre os resultados obtidos por MVF e por LBM.

Figura 5.14 – Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) $L01 A60 S00$, b) $L01 A60 S25$, c) $L01 A60 S50$ e d) comparação entre os três.



Fonte: Autoria própria (2022).

Constatou-se na Figura 5.14 (d) uma baixa influência de De em $\phi \leq 0,5$ para $N_f = 1$ e $\theta = 60^\circ$, assim como nos meios porosos com $N_f = 1$ e $\theta = 90^\circ$ da Figura 5.9. Além disto, os valores de K da Tabela 5.6 são relativamente próximos dos valores da Tabela 5.4, o que indica uma baixa influência de θ sobre Da .

Observou-se que o maior valor de E_K da Tabela 5.6 foi 47,935% para o meio poroso $L01 A60 S25$ em $\phi = 0,24$. Este valor é menor que os valores máximos das Tabelas 5.4 e 5.5, indicando um ajuste entre os métodos MVF e LBM melhores para meios porosos com $\theta = 60^\circ$ em relação aos anteriores, apesar da menor quantidade de valores de ϕ .

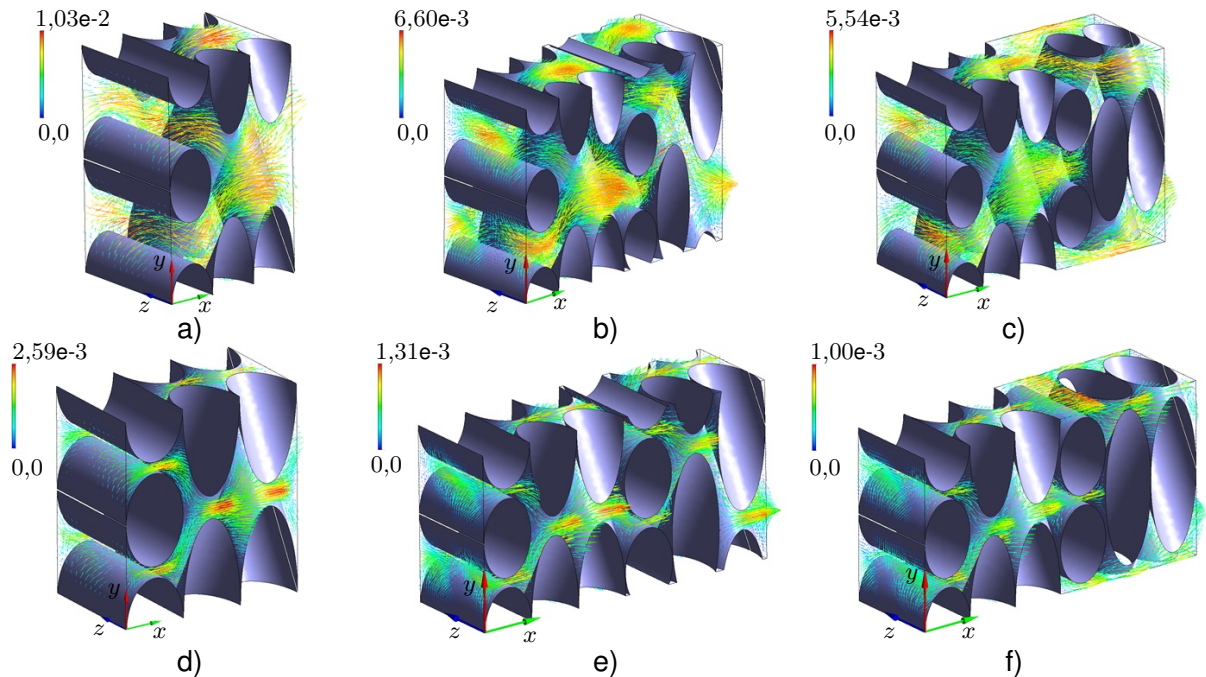
As Figuras 5.15 (a), (b) e (c) apresentam, respectivamente, os campos de vetores para $\phi = 0,50$ dos meios $L01 A60 S00$, $L01 A60 S25$ e $L01 A60 S50$. Nas Figuras 5.15 (d), (e) e (f) são apresentados os campos de vetores para $\phi = 0,30$ dos meios $L01 A60 S00$, $L01 A60 S25$ e $L01 A60 S50$, nesta ordem.

Para $\theta = 60^\circ$ e $De = 0\%$, na Figura 5.15 (a), o escoamento apresentou um desvio significativo, ao contrário dos escoamentos para $\theta = 90^\circ$ das Figuras 5.10 (a) e 5.13 (a) que não apresentam tanto desvio, apesar da influência de θ em Da não ser tão significativa, como citado anteriormente.

Tabela 5.6 – Comparação entre valores de K (mD) obtidos por MVF e por LBM para $N_f = 1$ e $\theta = 60^\circ$.

ϕ (%)	L01A60S00			L01A60S25			L01A60S50		
	K_{MVF}	K_{LBM}	$E_K(\%)$	K_{MVF}	K_{LBM}	$E_K(\%)$	K_{MVF}	K_{LBM}	$E_K(\%)$
75,0	$3,360 \cdot 10^8$	$4,242 \cdot 10^8$	20,783	-	$4,245 \cdot 10^8$	-	-	$4,059 \cdot 10^8$	-
70,0	$2,293 \cdot 10^8$	$2,351 \cdot 10^8$	2,460	-	$2,631 \cdot 10^8$	-	-	$2,626 \cdot 10^8$	-
60,0	$9,176 \cdot 10^7$	$9,398 \cdot 10^7$	2,367	-	$1,078 \cdot 10^8$	-	-	$1,106 \cdot 10^8$	-
55,0	$6,076 \cdot 10^7$	$6,188 \cdot 10^7$	1,809	-	$6,986 \cdot 10^7$	-	-	$7,135 \cdot 10^7$	-
50,0	$3,727 \cdot 10^7$	$4,000 \cdot 10^7$	6,844	$4,008 \cdot 10^7$	$4,387 \cdot 10^7$	8,643	$3,502 \cdot 10^7$	$4,471 \cdot 10^7$	21,678
40,0	$1,372 \cdot 10^7$	$1,461 \cdot 10^7$	6,074	$1,469 \cdot 10^7$	$1,514 \cdot 10^7$	2,997	$1,327 \cdot 10^7$	$1,529 \cdot 10^7$	13,247
35,0	$7,269 \cdot 10^6$	$7,833 \cdot 10^6$	7,196	$7,575 \cdot 10^6$	$7,677 \cdot 10^6$	1,335	$6,788 \cdot 10^6$	$7,824 \cdot 10^6$	13,236
30,0	$2,846 \cdot 10^6$	$2,875 \cdot 10^6$	1,029	$2,912 \cdot 10^6$	$2,913 \cdot 10^6$	0,029	$2,280 \cdot 10^6$	$2,975 \cdot 10^6$	23,350
25,0	$4,481 \cdot 10^5$	$4,575 \cdot 10^5$	2,051	$5,500 \cdot 10^5$	$3,876 \cdot 10^5$	41,892	$5,215 \cdot 10^5$	$4,081 \cdot 10^5$	27,786
24,0	$2,734 \cdot 10^5$	$2,202 \cdot 10^5$	24,188	$3,177 \cdot 10^5$	$2,147 \cdot 10^5$	47,935	$2,849 \cdot 10^5$	$2,233 \cdot 10^5$	27,551
23,0	$1,932 \cdot 10^5$	$1,770 \cdot 10^5$	9,178	$1,403 \cdot 10^5$	$1,110 \cdot 10^5$	26,401	$1,269 \cdot 10^5$	$1,125 \cdot 10^5$	19,949
Média			7,634			18,462			19,949

Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 5.15 – Campos de vetores de velocidade para os meios com $\phi = 0,50$: a) L01 A60 S00, b) L01 A60 S25, c) L01 A60 S50, e os meios com $\phi = 0,30$: d) L01 A60 S00, e) L01 A60 S25 e f) L01 A60 S50.

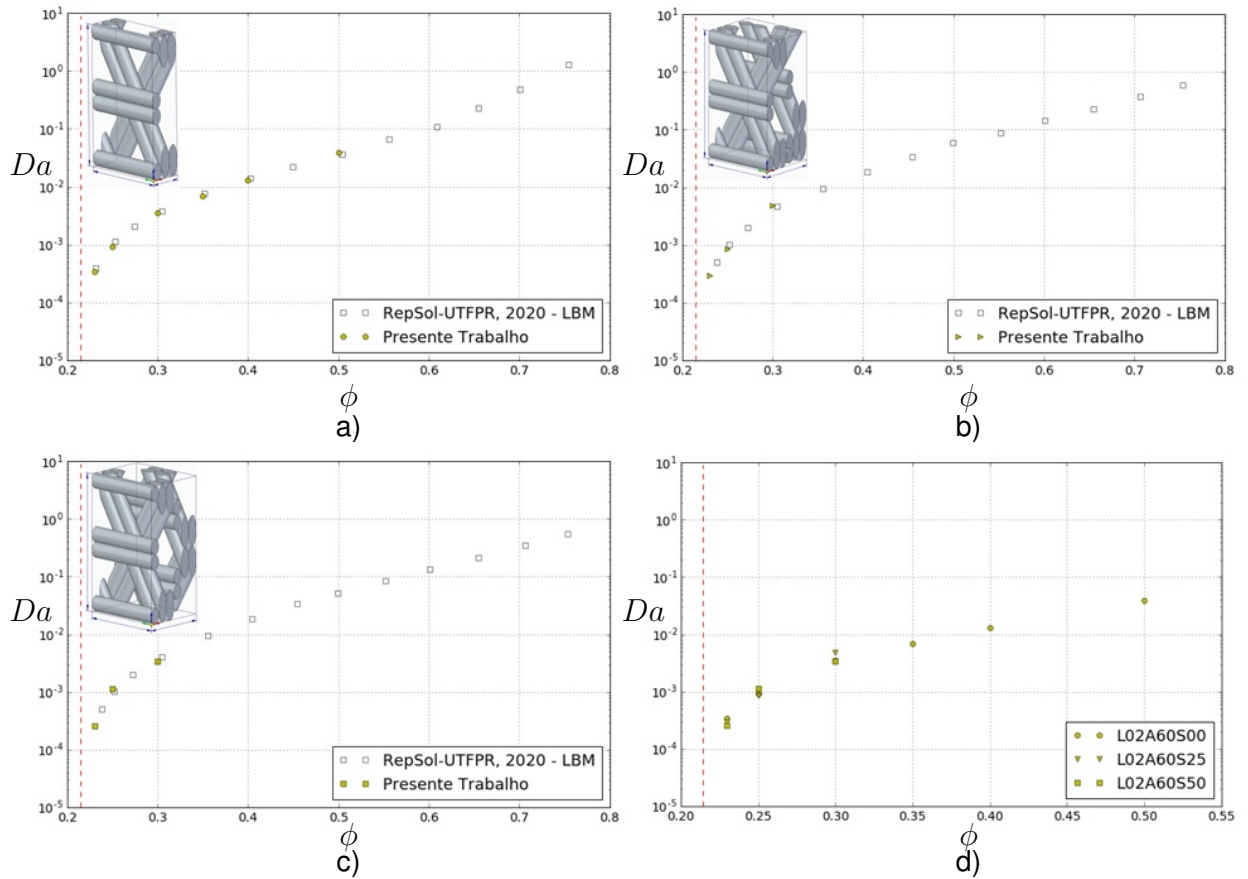
Fonte: Autoria própria (2022).

Além disto, as Figuras 5.15 (a), (b) e (c) mostraram visualmente a redução da velocidade com o aumento de De . Da mesma forma, nas Figuras 5.15 (d), (e) e (f) para $\phi = 0,30$, visualizou-se com clareza a diminuição da velocidade ao variar De , diferente dos resultados para $N_f = 1$, $\theta = 90^\circ$ e $\phi = 0,30$ das Figuras 5.10 (d), (e) e (f), nos quais os desvios são mais sutis.

As Figuras 5.16 (a), (b) e (c) apresentam, respectivamente, os números de Darcy por ϕ para os meios porosos L02 A60 S00, L02 A60 S25 e L02 A60 S50, comparando-os aos

resultados do LBM. A Figura 5.16 (d) compara os três meios porosos para avaliar o efeito de De sobre Da para $N_f = 2$ e $\theta = 60^\circ$.

Figura 5.16 – Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) $L02 A60 S00$, b) $L02 A60 S25$, c) $L02 A60 S50$ e d) comparação entre os três.



Fonte: Autoria própria (2022).

Constatou-se uma boa aproximação entre os métodos de CFD nas Figuras 5.16 (a), (b) e (c). Devido ao alto tempo computacional para convergência, escolheu-se reduzir novamente a quantidade de simulações para os meios com $De = 25\%$ e 50% . Observou-se na Figura 5.16 (d) uma influência de De relativamente maior do que para $N_f = 1$, apesar de menos valores de ϕ terem sido simulados nos últimos casos.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados de K (mD) para meios porosos $L02 A60 S00$, $L02 A60 S25$ e $L02 A60 S50$, e E_K calculado entre os resultados obtidos por MVF e por LBM.

A maior diferença E_K encontrada na Tabela 5.7 foi de 38,740 % para o meio $L02 A60 S25$ em $\phi = 0,23$, o que indica uma boa aproximação entre os métodos. Os resultados da Tabela 5.7 necessitaram de 15 dias em média para a convergência, chegando a passar de 35 dias em alguns casos específicos entre os meios com $De \neq 0\%$.

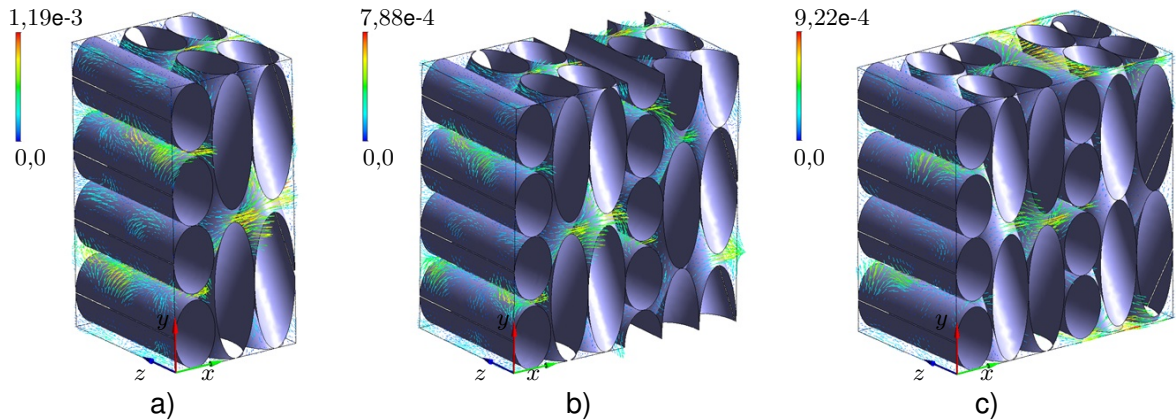
Como menos simulações foram realizadas para $\theta = 60^\circ$ e $N_f = 2$, os campos de vetores para $\phi = 0,50$ foram apresentados na Figura 5.17. As Figuras 5.17 (a), (b) e (c)

Tabela 5.7 – Comparação entre valores de K (mD) obtidos por MVF e por LBM para $N_f = 2$ e $\theta = 60^\circ$.

ϕ (%)	L02A60S00			L02A60S25			L02A60S50		
	K_{MVF}	K_{LBM}	E_K (%)	K_{MVF}	K_{LBM}	E_K (%)	K_{MVF}	K_{LBM}	E_K (%)
50,0	$2,907 \cdot 10^7$	$2,675 \cdot 10^7$	8,668	-	$4,453 \cdot 10^7$	-	-	$4,000 \cdot 10^7$	-
40,0	$9,860 \cdot 10^6$	$1,017 \cdot 10^7$	3,023	-	$1,359 \cdot 10^7$	-	-	$1,344 \cdot 10^7$	-
35,0	$5,227 \cdot 10^6$	$5,663 \cdot 10^6$	7,700	-	$6,685 \cdot 10^6$	-	-	$6,571 \cdot 10^6$	-
30,0	$2,632 \cdot 10^6$	$2,609 \cdot 10^6$	0,869	$3,605 \cdot 10^6$	$3,193 \cdot 10^6$	12,913	$2,540 \cdot 10^6$	$2,803 \cdot 10^6$	9,386
25,0	$6,900 \cdot 10^5$	$7,716 \cdot 10^5$	10,571	$6,491 \cdot 10^5$	$7,167 \cdot 10^5$	9,434	$8,632 \cdot 10^5$	$7,170 \cdot 10^5$	20,391
23,0	$2,594 \cdot 10^5$	$2,657 \cdot 10^5$	2,363	$2,199 \cdot 10^5$	$1,585 \cdot 10^5$	38,740	$1,920 \cdot 10^5$	$1,620 \cdot 10^5$	18,524
Média			5,532			20,363			16,100

Fonte: Autoria própria (2022).

apresentam, respectivamente, os campos de vetores para os meios $L02 A60 S00$, $L02 A60 S25$ e $L02 A60 S50$.

Figura 5.17 – Campos de vetores de velocidade para os meios com $\phi = 0,50$: a) $L02 A60 S00$, b) $L02 A60 S25$ e c) $L02 A60 S50$.

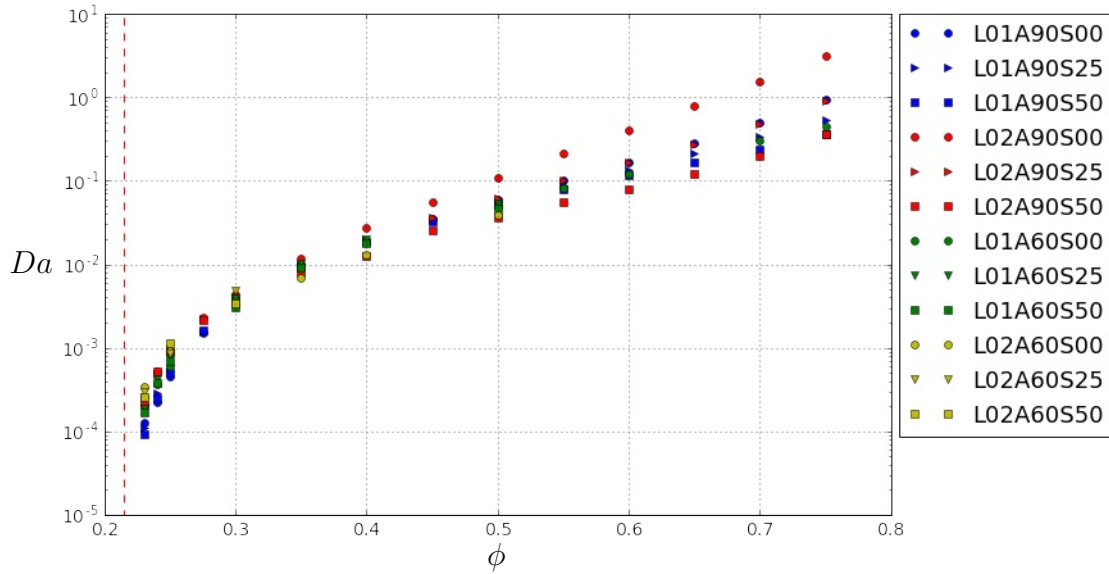
Fonte: Autoria própria (2022).

Quanto às faixas de valores de velocidade nos campos de vetores, a variação foi mais significativa entre as Figuras 5.17 (a) e (b) do que entre as Figuras 5.17 (b) e (c). Ademais, os valores de velocidade observados foram maiores nestes meios do que nos anteriores da Figura 5.15, demonstrando que aumentar N_f leva a um aumento da permeabilidade, assim como nos meios com $\theta = 90^\circ$.

A Figura 5.18 apresenta os resultados para todos os meios porosos compostos de filamentos elípticos simulados por MVF no presente trabalho.

Notou-se que θ influencia mais na inclinação das curvas do que no valor de Da_b de fato, o que resultou em maiores permeabilidades em $\theta = 60^\circ$ para $\phi < 0,3$, porém maiores permeabilidades em $\theta = 90^\circ$ para $\phi > 0,3$. Isto posto, o meio $L02 A90 S00$ apresentou o maior Da e o meio $L01 A90 S50$ apresentou o menor Da entre todos os meios simulados, porém especificamente em $\phi = 0,50$, por exemplo, o menor Da se encontra no meio $L01 A60 S00$. Portanto, tendo ϕ como parâmetro de referência, a escolha das configurações do meio poroso para certo trabalho depende da aplicação para o qual será utilizado.

Figura 5.18 – Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para todos os meios porosos simulados.



Fonte: Autoria própria (2022).

A verificação entre os resultados por MVF e por LBM foi satisfatória, tendo em vista que as características inerentes a cada método são diferentes e, por isto, existem as diferenças observadas no resultados. O ponto mais importante da comparação é que os resultados por MVF e por LBM foram da mesma ordem para os valores de ϕ estudados, apesar das diferenças percentuais existentes entre métodos.

5.2.3 Análise de Escala

Para encontrar uma correlação para K em função dos parâmetros geométricos, o trabalho de Tamayol e Bahrami (2011) foi utilizado como principal referência para realizar a análise de escala do problema. Além disto, a análise de escala foi utilizada para realizar a caracterização apropriada da tortuosidade (τ), conforme discutido anteriormente.

Considerou-se a escala para o gradiente de pressão como sendo $\vec{\nabla}P \sim \Delta P/\ell_{REV}$, então a equação de Hazen-Darcy definida pela Equação 2.3 tem a forma:

$$-\frac{\Delta P}{\ell_{REV}} \sim \frac{\mu}{K} U_D \quad (5.8)$$

Para a equação de Navier-Stokes, o termo de viscosidade é predominante na análise de escala para escoamentos de baixo número de Reynolds, conforme discutido no APÊNDICE B. Tomando $\nabla^2 \vec{u} \sim |\vec{V}|/\delta_{min}^2$, sendo que $|\vec{V}|$ é a magnitude da velocidade na escala dos poros, a Equação 4.13 pode ser escrita da forma:

$$-\frac{\Delta P}{\ell_{REV}} \sim \frac{\mu}{\delta_{min}^2} |\vec{V}| \quad (5.9)$$

Tamayol e Bahrami (2011) propõem a estimativa para a velocidade na escala do poro da forma $|\vec{V}| \approx U_D/(\tau\phi)$. Considerando a aproximação proposta pelos autores e comparando as Equações 5.8 e 5.9, tem-se:

$$\frac{\mu}{K} U_D \sim \frac{\mu}{\delta_{min}^2} \frac{U_D}{\tau\phi}$$

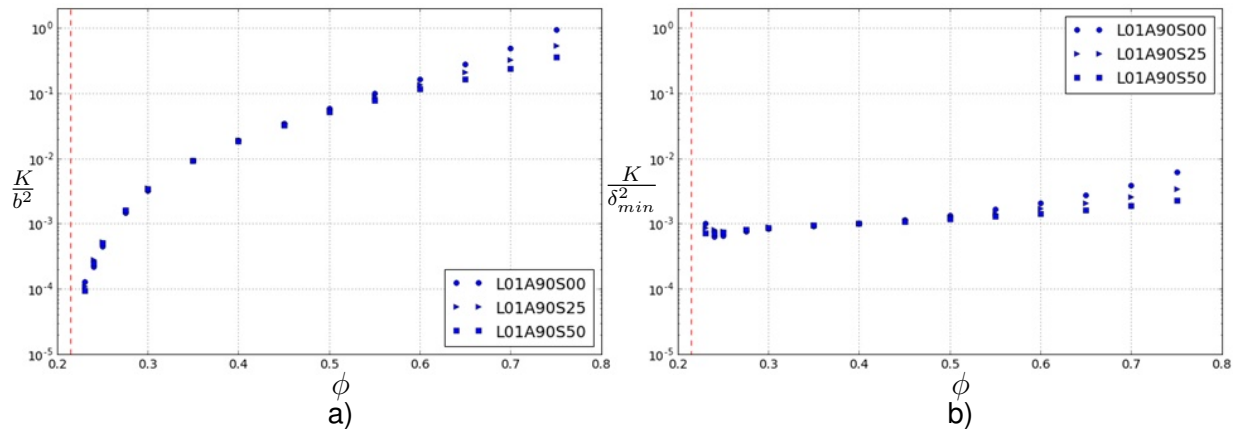
Portanto, a relação obtida para a permeabilidade tem a forma:

$$K \sim \delta_{min}^2 \tau \phi \quad (5.10)$$

ou seja, os fatores de influência na permeabilidade são ϕ , τ e δ_{min} .

A influência de δ_{min} pode ser observada graficamente ao substituir o raio b na Equação 5.6 para adimensionalizar K . As Figuras 5.19 (a) e (b) apresentam, respectivamente, os números de Darcy obtidos pela adimensionalização por b e por δ_{min} dos resultados para os meios porosos L01 A90 S(De).

Figura 5.19 – Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para meios porosos L01 A90 S(De): a) adimensionalizados por b^2 e b) adimensionalizados por δ_{min}^2 .



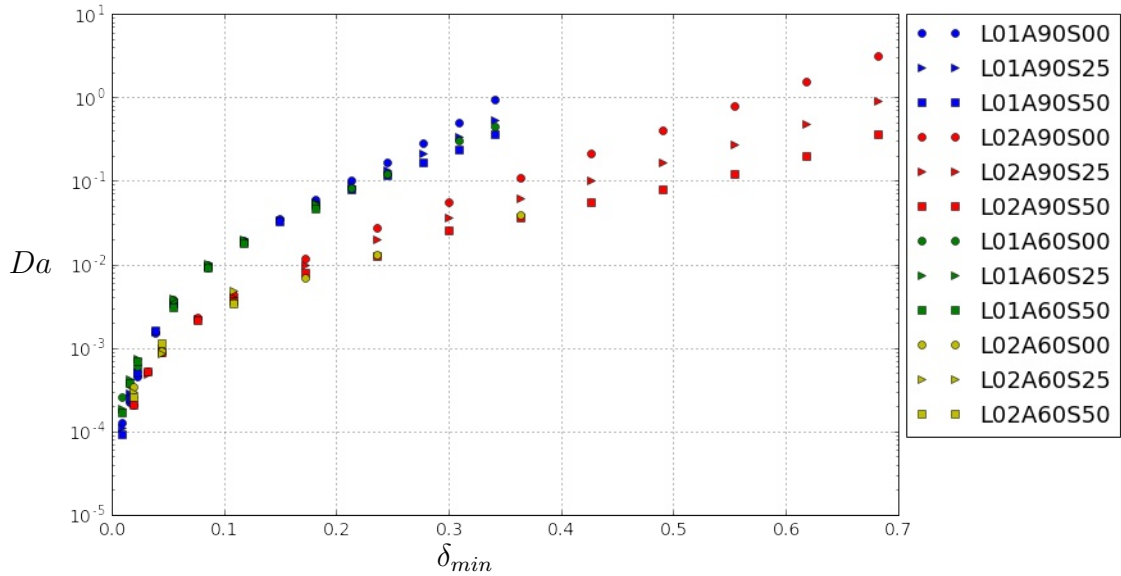
Fonte: Autoria própria (2022).

Os números de Darcy obtidos por b^2 na Figura 5.19 (a) variam entre 10^{-4} a 1, enquanto os obtidos por δ_{min}^2 na Figura 5.19 (b) variam entre 10^{-3} a 10^{-2} . A normalização dos valores observada na Figura 5.19 (b) demonstra exatamente que δ_{min} possui maior influência sobre a permeabilidade do que b .

Isto posto, a Figura 5.20 a seguir apresenta os resultados numéricos para todos os meios porosos simulados em um gráfico de Da por δ_{min} , para avaliar a influência dos outros parâmetros geométricos variados na estrutura.

Notou-se que Da diminui com a diminuição de δ_{min} , assim como observado para ϕ . Observou-se ainda, uma influência maior de De sobre os resultados quando $N_f = 2$, para ambos valores de θ . Já para valores fixos de δ_{min} , os meios porosos com $N_f = 2$ apresentaram Da bem menores do que os meios com $N_f = 1$. Além disto, os meios porosos com $\theta = 60^\circ$

Figura 5.20 – Número de Darcy (Da) por δ_{min} para todos os meios porosos simulados.



Fonte: Autoria própria (2022).

apresentaram menor Da em comparação a $\theta = 90^\circ$, de forma que o meio $L02 A60 S00$ atingiu valores de Da muito próximos aos do meio $L02 A90 S50$.

Como o parâmetro de entrada ou de referência para a formulação do problema foi ϕ por ser mais convencional na literatura, os meios porosos com $N_f = 1$ apresentaram valores menores de δ_{min} . Portanto, para futuros estudos que visem estudar mais valores de N_f , deve-se levar em conta que pode ser mais vantajoso a elaboração dos meios porosos a partir de δ_{min} , não de valores escolhidos para ϕ como no presente trabalho.

Todavia, a obtenção dos coeficientes de ajuste para a análise de escala a seguir foi realizada em função de ϕ , que é conveniente por se tratar de um parâmetro adimensional. A distância δ_{min} foi definida em função de ϕ na Equação 4.11. Substituindo δ_{min} e $a = C_{ab}b$ na Equação 5.10, obteve-se uma correlação para o número de Darcy da forma:

$$\frac{K}{b^2} = C_K C_{ab}^2 N_f^2 \left[\frac{\pi}{4(1-\phi)} - 1 \right]^2 \tau \phi \quad (5.11)$$

sendo que C_K é o coeficiente de ajuste, obtido por comparação da curva com resultados de referência, e K/b^2 é o número de Darcy.

Para a tortuosidade, os três modelos discutidos na Seção 2.2.3 foram utilizados na Equação 5.11 e C_K foi encontrado para cada modelo, visando uma comparação para identificar qual o modelo mais adequado para o presente problema.

O primeiro foi o modelo de Archie (1942) da Equação 2.7. Substituindo este modelo na Equação 5.11, tem-se:

$$Da_{Archie} = C_K C_{ab}^2 N_f^2 \left[\frac{\pi}{4(1-\phi)} - 1 \right]^2 \left(\frac{1}{\phi} \right)^\alpha \phi \quad (5.12)$$

Alguns estudos como o de Gostick *et al.* (2006), o de Tamayol e Bahrami (2011) e o de Duda, Koza e Matyka (2011) propõem que $\alpha = 0,5$ para o meio poroso com filamentos dipostos em camadas e $\alpha = 0,3$ para meios porosos como o tridirecional. Isto posto, no presente trabalho o coeficiente α foi encontrado junto com o coeficiente C_K ao minimizar a diferença percentual entre correlação e resultados numéricos. Uma comparação foi realizada entre o valor calculado e o valor de 0,5 proposto pela literatura.

Em sequência, o modelo de Tomadakis e Sotirchos (1993) da Equação 2.8 foi utilizado. O trabalho de Gostick *et al.* (2006) sugere que o coeficiente que depende da disposição dos filamentos seja $c_1 = 0,11$ em meios porosos com filamentos dispostos em camadas, enquanto o coeficiente que depende da direção do escoamento seja $c_2 = 0,785$ para escoamentos perpendiculares aos eixos dos filamentos.

Todavia, o modelo de Tomadakis e Sotirchos (1993) foi elaborado para escoamentos em meios com filamentos cilíndricos, não para elípticos. Uma vez que o escoamento é mais obstruído pelos filamentos elípticos, optou-se por variar o coeficiente c_2 junto com C_K para minimizar a diferença percentual entre correlação e resultados. O coeficiente $c_1 = 0,11$ foi mantido devido à organização em camadas dos meios porosos propostos. Isto posto, a Equação 2.8 foi substituída na Equação 5.11:

$$Da_{\text{Tomadakis-Sotirchos}} = C_K C_{ab}^2 N_f^2 \left[\frac{\pi}{4(1-\phi)} - 1 \right]^2 \left(\frac{0,89}{\phi - 0,11} \right)^{c_2} \phi \quad (5.13)$$

O último modelo utilizado é a Equação 2.10 de Matyka e Koza (2012). Neste caso, a equação para a tortuosidade não apresenta coeficientes de ajuste como as outras, então apenas o coeficiente C_K foi alterado para minimizar a diferença percentual entre a correlação e os resultados. Substituindo a Equação 2.10 na Equação 5.11, tem-se:

$$Da_{\text{Matyka-Koza}} = C_K C_{ab}^2 N_f^2 \left[\frac{\pi}{4(1-\phi)} - 1 \right]^2 \left(\frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{u}_i}{\sum_{i=1}^n u_{i,x}} \right) \phi \quad (5.14)$$

Análises estatísticas costumam utilizar o coeficiente de determinação, também chamado R^2 , para encontrar coeficientes apropriados e demonstrar a confiabilidade de regressões lineares. Todavia, para modelos de regressões não lineares, como os das Equações 5.12, 5.13 e 5.14, o R^2 pode levar à interpretações erradas dos resultados, como explica o artigo de Spiess e Neumeyer (2010).

Portanto, no presente trabalho os coeficientes C_K das Equações 5.12, 5.13 e 5.14 foram encontrados ao minimizar as diferenças percentuais entre os números de Darcy calculados pelas correlações ($Da_{\text{Correlação}}$) e pelo MVF (Da_{MVF}). As diferenças foram calculadas por:

$$E_K = \frac{|Da_{\text{MVF}} - Da_{\text{Correlação}}|}{Da_{\text{MVF}}} \quad (5.15)$$

Para o procedimento de cálculo dos coeficientes, primeiramente um valor arbitrário foi escolhido para C_K . Com o valor escolhido, E_K foi calculado para os valores de ϕ simulados e a diferença percentual máxima ($E_{K,max}$) encontrada foi tomada como referência. Em seguida, o valor de C_K foi variado com resolução de 10^{-5} para minimizar $E_{K,max}$. O cálculo encerrou quando $E_{K,max}$ deixou de diminuir e passou a aumentar com a variação de C_K , ou seja, o menor valor possível de $E_{K,max}$ foi atingido.

Para as Equações 5.12 e 5.13, os coeficientes α e c_2 também foram variados da mesma forma que C_K . Nestes casos, a resolução da variação foi aumentada para 10^{-4} devido a limitações do hardware disponível.

A Tabela 5.8 apresenta os coeficientes para os meios porosos $L01 A90 S(De)$ com os três diferentes modelos de tortuosidade. Além disto, a tabela apresenta a $E_{K,max}$ obtida com os respectivos coeficientes e a porosidade na qual a diferença foi obtida (ϕ_{max}).

Tabela 5.8 – Coeficientes de ajuste, $E_{K,max}$ e ϕ_{max} para correlações dos meios porosos $L01 A90 S(De)$.

Meio Poroso	Modelo de Tortuosidade	Coeficientes para τ	C_K	$E_{K,max}(\%)$	$\phi_{max}(\%)$
L01A90S00	Archie (1942)	0,5	0,15716	49,737	23,0
	(Coeficientes α)	1,2984	0,0739	23,588	23,0
	Tomadakis e Sotirchos (1993)	0,785	0,10382	23,228	23,0
	(Coeficientes c_2)	0,9710	0,0722	22,524	75,0
	Matyka e Koza (2012)	-	0,20048	64,704	23,0
L01A90S25	Archie (1942)	0,5	0,10166	62,534	23,0
	(Coeficientes α)	1,6424	0,0480	6,600	75,0
	Tomadakis e Sotirchos (1993)	0,785	0,07560	35,591	75,0
	(Coeficientes c_2)	1,1875	0,0543	11,188	25,0
	Matyka e Koza (2012)	-	0,11192	77,493	75,0
L01A90S50	Archie (1942)	0,5	0,07049	68,872	23,0
	(Coeficientes α)	1,9273	0,0324	17,075	45,0
	Tomadakis e Sotirchos (1993)	0,785	0,05504	47,934	30,0
	(Coeficientes c_2)	1,3632	0,0379	23,268	40,0
	Matyka e Koza (2012)	-	0,06992	82,921	23,0

Fonte: Autoria própria (2022).

Para Da_{Archie} , observou-se uma diminuição significativa de $E_{K,max}$ na Tabela 5.8 ao recalcular α em comparação ao valor encontrado na literatura. Entre os três meios porosos da Tabela 5.8, o melhor ajuste da curva foi no meio $L01 A90 S25$ para $\alpha = 1,6424$, ou seja, o menor valor de $E_{K,max}$ foi obtido utilizando o modelo de τ de Archie (1942).

Quanto à $Da_{Tomadakis-Sotirchos}$, a variação do coeficiente c_2 foi menos significativa no valor de $E_{K,max}$ para $L01 A90 S00$ entre os meios da Tabela 5.8. Todavia, no meio $L01 A90 S00$, o ϕ_{max} mudou de 0,23 para 0,75 com a mudança de c_2 . Isto significa que a correlação com $c_2 = 0,785$ se ajusta melhor em altas porosidades, pois $E_{K,max}$ ocorre em $\phi = 0,23$, enquanto

a correlação com $c_2 = 0,9710$ se ajusta melhor em baixas porosidades, pois $E_{K,max}$ ocorre em $\phi = 0,75$.

Os melhores ajustes das correlações aos resultados numéricos foram obtidos com o modelo para τ de Tomadakis e Sotirchos (1993) para o meio $L01 A90 S00$ e com o modelo para τ de Archie (1942) nos meios $L01 A90 S25$ e $L01 A90 S50$. Entretanto, observou-se uma consistência nos valores dos coeficientes c_2 para $Da_{Tomadakis-Sotirchos}$, no sentido de que foi necessária pouca variação em relação ao valor proposto na literatura, enquanto o α para o modelo Da_{Archie} requer valores até 4 vezes maior do que o proposto na literatura.

Observou-se que $Da_{Matyka-Koza}$ teve o pior ajuste entre os modelos para a presente análise de escala, apresentando a maior $E_{K,max}$ para os três meios porosos. Contudo, atenta-se ao fato de que as velocidades foram calculadas numericamente para o cálculo da tortuosidade, e, portanto, também estão sujeitas aos erros computacionais discutidos na Seção 5.2.2.

Isto posto, o modelo $Da_{Matyka-Koza}$ ainda permite estimar a ordem dos valores para alguns casos pelo mesmo motivo discutido na verificação, isto é, uma variação menor que 100% em $\phi = 0,23$ indica uma variação baixa, em torno de $10^{-6} m^2$. Além disto, lembra-se que este modelo é importante devido a tecnologias em desenvolvimento de obtenção experimental do perfil de velocidades, o que possibilita a caracterização experimental da tortuosidade (DUDA; KOZA; MATYKA, 2011).

As Figuras 5.21 (a), (b) e (c) apresentam, respectivamente, as comparações entre correlações com cada modelo de tortuosidade para os meios porosos $L01 A90 S00$, $L01 A90 S25$ e $L01 A90 S50$. Utilizou-se os coeficientes α e c_2 que permitiram os melhores ajustes. Além disto, a Figura 5.21 (d) compara os três meios porosos pelas correlações do modelo $Da_{Tomadakis-Sotirchos}$.

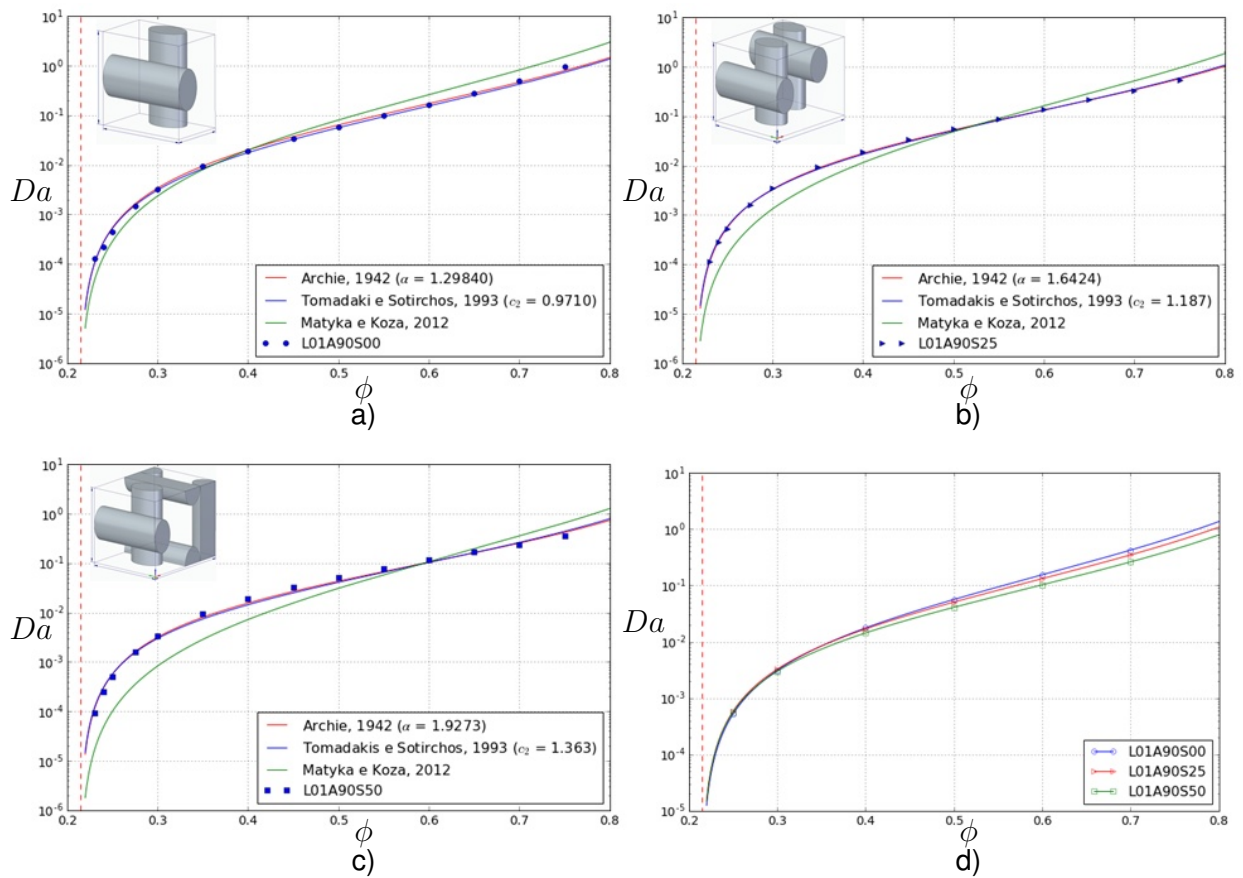
Para $Da_{Matyka-Koza}$, nas Figuras 5.21 (a), (b) e (c), foi possível confirmar visualmente o aumento de $E_{K,max}$ conforme De aumenta. Entretanto, para as correlações com os outros modelos de tortuosidade, quase não se observam as mudanças, como esperado devido aos baixos valores de $E_{K,max}$ da Tabela 5.8.

Quanto à comparação entre os meios na Figura 5.21 (d), as correlações para $Da_{Tomadakis-Sotirchos}$ mantêm o comportamento observado nos resultados numéricos, apresentando uma baixa influência de De nos resultados e um decréscimo de Da com o aumento de De , com variação mais notável em altas porosidades do que em baixas porosidades. Escolheu-se $Da_{Tomadakis-Sotirchos}$ para fazer a comparação entre os meios porosos devido aos resultados consistentes com os da literatura quanto ao coeficiente, à capacidade do modelo de permitir avaliar a anisotropia do meio poroso e também pelos resultados para os meios porosos a seguir.

A Tabela 5.9 apresenta os coeficientes para os meios porosos $L02 A90 S(De)$ com os três diferentes modelos de tortuosidade, a $E_{K,max}$ obtida com os respectivos coeficientes e ϕ_{max} .

Para o caso de $N_f = 2$, observou-se novamente uma redução significativa de $E_{K,max}$ ao variar os coeficientes dos modelos de tortuosidade. Contudo, as correlações para $Da_{Tomadakis-Sotirchos}$ apresentaram melhor ajuste para os três meios porosos do que Da_{Archie} .

Figura 5.21 – Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) $L01\ A90\ S00$, b) $L01\ A90\ S25$, c) $L01\ A90\ S50$ e d) comparação entre as três correlações escolhidas para cada meio ($Da_{Tomadakis-Sotirchos}$).



Fonte: Autoria própria (2022).

Para $Da_{Matyka-Koza}$, a correlação apresentou baixo $E_{K,max}$ no meio $L02\ A90\ S00$, próximo inclusive dos outros dois modelos. Todavia, as diferenças obtidas nos meios porosos $L02\ A90\ S25$ e $L02\ A90\ S50$ por $Da_{Matyka-Koza}$ são ainda maiores do que as obtidas na Tabela 5.8 com $N_f = 1$.

As Figuras 5.22 (a), (b) e (c) apresentam, respectivamente, as comparações entre correlações com cada modelo de tortuosidade para os meios porosos $L02\ A90\ S00$, $L02\ A90\ S25$ e $L02\ A90\ S50$. Utilizou-se os coeficientes α e c_2 que permitiram os melhores ajustes. Além disto, a Figura 5.22 (d) compara os três meios porosos pelas correlações com o modelo $Da_{Tomadakis-Sotirchos}$.

Novamente as Figuras 5.22 (a), (b) e (c) permitiram verificar visualmente o aumento de $E_{K,max}$ para o modelo $Da_{Matyka-Koza}$. As curvas quase se sobrepõem para o meio $L02\ A90\ S00$, enquanto que nos outros meios a curva de $Da_{Matyka-Koza}$ se destaca claramente, estando distante dos resultados numéricos.

Para a comparação entre meios porosos na Figura 5.22 (d), o modelo $Da_{Tomadakis-Sotirchos}$ apresentou as mesmas características dos resultados numéricos, isto é, a influência mais significativa de De em porosidades altas, enquanto as curvas se sobrepõem em porosidades

Tabela 5.9 – Coeficientes de ajuste, $E_{K,max}$ e ϕ_{max} para correlações dos meios porosos L02 A90 S(De).

Meio Poroso	Modelo de Tortuosidade	Coeficientes para τ	C_K	$E_{K,max}$	ϕ_{max}
L02A90S00	Archie (1942)	0,5	0,07347	41,163	40,0
	(Coeficientes α)	0,8012	0,0534	36,035	75,0
	Tomadakis e Sotirchos (1993)	0,785	0,04645	42,757	35,0
	(Coeficientes c_2)	0,5419	0,0593	32,542	35,0
	Matyka e Koza (2012)	-	0,09844	40,640	23,0
L02A90S25	Archie (1942)	0,5	0,04339	71,790	23,0
	(Coeficientes α)	1,9820	0,0121	30,715	35,0
	Tomadakis e Sotirchos (1993)	0,785	0,03228	51,484	23,0
	(Coeficientes c_2)	1,3980	0,0148	24,278	23,0
	Matyka e Koza (2012)	-	0,04261	79,270	23,0
L02A90S50	Archie (1942)	0,5	0,01939	84,774	70,0
	(Coeficientes α)	2,6004	0,00440	24,291	23,0
	Tomadakis e Sotirchos (1993)	0,785	0,01559	71,688	23,0
	(Coeficientes c_2)	1,8403	0,0060	9,733	23,0
	Matyka e Koza (2012)	-	0,01521	90,752	23,0

Fonte: Autoria própria (2022).

baixas. Em comparação aos meios com $N_f = 1$ da Figura 5.21 (d), as correlações para $N_f = 2$ apresentaram maior diferença entre si e permitiram visualizar diferenças em valores menores de ϕ .

A Tabela 5.10 apresenta os coeficientes para os meios porosos L01 A60 S(De) com os três diferentes modelos de tortuosidade, a $E_{K,max}$ obtida com os respectivos coeficientes e ϕ_{max} .

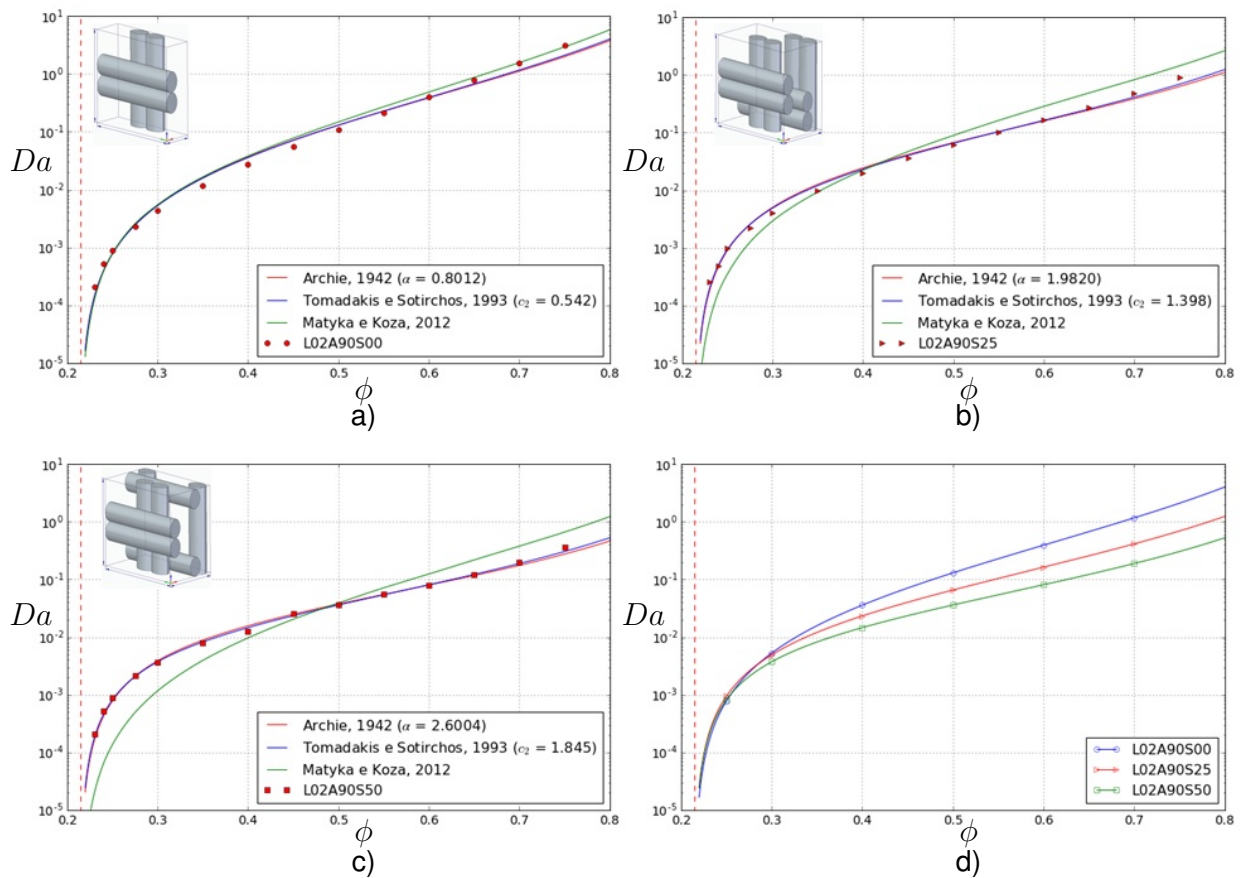
Observou-se que os coeficientes de ajuste α e c_2 recalculados permitem a redução de $E_{K,max}$ mais significativa quando $De \neq 0$, apesar do valor dos coeficientes alterar pouco entre meios porosos. Isto ocorre devido a menos valores de ϕ terem sido simulados para L01 A60 S25 e L01 A60 S50, e, portanto, os coeficientes de ajustes demandaram pouca variação para ajustar a correlação aos resultados numéricos.

Logo, para os meios porosos L01 A60 S(De), o modelo $Da_{Matyka-Koza}$ levou ao pior ajuste da correlação, com os maiores valores de $E_{K,max}$, enquanto o modelo $Da_{Tomadakis-Sotirchos}$ apresentou o melhor ajuste da correlação, com os menores valores de $E_{K,max}$.

As Figuras 5.23 (a), (b) e (c) apresentam, respectivamente, as comparações entre correlações com cada modelo de tortuosidade para os meios porosos L01 A60 S00, L01 A60 S25 e L01 A60 S50. Utilizou-se os coeficientes α e c_2 que permitiram os melhores ajustes. Além disto, a Figura 5.23 (d) compara os três meios porosos pelas correlações com o modelo $Da_{Tomadakis-Sotirchos}$.

Primeiramente, as curvas para as correlações com $De = 25\%$ e 50% para o modelo $Da_{Matyka-Koza}$ foram apresentadas apenas até $\phi = 0,5$. O motivo disto é que como não foram

Figura 5.22 – Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) $L02 A90 S00$, b) $L02 A90 S25$, c) $L02 A90 S50$ e d) comparação entre as três correlações escolhidas para cada meio ($Da_{Tomadakis-Sotirchos}$).



Fonte: Autoria própria (2022).

realizadas simulações para $\phi > 0.5$ nestes meios, a correlação não apresenta valores confiáveis para extrapolações a partir dos resultados obtidos.

Além disto, é possível diferenciar visualmente como as curvas se ajustam melhor aos meios porosos com menos simulações do que para o meio $L01 A60 S00$, assim como discutido anteriormente. Principalmente para o modelo $Da_{Matyka-Koza}$, nas Figuras 5.21 e 5.22 as curvas se afastaram dos resultados numéricos com o aumento de De , enquanto nas Figuras 5.23 (b) e (c) as curvas praticamente não tiveram alteração, assim como nos valores da Tabela 5.10 discutidos.

Quanto à comparação entre os meios porosos na Figura 5.23 (d), a influência de De foi muito baixa para $\theta = 60^\circ$ da mesma forma que nos resultados numéricos, por isto as curvas se sobrepõem em baixos valores de ϕ e apenas em $\phi > 0,60$ foi possível observar uma diferença de fato.

A Tabela 5.11 apresenta os coeficientes para os meios porosos $L02 A60 S(De)$ com os três diferentes modelos de tortuosidade, a $E_{K,max}$ obtida com os respectivos coeficientes e ϕ_{max} .

Para os meios porosos $L02 A60 S(De)$ menos valores de ϕ foram simulados do que para os meios porosos anteriores, e, conseqüentemente, foi possível obter valores de $E_{K,max}$ ainda

Tabela 5.10 – Coeficientes de ajuste, $E_{K,max}$ e ϕ_{max} para correlações dos meios porosos L01 A60 S(De).

Meio Poroso	Modelo de Tortuosidade	Coeficientes para τ	C_K	$E_{K,max}$	ϕ_{max}
L01A60S00	Archie (1942)	0,5	0,09675	84,509	23,0
	(Coeficientes α)	2,5335	0,0202	35,774	23,0
	Tomadakis e Sotirchos (1993)	0,785	0,07969	70,501	23,0
	(Coeficientes c_2)	1,7706	0,0251	33,058	25,0
	Matyka e Koza (2012)	-	0,09629	91,376	23,0
L01A60S25	Archie (1942)	0,5	0,17423	61,577	50,0
	(Coeficientes α)	2,3487	0,0264	11,889	25,0
	Tomadakis e Sotirchos (1993)	0,785	0,11344	42,163	50,0
	(Coeficientes c_2)	1,5475	0,0384	9,778	23,0
	Matyka e Koza (2012)	-	0,21358	73,877	23,0
L01A60S50	Archie (1942)	0,5	0,15322	62,640	23,0
	(Coeficientes α)	2,3928	0,0209	17,717	30,0
	Tomadakis e Sotirchos (1993)	0,785	0,10009	43,575	23,0
	(Coeficientes c_2)	1,5632	0,0322	13,695	30,0
	Matyka e Koza (2012)	-	0,19595	73,580	23,0

Fonte: Autoria própria (2022).

menores ao variar os coeficientes α e c_2 dos modelos de τ de Archie (1942) e de Tomadakis e Sotirchos (1993).

Novamente, o modelo $Da_{Matyka-Koza}$ apresentou os maiores valores de $E_{K,max}$ entre os modelos comparados, resultando no pior ajuste da correlação aos resultados numéricos. Por outro lado, o modelo $Da_{Tomadakis-Sotirchos}$ permitiu o melhor ajuste entre os modelos.

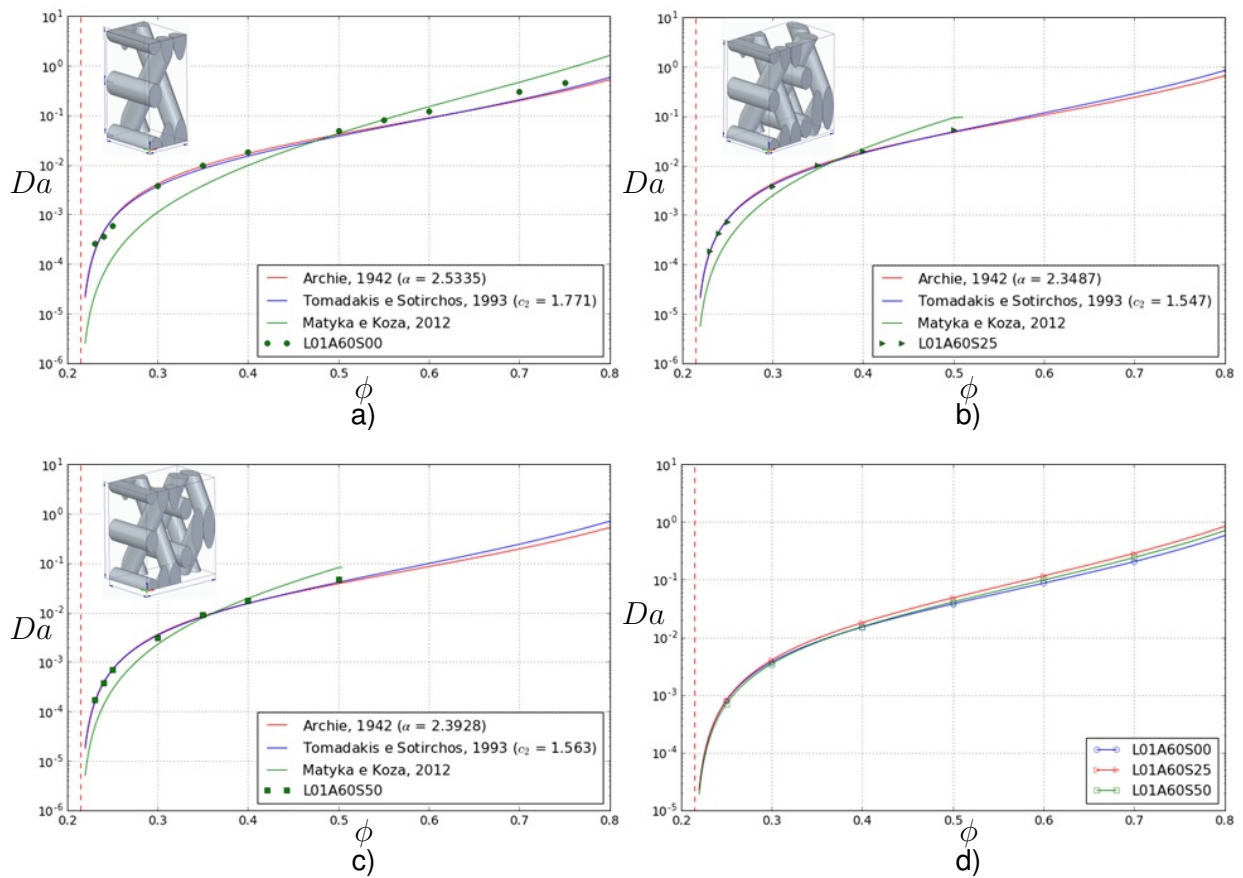
As Figuras 5.24 (a), (b) e (c) apresentam, respectivamente, as comparações entre correlações com cada modelo de tortuosidade para os meios porosos L02 A60 S00, L02 A60 S25 e L02 A60 S50. Além disto, a Figura 5.24 (d) compara os três meios porosos pelas correlações com o modelo $Da_{Tomadakis-Sotirchos}$.

Para os meios porosos com $De \neq 0$ das Figuras 5.24 (b) e (c), as correlações com o modelo $Da_{Matyka-Koza}$ foram apresentadas até $\phi = 0,30$, uma vez que a falta de simulações acima deste valor leva a um comportamento incoerente das curvas, devido à necessidade de interpolações.

Quanto à comparação entre meios porosos da Figura 5.24 (d), desta vez notou-se que $De = 25\%$ quase não influencia na correlação, sobrepondo a curva para $De = 0\%$, porém $De = 50\%$ altera mais significativamente a inclinação da curva, o que permite visualizar a diferença entre correlações. Isto ocorre devido à menor quantidade de simulações para altas porosidades em $De \neq 0\%$.

Portanto, o modelo $Da_{Tomadakis-Sotirchos}$ para o cálculo da tortuosidade foi escolhido para caracterizar τ no presente trabalho, visto que este modelo apresentou o melhor ajuste na grande

Figura 5.23 – Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) $L01 A60 S00$, b) $L01 A60 S25$, c) $L01 A60 S50$ e d) comparação entre as três correlações escolhidas para cada meio ($Da_{Tomadakis-Sotirchos}$).



Fonte: Autoria própria (2022).

maioria dos meios porosos projetados, apesar das ressalvas quanto aos casos com menos simulações.

A Figura 5.25 a seguir apresenta uma comparação entre as curvas obtidas pela análise de escala com o modelo de τ de Tomadakis e Sotirchos (1993), Equação 5.13, para todos os meios porosos simulados, utilizando os coeficientes de ajuste que foram calculados no presente trabalho. Para facilitar, a Tabela 5.12 resume os coeficientes C_K e c_2 calculados para cada configuração do meio poroso para a Equação 5.13.

A correlação apresentou as mesmas características observadas nos resultados numéricos da Figura 5.18, ou seja, o meio poroso $L02 A90 S00$ apresentou os maiores valores de Da , enquanto o meio $L01 A90 S50$ apresentou os menores valores de Da . Além disto, para $\phi > 0,50$ os meios porosos $L02 A60 S(\theta)$ apresentaram menores valores, indicando a alteração na inclinação das curvas com o aumento de θ .

Como a Equação 5.13 foi capaz de reproduzir as características discutidas dos números de Darcy e permaneceu dentro de uma diferença percentual aceitável devido aos coeficientes ajustados, a análise de escala resultou em uma correlação confiável para avaliar a ordem dos valores de permeabilidade dos meios porosos propostos.

Tabela 5.11 – Coeficientes de ajuste, $E_{K,max}$ e ϕ_{max} para correlações dos meios porosos L02 A60 S(De).

Meio Poroso	Modelo de Tortuosidade	Coeficientes para τ	C_K	$E_{K,max}$	ϕ_{max}
L02A60S00	Archie (1942)	0,5	0,03577	82,936	23,0
	(Coeficientes α)	3,5294	0,0017	30,398	23,0
	Tomadakis e Sotirchos (1993)	0,785	0,02496	72,475	23,0
	(Coeficientes c_2)	2,3313	0,0031	24,223	23,0
	Matyka e Koza (2012)	-	0,02891	89,667	23,0
L02A60S25	Archie (1942)	0,5	0,09890	44,324	23,0
	(Coeficientes α)	4,0868	0,0009	1,409	25,0
	Tomadakis e Sotirchos (1993)	0,785	0,05015	34,725	23,0
	(Coeficientes c_2)	2,3546	0,0033	0,279	25,0
	Matyka e Koza (2012)	-	0,11319	57,681	23,0
L02A60S50	Archie (1942)	0,5	0,07365	52,525	30,0
	(Coeficientes α)	4,9125	0,0002	5,592	25,0
	Tomadakis e Sotirchos (1993)	0,785	0,03772	43,790	23,0
	(Coeficientes c_2)	2,8308	0,0012	6,926	23,0
	Matyka e Koza (2012)	-	0,08614	63,784	23,0

Fonte: Autoria própria (2022).

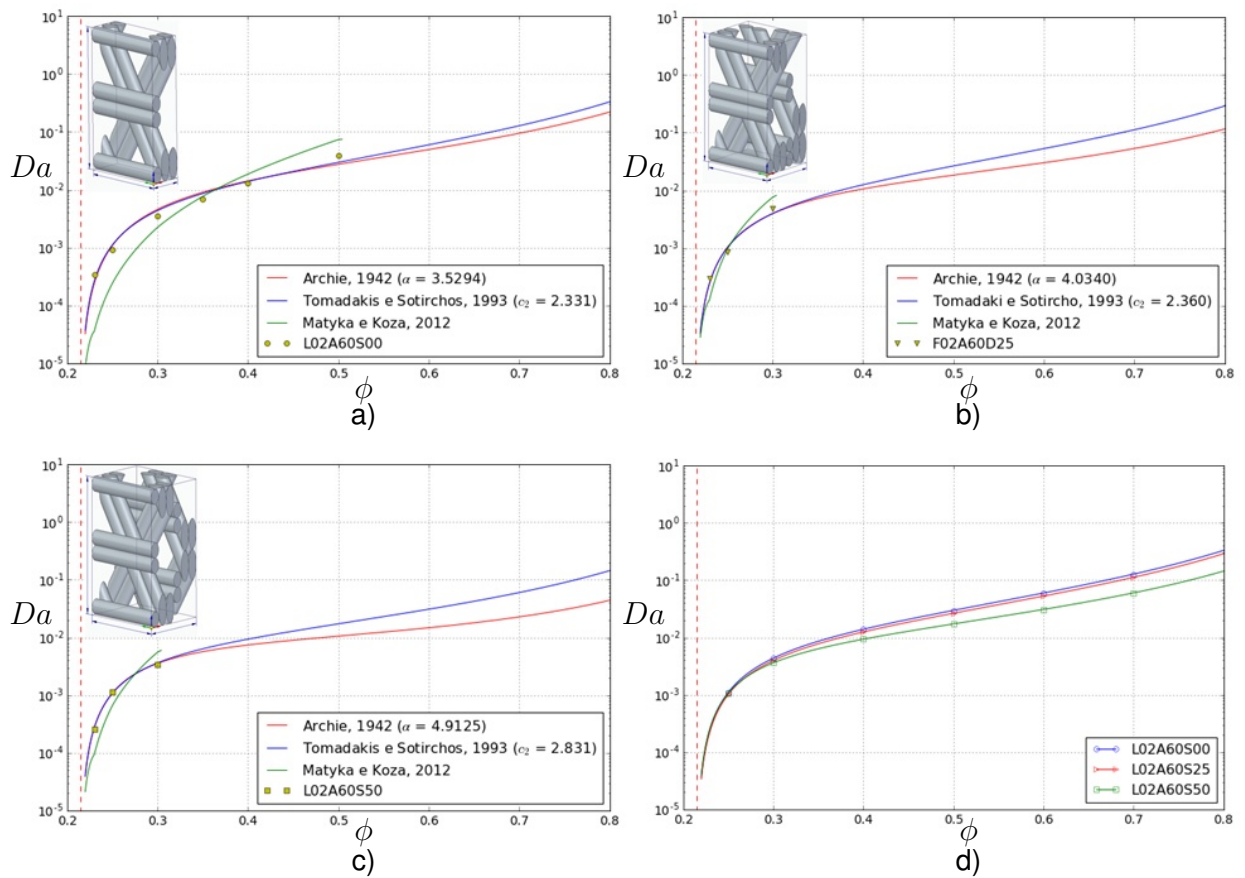
Tabela 5.12 – Coeficientes C_K e c_2 da Equação 5.13 para cada configuração de meio poroso.

θ	N_f	De (%)	C_K	c_2
90	01	0	0,0722	0,9710
		25	0,0543	1,1875
		50	0,0379	1,3632
	02	0	0,0593	0,5419
		25	0,0148	1,3980
		50	0,0060	1,8403
60	01	0	0,0251	1,7706
		25	0,0384	1,5475
		50	0,0322	1,5632
	02	0	0,0031	2,3313
		25	0,0033	2,3546
		50	0,0012	2,8308

Fonte: Autoria própria (2022).

Isto posto, o modelo de τ de Tomadakis e Sotirchos (1993) foi considerado o mais adequado para o presente problema e foi utilizado para a caracterização das tortuosidades dos meios porosos propostos. A Figura 5.26 a seguir apresenta um gráfico de τ por ϕ para todos os meios simulados, utilizando a Equação 2.8 com os coeficientes c_2 apresentados na Tabela 5.12.

Figura 5.24 – Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para: a) $L02 A60 S00$, b) $L02 A60 S25$, c) $L02 A60 S50$ e d) comparação entre as três correlações escolhidas para cada meio ($Da_{Tomadakis-Sotirchos}$).



Fonte: Autoria própria (2022).

Conforme discutido anteriormente, os valores dos coeficientes para os meios com $\theta = 60^\circ$ estão sujeitos a maiores erros de ajuste devido a menos simulações terem sido realizadas. Contudo, mesmo que os valores de τ possam eventualmente estar mais altos ou baixos devido aos erros discutidos, as principais características da influência dos parâmetros geométricos sobre τ puderam ser observadas na Figura 5.26.

Constatou-se na Figura 5.26 que o meio poroso $L02 A90 S00$ apresentou as menores tortuosidades. Isto ocorre devido ao meio $L02 A90 S00$ apresentar maior diâmetro de poro ($2\delta_{min}$) do que os meios com $N_f = 1$, o que resulta em maior área de escoamento, com pouca obstrução pelo desalinhamento ser de 0%. Já o meio $L02 A60 S50$ apresentou as maiores tortuosidades devido sua complexidade estrutural, uma vez que o ângulo de varredura de 60° gera maior obstrução do escoamento em comparação ao ângulo de 90° , o que requer um maior desvio do fluido para permear o meio poroso. Além disto, o desalinhamento de 50% também aumenta esta obstrução do escoamento, aumentando o valor de τ , conforme observado em todas as configurações de N_f e θ .

Ademais, para $\theta = 90^\circ$ os meios com $N_f = 1$ apresentaram um pequeno aumento de τ com o aumento de De , enquanto os meios com $N_f = 2$ apresentaram um aumento bem

Figura 5.25 – Número de Darcy (Da) por porosidade (ϕ) para todos os meios porosos simulados.

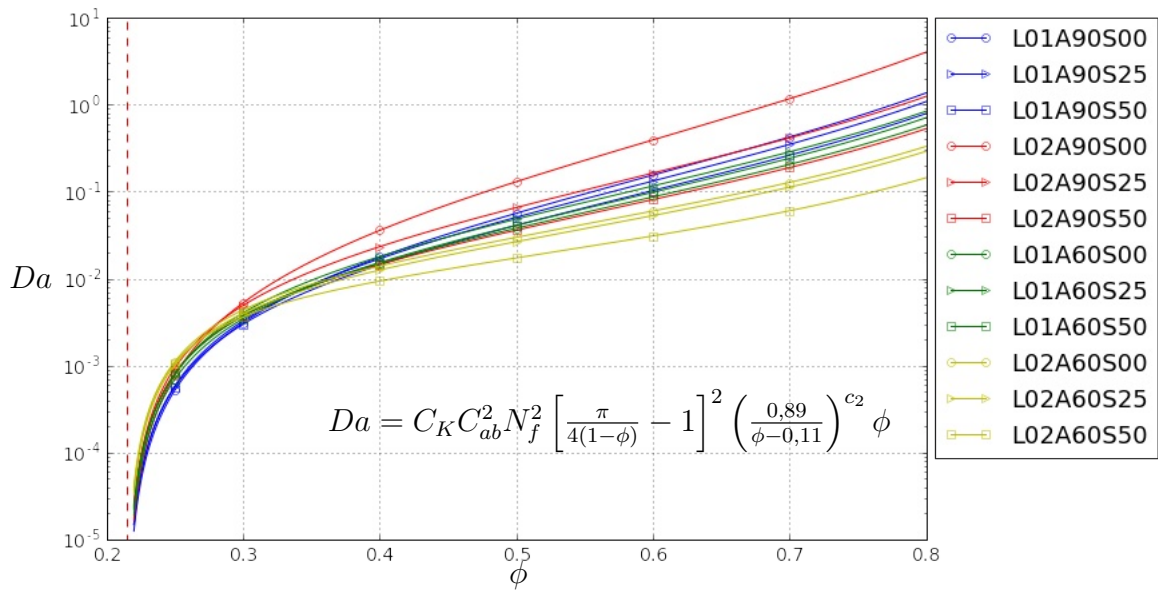
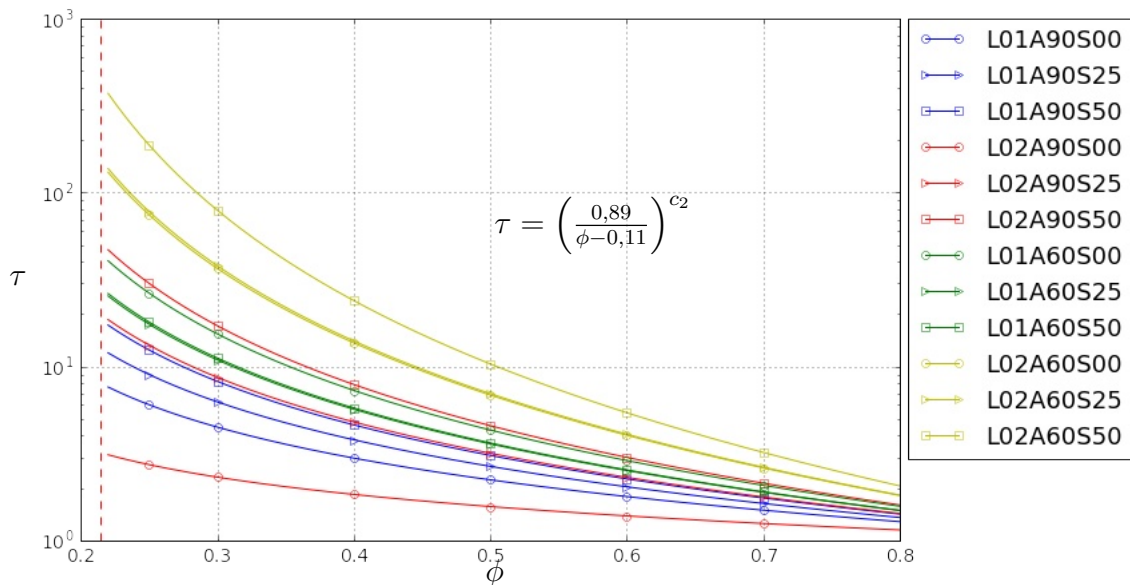


Figura 5.26 – Tortuosidade (τ) por porosidade (ϕ) para todos os meios porosos simulados.



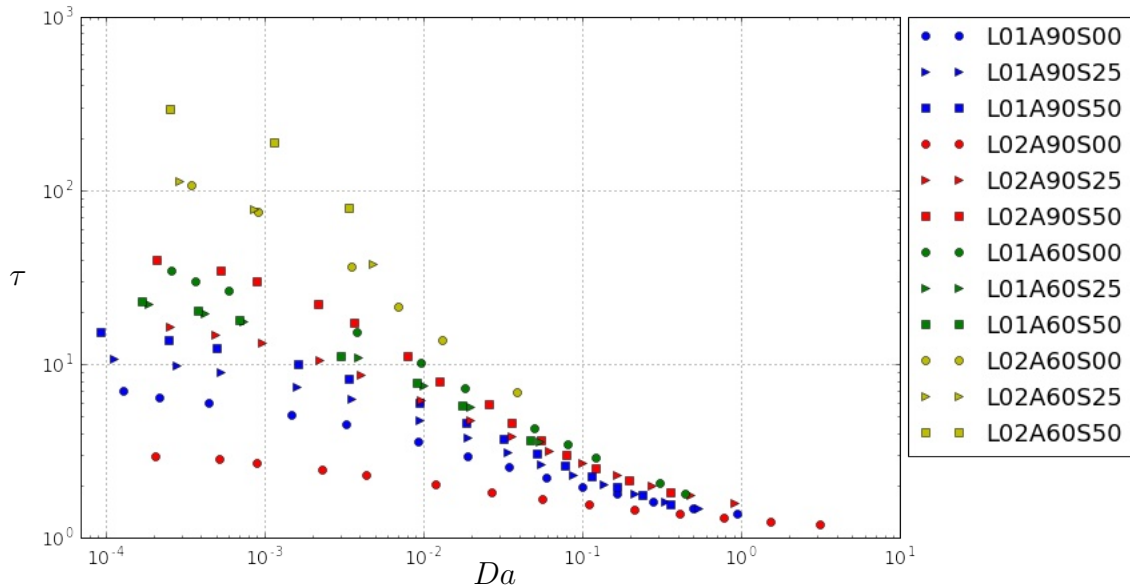
mais significativo de τ com o aumento de De . Em outras palavras, observou-se que, neste caso, obstruir o meio poroso é mais eficaz para aumentar a tortuosidade quando o espaço de escoamento é maior, devido ao fluido realizar um desvio maior para permear o meio.

Para $\theta = 60^\circ$, nos meios com $N_f = 1$ constatou-se pouca variação de τ entre $De = 25\%$ e 50% . Já para os meios com $N_f = 2$, têm-se pouca variação de τ entre $De = 0\%$ e 25% , enquanto $De = 50\%$ apresentou uma diferença significativa em relação aos anteriores. Da mesma forma que para Da , este tipo de comportamento de τ decorre de menos simulações estarem disponíveis para o ajuste da curva, levando a valores próximos dos coeficientes de ajuste c_2 .

Portanto, considerou-se que a caracterização de τ pelo modelo de Tomadakis e Sotirchos (1993) foi satisfatória. Considerou-se também que a correlação da Equação 5.13, obtida por análise de escala, pôde representar satisfatoriamente os resultados numéricos para os meios porosos propostos.

Tendo a tortuosidade caracterizada, a Figura 5.27 a seguir apresenta um gráfico de τ por Da para todos os meios porosos simulados.

Figura 5.27 – Tortuosidade (τ) por número de Darcy (Da) para todos os meios porosos simulados.



Primeiramente, verificou-se na Figura 5.27 um acréscimo de τ ao variar θ de 90° para 60° , o mesmo comportamento da Figura 5.26. Em sequência, notou-se como o meio $L02 A90 S00$ de maior Da apresentou menor τ entre todos os simulados. Entretanto, o meio $L01 A90 S50$ de menor Da não apresentou a maior τ . Isto ocorre pois, entre os três parâmetros da Equação 5.10, o δ_{min} é o fator de influência predominante no cálculo de Da , por isto o meio $L01 A90 S50$ apresentou menor Da do que o meio $L02 A60 S50$.

A Figura 5.27 é importante para projetos de meios porosos por permitir avaliar os efeitos dos parâmetros geométricos definidos na faixa de valores estudados. Se for necessário números de Darcy entre 10^{-3} e 10^{-2} , por exemplo, e também for necessário um meio de baixa tortuosidade, os meios com $\theta = 90^\circ$ e $De = 0\%$ são os mais adequados, enquanto para alta tortuosidade deve-se utilizar os meios com $N_f = 2$ e $\theta = 60^\circ$.

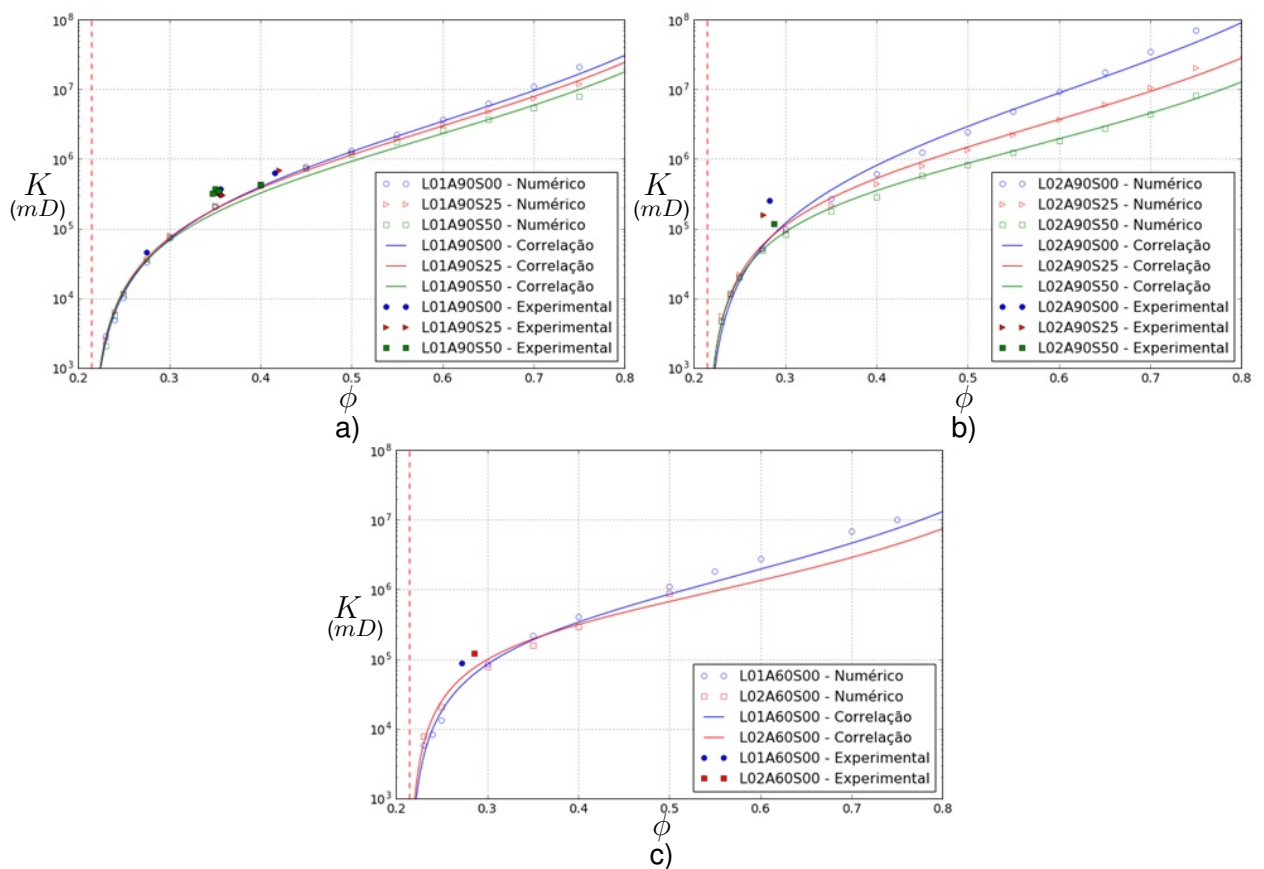
Por fim, com os resultados numéricos verificados e com a correlação para Da em função de ϕ definida, deu-se sequência à validação do problema, isto é, realizou-se uma comparação das simulações com os resultados experimentais de RepSol-UTFPR (2020).

5.2.4 Validação dos Resultados Numéricos

Na presente seção, a validação foi realizada pela comparação dos resultados numéricos obtidos por MVF com resultados experimentais obtidos pelo procedimento descrito na Seção 4.4.

Estão expostos a seguir os valores de K (mD) em função de ϕ para os meios porosos $L01 A90 S(De)$ na Figura 5.28 (a), para $L02 A90 S(De)$ na Figura 5.28 (b) e $L01 A60 S00$ e $L02 A60 S00$ na Figura 5.28 (c). Os resultados experimentais foram comparados aos valores de K obtidos por MVF e pelas correlações obtidas pela Equação 5.13.

Figura 5.28 – Permeabilidade (K) por porosidade (ϕ) para os meios porosos: a) $L01 A90 S(De)$, b) $L02 A90 S(De)$ e c) $L01 A60 S00$ e $L02 A60 S00$.



Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 5.28 (a), observou-se uma diferença relativamente baixa entre os resultados experimentais e numéricos para os meios porosos $L01 A90 S(De)$. Especificamente para $\phi = 0,275$ e $\phi \geq 0,40$, os resultados experimentais ficaram bem próximos dos numéricos e das correlações para os três meios porosos comparados. Além disto, para ϕ em torno de 0,35 os resultados ficaram visualmente mais distantes, porém ainda foram satisfatórios considerando a discussão sobre a ordem de valores ser a mesma entre os métodos.

Na Figura 5.28 (b), obteve-se notavelmente uma diferença maior entre os resultados. O resultado experimental para o meio poroso $L02 A90 S50$ se aproximou dos resultados numéricos

e analíticos tão bem quanto os anteriores, enquanto para o meio poroso *L02 A90 S00* os resultados ficaram mais distantes.

Para os meios porosos com $\theta = 60^\circ$, na Figura 5.28 (c), menos amostras foram produzidas e testadas em permeâmetro, por isto os resultados com $De = 0\%$ para $N_f = 01$ e 02 foram apresentados juntos. Constatou-se uma boa aproximação dos experimentos aos resultados do presente trabalho para ambos meios porosos.

Para avaliar quantitativamente a validação, as diferenças percentuais entre os resultados experimentais da Figura 5.28 e a Equação 5.13 foram calculadas. Escolheu-se comparar os resultados experimentais à correlação devido aos valores de ϕ experimentais não serem exatamente iguais aos valores de ϕ simulados. Portanto, a correlação permite comparar com maior facilidade os resultados, visto que basta utilizar os valores de ϕ dos experimentos na Equação 5.13, sem a necessidade de interpolações.

As diferenças percentuais (E_K) foram calculadas entre as permeabilidades obtidas por experimentos ($K_{\text{Experimental}}$) e obtidas por correlação ($K_{\text{Correlação}}$) da forma:

$$E_K = \frac{|K_{\text{Experimental}} - K_{\text{Correlação}}|}{K_{\text{Experimental}}} \quad (5.16)$$

A Tabela 5.13 apresenta os valores de ϕ , de E_K e de K (mD) para os experimentos e para a correlação em cada valor de ϕ experimental.

Tabela 5.13 – Comparação entre valores de K (mD) obtidos por experimentos e pela análise de escala.

Meios Porosos	ϕ (%)	$K_{\text{Experimental}}$ (mD)	$K_{\text{Correlação}}$ (mD)	E_K (%)
L01A90S00	27,50	$4,568.10^4$	$3,426.10^4$	24,999
	35,60	$3,686.10^5$	$2,090.10^5$	43,285
	35,52	$3,216.10^5$	$2,063.10^5$	35,832
	35,38	$3,206.10^5$	$2,017.10^5$	37,079
	41,55	$6,261.10^5$	$4,844.10^5$	22,622
L01A90S25	35,80	$3,010.10^5$	$2,141.10^5$	28,893
	35,42	$3,268.10^5$	$2,020.10^5$	38,183
	35,72	$3,103.10^5$	$2,115.10^5$	31,834
	42,01	$7,005.10^5$	$4,849.10^5$	30,774
L01A90S50	35,00	$3,765.10^5$	$1,663.10^5$	55,834
	34,69	$3,255.10^5$	$1,586.10^5$	51,254
	35,37	$3,459.10^5$	$1,757.10^5$	49,208
	40,02	$4,326.10^5$	$3,239.10^5$	25,130
L02A90S00	28,31	$2,527.10^5$	$7,206.10^4$	71,488
L02A90S25	27,63	$1,575.10^5$	$6,004.10^4$	61,892
L02A90S50	28,76	$1,180.10^5$	$6,810.10^4$	42,292
L01A60S00	27,19	$8,856.10^4$	$4,181.10^4$	52,784
L02A60S00	28,60	$1,210.10^5$	$7,509.10^4$	37,966

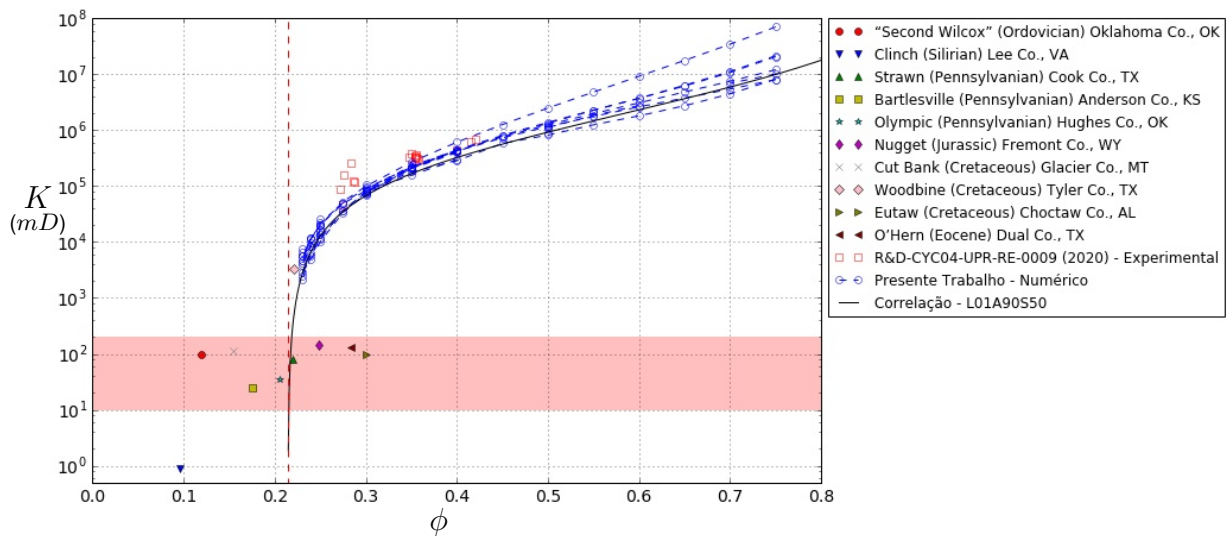
Fonte: Autoria própria (2022).

Assim sendo, conforme observado na Figura 5.28, as maiores diferenças foram encontradas nos meios porosos $L02 A90 S(De)$, chegando a 71,488% no meio com $De = 0\%$. Além disto, o menor valor de E_K foi 22,622% para o meio poroso $L01 A90 S00$ em $\phi = 0,4155$.

Portanto, considerou-se que a validação dos resultados foi satisfatória, visto que foi possível chegar numericamente a resultados próximos dos resultados experimentais. Mesmo com a diferença percentual relativamente alta para o meio $L02 A90 S00$ e cientes de possíveis erros nas correlações para os meios com $\theta = 60^\circ$ devido a menos simulações terem sido realizadas, os ajustes aos resultados experimentais foram aceitáveis, uma vez que foi possível estimar a ordem de valores em que a permeabilidade se encontra.

Visando uma contextualização da faixa de valores estudada no presente trabalho, foi realizada uma comparação dos resultados obtidos com permeabilidades de rochas reais, que são comumente encontradas em reservatórios de petróleo. A Figura 5.29 apresenta uma comparação entre os resultados numéricos obtidos por MVF, os resultados experimentais do permeâmetro utilizados na validação, a correlação da Equação 5.13 e permeabilidades de rochas reais de Tiab e Donaldson (2015).

Figura 5.29 – Permeabilidade (K) por porosidade (ϕ) para comparação de resultados com rochas reais.



Fonte: Autoria própria (2022).

Observou-se que as permeabilidades de rochas reais variam comumente entre 10^1 e 10^2 mD , representada pela faixa de valores vermelha na Figura 5.29, enquanto que as permeabilidades dos meios simulados variam de 10^3 a 10^8 mD .

Para diminuir a permeabilidade dos meios porosos organizados propostos no presente trabalho até a faixa de valores marcada, seria necessário reduzir a porosidade e o diâmetro de poro até a valores extremamente próximos da porosidade limite estabelecida pelos formatos dos filamentos. Isto é inviável de ser simulado devido a problemas de divergência e aos altos tempos computacionais relacionados a meios com porosidades próximas do limite.

Todavia, a análise de escala permite uma avaliação do comportamento dos meios porosos em porosidades próximas do limite. Escolheu-se plotar a correlação para *L01 A90 S50* na Figura 5.29 por ter sido o meio poroso que apresentou menores valores de K na faixa de ϕ estudada. Constatou-se que para atingir a faixa de valores de rochas reais utilizando o meio poroso *L01 A90 S50*, considerando $b = 0,15 \text{ mm}$, faz-se necessário que ϕ esteja entre 0,215525 a 0,218764 e, portanto, δ_{min} esteja aproximadamente entre 0,000259 e 0,001172 mm .

Assim como é complexo realizar simulações em valores tão baixos de δ_{min} , também é difícil fabricar amostras por impressão 3D nestes valores devido a resolução dos equipamentos disponíveis não alcançarem tamanha precisão. Contudo, pode ser possível obter porosidades tão baixas ao utilizar outras estruturas de meios porosos compostos de filamentos diferentes das utilizadas no presente trabalho.

5.3 Síntese do Capítulo 5

Neste capítulo foram expostos os resultados de simulação, que foram verificados e validados pela comparação com outros resultados obtidos pelo grupo e pela literatura. Primeiramente, apresentou-se resultados de verificação e validação do método, em que conclui-se que o MVF é adequado para simulações de escoamentos nos meios porosos propostos.

Em seguida, para os meios porosos de filamentos elípticos propostos, apresentou-se resultados da verificação do regime de Darcy para ΔP variando de 0,12 a 1.200 Pa , constatou-se que a ΔP de 1,2 Pa foi a mais adequada para as simulações.

Os resultados numéricos de permeabilidade foram apresentados em gráficos de Da por ϕ e verificados pela comparação com resultados obtidos por LBM. Constatou-se pela verificação que os resultados obtidos são coerentes e alguns campos de vetores foram apresentados para ilustrar os escoamentos em diferentes configurações do meio poroso.

Na sequência, a análise de escala foi realizada para encontrar uma correlação para Da . Observou-se que δ_{min} foi a variável de maior influência no presente estudo. Três diferentes modelos de tortuosidade foram comparados ao ajustar as curvas obtidas aos resultados numéricos. O modelo de Tomadakis e Sotirchos (1993) foi escolhido como o mais apropriado para o presente trabalho. Sendo assim, caracterizou-se τ pela Equação 2.8 e Da pela Equação 5.13.

Por fim, os resultados foram validados pela comparação com resultados experimentais obtidos pelo grupo e foram comparados com valores de permeabilidade de rochas reais da literatura. Concluiu-se que os resultados numéricos e analíticos são suficientemente coerentes, isto é, foi possível estimar numericamente a ordem de grandeza da permeabilidade de meios porosos manufacturados. Além disto, observou-se que os meios porosos de filamentos elípticos propostos podem apresentar permeabilidade dentro da faixa de valores das rochas reais desde que δ_{min} e ϕ sejam baixos o suficiente.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foram caracterizadas as permeabilidades (K) e as tortuosidades (τ) de meios porosos ao variar os parâmetros geométricos denominados: a porosidade (ϕ), o desalinhamento entre camadas (De), o ângulo de varredura (θ) e o número de filamentos unidos na estrutura (N_f). Em resumo, os resultados das simulações mostraram que K diminui ao diminuir ϕ , diminui ao aumentar De , aumenta ou diminui ao diminuir θ , dependendo de ϕ , e aumenta ou diminui ao aumentar N_f , dependendo de ϕ e De . Além disto, τ aumenta ao diminuir ϕ , aumenta ao aumentar De , aumenta ao diminuir θ , e aumenta ou diminui ao aumentar N_f , dependendo de θ e De .

A validação e verificação do método foi realizada para averiguar que a metodologia permite simular escoamentos em meios porosos, além de possibilitar a comparação realizada entre diferentes tipos de filamentos, que resultou na redução dos valores de K ao alterar o filamento de cilíndrico para elíptico.

A verificação dos resultados foi realizada com êxito, uma vez que os resultados por MVF obtidos no presente trabalho foram próximos o suficiente dos resultados por LBM obtidos pelo grupo, garantindo que os valores de K obtidos são coerentes.

A análise de escala permitiu encontrar uma correlação que demonstra a dependência de K pelos parâmetros δ_{min} , τ e ϕ . Observou-se pela normalização das curvas que δ_{min} é um parâmetro de grande influência no valor de K . Além disto, entre os modelos de cálculo de tortuosidade testados pela análise de escala, chegou-se a conclusão que o modelo de Tomadakis e Sotirchos (1993) foi o mais apropriado para o presente caso. Contudo, o coeficiente de ajuste c_2 foi calculado para os meios porosos com base nos resultados numéricos previamente verificados ao invés de utilizar o valor sugerido na literatura.

Quanto à validação do método, as simulações apresentaram valores próximos o suficiente dos resultados experimentais das amostras de polímeros compostas por filamentos elípticos. As diferenças percentuais foram calculadas entre resultados experimentais e correlações, e a conclusão foi que é possível estimar numericamente a ordem de valores das propriedades permoporosas das amostras fabricadas, uma vez que foram constatadas diferenças satisfatórias.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Algumas sugestões que poderiam ajudar no desenvolvimento da presente linha de pesquisa, seriam primeiramente otimizar o tempo computacional utilizado, considerando os excessivos tempos que foram necessários para a conclusão não só das simulações, mas de todo o projeto.

O alto tempo computacional, principalmente para $\theta = 60^\circ$, pode decorrer de diversas razões, sendo a mais provável a complexidade envolvendo as malhas utilizadas. É possível que o tempo seja otimizado ao utilizar malhas diferentes, com diferentes formatos de elementos e/ou

parâmetros. Para isto, diferentes testes de malha seriam necessários, para decidir os outros parâmetros além das quantidades de elementos.

Outra forma de reduzir o tempo computacional seria utilizar esquemas mais simples para a discretização do método. O esquema QUICK escolhido apresenta melhor precisão que o esquema Upwind, por exemplo, apesar de requerer maior tempo para convergência. No entanto, considerando todas as simplificações feitas pelas hipóteses propostas, considera-se utilizar o esquema Upwind em futuros estudos de casos como forma de economizar tempo computacional.

Uma terceira forma de reduzir o tempo computacional seria atualizar o hardware do computador utilizado para as simulações. Uma memória RAM de maior capacidade pode acelerar consideravelmente as simulações, além de permitir o uso de técnicas de paralelização de dados para utilizar diferentes processadores no cálculo.

Além disto, realizar simulações para uma maior quantidade de valores para os parâmetros δ_{min} , N_f , θ e De permitirá uma melhor compreensão da influência de cada um na permeabilidade dos meios porosos, colaborando com o mapa de resultados da Figura 5.27 para a escolha de meios porosos em função de Da e τ . Ampliar este mapa de resultados pode ainda contribuir para linhas de pesquisa que utilizem geometrias obtidas por microtomografia, permitindo utilizar como base a metodologia do REV aplicada no presente trabalho para a caracterização de amostras reais de rochas.

Por fim, constatou-se uma alta influência dos parâmetros geométricos N_f , θ e De na tortuosidade do meio, o que leva à discussão se diferentes valores destes parâmetros podem aumentar a perda de carga do escoamento, resultando em menores valores de permeabilidade.

REFERÊNCIAS

- ALI, D.; SEN, S. Finite element analysis of mechanical behavior, permeability and fluid induced wall shear stress of high porosity scaffolds with gyroid and lattice-based architectures. **Journal of the mechanical behavior of biomedical materials**, Elsevier, v. 75, p. 262–270, 2017.
- ANDERSON, G. Coring and core analysis handbook. Petroleum Publishing Company, Tulsa, OK, 1975.
- ANSYS INC. **Ansys @Academic Research Mechanical, Release 12.1, ANSYS CFX-Solver Theory Guide**. [S.l.], 2009.
- ANSYS INC. **Ansys @Academic Research Mechanical, Release 19.1, Help System, Non-Conformal Mesh Calculations**. [S.l.], 2020.
- API, R. Recommended practices for core analysis. **Recommended Practice**, v. 40, 1998.
- ARCHIE, G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. **Transactions of the AIME**, Society of petroleum engineers, v. 146, n. 01, p. 54–62, 1942.
- BAZARIN, R. L. M. *et al.* Validation of numerical modeling to evaluate the permeability of polymeric porous samples obtained by additive manufacturing. **18th BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING (ENCIT)**, 2020.
- BEAR, J.; BACHMAT, Y. **Introduction to modeling of transport phenomena in porous media**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 4.
- BEJAN, A.; KRAUS, A. D. **Heat transfer handbook**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003. v. 1.
- BERGELIN, O. *et al.* Heat transfer and fluid friction during viscous flow across banks of tubes: lii—a study of tube spacing and tube size. **ASME Transactions**, v. 72, p. 881–888, 1950.
- CARMAN, P. C. Fluid flow through granular beds. **Trans. Inst. Chem. Eng.**, v. 15, p. 150–166, 1937.
- CINTRA, R. **Brocas de Perfuração - Conheça alguns detalhes**. 2016. Acesso em: 19 de fev. 2020. Disponível em: <https://www.portalmaritimo.com/2016/11/04/brocas-de-perfuracao-conheca-alguns-detalhes/>.
- CLAGUE, D. *et al.* Hydraulic permeability of (un) bounded fibrous media using the lattice boltzmann method. **Physical Review E**, APS, v. 61, n. 1, p. 616, 2000.
- DARCY, H. P. G. **Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau, etc**. [S.l.]: V. Dalamont, 1856.
- De Lai, F. C. Simulação numérica do escoamento particulado para o preenchimento de canal fraturado. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná., 2013.
- DIAS, M. *et al.* Permeability analysis of scaffolds for bone tissue engineering. **Journal of biomechanics**, Elsevier, v. 45, n. 6, p. 938–944, 2012.
- DUDA, A.; KOZA, Z.; MATYKA, M. Hydraulic tortuosity in arbitrary porous media flow. **Physical Review E**, APS, v. 84, n. 3, p. 036319, 2011.

- FURUMOTO, T. *et al.* Permeability and strength of a porous metal structure fabricated by additive manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 219, p. 10–16, 2015.
- GAO, H.; LI, H. A. Pore structure characterization, permeability evaluation and enhanced gas recovery techniques of tight gas sandstones. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, Elsevier, v. 28, p. 536–547, 2016.
- GOSTICK, J. T. *et al.* In-plane and through-plane gas permeability of carbon fiber electrode backing layers. **Journal of Power Sources**, Elsevier, v. 162, n. 1, p. 228–238, 2006.
- HIGDON, J.; FORD, G. Permeability of three-dimensional models of fibrous porous media. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge University Press, v. 308, p. 341–361, 1996.
- KAVIANY, M. Conduction heat transfer. *In: Principles of heat transfer in porous media.* [S.l.]: Springer, 1995. p. 119–156.
- LAGE, J. **The Fundamental Theory of Flow through Permeable Media from Darcy to Turbulence.** [S.l.]: Pergamon Press, 1998. Edited by DB Ingham and I. Pop. P 1-31, in "Transport Phenomena in Porous Media".
- LI, J. *et al.* Numerical evaluation and prediction of porous implant design and flow performance. **BioMed Research International**, Hindawi, v. 2018, 2018.
- LIFTON, V. A. Microfluidics: an enabling screening technology for enhanced oil recovery (eor). **Lab Chip**, The Royal Society of Chemistry, v. 16, p. 1777–1796, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/C6LC00318D>.
- MATYKA, M.; KOZA, Z. How to calculate tortuosity easily? *In: AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. AIP Conference Proceedings 4.* [S.l.], 2012. v. 1453, n. 1, p. 17–22.
- MCPHEE, C.; REED, J.; ZUBIZARRETA, I. Core analysis: A best practice guide. **Elsevier - Developments in Petroleum Science**, v. 64, 2015.
- MELCHELS, F. P. *et al.* Effects of the architecture of tissue engineering scaffolds on cell seeding and culturing. **Acta biomaterialia**, Elsevier, v. 6, n. 11, p. 4208–4217, 2010.
- MONTAZERIAN, H. *et al.* Permeability and mechanical properties of gradient porous pdms scaffolds fabricated by 3d-printed sacrificial templates designed with minimal surfaces. **Acta biomaterialia**, Elsevier, v. 96, p. 149–160, 2019.
- MONTAZERIAN, H. *et al.* Longitudinal and radial permeability analysis of additively manufactured porous scaffolds: Effect of pore shape and porosity. **Materials & Design**, Elsevier, v. 122, p. 146–156, 2017.
- MUGGERIDGE, A. *et al.* Recovery rates, enhanced oil recovery and technological limits. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, The Royal Society Publishing., v. 372, n. 2006, p. 20120320, 2014.
- NIELD, D. A.; BEJAN, A. **Convection in porous media.** [S.l.]: Springer, 2006. v. 3.
- REPSOL-UTFPR. **R&D-CYC04-UPR-RE-0009: Relatório Final - Cyclop WP4 - Pesquisa/Infraestrutura. Geração de rochas sintéticas 3D para estudos de EOR.** 2020.
- SANDINO, C. *et al.* Predicting the permeability of trabecular bone by micro-computed tomography and finite element modeling. **Journal of biomechanics**, Elsevier, v. 47, n. 12, p. 3129–3134, 2014.

- SHIGUEOKA, M. O.; VOLPATO, N. Expanding manufacturing strategies to advance in porous media planning with material extrusion additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 38, p. 101760, 2021. ISSN 2214-8604. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860420311325>.
- SIEMENS INC. **SIEMENS PLM @SOLID EDGE 2020 Academic Edition**. [S./], 2020. Disponível em: https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/se/2020/se_help/.
- SKIBINSKI, J. *et al.* The influence of pore size variation on the pressure drop in open-cell foams. **Materials & Design**, Elsevier, v. 87, p. 650–655, 2015.
- SKOPEC, F.; COLLEE, P.; TYLER, P. Recent advances in coring technology: New techniques to enhance reservoir evaluation and improve coring. **SCA Conference**, n. paper 9604, September 1996.
- SOBERA, M.; KLEIJN, C. Hydraulic permeability of ordered and disordered single-layer arrays of cylinders. **Physical Review E**, APS, v. 74, n. 3, p. 036301, 2006.
- SOLTANI, P.; JOHARI, M. S.; ZARREBINI, M. Effect of 3d fiber orientation on permeability of realistic fibrous porous networks. **Powder Technology**, Elsevier, v. 254, p. 44–56, 2014.
- SPIESS, A.-N.; NEUMEYER, N. An evaluation of r^2 as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research: a monte carlo approach. **BMC pharmacology**, BioMed Central, v. 10, n. 1, p. 1–11, 2010.
- TAMAYOL, A.; BAHRAMI, M. Transverse permeability of fibrous porous media. **Mechatronic Systems Engineering, School of Engineering Science, Simon Fraser University**, 2011.
- TAVAKOLI, V. Core analysis: an introduction. *In*: **Geological Core Analysis**. [S./]: Springer, 2018. p. 1–13.
- TIAB, D.; DONALDSON, E. C. **Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties**. [S./]: Gulf professional publishing, 2015.
- TOMADAKIS, M. M.; SOTIRCHOS, S. V. Transport properties of random arrays of freely overlapping cylinders with various orientation distributions. **The Journal of chemical physics**, American Institute of Physics, v. 98, n. 1, p. 616–626, 1993.
- TRUSCELLO, S. *et al.* Prediction of permeability of regular scaffolds for skeletal tissue engineering: a combined computational and experimental study. **Acta biomaterialia**, Elsevier, v. 8, n. 4, p. 1648–1658, 2012.
- Van Doormaal, M. A.; PHAROAH, J. G. Determination of permeability in fibrous porous media using the lattice boltzmann method with application to pem fuel cells. **International journal for numerical methods in fluids**, Wiley Online Library, v. 59, n. 1, p. 75–89, 2009.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2a. ed. [S./]: Pearson education, 2007.
- VOSENBERG, P. *et al.* Darcian permeability constant as indicator for shear stresses in regular scaffold systems for tissue engineering. **Biomechanics and modeling in mechanobiology**, Springer, v. 8, n. 6, p. 499, 2009.
- WHITAKER, S. **Theory and applications of transport in porous media: the method of volume averaging**. [S./]: Kluwer Academic Publishers, 1999.

ZHANG, Z. *et al.* Hierarchical tailoring of strut architecture to control permeability of additive manufactured titanium implants. **Materials Science and Engineering: C**, Elsevier, v. 33, n. 7, p. 4055–4062, 2013.

ZHIANMANESH, M.; VARMAZYAR, M.; MONTAZERIAN, H. Fluid permeability of graded porosity scaffolds architected with minimal surfaces. **ACS Biomaterials Science & Engineering**, ACS Publications, v. 5, n. 3, p. 1228–1237, 2019.

APÊNDICE A – Testes de Malhas

Neste apêndice são apresentados os testes de malha para os meios porosos estudados no presente trabalho. Primeiramente, são apresentados os testes para os meios unidirecional, bidirecional e tridirecional da Seção 5.1, seguidos dos testes de malha para os meios de filamentos elípticos definidos na Seção 4.1.

Os testes de malha foram realizados para as porosidades mais baixa e mais alta para cada geometria, $\phi = 0,75$ e $\phi = 0,23$. A permeabilidade foi calculada com o número de elementos de malha arbitrário escolhido, a quantia de elementos da malha foi dobrada e a permeabilidade calculada novamente até que a diferença obtida pela Equação A.1 entre valores de permeabilidade fosse menor que 10% e os valores de número de Reynolds máximo fossem coerentes.

As diferenças entre as permeabilidades (E_K) para o teste das malhas foram calculadas entre as malhas pela relação:

$$E_K = \left(1 - \frac{K_{\text{grossa}}}{K_{\text{refinada}}} \right) \times 100 \quad (\text{A.1})$$

sendo que K_{refinada} é a permeabilidade na malha com maior números de elementos entre as duas malhas comparadas e K_{grossa} a permeabilidade na malha com menor número de elementos entre as malhas comparadas.

O teste foi realizado para geometria unidirecional com diferença de pressão $\Delta P = 1,2$ Pa. A malha utilizada para a geometria unidirecional é regular e permite o controle da quantia de elementos pelas divisões das arestas do REV. A Tabela A.1 a seguir apresenta os resultados de permeabilidade e número de Reynolds máximo em $\phi = 0,75$ e $\phi = 0,23$.

Tabela A.1 – Resultado do teste de malha para meio poroso unidirecional.

ϕ	Números de Elementos	Número de Divisões	K (m^2)	Re_{max}	E_K (%)
75%	400	10x10x4	1,3242e-02	5,3746e-02	-
	800	20x10x4	1,3089e-02	5,4014e-02	-
	1.600	40x10x4	1,3086e-02	5,4008e-02	-
	3.200	80x10x4	1,3145e-02	5,3467e-02	-
	6.400	80x20x4	1,3383e-02	5,2645e-02	1,77
	12.800	160x20x4	1,3427e-02	5,2682e-02	0,33
	23%	400	20x5x4	1,3036e-06	3,7648e-04
800		20x10x4	1,9340e-07	1,8869e-04	-
1.600		40x10x4	3,3771e-07	1,7269e-04	-
3.200		40x20x4	6,9259e-07	1,7273e-04	-
6.400		80x20x4	8,0342e-07	1,7463e-04	-
12.800		80x40x4	9,0116e-07	1,7465e-04	-
25.600		160x40x4	7,7848e-07	1,7578e-04	15,76
51.200		160x80x4	8,9337e-07	1,7558e-04	12,86
102.400		320x80x4	9,0103e-07	1,7588e-04	0,85

Fonte: Autoria própria (2022).

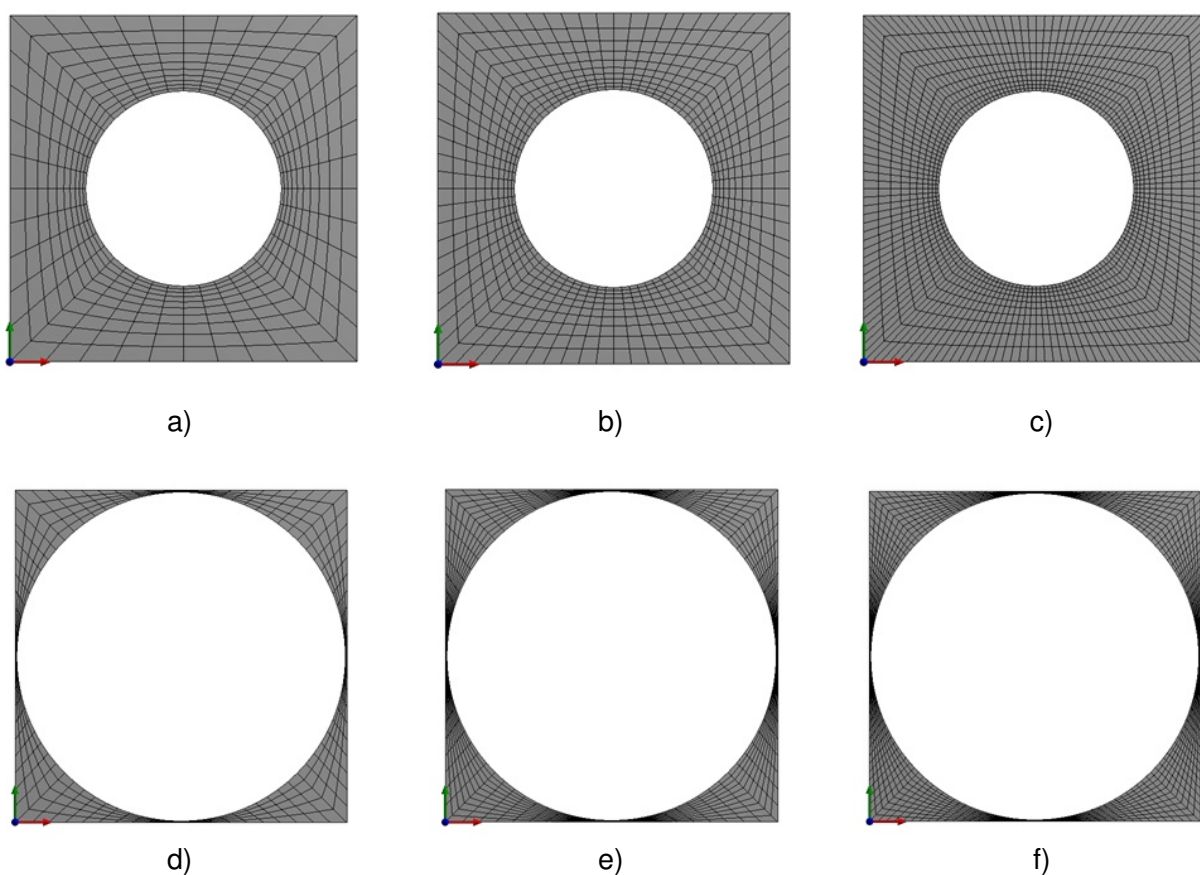
Apesar da baixa diferença entre as malhas de 400 elementos e de 800 elementos em $\phi = 0,75$, mais malhas foram testadas para garantir que a convergência estivesse adequada e

os valores de permeabilidade e de número de Reynolds variaram pouco. A diferença entre as malhas de 6.400 elementos e de 12.800 elementos foi $E_K = 0,33\%$, concluindo que a malha de 12.800 elementos representa o problema de forma satisfatória para $\phi = 0,75$. Para $\phi = 0,23$ entre as malhas de 51.200 elementos e 102.400 elementos tem-se $E_K = 0,85\%$, concluindo que a malha de 51.200 elementos representa o problema de forma satisfatória. Todavia, utilizou-se a malha de 102.400 elementos para os testes com baixos ϕ para garantir melhor precisão.

Constatou-se que a sensibilidade da malha computacional é bem maior em $\phi = 0,23$ do que em $\phi = 0,75$, indicando que $0,23$ é a porosidade mais crítica para o meio poroso unidirecional.

A Figura A.1 apresenta seis das malhas utilizadas para ilustrar como ocorre o teste de malha para geometria unidirecional.

Figura A.1 – Malhas utilizadas no teste de malha com: a) $\phi = 0,75$ e 400 elementos, b) $\phi = 0,75$ e 800 elementos, c) $\phi = 0,75$ e 1.600 elementos, d) $\phi = 0,23$ e 400 elementos, e) $\phi = 0,23$ e 800 elementos e f) $\phi = 0,23$ e 1.600 elementos.



Fonte: Autoria própria (2022).

As Figuras A.1 (a), (b) e (c) são malhas para o meio unidirecional com $\phi = 0,75$, nas quais se observam com clareza os menores elementos próximos da superfície do filamento. As Figuras A.1 (d), (e) e (f) são malhas com $\phi = 0,23$. Para malhas de 800 elementos ou mais em

$\phi = 0,23$, Figuras A.1 (e) e (f), o efeito de diminuição dos elementos próximos da superfície foi menos notável pelo pouco espaço entre filamentos.

Para a geometria bidirecional o REV é mais complexo por ser tridimensional e a malha utilizada é irregular, por isto os números de elementos não são exatamente o dobro entre malhas. A Tabela A.2 apresenta os resultados do teste de malha em $\phi = 0,75$ e $\phi = 0,23$ com diferença de pressão $\Delta P = 0,12$ Pascal.

Tabela A.2 – Resultado do teste de malha para meio poroso bidirecional.

ϕ	Comprimento médio dos elementos (mm)	Números de elementos	$K (m^2)$	Re_{max}	$E_K (%)$
75%	200,5	2.766	1,4431e-02	5,2081e-03	-
	125,0	5.413	1,3874e-02	5,1699e-03	-
	78,0	10.528	1,4405e-02	5,0987e-03	-
	50,0	20.550	1,3552e-02	5,1362e-03	6,30
	28,9	40.676	1,3388e-02	5,1300e-03	1,22
23%	165,0	2.766	9,0519e-05	7,6867e-05	-
	99,9	5.540	6,1020e-05	6,3424e-05	-
	76,5	10.132	4,2593e-05	5,9784e-05	-
	48,0	20.317	2,8566e-05	5,2967e-05	-
	35,5	41.314	1,9664e-05	5,2978e-05	-
	25,7	82.551	1,5421e-05	5,4739e-05	-
	19,0	165.117	1,3566e-05	5,0518e-05	13,68
	14,0	326.107	1,2338e-05	4,9995e-05	9,95

Fonte: Autoria própria (2022).

Oteve-se $E_K = 1,22\%$ entre as malhas de 20.550 elementos e de 40.676 elementos para $\phi = 0,75$ e $E_K = 9,95\%$ entre as malhas de 165.117 elementos e de 326.107 elementos para $\phi = 0,23$. As malhas utilizadas para a geometria bidirecional possuem 40.676 elementos em $\phi = 0,75$ e 165.117 elementos em $\phi = 0,23$, devido ao menor tempo computacional em comparação com a malha de 326.107 elementos.

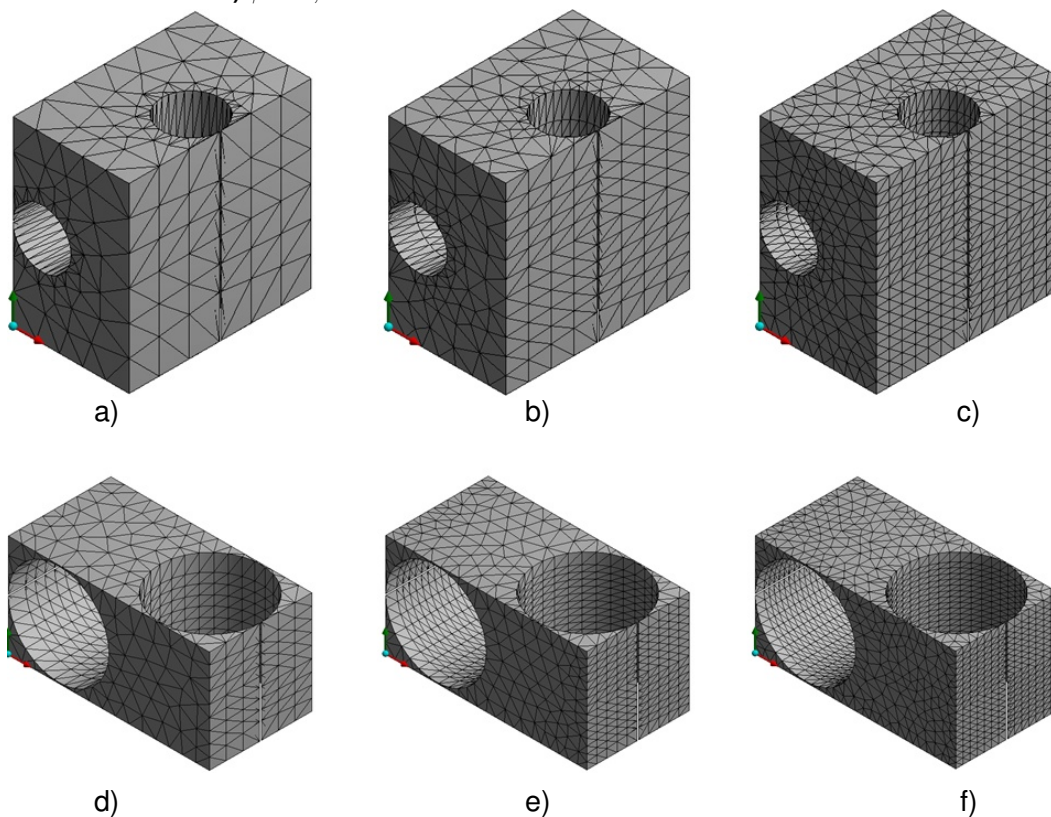
Constatou-se uma sensibilidade maior ao número de elementos de malha em $\phi = 0,23$, em comparação à $\phi = 0,75$, indicando 0,23 como sendo a porosidade crítica para o meio poroso bidirecional.

A Figura A.2 apresenta seis das malhas utilizadas para ilustrar como ocorre o teste de malha para geometria bidirecional.

As Figuras A.2 (a), (b) e (c) são malhas para o meio bidirecional com $\phi = 0,75$. Novamente, para alto ϕ observou-se a diminuição do tamanho de elementos próximos da superfície dos filamentos. Notou-se ainda que para a superfície de saída do REV existe certa melhoria na estruturação da malha ao aumentar a quantidade de elementos. Isto demonstra como ao aumentar o número de elementos é possível obter melhor estruturação e regularidade para a malha computacional.

As Figuras A.2 (d), (e) e (f) são malhas para o meio bidirecional com $\phi = 0,23$. Observou-se também neste meio a diminuição dos elementos próximos à superfície do filamento e a estruturação da superfície do REV com o aumento do número de elementos.

Figura A.2 – Malhas utilizadas no teste de malha com: a) $\phi = 0,75$ e 2.766 elementos, b) $\phi = 0,75$ e 5413 elementos, c) $\phi = 0,75$ e 10.528 elementos, d) $\phi = 0,23$ e 2.766 elementos, e) $\phi = 0,23$ e 5.540 elementos e f) $\phi = 0,23$ e 10.132 elementos.



Fonte: Autoria própria (2022).

Para a geometria tridirecional a malha utilizada é irregular por o REV ser tridimensional, apesar da geometria simétrica facilitar a solução. A Tabela A.3 apresenta os resultados do teste de malha em $\phi = 0,75$ e $\phi = 0,23$ com diferença de pressão $\Delta P = 0,12$ Pascal.

Tabela A.3 – Resultado do teste de malha para meio poroso tridirecional.

ϕ	Comprimento médio dos elementos (mm)	Números de elementos	K (m^2)	Re_{max}	E_K (%)
75%	73,5	9.042	1,4205e-02	6,3795e-03	-
	64,0	18.057	1,3878e-02	6,3150e-03	-
	44,5	38.270	1,3590e-02	6,2877e-03	-
	25,0	72.601	1,3204e-02	6,2840e-03	2,92
23%	46,5	9.981	4,9888e-04	1,2168e-03	-
	36,0	19.034	4,8156e-04	1,2020e-03	-
	28,4	38.021	4,6874e-04	1,2009e-03	2,74
	21,2	76.844	4,6007e-04	1,2022e-03	1,88

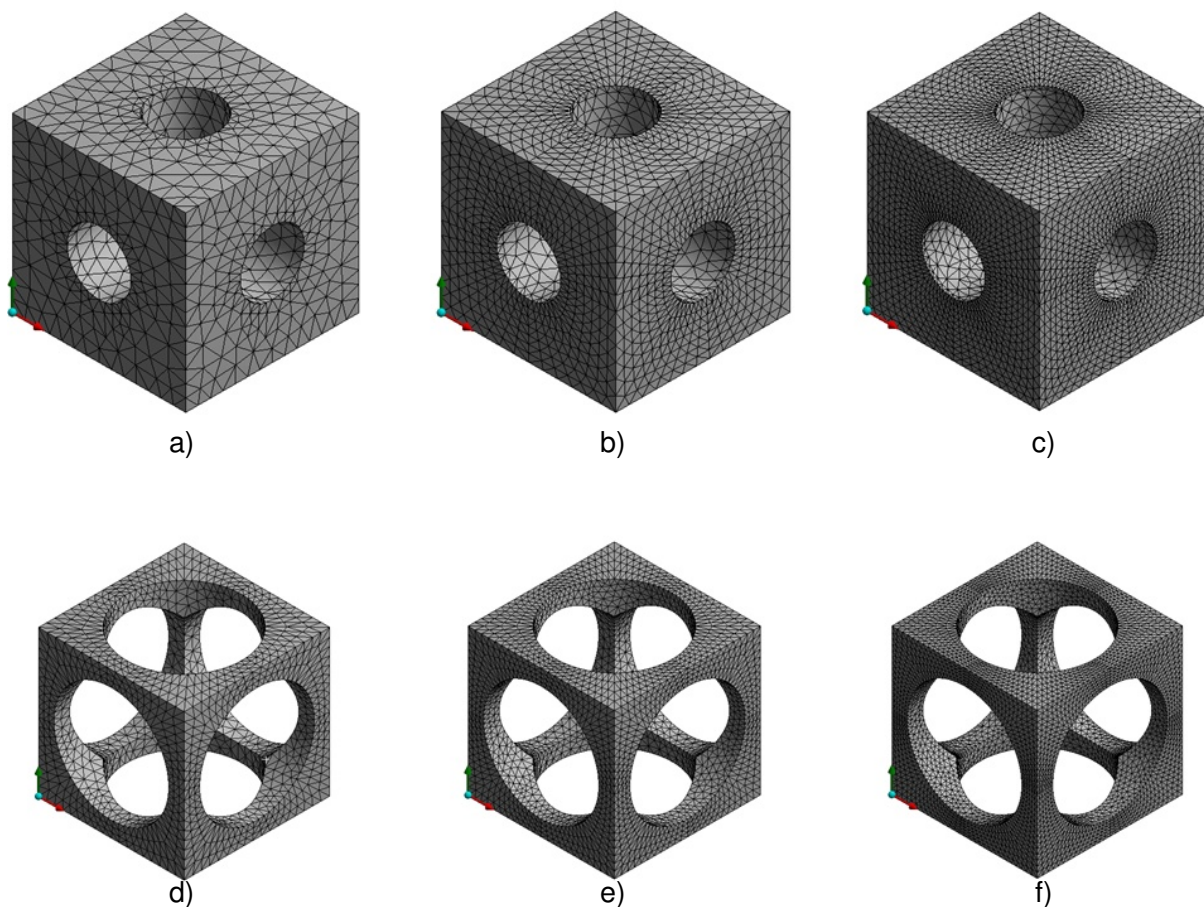
Fonte: Autoria própria (2022).

Para $\phi = 0,75$, obteve-se $E_K = 2,92\%$ entre as malhas de 38.270 elementos e de 72.601 elementos. Para $\phi = 0,23$, tem-se $E_K = 1,88\%$ entre as malhas de 38.021 elementos e de 76.844 elementos. Conclui-se que a malha de 72.601 elementos em $\phi = 0,75$ e a malha de 76.844 elementos em $\phi = 0,23$ representam o problema de modo satisfatório.

Neste caso, notou-se que ambas porosidades testadas apresentam relativa baixa sensibilidade à quantidade de elementos na malha. Isto ocorre devido à distância δ_{min} ser maior para o meio tridirecional em relação aos outros meios porosos.

A Figura A.3 apresenta seis das malhas utilizadas para ilustrar como ocorre o teste de malha para geometria tridirecional.

Figura A.3 – Malhas utilizadas no teste de malha com: a) $\phi = 0,75$ e 9.042 elementos, b) $\phi = 0,75$ e 18.057 elementos, c) $\phi = 0,75$ e 38.270 elementos, d) $\phi = 0,23$ e 9.981 elementos, e) $\phi = 0,23$ e 19.034 elementos e f) $\phi = 0,23$ e 38.021 elementos.



Fonte: Autoria própria (2022).

As Figuras A.3 (a), (b) e (c) apresentam malhas para o meio tridirecional com $\phi = 0,75$, nas quais se observam uma melhoria significativa da estruturação ao aumentar o número de elementos, com exceção aos elementos adjacentes às superfícies dos filamentos. As Figuras A.3 (d), (e) e (f) apresentam malhas para $\phi = 0,23$. Notou-se que para baixo ϕ as malhas obtidas foram mais organizadas em comparação à $\phi = 0,75$, apesar da malha ainda ser desestruturada.

Por fim, a Tabela A.4 apresenta todos os números de elementos das malhas utilizadas nas simulações em cada valor de ϕ , para os meios porosos com geometrias unidirecional, bidirecional e tridirecional.

Nos meios porosos unidirecional e bidirecional, utilizou-se malhas com menores números de elementos em porosidades altas devido a baixa sensibilidade dos resultados de

Tabela A.4 – Número de Elementos de malha utilizados para geometrias de validação.

ϕ	Número de elementos		
	Unidirecional	Bidirecional	Tridirecional
0,75	12.800	40.676	72.601
0,70	12.800	52.587	76.664
0,65	12.800	57.354	73.305
0,60	12.800	62.297	74.608
0,55	12.800	66.462	79.681
0,50	12.800	70.761	76.179
0,45	12.800	73.407	71.783
0,40	12.800	76.862	73.975
0,35	12.800	79.401	77.621
0,30	12.800	86.263	79.229
0,275	51.200	87.270	70.912
0,25	102.400	150.240	74.469
0,24	102.400	147.955	70.194
0,23	102.400	165.117	76.844

Fonte: Autoria própria (2022).

permeabilidade observados anteriormente. Isto permitiu economizar tempo computacional significativamente enquanto os resultados ainda são satisfatórios conforme discutido na Seção 5.1.

Considerando os resultados dos testes de malha dos meios porosos de filamentos cilíndricos, definiu-se $\phi = 0,23$ como a porosidade crítica. Portanto, os testes de malha para os meios porosos compostos de filamentos elípticos foram conduzidos apenas em $\phi = 0,23$. A Tabela A.5 a seguir apresenta os resultados dos testes de malha para os meios porosos *L01 A90 S00*, *L01 A90 S25* e *L01 A90 S50*.

Tabela A.5 – Resultados dos testes de malha para os meios *L01 A90 S(De)* em $\phi = 0,23$.

Meio Poroso	Comprimento médio dos elementos (mm)	Números de elementos	$K (m^2)$	Re_{max}	$E_K (%)$
<i>L01 A90 S00</i>	125,5	4.830	7,732e-5	6,299E-04	-
	77,0	9.089	4,169e-5	5,889E-04	-
	45,0	19.041	1,572e-05	5,886E-04	-
	33,3	38.365	1,198e-05	5,653E-04	31,28
	24,4	76.373	9,408e-06	9,347E-04	27,32
	18,0	151.485	8,158e-06	5,308E-04	15,32
	13,2	300.733	7,435e-06	4,967E-04	9,73
<i>L01 A90 S25</i>	32,2	72.054	1,583e-5	6,285E-04	-
	23,5	143.637	1,250e-5	6,152E-04	21,01
	17,5	280.614	1,117e-05	6,140E-04	10,68
<i>L01 A90 S50</i>	27,5	61.695	1,205e-5	6,994E-04	-
	20,0	125.500	1,044e-5	6,549E-04	13,40
	14,6	259.354	9,436e-06	6,260E-04	9,59

Fonte: Autoria própria (2022).

Observou-se para o meio *L01 A90 S00* uma diferença de 9,73% entre as malhas com 151.485 elementos e com 300.733 elementos, indicando que a malha com 151.485 elementos

apresenta um resultado satisfatório. Devido aos meios porosos anteriores terem apresentados resultados de número de elementos de malha entre 100.000 e 150.000 elementos, menos testes de malha foram apresentados a partir do meio *L01 A90 S25*. Consideraram-se adequadas as malhas com 143.637 elementos para o meio *L01 A90 S25* e com 125.500 elementos para o meio *L01 A90 S50*.

A Tabela A.6 a seguir apresenta os resultados dos testes de malha para os meios porosos *L02 A90 S00*, *L02 A90 S25* e *L02 A90 S50*.

Tabela A.6 – Resultados dos testes de malha para os meios *L02 A90 S(De)* em $\phi = 0,23$.

Meio Poroso	Comprimento médio dos elementos (mm)	Números de elementos	$K (m^2)$	Re_{max}	$E_K (%)$
<i>L02 A90 S00</i>	64,0	69.601	2,261E-05	1,502E-03	-
	34,0	138.745	1,946E-05	1,470E-03	13,95
	25,0	277.089	1,752E-05	1,385E-03	9,95
<i>L02 A90 S25</i>	70,0	71.856	3,492E-05	1,679E-03	-
	47,0	130.896	2,835E-05	1,656E-03	18,80
	34,5	258.562	2,565E-05	1,599E-03	9,53
<i>L02 A90 S50</i>	70,0	70.352	2,849E-05	1,681E-02	-
	47,0	125.260	2,495E-05	1,675E-03	12,45
	34,4	252.164	2,347E-05	1,620E-03	5,91

Fonte: Autoria própria (2022).

Para o meio *L02 A90 S00*, a diferença entre as malhas com 138.745 e com 277.089 elementos foi de 9,95%, indicando que a malha com 138.745 elementos pode ser utilizada de forma satisfatória. Da mesma forma, a malha com 130.896 elementos foi escolhida para o meio *L02 A90 S25* e a malha com 125.260 elementos foi escolhida para o meio *L02 A90 S50*.

Como os testes de malha para todos os meios porosos das Tabelas A.5 e A.6 apresentaram resultados próximos quanto à qual o número de elementos da malha apropriado, escolheu-se não apresentar testes de malha para os meios com $\theta = 60^\circ$ devido ao alto tempo computacional que não foi possível de se contornar no presente trabalho, conforme a discussão na Seção 5.2.2.

Isto posto, a Tabela A.7 a seguir apresenta os números de elementos de malha utilizado em cada valor de ϕ para todas as configurações simuladas para o meio poroso de filamentos elípticos.

De forma geral, para garantir a convergência à resultados apropriados em $\phi \neq 0,23$, escolheu-se malhas com números de elementos próximos dos definidos nas Tabelas A.5 e A.6. Todavia, visando reduzir o grande tempo computacional, em alguns meios os números de elementos escolhidos foram menores do que os números para $\phi = 0,23$. Esta escolha foi considerada apropriada visto a baixa sensibilidade à malha observada ao longo dos testes em porosidades mais altas.

Tabela A.7 – Números de elementos de malha para cada valor de ϕ dos meios porosos de filamentos elípticos.

ϕ (%)	L01A90S00	L01A90S25	L01A90S50	L02A90S00	L02A90S25	L02A90S50
75,0	127.032	149.052	150.969	105.261	175.807	133.214
70,0	156.912	112.507	150.399	142.291	181.315	166.803
65,0	130.114	168.525	131.476	154.551	169.855	143.274
60,0	137.870	173.698	138.795	148.059	161.170	117.182
55,0	156.707	168.358	147.295	146.033	171.861	195.219
50,0	167.706	130.173	140.628	137.538	174.526	182.342
45,0	158.820	153.131	121.777	132.993	175.478	180.802
40,0	165.690	178.073	129.485	123.531	171.992	166.843
35,0	153.124	184.858	135.569	144.427	172.400	170.326
30,0	157.542	155.053	138.319	140.463	173.625	151.322
27,5	156.306	156.269	138.650	139.255	188.418	153.421
25,0	154.924	138.097	149.943	166.499	128.774	124.734
24,0	152.859	145.247	149.373	148.460	131.565	123.558
23,0	151.485	143.637	125.500	138.745	130.896	125.260
	L01A60S00	L01A60S25	L01A60S50	L02A60S00	L02A60S25	L02A60S50
75,0	101.002	-	-	-	-	-
70,0	79.751	-	-	-	-	-
60,0	82.554	-	-	-	-	-
55,0	74.610	-	-	-	-	-
50,0	89.914	157.219	99.442	102.909	-	-
40,0	87.089	134.077	109.775	90.870	-	-
35,0	80.912	122.656	120.640	103.246	-	-
30,0	92.570	115.177	103.014	100.175	126.800	146.631
25,0	117.579	111.443	116.129	102.490	224.120	125.415
24,0	105.411	106.136	125.875	-	-	-
23,0	102.322	101.983	105.423	109.320	197.313	122.348

Fonte: Autoria própria (2022).

APÊNDICE B – Adimensionalização do Problema

Neste apêndice, a adimensionalização do problema foi realizada com o intuito de encontrar o número de Reynolds e avaliar os termos significativos nas equações governantes.

Assumiu-se as dimensões características do problema sendo: $|\vec{u}| \simeq U_0$, $|\vec{x}| \simeq L_0$, $\rho \simeq \rho_0$, $|\vec{p}| \simeq \rho_0 U_0^2$ e $\mu \simeq \mu_0$. Sendo $O(1)$ a ordem de grandeza unitária, estes parâmetros podem ser reescritos em suas formas adimensionais:

$$u^* \simeq \vec{u}/U_0 \sim O(1) \quad (\text{B.1a})$$

$$x^* \simeq \vec{x}/L_0 \sim O(1) \quad (\text{B.1b})$$

$$\rho^* \simeq \rho/\rho_0 \sim O(1) \quad (\text{B.1c})$$

$$p^* \simeq \vec{p}/(\rho_0 U_0^2) \sim O(1) \quad (\text{B.1d})$$

$$\mu^* \simeq \mu/\mu_0 \sim O(1) \quad (\text{B.1e})$$

Substituindo os parâmetros adimensionais na equação de conservação da massa definida na Equação 4.12:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{L_0 \partial x^*} (U_0 \cdot u^*) &= 0 \rightarrow \frac{U_0}{L_0} \frac{\partial u^*}{\partial x^*} = 0 \rightarrow \\ \frac{\partial u^*}{\partial x^*} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

Substituindo os parâmetros adimensionais na equação de Navier-Stokes definida na Equação 4.13:

$$\begin{aligned} \rho_0 \rho^* \frac{\partial}{L_0 \partial x^*} (U_0^2 u^* u^*) &= \frac{1}{L_0} \frac{\partial}{\partial x^*} (\rho_0 U_0^2 p^*) + \mu_0 \mu^* \left[\frac{\partial^2}{L_0^2 \partial x^{*2}} (U_0 u^*) \right] \rightarrow \\ \frac{\rho_0 U_0^2}{L_0} \rho^* \frac{\partial}{\partial x^*} (u^* u^*) &= \frac{\rho_0 U_0^2}{L_0} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{U_0 \mu_0}{L_0^2} \mu^* \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} \right) \rightarrow \\ \rho^* \frac{\partial}{\partial x^*} (u^* u^*) &= \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{\mu_0}{\rho_0 U_0 L_0} \mu^* \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} \end{aligned}$$

Definindo o Número de Reynolds como $Re_L = \rho_0 U_0 L_0 / \mu_0$, pode-se escrever a equação de Navier-Stokes da forma:

$$\rho^* \frac{\partial}{\partial x^*} (u^* u^*) = \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{1}{Re_L} \mu^* \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} \quad (\text{B.3})$$

Definiu-se na Seção 4 o regime darciano para o presente problema, ou seja, Re_L deve ser baixo, o que leva a baixas velocidades e alto valor para $1/Re_L$. Portanto, o termo de inércia à esquerda da igualdade na Equação B.3 se torna irrelevante em comparação aos outros termos à direita e foi desconsiderado na elaboração da análise de escala da Seção 5. O número de

Reynolds local máximo Re_{max} utilizado para avaliar ΔP na Seção 5 foi obtido ao tomar a velocidade de referência como a velocidade máxima no REV, $U_0 = U_{max}$.