

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M

ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA PERMEABILIDADE TRANSVERSAL
DE PRÉ-FORMAS FIBROSAS

TESE DE DOUTORADO

RAFAEL SCHEER TRINDADE

Porto Alegre

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M

ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA PERMEABILIDADE TRANSVERSAL
DE PRÉ-FORMAS FIBROSAS

RAFAEL SCHEER TRINDADE

O presente trabalho foi realizado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), dentro da Escola de Engenharia da UFRGS como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico (PPGE3M/UFRGS)

Coorientador: Prof. Dr. Jeferson Avila Souza (PPGMC/FURG)

Porto Alegre

2021

Orientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico (PPGE3M/UFRGS)

Coorientador: Prof. Dr. Jeferson Avila Souza (PPGMC/FURG)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior - IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos - PPGMC/FURG

Prof. Dr. Wanderley Ferreira Amorim Júnior- UAEM/UFCG

Prof. Dr. Afonso Reguly

Coordenador do PPGE3M

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me permitir a coragem de encarar cada desafio.

Ao professor Dr. Sandro Campos Amico pela partilha incessante de conhecimento e pela orientação através do exemplo.

Ao professor Dr. Jeferson Ávila pelo inesgotável suporte na incorporação de novos (e complicados) tópicos e muito aprendizados.

À CAPES – Brasil, pelo financiamento deste

Ao demais professores do PPGE3M, companheiros de LAPOL/GCOMP, aos técnicos-administrativos que me ajudaram ao longo de todo esse período.

Ao colegas, Maikson, Stephanie, Laís, Andréia, Rafael D., Clarissa, Eduardo K., Eduardo M., pelo companherismo e ajuda no enfrentamento dos mais diversos desafios. Ao muitos e valerosos IC's, obrigado por toda ajuda nos intermináveis testes em laboratório. Ao Cristiano e a Laísa, colegas da FURG pela ajuda com as soluções numéricas.

À minha amada esposa Maria Luján pela compreensão e suporte sem o qual seria impossível avançar nesse incrível processo de crescimento pessoal.

Ao meu filho Lucas, por ser fonte de motivação e inspiração de onde busquei a força necessária para concluir esse desafio.

Às minhas irmãs Laura e Kendra pelo imenso amor fraternal sempre presente.

Meu muito obrigado a todos que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização desse trabalho.

À minha mãe Rosângela e ao meu pai Lucio,
eu agradeço pela vida.

PUBLICAÇÕES RELACIONADAS

Artigo completo em periódico

TRINDADE, R. S.; RIBEIRO, A. C.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C. Experimental investigation of transverse permeability applied to liquid molding. **Polymer composites**. 40:3938-3946, 2019.

Trabalhos completos em anais de congresso

TRINDADE, R. S.; RODRIGUES, F.; KERCHE, E.; RIBEIRO, A. C.; SOUZA, F. A.; AMICO, S. C. Experimental evaluation of temperature effect on the transverse permeability of fibrous preform. In: **4th Brazilian Conference on Composite Materials (BCCM 4)**, 2018, Rio de Janeiro.

TRINDADE, R. S.; LANFREDI, P. H.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C. Study of the transverse permeability influence on thick composites liquid molding with the aid of numerical simulation, In: **3rd Brazilian Conference on Composite Materials (BCCM 3)**. 2016, Gramado.

TRINDADE, R.S.; NUNES, S.G.; SILVA, F. W.; SOUZA, J.A.; AMICO, S.C. Permeability Analysis of R-Glass Fabrics For Different Fiber Volume Fraction and Injection Pressure. In: **International Conference on Advanced Materials and Manufacturing (ICAMM)**, 2015, Tirunelveli/India.

RESUMO

Um conhecimento aprofundado do comportamento da matriz polimérica no estado líquido escoando através de reforços fibrosos traz benefícios na fabricação de materiais compósitos principalmente ao considerarmos esse escoamento na direção transversal ao plano dos reforços. Isso é devido ao avanço na utilização de compósitos de maior espessura que trouxe, por sua vez, esse desafio tecnológico. Assim, para otimizar a etapa de impregnação dos reforços, que leva ao aumento da qualidade final desses compósitos e a redução de custos, deve-se conhecer as principais componentes da permeabilidade dos reforços. Esse desafio motivou a pesquisa desse trabalho de forma a avançar o conhecimento com relação a componente transversal da permeabilidade, K_{zz} , e como ela é afeta pelas características dos reforços em uma ampla faixa de frações volumétricas de fibra (V_f). Para tanto, um equipamento de medição de K_{zz} foi projetado, construído e utilizado no ensaio de diferentes reforços. Parâmetros de teste como a espessura da pré-forma e o fluido de trabalho foram avaliados, seguido do efeito do tipo de reforço e do V_f , bem como ensaios de permeabilidade no plano e compressão de camadas empilhadas de tecidos também foram realizadas para contribuir com o entendimento do efeito das características dos reforços no K_{zz} . As mantas de fibras curta apresentaram os maiores valores de permeabilidade, enquanto dentre os tecidos aqueles com arquitetura menos compacta, e de menor *tex*, foram os que apresentaram maior K_{zz} . Além disso, foi verificado uma mudança importante de comportamento no escoamento transversal com relação ao V_f . Para teores de fibra de até 50% os espaços entre os feixes em uma mesma camada de reforço, bem como o alinhamento desses espaços em camadas adjacentes, leva a elevados valores de K_{zz} . Por outro lado, quando o teor de fibra é maior do que 50% há aumento da compressão que desalinha feixes e diminui o K_{zz} . A partir daí, a elevada compressão dos reforços faz com que o caminho preferencial seja através dos feixes que de forma que a permeabilidade se reduz significativamente. Visando complementar e aprofundar o estudo, adaptou-se uma metodologia numérica usando o método de volumes finitos e resolvendo as equações de conservação da massa e quantidade de movimento em conjunto com a lei de Darcy para obter a solução do escoamento. Após os testes de independência de malha, os resultados numéricos foram comparados aos experimentais e, dada a proximidade desde, foi definida a possibilidade de utilizar essa metodologia adaptada para realização de novos estudos do escoamento transversal em meios fibrosos.

Palavras-chave: Compósitos, RTM, reforços, permeabilidade transversal, CFD

ABSTRACT

A further investigation on the behavior of the polymer matrix in the liquid state flowing through fibrous reinforcements brings benefits in the manufacture of composite materials, especially when considering this flow in the transverse direction to the reinforcement plane. This is due to the advance in the use of thicker composites, which, in turn, brought this technological challenge. Thus, to optimize the reinforcement impregnation step, which leads to an increase in the final quality of these composites and a reduction in costs, the main components of the reinforcement permeability must be known. This challenge motivated the research of this work in order to advance the knowledge regarding the transversal component of permeability, K_{zz} , and how it is affected by the characteristics of the reinforcements in a wide range of fiber volume fractions (V_f). For this purpose, a K_{zz} measurement equipment was designed, built and used to test different reinforcements. Test parameters such as preform thickness and working fluid were evaluated, followed by the effect of reinforcement type and V_f , as well as in-plane permeability and compression tests of stacked layers of fabrics were also performed to contribute to the understanding the effect of reinforcement characteristics on K_{zz} . The short fiber mats had the highest permeability values, while among the fabrics those with less compact architecture, and with lower tex, were the ones with the highest K_{zz} . In addition, an important change in the behavior of the transversal flow was verified in relation to V_f . For fiber contents of up to 50%, the spaces between the bundles in the same reinforcement layer, as well as the alignment of these spaces in adjacent layers, lead to high K_{zz} values. On the other hand, when the fiber content is greater than 50%, there is an increase in compression, which misaligns bundles and decreases K_{zz} . From there, the high compression of the reinforcements makes the preferential path through the beams, so that the permeability is significantly reduced. Aiming to complement and deepen the study, a numerical methodology was adapted using the finite volume method and solving the mass and momentum conservation equations together with Darcy's law to obtain the flow solution. After the mesh independence tests, the numerical results were compared to the experimental ones and, given the proximity since, the possibility of using this adapted methodology to carry out new studies of the transversal flow in fibrous media was defined.

Keywords: Compositesm RTM, reinforcement, permeability, CFD, transverse flow

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Representação esquemática de um feixe composto por filamentos. _____	5
Figura 3.2 – Exemplos de: a) manta e b) tecido bidirecional de fibra de vidro . _____	6
Figura 3.3 – Matriz poliéster líquida (pré-cura) sobre tecido de fibra de vidro _____	7
Figura 3.4 – Sequência de etapas da RTM. _____	9
Figura 3.5 – Molde de RTM durante moldagem líquida de compósitos. _____	10
Figura 3.6 – Representação esquemática de escoamento de uma fase líquida em meio poroso. Fonte: adaptado de (VAFAI, 2015). _____	12
Figura 3.7 – Representação esquemática do escoamento em nível micro e macroscópico. Fonte: Adaptado de (RUDD; SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1997). _____	13
Figura 3.8 – a) Vazios macroscópicos (entre feixes) e b) vazios microscópicos (intra-feixe). Fonte: Adaptado de (RUDD; SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1997). _____	14
Figura 3.9 – a) Equipamento de medição de K_{zz} saturado e b) Representação esquemática do sistema. Fonte: Adaptado (CHAE; SONG; YOUN, 2007). _____	21
Figura 3.10 – Representação esquemática do sistema de medição de K_{zz} . Fonte: Adaptado (FANG et al., 2014). _____	22
Figura 3.11 – a) Equipamento de medição de K_{zz} saturado de forma contínua e b) Representação esquemática do sistema. Fonte: Adaptado de (OUAGNE et al., 2013). _____	25
Figura 4.1 – Fotografia dos reforços (a escala mostrada pelas linhas brancas verticais e horizontais entorno de cada tipo de reforço está em mm). _____	37
Figura 4.2 – Representação esquemática do sistema de obtenção de imagens com a luz passando através dos reforços. _____	38
Figura 4.3 – Imagens obtidas usando o sistema apresentado na Figura 4.2 para avaliação qualitativa (escala igual à Figura 4.1). _____	39
Figura 4.4 – Exemplo do posicionamento dos reforços no ensaio de compressão. _____	40
Figura 4.5 – a) Sistema utilizado para medição da permeabilidade no plano e b) Detalhe do sistema mostrando a entrada da matriz na pré-forma. _____	42
Figura 4.6 – Exemplo de curva de pressões obtida pelo transdutor localizado na entrada da cavidade do molde. _____	42
Figura 4.7 – Exemplo de curva de viscosidade do óleo de soja com relação a temperatura, bem como sua curva de ajuste linear. _____	43
Figura 4.8 – a) Modelo 3D do equipamento de medição da permeabilidade transversal e b) detalhe interno das diferentes partes. _____	44
Figura 4.9 – a) Placa perfurada usada no equipamento de medição de K_{zz} e b) Desenho técnico desta placa. _____	45
Figura 4.10 – Esquema mostrando a montagem das placas furadas e os espaçadores. _____	46
Figura 4.11 – a) Esquema de medição da permeabilidade transversal e b) equipamento. _____	46
Figura 4.12 – Exemplo da curva de obtenção do coeficiente para cálculo de K_{zz} . _____	48

Figura 4.13 – Representação esquemática do domínio computacional e das condições de contorno usadas: a) cavidade inteira e b) usando simetria considerando os furos. _____	54
Figura 4.14 – Fluxograma dos casos numéricos estudados sob regime saturado. _____	55
Figura 4.15 – Malha utilizada nos estudos numéricos sob regime saturado (Casos 1 e 2). ____	56
Figura 4.16 – Malhas alternativas: a) malha construída usando um furo central, b) quatro furos centrais. _____	58
Figura 4.17 – Fluxograma dos casos numéricos estudados sob regime insaturado. _____	59
Figura 4.18 – Malha inteira construída para simular a cavidade do equipamento. _____	60
Figura 4.19 – Malha construída usando planos de simetria. _____	61
Figura 4.20 – a) Malha construída usando simetria e um furo e b) quatro furos. _____	64
Figura 5.1 – Efeito da espessura da pré-forma e do teor de fibras no K_{zz} : a) para vidro-E e b) para o vidro-R. _____	67
Figura 5.2 – Efeito da temperatura e do teor de fibras no K_{zz} para a Fibra E (com óleo de soja e espessura da preforma de 15 mm). _____	69
Figura 5.3 – Resultados de permeabilidade transversal para todos os reforços (com óleo de soja e espessura da preforma de 15 mm). _____	70
Figura 5.4 – Representação esquemática dos feixes (seção trasnversal) e do escoamento. a) feixes de menor tex; b) feixes de maior tex; c) maior emaranhamento ($V_f \approx 50\%$); d) V_f muito elevado com escoamento intra-feixe . _____	72
Figura 5.5 – Resultados dos testes de compressão dos reforços. _____	73
Figura 5.6 – Resultados de permeabilidade no plano. _____	74
Figura 5.7 – Variação da razão entre as permeabilidades no plano e transversal (ψ) com o teor de fibras. _____	76
Figura 5.8 – Micrografias das seções transversais dos compósitos com diferentes reforços. _	78
Figura 5.9 – Micrografias da superfície (visão de topo) dos compósitos com diferentes reforços. _____	79
Figura 5.10 – Fração de área da matriz observada nas seções transversais dos compósitos. _	80
Figura 5.11 – Malha com os parâmetros definidos pelo testes de independência de malha. _	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tipos de reforços, faixa de V_f e K_{zz} encontrados na literatura. _____	28
Tabela 4.1 – Características dos reforços estudados. _____	36
Tabela 4.2 – Parâmetros das pré-formas usados nos testes experimentais. _____	49
Tabela 4.3 – Parâmetros usados na solução numérica. _____	51
Tabela 4.4 – Características das malhas das geometrias alternativas. _____	57
Tabela 4.5 – Características das malhas iniciais. _____	60
Tabela 4.6 – Características das malhas construídas usando planos de simetria. _____	62
Tabela 4.7 – Características das malhas considerando um, quatro furos e 39 furos. _____	63
Tabela 5.1 – Comparação entre os diferentes fluidos de trabalho. _____	66
Tabela 5.2 – Parâmetros constantes usados nas simulações. _____	81
Tabela 5.3 – Independência de malha: número de volumes nos furos. _____	82
Tabela 5.4 – Independência de malha: número de volumes nos planos de simetria. _____	83
Tabela 5.5 – Independência de malha: número de volumes na direção z. _____	83
Tabela 5.6 – Resultados comparativos para malhas de 3,8 mm até 22 mm de altura. _____	86
Tabela 5.7 – Independência de malha na direção transversal geometrias alternativas. _____	87
Tabela 5.8 – Comparação dos resultados das geometrias alternativas com os experimentais. _____	88
Tabela 5.9 – Independência de malha na direção transversal usando a malha inteira. _____	89
Tabela 5.10 – Independência de malha na direção transversal usando simetria. _____	89
Tabela 5.11 – Comparação entre as malhas inteira e com simetria, já independentes, e em relação ao modelo analítico. _____	90
Tabela 5.12 – Solução na direção transversal usando simetria e um furo ou quatro furos. _____	91
Tabela 5.13 – Solução na direção transversal usando simetria e todos os furos. _____	91
Tabela 5.14 – Comparação entre os resultados obtidos pelas malhas usando simetria: entrada igual a área total, com um furo e com quatro furos. _____	92

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

A	Área da pré-forma transversal à direção de escoamento (m^2)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica de Fluidos Computacional)
Co	Courant Number (número de Courant)
EDP	Equações Diferenciais Parciais
\vec{F}	Termo fonte ou forças externas (N/m^3)
f	Fração volumétrica da matriz
\vec{g}	Aceleração da gravidade (m/s^2)
h	Espessura da pré-forma (m)
KC	Kozeny-Carman
K	Tensor permeabilidade do meio poroso (m^2)
K_{xx}	Componente principal do tensor permeabilidade em x (m^2)
K_{yy}	Componente principal do tensor permeabilidade em y (m^2)
K_{zz}	Componente principal do tensor permeabilidade em z (m^2)
L	Distância percorrida pela frente de escoamento (m)
LCM	<i>Liquid Composite Moulding</i> (Moldagem Líquida de Compósitos)
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
p	Pressão (Pa)
p_{inj}	Pressão de injeção (Pa)
Q	Vazão volumétrica (m^3/s)
r_0	Raio de injeção (m)
r_e	Raio equivalente (m)
r_{ff}	Raio da frente de escoamento (m)
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i> (Moldagem por Transferência de Resina)

t_{ff}	Tempo em x_{ff} (s)
VARTM	<i>Vacuum Assisted Resin Transfer Molding</i> (Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo)
\vec{V}	Vetor velocidade superficial do fluido (m/s)
V_f	Fração volumétrica de fibras
VOF	<i>Volume of Fluid</i> (Volume de Fluido)
V_p	Volume de poros (m ³)
V_t	Volume total da cavidade do equipamento (m ³)
$x_{(t)}$	Posição da frente de escoamento no tempo t (m)
x_e, y_e	Coordenadas equivalentes (m)
x_{ff}	Posição da frente de escoamento no tempo t_{ff} (m)

Caracteres gregos:

Δp	Diferença de pressão entre as aberturas de entrada e saída do equipamento (Pa)
ε	Porosidade
μ	Viscosidade da matriz (Pa s)
ρ	Massa específica (kg/m ³)
$[\bar{\tau}]$	Tensor de tensões (Pa)
ψ	Razão K_{xx}/K_{zz}

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	3
2.1.	Objetivo geral	3
2.2.	Objetivos específicos	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1.	Compósitos poliméricos reforçados por fibras	4
3.2.	Moldagem líquida de compósitos	8
3.3.	Escoamento de matriz em meios fibrosos	11
3.4.	Caracterização da permeabilidade	15
3.5.	Permeabilidade transversal	18
3.6.	Modelagem e simulação aplicados à LCM.....	29
4.	METODOLOGIA	36
4.1.	Experimental.....	36
4.1.1.	Materiais	36
4.1.2.	Caracterização da permeabilidade	40
4.1.3.	Ensaio de permeabilidade no plano	41
4.1.4.	Ensaio de permeabilidade transversal	44
4.2.	Simulação Numérica.....	50
4.2.1.	Simulações com regime saturado e insaturado	52
4.2.2.	Domínios computacionais e malhas	53
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1.	Resultados experimentais	65
5.1.1.	Avaliação dos parâmetros de testes	65
5.1.2.	Permeabilidade transversal	69
5.1.3.	Variação da razão K_{xx}/K_{zz}	74

5.2.	Resultados numéricos	80
5.2.1.	Simulações com escoamento saturado	82
5.2.2.	Simulações com escoamento insaturado	88
6.	CONCLUSÕES	94
6.1.	Sugestões para trabalhos futuros	95
7.	REFERÊNCIAS.....	96

1. INTRODUÇÃO

Materiais compósitos poliméricos reforçados por fibras são muito interessantes em aplicações que demandam elevada resistência mecânica associada a uma baixa densidade como, por exemplo, aeronaves e automóveis, uma vez que isso leva a um menor consumo de combustíveis. A fabricação desses materiais se dá, muitas vezes, por alguma técnica da família de moldagem líquida, ou seja, a matriz ainda líquida molha os reforços previamente secos. Assim, uma impregnação eficiente das camadas de reforço é essencial na produção de compósitos de boa qualidade e esse processo é dependente do escoamento da matriz no interior da cavidade do molde (OKONKWO, SIMACEK, et al. 2011).

As camadas de reforço já na dimensão final (no plano) e empilhadas com a orientação correta formam a pré-forma. Elas podem ser formadas por mantas, nas quais as fibras são curtas e orientadas aleatoriamente, ou por feixes longos tramados em uma arquitetura específica, os tecidos. Os feixes são formados por centenas ou milhares de fibras de diâmetro micrométrico paralelas ou torcidas em relação ao eixo principal de forma a originar dois tipos de porosidade: uma interna ao feixe (intra-feixe ou entre as fibras) e outra nos espaços vazios entre os feixes de uma mesma camada e entre as camadas empilhadas.

A arquitetura das camadas de reforço definem uma propriedade fundamental do reforço fibroso, a permeabilidade. Essa propriedade é um parâmetro chave que influencia diretamente o escoamento durante o preenchimento do molde e a impregnação dos reforços pela matriz. A permeabilidade é determinante na moldagem líquida por ter influência direta não só no tempo total de preenchimento, mas também na forma da frente de escoamento do fluido. Usualmente, caracteriza-se apenas as componentes principais da permeabilidade no plano (K_{xx} e K_{yy}), e a componente transversal (K_{zz}), isto é, na direção da espessura, somente é considerada quando a peça tem formato complexo, é espessa (FANG, et al. 2014) ou, ainda, quando trata-se de um reforço com camadas de diferentes tipos de fibra (compósitos híbridos) ou arquitetura do reforço. De fato, a grande maioria das pesquisas que focam em permeabilidade experimental limitam-se às medidas no plano.

Levando-se em consideração a complexidade dos materiais envolvidos e dos métodos de fabricação, assim como o elevado número de parâmetros que influenciam o comportamento do fluido no interior da pré-forma, é vantajoso estudar o fenômeno utilizando modelagem numérica. Parâmetros como pressão de injeção, velocidade do fluido e permeabilidade do reforço têm papel fundamental no processo de impregnação das fibras e

usando a modelagem, pode-se testar a influência de parâmetros separadamente sem a necessidade de realizar os ensaios experimentais que demandam, em geral, tempo e custo considerável. Para prever numericamente o preenchimento do molde, é necessário conhecer as condições de operação (pressão ou vazão do fluido), a geometria do molde (dimensões, localização de entrada e saída do fluido) e as propriedades físicas dos materiais (viscosidade do fluido, e porosidade e permeabilidade do reforço).

Assim, o sucesso da simulação em prever como a matriz impregna o reforço contido no molde depende em grande parte da precisão dos dados de permeabilidade (ALI *et al.*, 2019a). Além disso, uma metodologia numérica adequada utilizando o método de volumes finitos precisa definir a quantidade ótima de volumes para obter resultados preciso o suficiente sem recorrer a demandas computacionais excessivas que tornem o processo longo. Considerando-se as vantagens e desvantagens das metodologias experimental e numéricas, a melhor opção para o estudo da permeabilidade transversal é associá-las de forma a diminuir o desperdício associado aos métodos experimentais sem perder a precisão dos resultados numéricos.

Assim, estudar a permeabilidade transversal de reforços fibrosos tem um grande interesse dada o potencial de melhoria na fabricação de compósitos poliméricos reforçados por fibras com formatos cada vez mais complexos e direcionados à demanda de aplicação. Soma-se a isso, a ampliação da faixa de teores de fibra estudado e o grau de compressão exercido sobre os tecido revela aspectos muito interessantes do ponto de vista científico e tecnológico (YUN, CARELLA, et al. 2017).

Além disso, a falta de padronização do testes de permeabilidade em geral, mas principalmente na transversal contribuem com a necessidade de se desenvolver um equipamento e uma metodologia de ensaio, bem como aplicar outros ensaios para melhor observar os fenômenos envolvidos no comportamento de cada reforço (SYERKO, et al. 2017). De forma a avançar ainda mais no desenvolvimento dessa tecnologia de processamento de compósitos, adaptar uma metodologia computacional e ampliar ainda mais as possibilidades de prever o comportamento do fluido no interior das pré-formas fibrosas de forma a reduzir tempo de desenvolvimento e custos do projeto.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Estudar a permeabilidade transversal e sua influência no escoamento transversal de fluidos viscosos em meios fibrosos.

2.2. Objetivos específicos

- Para tanto, desenvolver um equipamento especificamente projetado para realizar as medições da permeabilidade transversal de diferentes tipos de reforços será necessário, bem como uma metodologia de ensaio.

- Utilizar os resultados obtidos experimentalmente em um estudo numérico do comportamento da matriz no interior da cavidade do equipamento.

- Avaliar a influência dos parâmetros de teste (espessura da pré-forma, fluido de teste e temperatura de ensaio) nas medidas de permeabilidade transversal;

- Estabelecer a relação entre a permeabilidade transversal e a permeabilidade no plano, bem como sua relação com a arquitetura dos reforços;

- Adaptar uma metodologia computacional para estudar o escoamento de fluidos viscosos em meios fibrosos especificamente para escoamentos na transversal.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Compósitos poliméricos reforçados por fibras

Conhecendo os vários tipos de compósitos e compreendendo sua dependência em relação às características das fases constituintes, é possível projetar materiais compósitos que possuam uma melhor combinação de propriedades. Um compósito consiste de dois ou mais materiais, intrinsecamente insolúveis entre si, com diferentes formas composições, estruturas e/ou propriedades em proporção significativa das propriedades de ambas as fases de tal maneira a melhorar as propriedades da peça final produzida (LEVY NETO; PARDINI, 2006) (CHUNG, 2010; MIKITAIEV; LIGIDOV; ZAIKOV, 2006; YI; DU; ZHANG, 2018). Assim, os materiais compósitos são geralmente formados por duas fases; uma é chamada de matriz, a qual é contínua e envolve a outra fase, chamada de fase dispersa. O compósito é produzido pela mistura desses constituintes. As propriedades finais do compósito são dependentes não só das propriedades dos seus constituintes como também da geometria (formato e tamanho), orientação, distribuição e fração volumétrica das fases (razão entre o volume da fase com relação ao volume total do compósito). Além disso, as fases são separadas, em escala microscópica, por uma interface. A resistência dessa ligação interfacial tem de ser suficiente para que a carga seja eficientemente transferida da matriz para a fase reforço (AMICO, 2000).

A maioria dos compósitos são desenvolvidos visando a melhoria de propriedades mecânicas, como rigidez, resistência e tenacidade, sendo às vezes explorada a combinação com outras características, como baixa densidade, resistência a intempéries e menor frequência de manutenção. Sendo assim, esses materiais oferecem maior flexibilidade de projeto aliado a reduções de custo de fabricação e manutenção. Compósitos se aproximam ou até ultrapassam o desempenho mecânico dos metais em setores diversos, tornando-se atrativos por fornecerem também uma redução de peso significativa. As principais barreiras para uma aplicação ainda mais ampla desses compósitos são o alto custo das matérias-primas, a difícil reciclabilidade e a produção em massa (ILANKEERAN; MOHITE; KAMLE, 2012).

Uma das principais e mais usuais formas de se classificar os compósitos é com relação ao tipo e geometria do reforço. O reforço em um compósito pode ser do tipo particulado ou fibroso sendo que os compósitos de melhor desempenho mecânico são aqueles em que a fase dispersa encontra-se na forma de fibras de alta resistência (contínuas ou descontínuas) dispersas em uma matriz polimérica. A fase dispersa apresenta pelo menos uma dimensão pequena (1 – 500 μm) e é frequentemente mais rígida, resistente e dura do que a matriz. Uma

fibra com pequeno diâmetro é muito mais resistente do que o material volumoso, uma vez que a probabilidade de haver um defeito crítico de superfície é menor. Além do tipo de fibra (vidro, carbono, polimérica, etc.), outras características da fibra que tem influência nas propriedades dos compósitos são: comprimento, orientação e fração volumétrica de fibras (V_f) (CALLISTER; RETHWISCH, 2014). Uma propriedade importante do reforço fibroso é a razão entre o comprimento e a seção transversal da fibra, ou seja, sua razão de aspecto.

Fibras contínuas são aquelas com alta razão de aspecto, enquanto descontínuas são aquelas de baixa razão de aspecto. Os filamentos de fibras podem ser agrupados em feixes, os quais podem ser cortados (fibras curtas), paralelos (*roving* ou fita) ou torcidos (*yarn*). Feixes contínuos de fibras podem ser tecidos usando maquinário têxtil convencional para produzir tecidos multidirecionais. Assim, pode-se produzir compósitos unidirecionais (fibras longas distribuídas em uma direção preferencial, dito compósito unidirecional), compósitos bidirecionais (fibras longas distribuídas em duas direções preferenciais), ou ainda compósitos multicamadas. A quantidade de camadas vai depender da dimensão final desejada enquanto a sequência de direção das fibras vai depender das cargas às quais o compósito estará sujeito quando em serviço (CALLISTER; RETHWISCH, 2014). A Figura 3.1 apresenta uma representação esquemática da seção transversal de um feixe composto de muitos filamentos.

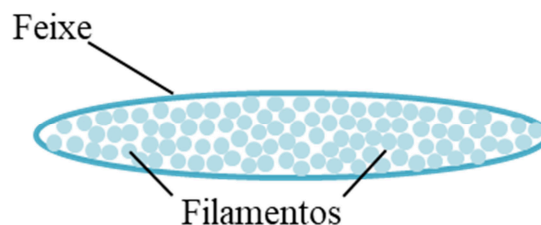


Figura 3.1 – Representação esquemática de um feixe composto por filamentos.

As mantas de fibras consistem em pequenos pedaços de vidro, normalmente 25 a 30 mm de comprimento, distribuídos de forma aleatória e impregnados com um tipo de ligante que mantém os pedaços unidos. A utilização de mantas leva a um compósito de menor resistência pelo fato das fibras serem descontínuas e, também, porque é impossível conseguir um alto teor fibra, tipicamente 25 a 30%. Usando tecidos atinge-se 40 a 60%. A gramatura (massa de reforço por área) das mantas está geralmente entre 150 a 600 g/m². Tecidos permitem a fabricação de compósitos de elevada resistência e teor de fibras. Tecidos

fabricados a partir dos filamentos das fibras podem ser feitos de fios torcidos juntos (*yarn*) ou fios contínuos paralelos (*rovings*). Gramatura na faixa de 90 a 600 g/m². Eles são compostos de fibras correndo em duas direções usualmente em ângulos de 90° uma com a outra. A gramatura de um tecidos é determinada pelo *tex* do material, que é a massa de 1000 metros lineares de filamento. Materiais com o *tex* alto devem ser usados para tecidos de elevada gramatura, enquanto materiais com *tex* baixo são usados para produzir tecidos leves e com baixa porosidade. Sabendo colocar os filamentos cilíndricos lado a lado em elevada compactação é possível desenvolver materiais fechados e com baixa porosidade (NASSEH, 2007). A Figura 3.2 apresenta dois exemplos de fibra de vidro: (a) manta de fibras curtas e aleatórias e (b) tecido bidirecional de feixes contínuos.

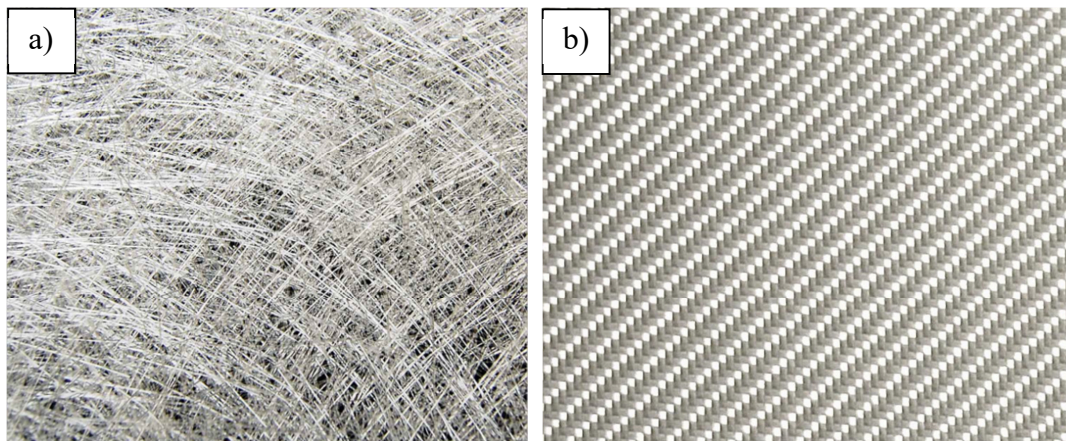


Figura 3.2 – Exemplos de: a) manta e b) tecido bidirecional de fibra de vidro.

Outro importante constituinte dos compósitos a ser considerado é a fase matriz, a qual é contínua e geralmente presente em maior quantidade. Esta fase possui algumas funções essenciais: manter as fibras fixas e próximas umas às outras, atuar como meio através do qual a tensão é transmitida às fibras, proteger as fibras contra danos superficiais, separar as fibras umas das outras e prevenir a propagação frágil de trincas. A fase matriz de compósitos em geral consiste de um polímero termoplástico, termorrígido ou elastomérico. Dentre estes, os termorrígidos são muito usados em moldagem líquida de compósitos que é o objeto desse estudo. Os polímeros termorrígidos compõem uma classe de polímeros que passam pela cura, ou seja, a formação de ligações covalentes fortes e permanentes de reticulação em um arranjo tridimensional entre as cadeias poliméricas quando expostas ao calor ou pela presença de

agente de cura. Contudo, antes dessa reação de cura o polímero se encontra na fase líquida como mostrado na Figura 3.3, o que é interessante para a fabricação dos compósitos.

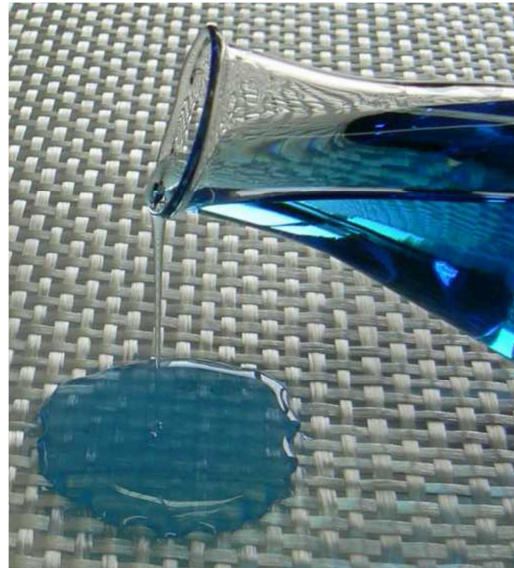


Figura 3.3 – Matriz poliéster líquida (pré-cura) sobre tecido de fibra de vidro.

O tempo entre a mistura dos componentes e a gelificação da matriz é dito tempo de gel, o qual marca o tempo máximo de impregnação dos reforços pela matriz. Após a consolidação pela cura, a resistência e rigidez dos termorrígidos não é tão afetada pela temperatura ou taxa de deformação, além de geralmente apresentarem boas propriedades mecânicas, térmicas e químicas, juntamente com resistência elétrica e certa estabilidade dimensional. Outra característica interessante desses materiais é que não são necessárias altas pressões ou temperaturas para processá-los. As principais desvantagens são as temperaturas de trabalho relativamente baixas, até 250 °C, comparadas com outras famílias de materiais, alta retração durante a cura e sensibilidade à radiação e umidade. Para a seleção do polímero, custo, durabilidade, adesão, facilidade de manipulação e de cura são considerações importantes (ASAAD; TAWFIK, 2011).

Inicialmente, as peças produzidas em compósito eram simples e de pequena espessura (em geral, placas delgadas). Contudo, conforme surgiram novas aplicações (estruturais e de proteção balística) foi necessário desenvolver peças com maior complexidade e maior espessura. Isso levou a novos desafios com relação à impregnação dos reforços por parte da matriz polimérica e a sua cura (ZIMMERMANN; ZENKERT; SIEMETZKI, 2010). Um

aspecto que deve ser considerado quando se produz compósitos espessos é a importância relativa que surge com a frente de escoamento na direção transversal, característica usualmente ignorada devido à pequena espessura em geral. Pode-se considerar um compósito espesso quando este apresenta mais que 6 mm de espessura, contudo, valores acima de 15 mm são mais comumente referidos como compósitos espessos (LAURENZI *et al.*, 2014). Outro exemplo do aumento da complexidade do processamento de placas espessas é que no processamento de placas finas não há gradiente de temperatura ao longo da espessura e o calor gerado pela natureza exotérmica da reação é facilmente dissipado. Por outro lado, para uma placa espessa, essas suposições podem não ser aplicáveis.

3.2. Moldagem líquida de compósitos

A Moldagem Líquida de Compósitos (*LCM*, sigla em inglês) representa uma família de processos de fabricação que compartilham características, isto é, uma matriz líquida termorrígida é injetada na cavidade de um molde fechado atravessando as camadas de reforço secas, removendo o ar e molhando as fibras (chamada de etapa de injeção). A matriz é então curada (chamada de etapa de consolidação) e o molde posteriormente aberto para retirada da peça, que pode ainda necessitar de operações de acabamento subsequentes. A introdução da matriz se dá sob ação de um gradiente de pressão, o qual pode ser negativo ou positivo (RUDD; SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1997).

Existem diversas variantes deste processo, que diferem na forma como a matriz é transportada, como o ar é removido da cavidade, entre outros. Essa flexibilidade permite alterações do processo para um produto específico. As rotas de processamento influenciam as propriedades, a forma geométrica e o custo total da peça final. O molde necessário para a moldagem líquida é geralmente considerado leve e de baixo custo se comparado a técnicas convencionais como moldagem por compressão e termoformação, resultando em menor investimento inicial. As técnicas de LCM mais conhecidas são a Moldagem por Transferência de Resina (RTM), o RTM-Light, a Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo (VARTM), a infusão a vácuo, entre outras (LEVY NETO; PARDINI, 2006). Dentre esses, o RTM é um processo que oferece vantagens por ser adequado para produções de pequeno e médio porte e precisar de um investimento inicial pequeno (POODTS *et al.*, 2014).

O RTM consiste fundamentalmente na injeção de uma resina (matriz) polimérica através de uma pré-forma fibrosa disposta entre moldes rígidos. Inicialmente, prepara-se a

pré-forma através do empilhamento de camadas de fibras, as quais podem ser de diferentes tipos e arquiteturas. A pré-forma é o meio poroso/fibroso através do qual ocorrerá o escoamento da matriz (fluido viscoso). A pré-forma (reforço fibroso já no formato da peça) é posicionada no interior da cavidade de um molde, antes de seu fechamento, formando um “esqueleto” da peça final visando satisfazer as necessidades geométricas e estruturais (YENILMEZ; SENAN; MURAT SOZER, 2009). Essa sequência de etapas está apresentada na Figura 3.4.

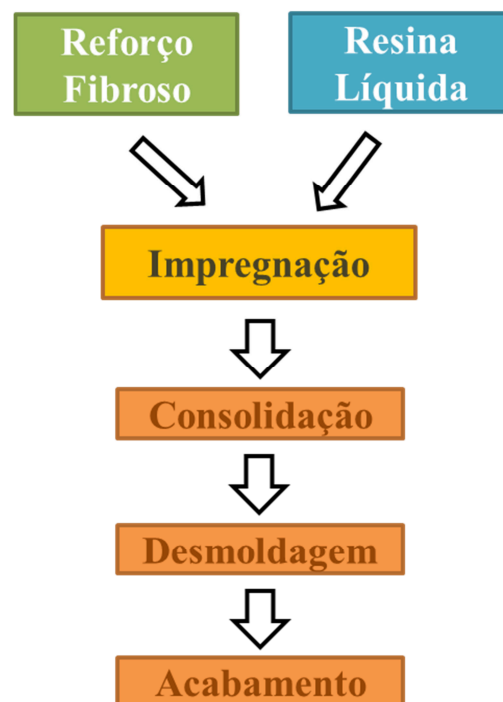


Figura 3.4 – Sequência de etapas da RTM.

Após o fechamento do molde se dá a transferência da matriz a partir de um reservatório para o interior do molde iniciado pela aplicação de pressão sobre o fluido (matriz). Assim, a matriz é injetada a uma pressão constante impregnando as fibras até o reforço ser totalmente saturado, ou seja, até todo o ar ser removido e substituído pela matriz. Na etapa seguinte ocorre o processo de cura do polímero, a partir do qual o compósito desenvolve uma rigidez suficiente para sua ejeção do molde. Depois disso, a peça pode seguir para etapas de pós-processamento como: elevação de temperatura para pós-cura (visando a completa reticulação do polímero), retífica, operações de acabamento, etc. (MORREN *et al.*, 2009). A Figura 3.5

apresenta um exemplo de infiltração de resina em uma pré-forma fibrosa usando um molde de RTM.



Figura 3.5 – Molde de RTM durante moldagem líquida de compósitos.

Para promover a formação de uma ligação interfacial entre a fibra e a matriz e para atingir elevadas propriedades mecânicas do compósito, a matriz líquida precisa molhar a superfície da fibra e penetrar no interior do feixe enquanto a matriz ainda está no estado líquido (VAFAI, 2015). Para isso, o molde de RTM deve possuir pelo menos uma abertura de entrada, para injeção da matriz, e uma abertura de saída, para permitir a saída do ar existente no interior do molde. Em peças grandes há várias aberturas para entrada e saída de matriz. O RTM pode ser realizado à temperatura ambiente, mas pode ter o molde aquecido, o que reduz a viscosidade e o tempo de gel da matriz. Uma vez que os moldes utilizados são rígidos, tolerâncias dimensionais e porosidade podem ser controladas e peças de alta qualidade podem ser produzidas (NAIK; SIRISHA; INANI, 2014). Além disso, esse processo tem o potencial de fabricar peças com média e alta fração volumétrica de fibras, o que, juntamente com a arquitetura da pré-forma fibrosa, influenciam as propriedades mecânicas do compósito (RUDD; SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1997). Frações volumétricas de fibras mais altas requerem maiores pressões de injeção, o que pode afetar negativamente as propriedades da peça final. Neste processo, as pressões de injeção utilizadas estão entre 1 e 10 bar, pois valores maiores podem ocasionar o arraste de fibras (*fiber wash*), a deflexão do molde e a formação de vazios no compósito. A matriz deve ter uma viscosidade baixa (entre 50 e 1500 cP) para uma boa impregnação do reforço e curto tempo de injeção (YI; DU; ZHANG, 2018).

As vantagens do RTM incluem a fabricação de produtos de formato complexo e o excelente controle de propriedades. Segue ainda o baixo custo relativo de equipamentos, ciclos de tempo de produção curtos, automação do processo, duas superfícies de alta qualidade na peça final e valores elevados de teor de fibras. Além disso, o uso do RTM também reduz o manuseio de matriz líquida dentro da fábrica, facilitando a manutenção de uma área de trabalho limpa e pouco contato do operador com a matriz, logo, há baixo desperdício durante a produção e baixa emissão de voláteis (LEVY NETO; PARDINI, 2006). Por outro lado, uma das principais barreiras do RTM é o entendimento do processo de escoamento da matriz pela pré-forma. Se as aberturas de entrada e saída não estiverem devidamente posicionadas no molde, seções da pré-forma podem permanecer secas após o término do processo (ALI *et al.*, 2019a). Sendo assim, no RTM existem parâmetros que precisam ser estudadas principalmente ao serem consideradas a produção de peças de compósito espesso. Em particular, o conhecimento dos padrões de escoamento durante a injeção de matriz, e a distribuição de pressão do líquido resultante, permitem que o molde seja projetado com considerável confiança. Mais fundamentalmente, a modelagem do processo pode ser usada para otimizar o ciclo de moldagem.

3.3. Escoamento de matriz em meios fibrosos

Na moldagem líquida de compósitos, a matriz flui através de um entrelaçamento de fibras, o qual pode ser considerado como um meio poroso em que as descontinuidades entre as fibras são chamadas de poros (VAFAI, 2015). Meios fibrosos podem ser encontrados em uma variedade de aplicações, incluindo tecidos funcionais, filtragens, isolamento térmico, ciências médicas, fenômenos de transporte biológicos (SHOU; FAN; DING, 2011), construção civil, aeronáutica e mesmo em aplicações corriqueiras (ZHU *et al.*, 2011). Uma representação esquemática de um meio poroso é mostrada na Figura 3.6.

Todos os processos de moldagem líquida dependem da completa impregnação do reforço enquanto a matriz líquida preenche a cavidade do molde. Isto deve ocorrer antes da matriz entrar na chamada fase gel que é caracterizada por um aumento significativo de viscosidade até a posterior cura, momento no qual a matriz torna-se sólida. Assim, a cinética da reação de cura da matriz determina o tempo máximo disponível para um preenchimento completo do molde. Também é preciso conhecer o meio poroso a ser preenchido, o líquido impregnante e as formas de interação entre eles (LEKAKOU; BADER, 1998).

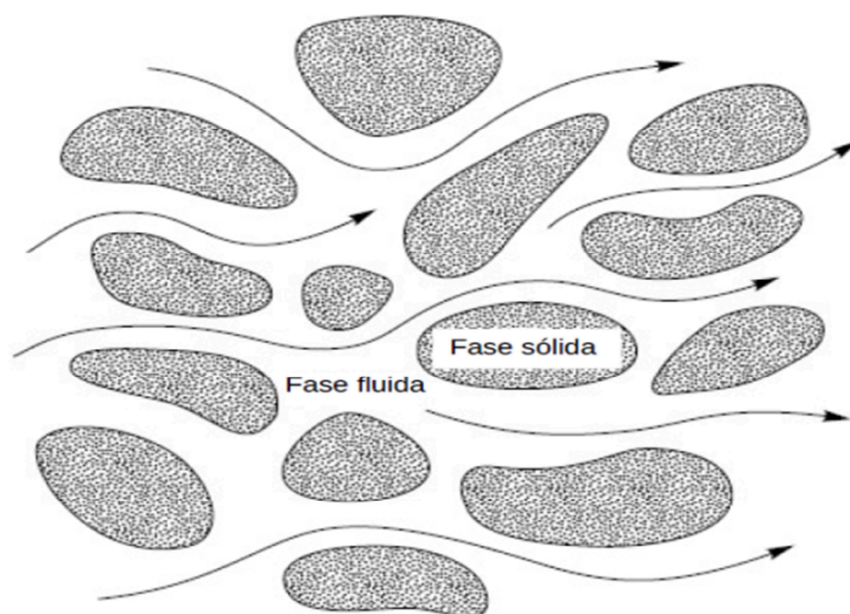


Figura 3.6 – Representação esquemática de escoamento de uma fase líquida em meio poroso.

Fonte: adaptado de (VAFAI, 2015).

Uma das maiores preocupações na fabricação de compósitos por moldagem líquida envolve o controle do teor de vazios na peça final e isso é determinado durante o processamento no qual o ar (fase gasosa) é substituída pela matriz (fase líquida). Caso contrário, defeitos nos componentes moldados podem ocorrer. O avanço da frente de escoamento da matriz é usado para expelir o ar através das saídas periféricas da cavidade. Por isso, alguns processos utilizam vácuo nas saídas aplicado antes ou durante a impregnação (LECLERC; RUIZ, 2008).

O ar está presente no interior da pré-forma entre os feixes e dentro destes e o deslocamento de ar em ambos é necessário para reduzir o teor de vazios. A Figura 3.7 mostra que a frente de escoamento do líquido procede em dois níveis. A frente macroscópica avança entre os feixes do reforço a uma taxa determinada pelo gradiente de pressão de 1-10 bar, valores tipicamente associados à moldagem líquida. No interior do feixe (em escala microscópica) as forças dominantes no escoamento são capilares, sendo dependentes da tensão superficial entre fibra e matriz. Neste mecanismo de escoamento em duas escalas, caso as frentes de escoamento (micro e macro) não sejam coincidentes, pode-se gerar uma grande quantidade de ar retido nos feixes após a passagem da frente de escoamento. As três principais fontes de vazios são: o “*race tracking*” (ou coalescência da frente de escoamento

em nível macroscópico); presença de umidade ou compostos voláteis presentes nas matrizes ou fibras; e o aprisionamento de ar no interior dos feixes (“*fingering*”) (RUDD; SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1997).

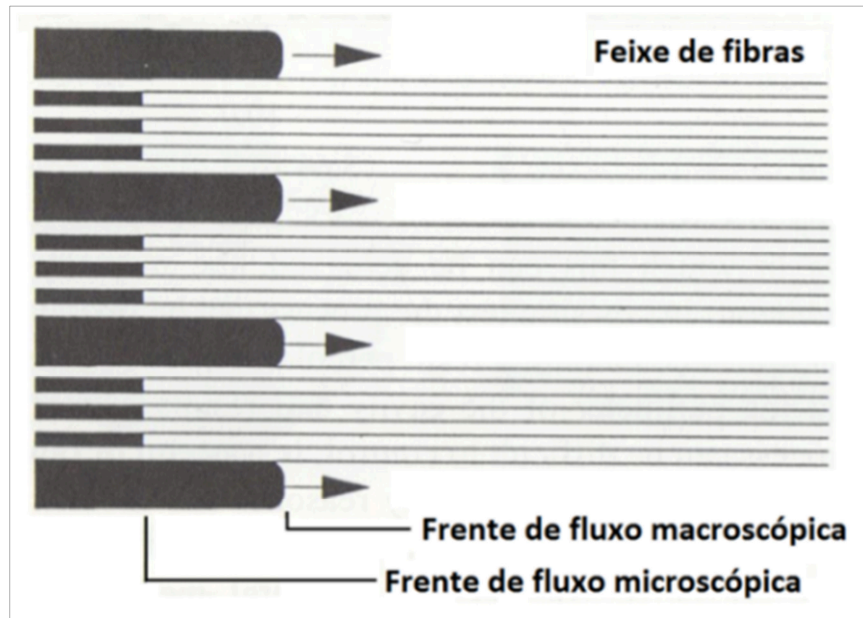


Figura 3.7 – Representação esquemática do escoamento em nível micro e macroscópico.

Fonte: Adaptado de (RUDD; SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1997).

Vazios macroscópicos (Figura 3.8a) são regiões sem matriz geradas pelo aprisionamento de bolhas de ar durante a etapa de impregnação dos reforços. Esses vazios dependem muito do projeto do molde e da arquitetura da pré-forma fibrosa, e podem ocorrer quando o avanço da frente de escoamento ocorre em uma direção secundária. Além dessa possibilidade, a existência de espaço entre a borda da pré-forma e a parede do molde pode ocorrer devido ao corte defeituoso do reforço ou ainda devido a uma pressão excessiva que deforme o molde e afaste as fibras fazendo com que a matriz avance preferencialmente nessa região e leve à coalescência da frente de escoamento (“*race-tracking*”).

Vazios no interior dos feixes (Figura 3.8b) são mais comumente formados quando o escoamento se dá sob altas vazões e são mais difíceis de serem eliminados. O escoamento entre feixes avança mais rapidamente do que o escoamento no interior dos feixes, o qual é chamado de efeito de “*fingering*”. Quando o fluido avança, envolve o feixe com fluido e o ar fica preso no seu interior resultando em vazios microscópicos. Em pequenas vazões, a frente

de escoamento é capaz de progredir mais rapidamente no interior do feixe do que fora dele. Em vazões moderadas, as forças capilares e viscosas são aproximadamente iguais, o que resulta em uma impregnação simultânea dos pequenos e grandes espaços entre as fibras (RUDD; SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1997).

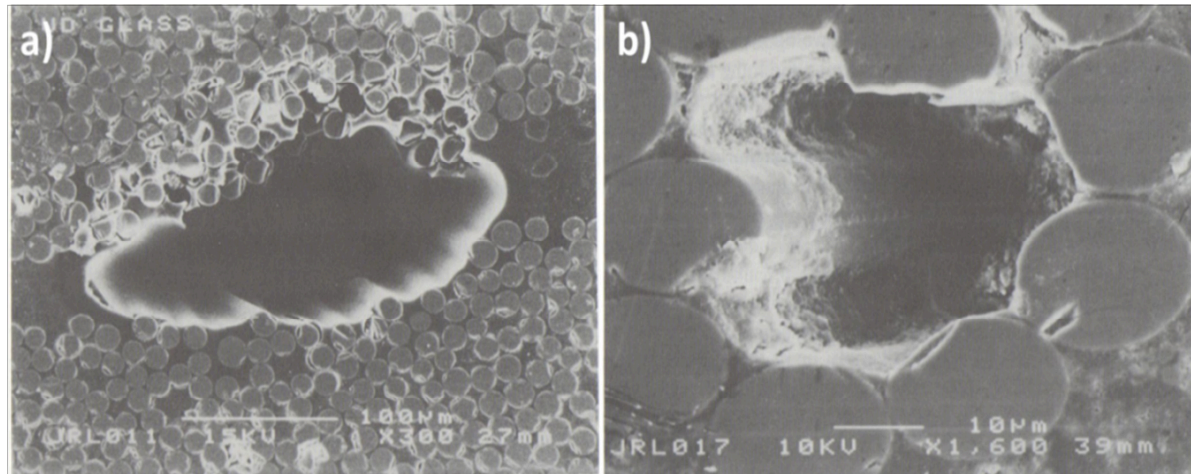


Figura 3.8 – a) Vazios macroscópicos (entre feixes) e b) vazios microscópicos (intra-feixe).

Fonte: Adaptado de (RUDD; SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1997).

As ações para minimizar a ocorrência de vazios em laminados incluem: degasagem da matriz (aplicação de vácuo após a mistura e antes da moldagem), aplicação de vácuo durante a impregnação, secagem das fibras antes da moldagem, aplicação de alta taxa de escoamento após preenchimento do molde e aquecimento. Alguns estudos abordam técnicas de diminuição de vazios nos compósitos através do estudo de diferentes geometrias dos reforços e parâmetros de injeção visando orientar a frente de escoamento (GOURICHON *et al.*, 2008; LECLERC; RUIZ, 2008).

Apesar do processo de impregnação ser teoricamente simples, o escoamento através do reforço em nível microscópico é complexo. Modelos de escoamento de matriz através da pré-forma fibrosa são geralmente descritos como o escoamento planar de um fluido Newtoniano e incompressível através de um meio poroso, considerado como equivalente a um escoamento em múltiplos tubos (KOŁODZIEJ; DZIECIELAK; KOŃCZAK, 1998). Logo, a física da etapa de injeção durante a moldagem líquida é baseada na conservação de massa e usa a lei de Darcy como força resistiva na equação da conservação da quantidade de movimento. Embora seja amplamente utilizada em modelos de escoamento em RTM, o uso da lei de Darcy é

controverso, uma vez que há menções quanto ao insucesso do modelo aplicado a meios anisotrópicos (YAZDCHI; SRIVASTAVA; LUDING, 2011). Quando não é verificada a linearidade entre a velocidade do escoamento e o gradiente de pressão, diz-se tratar de um escoamento “não-Darciano” devido à alta velocidade e/ou ao comportamento não-Newtoniano do fluido. Foi verificado que para baixas velocidades de injeção a pressão capilar pode ser tornar mais importante que o gradiente de pressão, levando a desvios em seus resultados. Apesar de todos os questionamentos, a lei de Darcy ainda é o modelo mais aplicado para descrever o comportamento do escoamento no processo RTM.

3.4. Caracterização da permeabilidade

A lei de Darcy é uma equação constitutiva derivada fenomenologicamente que descreve o escoamento de um fluido através de um meio poroso. A lei foi formulada por Henry Darcy com base em resultados experimentais (publicados em 1856) sobre o escoamento de água através de areia. Além disso, essa lei também constitui a base científica da permeabilidade dos meios fibrosos. Em 1856, Darcy propôs sua famosa equação de escoamento em meios porosos, na forma unidimensional e com a permeabilidade apresentada como um escalar. A forma tensorial da equação de Darcy (Eq. (3.1)) foi introduzida por Liakopoulos (1965). A permeabilidade indica a facilidade com a qual a matriz escoar através dos espaços vazios de um meio poroso e, para escoamentos tridimensionais, é expressa como um tensor simétrico de segunda ordem. A lei de Darcy estabelece que a velocidade do fluido através do meio fibroso é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade do fluido que, quando estendida para três dimensões, é dada por (RUDD; SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1997):

$$\vec{V} = -\frac{1}{\mu} \bar{K} \nabla p \quad (3.1)$$

onde: μ é a viscosidade do fluido (Pa s) e \bar{K} é o tensor permeabilidade do meio poroso, dado por:

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Para a maioria dos reforços fibrosos, a permeabilidade é uma propriedade direcional que varia em três dimensões no interior da pré-forma. Por isso a necessidade de usar um tensor

(Eq. (3.2) que toma a forma de uma matriz 3×3 e relaciona os três componentes do vetor velocidade superficial do fluido (u_x , u_y , u_z) ao gradiente de pressão paralelo associado aos eixos coordenados.

Uma das propriedades importantes do tensor permeabilidade é que existe um conjunto ortogonal de eixos (eixo principal) com respeito ao qual todos os termos diagonais do tensor são não-zero (Eq. (3.3)). Ou seja, a permeabilidade é normalmente definida por dois valores principais medidos no plano do reforço (K_{xx} e K_{yy}) e um outro na direção principal através da espessura do empilhamento (K_{zz}).

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

A permeabilidade é influenciada pelas características físicas da pré-forma de reforço que incluem: tamanho de poro, porosidade, rugosidade, comprimento e tortuosidade dos canais (alinhamento dos poros entre os feixes), fração volumétrica de fibras, arquitetura e orientação das fibras e sequência de empilhamento das camadas. Tortuosidade: microfluxo em torno do feixe relacionado à capilaridade e microporosidade. Pode ser afetado pelo crimp dos tecidos. A porosidade (ε), que é a medida da fração volumétrica sem fibras antes da moldagem (“complementar” ao espaço ocupado pela pré-forma) pode ser calculada pela razão entre o volume de poros (V_p) e o volume total (V_t), ou ainda, pelo complementar da fração volumétrica de fibras (V_f):

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_t} = 1 - V_f \quad (3.4)$$

Para estimar a permeabilidade dos reforços, são utilizados valores de viscosidade do fluido, velocidade do escoamento, porosidade do reforço e pressão de injeção. A velocidade com que o fluido avança na pré-forma depende de como ela é tramada e da direção em que é disposta no molde. Por isso, recomenda-se que a medição da permeabilidade seja o mais próximo possível das condições reais do processamento (RUDD; SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1997). Os fluidos de teste usualmente encontrados incluem óleos de silicone, óleos minerais e ainda óleos vegetais, que possuem baixa viscosidade relativa, baixa toxicidade e estabilidade térmica para as condições de ensaio, entre outras características. Além disso, a correlação entre viscosidade e temperatura para os fluidos de teste deve ser estabelecida antes da determinação da permeabilidade (MORREN; BOSSUYT; SOL, 2008).

Os ensaios de medição da permeabilidade podem ser realizados sob condições transientes (nos quais os reforços iniciam secos e mede-se a permeabilidade insaturada) ou estacionárias (nos quais os reforços iniciam totalmente molhados pelo fluido e mede-se a permeabilidade saturada). O molde é em geral constituído com pelo menos uma das metades em material transparente para possibilitar a visualização da etapa de injeção, ou pode-se monitorar o escoamento e a cura por sensores dielétricos baseados em corrente contínua (VAIDYA; ABRAHAM; Bhide, 2001). Durante o experimento, o fluido é injetado na cavidade a partir de um reservatório onde há aplicação de pressão, a qual força o fluido até chegar na saída do molde passando pela pré-forma posicionada na cavidade. Esses ensaios podem ser realizados sob vazão ou pressão de injeção constante. Assim, dependendo do regime usado, mede-se a velocidade do fluido ou a relação entre vazão e diferença de pressão para calcular a permeabilidade. Diferenças foram identificadas entre os valores insaturados e saturados devido à redução do ângulo de contato entre fluido e fibra após o molhamento destas. Uma vez que as medidas de permeabilidade insaturada incluem o efeito sobre o escoamento das energias superficiais e forças capilares estes são, em geral, mais próximos a uma situação real de moldagem líquida do que os ensaios saturados (NAIK; SIRISHA; INANI, 2014).

Os processos convencionais de fabricação de laminados finos dependem principalmente do escoamento no plano para preenchimento de molde, com isso, o problema é dominado pelas componentes no plano X-Y da permeabilidade (K_{xx} e K_{yy}). As componentes da permeabilidade no plano são determinadas experimentalmente por escoamento retilíneo ou radial (HAN *et al.*, 2000). Os testes retilíneos (permeabilidade 1D) são feitos pela introdução de fluido em um reforço usando uma abertura de entrada na borda da cavidade do molde visando forçar o escoamento retilíneo e confinando este fluido para avançar paralelamente em relação à lateral da cavidade na direção da abertura de saída, na lateral oposta. Atenção deve ser tomada na disposição da pré-forma para evitar espaços vazios que possam levar a escoamentos heterogêneos principalmente quando a fração volumétrica de fibras é muito reduzido. A vantagem dessa técnica é a simplicidade do experimento, tanto na montagem e medições quanto no cálculo da permeabilidade. Alguns dos problemas relatados envolvem a estabilização da pressão de injeção e tempos de preenchimento muito reduzidos, que levam frequentemente à necessidade de um número elevado de ensaios até a obtenção de resultados representativos e reprodutíveis (VAIDYA; ABRAHAM; Bhide, 2001).

Em experimentos de escoamento radial, a matriz é injetada na cavidade do molde através de uma abertura central fazendo com que o escoamento siga radialmente na pré-forma até as aberturas de saída na periferia da cavidade do molde. Um furo central normalmente é feito em cada de reforço antes do empilhamento para evitar compactação local com a chegada do fluido sob pressão e para facilitar a introdução simultânea de fluido em todas as camadas. A progressão da frente de escoamento pode ser monitorada por gravação em vídeo e pós-processamento das imagens para medir com maior exatidão a velocidade instantânea do fluido ou por monitoramento visual usando escalas. O teste radial têm duas vantagens principais com relação ao retilíneo, dois componentes do tensor permeabilidade podem ser obtidos em um único experimento (K_{xx} e K_{yy}), e elimina-se a necessidade de uma precisão muito grande no encaixe do reforço na cavidade uma vez que não há o efeito das bordas.

Alguns materiais podem ser tratados como isotrópicos ou *quasi*-isotrópicos, ou seja, o comportamento do escoamento é igual ao longo de todas as direções, com isso, a matriz se propaga na pré-forma segundo um formato circular. Exemplos típicos são mantas com fibras dispostas aleatoriamente. Reforços alinhados, como tecidos unidirecionais ou *tapes*, são ortotrópicos, logo, o comportamento do escoamento no plano é diferente em cada direção principal. Neste caso é necessário a determinação de duas componentes da permeabilidade (K_{xx} e K_{yy}), e a frente do escoamento assume um formato elíptico. Permeabilidades de pré-formas ortotrópicas também podem ser obtidas caso a razão das principais permeabilidades no plano seja conhecida (COMAS-CARDONA; BINETRUY; KRAWCZAK, 2007). Sendo assim, tem-se que adaptar as equações para diferenciar os casos dos reforços que apresentam a mesma permeabilidade nas duas direções principais (*quasi*-isotrópicos) ou não (ortotrópicos) (RUDD; SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1997).

3.5. Permeabilidade transversal

A permeabilidade dos reforços é influenciada de forma significativa pela porosidade, a qual ocorre em duas escalas. A porosidade intra-feixe tem, aparentemente, um efeito reduzido na permeabilidade da pré-forma, principalmente ao se considerar um baixo teor de fibras. A porosidade entre feixes, por outro lado, apresenta uma influência pronunciada na permeabilidade (TAHIR, et al. 2015). Dentre as principais contribuições, entender o papel que os caminhos do escoamento na direção transversal ocorrem majoritariamente através dos espaços entre os feixes distribuídos através da espessura, os quais podem estar, ou não,

alinhados entre camadas adjacentes. Quando desalinhados, os feixes de uma camada estão no espaço entre dois feixes da camada adjacente impedindo a passagem do fluido através daquela camada. Esse fenômeno chamamos de emaranhamento. Para elevados teores de fibra (V_f acima de 50%), o grau de compactação aumenta, levando a um maior escoamento através dos feixes de fibras (escoamento intra-feixe) o qual é governado pela permeabilidade em escala micrométrica do feixe (YUN, CARELLA, et al. 2017). Assim, o espaço entre camadas e entre feixes, a razão de aspecto do feixe, e a porosidade intra-feixe têm influência sobre o escoamento transversal através dos reforços. Além disso, para maiores teores de fibra (40-60%), a influência da permeabilidade dentro do feixe no plano e transversal torna-se ainda mais relevante (SYERKO, et al. 2017).

Os modelos de escoamento em duas dimensões funcionam bem para simulações de peças produzidas por infusão de matriz com pequena espessura (<6 mm). Contudo, simulações numéricas usadas no projeto e otimização dos processos de moldagem líquida podem demandar o tensor tridimensional de permeabilidade, especialmente se uma pré-forma multicamada espessa (>6 mm) for usada. Assim, as componentes principais da permeabilidade podem ser necessárias quando o escoamento for tridimensional, ou seja, quando o compósito tem elevada espessura e a matriz escoar tanto no plano quanto na direção transversal (normal às fibras). A forma mais usual é medir a permeabilidade transversal em um experimento separado da medida da permeabilidade no plano (CHAE; SONG; YOUN, 2007; GEBART, 1992; SCHOLZ; GILLESPIE JR.; HEIDER, 2007), ainda que alguns autores tenham desenvolvido métodos em que a medida é simultânea (AHN; LEE; SPRINGER, 1995).

A medida da permeabilidade transversal é mais difícil devido à dificuldade em se detectar a frente de escoamento que se move perpendicularmente ao plano do laminado. Apesar disso, alguns autores utilizam sistemas de medidas indiretas como: medida de permeabilidade transversal insaturada, mas realizando a medida em escoamento retilíneo com cálculo através da diferença de velocidade entre as superfícies superior e inferior do molde (LUGO; SIMACEK; ADVANI, 2014). Em YUN *et al.*, 2017b, um equipamento de VARTM foi adaptado usando um molde superior flexível, uma luz no topo e uma câmera na parte inferior para observar a posição da frente de escoamento usando essa luz que passa através da pré-forma. Weitzenbock et al. (1998) detectou a frente de escoamento usando termistores e reportou as dificuldades causadas pela pressão capilar em medidas tridimensionais.

Em Kim; Daniel (2003), o escoamento foi monitorado usando uma nova tecnologia de sensores chamada *Smart Weave*. Ahn et al. (1995) usaram uma rede de sensores de fibras ópticas dentro da pré-forma e conseguiram demonstrar a usabilidade dos sensores em monitorar o escoamento e determinar a permeabilidade. Já SAOUAB *et al.* (2001) descreveram um escoamento insaturado 3D de uma matriz através de um reforço usando monitoramento por radiografia de raios-X, o qual não é comercialmente aplicável nem confiável para medidas de permeabilidade. Ainda assim, conseguiram mostrar fenômenos interessantes como, por exemplo, a deformação do reforço fibroso na região de injeção. ALI *et al.* (2019b) utilizaram tomografia por raios-x para analisar o escoamento.

A simplicidade do método fazer medições de permeabilidade saturada é marcante, principalmente considerando-se que essas medições não necessitam de acompanhamento da frente de escoamento já que este se dá no interior de moldes fechados sem acesso visual. Os autores relataram que a utilização de pequenas vazões foi fundamental para as medidas de permeabilidade de forma contínua e discreta visando evitar escoamentos não-uniformes (OUAGNE; BRÉARD, 2010; OUAGNE *et al.*, 2013). A limitação desse método é que a permeabilidade medida é a permeabilidade saturada, a qual, ainda que importante do ponto de vista científico, tem menor utilidade prática pois a moldagem de compósitos é feita a partir de pré-formas secas (TREVINO *et al.*, 1991). Apesar disso, tem-se verificado que a permeabilidade através da espessura é, em geral, pelo menos uma ordem de grandeza menor do que na direção das fibras (ZARANDI; ARROYO; PILLAI, 2019).

Dentre os trabalhos que descrevem formas de estimar a permeabilidade transversal de pré-formas fibrosas, alguns destes utilizaram um equipamento com entrada na parte inferior, regime de escoamento saturado, e medição da relação entre vazão e diferença de pressão entre a entrada e a saída do molde (CHAE; SONG; YOUN, 2007; OUAGNE; BRÉARD, 2010). Outros autores usaram moldes planos comuns e observaram a velocidade de avanço da frente de escoamento visualmente ou com auxílio de sensores (OKONKWO *et al.*, 2011; SAS *et al.*, 2014; YUN *et al.*, 2017a, 2017b). Estes autores calcularam de forma indireta a permeabilidade transversal e, em alguns casos, todos os termos simultaneamente, ainda que o processamento de imagens ou rotinas de cálculos mais refinadas tenham sido necessárias. Merhi et al. (2007) estudaram a relação entre a permeabilidade transversal e o tamanho, a geometria e a fração volumétrica dos feixes de fibra de vidro usados em compósitos de fibras curtas e aleatórias. A permeabilidade se mostrou dependente do aditivo usado para manter o feixe coeso e, em geral, a porosidade foi o fator mais importante.

Ampliando esses estudos, Chae et al. (2007) estudaram a permeabilidade transversal de pré-formas produzidas a partir de mantas com fibras aleatórias, tecidos e fibras trançadas tridimensionalmente e verificaram que todos os valores variaram conforme a porosidade variou e que a permeabilidade foi reduzida conforme o número de camadas foi aumentado, ainda que o V_f fosse o mesmo. Outro resultado interessante encontrados por esses autores foi com relação às placas permeáveis usadas para confinar as camadas de fibra no interior da cavidade do equipamento de medida permitindo a passagem do fluido. Os autores verificaram que, para a faixa de permeabilidades estudada, o número e tamanho dos furos dispostos nessas placas permeáveis teve influência reduzida nos resultados e que a disposição com 68 furos de 8 mm concentrados na parte central da placa com 120 mm de diâmetro. O sistema utilizado pelo autores está apresentado na Figura 3.9.

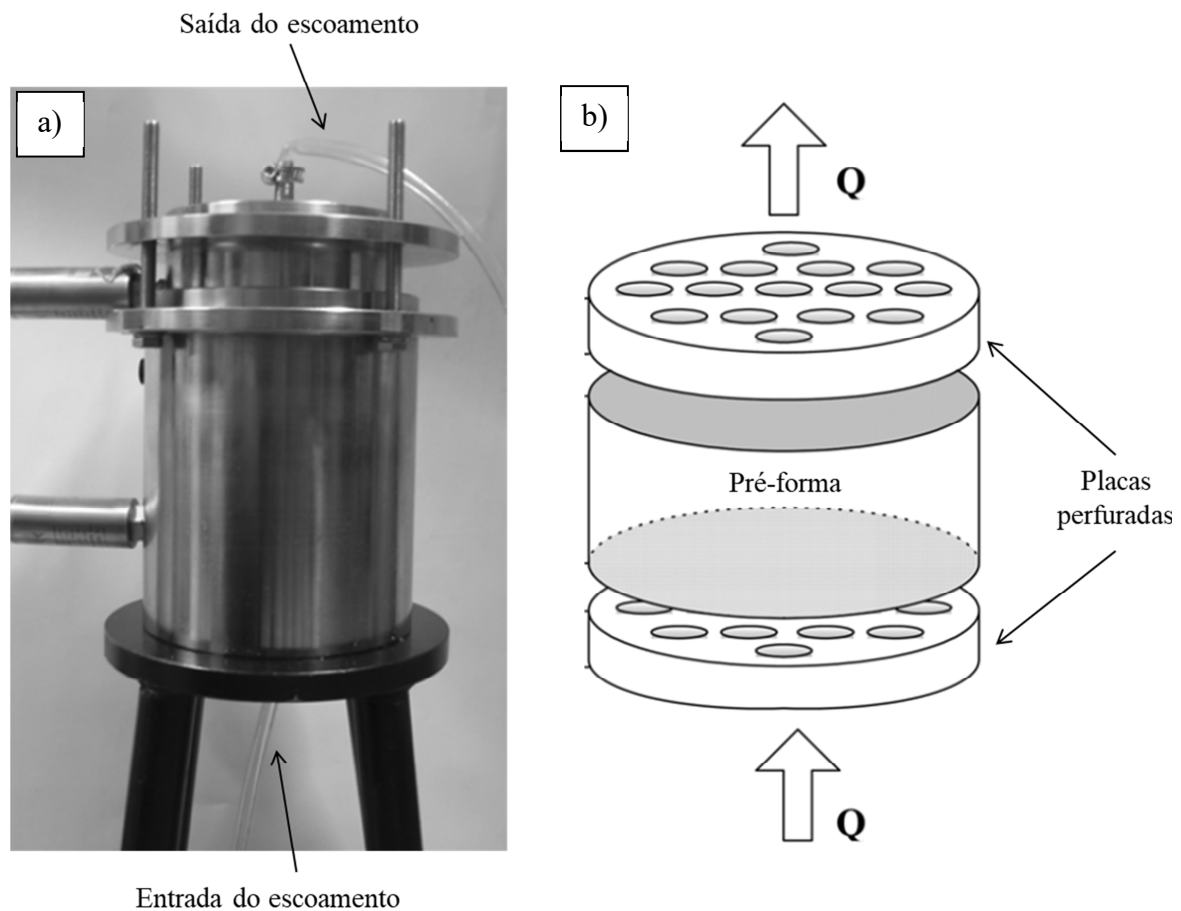


Figura 3.9 – a) Equipamento de medição de K_{zz} saturado e b) Representação esquemática do sistema. Fonte: Adaptado (CHAE; SONG; YOUN, 2007).

O emaranhamento das fibras (capacidade máxima dos feixes de camadas adjacentes de aproximarem-se) e a compactação não-uniforme das camadas altera os espaços entre feixes levando a uma maior variação dos valores de permeabilidade (VERNET *et al.*, 2014). Isso ocorre porque, dependendo do tipo e arquitetura dos reforços, o emaranhamento pode alterar o caminho de escoamento do fluido e impactar significativamente a permeabilidade. Assim, conforme o ângulo entre as fibras das sucessivas camadas aumenta, a permeabilidade transversal aumenta de forma não-linear devido à criação de espaços vazios, ou seja, caminhos de menor resistência entre as camadas (SAS *et al.*, 2014).

Wu *et al.* (1994) e Fang *et al.* (2014) mediram a permeabilidade transversal de um modelo de escoamento unidimensional. Conforme a fração volumétrica de fibras aumentou, a permeabilidade transversal diminuiu por causa do efeito de bloqueio na interface entre camadas adjacentes, criando caminhos mais tortuosos. Nesse caso a maior permeabilidade está associada a uma estrutura menos compactada. Neste sentido, um efeito que deve ser considerado é o chamado efeito de “*nesting*” dos reforços, que causa a obstrução da porosidade transversal pelas camadas empilhadas de forma adjacente. Neste trabalho, os autores conseguem descrever a permeabilidade local de cada zona como função dos parâmetros geométricos dos feixes. Como resultado, obtiveram que, para uma mesma fração volumétrica de fibras, a ordem de grandeza da permeabilidade foi duas vezes maior comparando o emaranhamento mínimo ao máximo. Além disso, essa diferença diminuiu com o aumento da fração volumétrica de fibras. O sistema utilizado pelo autores está apresentado na Figura 3.10.

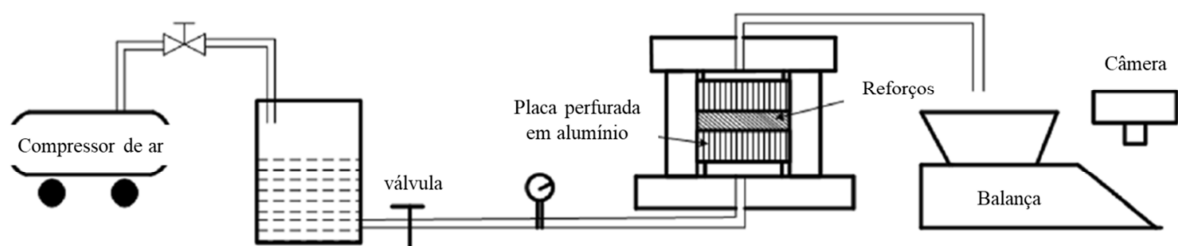


Figura 3.10 – Representação esquemática do sistema de medição de K_{zz} . Fonte: Adaptado (FANG *et al.*, 2014).

Ahn *et al.* (1995) desenvolveram um equipamento para medir simultaneamente a permeabilidade transversal e a pressão capilar no escoamento insaturado. Os autores mediram

a posição da frente de escoamento como uma função do tempo e verificaram que o uso da lei de Darcy não é aplicável quando sistemas estudados apresentarem porosidades muito baixas (menor que 0,21), porosidades muito elevadas (acima de 0,80), caminhos bloqueados para o escoamento, deformações alongacionais, ou poros não-uniformes pois considera capilaridade e diâmetro capilar médio constantes.

Woerdeman et al. (1995) apresenta uma metodologia geral para determinar os componentes do tensor permeabilidade tridimensional a partir de um conjunto de testes com escoamento unidirecional saturados. Os resultados foram obtidos pela resolução numérica de seis equações altamente não-lineares relacionando a permeabilidade efetiva ao tensor permeabilidade. Nedanov et al. (2002) propôs um método de determinação simultânea dos principais valores do tensor permeabilidade tridimensional das pré-formas que se baseia no monitoramento visual da posição da frente de escoamento no plano. Com a forma desta frente, a quantidade de fluido na pré-forma e o tempo decorrido, pode-se caracterizar a evolução da frente de escoamento tridimensional. Contudo, os resultados podem não ser confiáveis uma vez que os autores usaram somente a medida do tempo de saída da matriz para encontrar a permeabilidade transversal. Além disso, os autores verificaram que o tamanho da abertura de entrada do fluido na pré-forma afetou o cálculo de permeabilidade.

Gokce et al. (2005) apresentou um novo método de estimativa experimental da permeabilidade chamado Algoritmo de estimação da permeabilidade, que utiliza um modelo de processamento numérico ao invés de relações analíticas. Limitou sua aplicação a encontrar a permeabilidade transversal da pré-forma e de um promotor de escoamento específico, sem garantir a aplicabilidade para outros reforços. A razão permeabilidade/porosidade da pré-forma é um parâmetro crítico do processo, a qual varia com a forma geométrica do reforço fibroso. Esse parâmetro domina as características do escoamento da matriz e influencia a qualidade do produto final. A maioria dos métodos de medida consideram a porosidade do material como uma constante e estimam a permeabilidade de toda a pré-forma fibrosa como um valor único, ignorando variações locais. A razão entre permeabilidade e porosidade é importante para simulação e controle do processo e sua avaliação deveria ser local e não apenas global (CHIU *et al.*, 2018).

GODBOLE *et al.* (2019) verificaram que os filamentos em um feixe estão aleatoriamente distribuídos, ou seja, assumir uma distância inter-filamentar constante não é suficiente. O modelo neste trabalho indica a necessidade de descrever corretamente a permeabilidade transversal do feixe. Apesar da fração volumétrica de fibras geral no interior

do feixe ser de aproximadamente 0,6, pode haver variações locais, assim sugere a aplicação dos modelos a diferentes frações volumétricas de fibras. O efeito do formato da seção transversal do feixe no escoamento através dos espaços entre os feixes em um reforço têxtil foi estudado em (ENDRUWEIT *et al.*, 2018).

Permeabilidades maiores podem ser obtidas quando os caminhos entre feixes/camadas na direção transversal forem formados pelos feixes de seção transversal quase retangular mais do que para feixes com seção transversal lenticular. Isso sugere que aumentar a área da seção transversal do duto pela mudança do seu formato não necessariamente se traduz em um aumento da permeabilidade transversal. A permeabilidade máxima e mínima dos espaços entre feixes difere por um fator de 3,3. Isso explica porque uma predição precisa da permeabilidade é difícil na prática mesmo quando a fração volumétrica de fibras é conhecida. Testes com o equipamento vazio para determinar a perda de carga entre a entrada e a saída do equipamento devido unicamente à geometria do equipamento já foram realizados. Assim, os autores relataram que a perda de carga devido aos *honeycombs* (estrutura porosa usada para sustentar as camadas de fibra permitindo a passagem do fluido) e a variações nas suas características como reduções de diâmetro e *set-up* em geral. Eles mostraram que o efeito foi negligenciável (MERHI *et al.*, 2007).

Normalmente, obtém-se a permeabilidade em uma fração volumétrica de fibras específica e depois, em um novo experimento outra permeabilidade em relação a outra fração volumétrica de fibras e, assim, sucessivamente. Uma alternativa é medir a permeabilidade enquanto o reforço é continuamente compactado. O escoamento pode ser gerado pelo movimento dos pratos ou injeção de fluido externo (OUAGNE *et al.*, 2013). Uma pilha de camadas de reforço é disposta entre placas rígidas enquanto há uma diminuição da distância entre as placas levando a um aumento da fração volumétrica de fibras. Ao mesmo tempo, a diferença de pressão ou vazão é medida em função do tempo (HEIDER *et al.*, 2007). A distância entre placas pode ser convertida em fração volumétrica de fibras enquanto a vazão e a diferença de pressão são utilizadas para obter a permeabilidade usando a lei de Darcy em cada instante durante a compactação.

A vantagem do método contínuo é reduzir o número de medidas e o tempo total de experimentação. A relação entre fração volumétrica de fibras e permeabilidade pode ser obtida em uma medida única (BUNTAIN; BICKERTON, 2003). Contudo, muitas vezes os resultados obtidos por método contínuo não são comparáveis com aqueles obtidos pelo método discreto, logo, a confiabilidade do método contínuo ainda é questionada (DRAPIER

et al., 2002; SCHOLZ; GILLESPIE JR.; HEIDER, 2007). Por outro lado, valores similares para método contínuo e discreto já foram encontrados, caso a velocidade de compressão for suficientemente baixa (OUAGNE; BRÉARD, 2010). Viu-se que a vazão deve ser pequena visando evitar distribuições não-uniformes da fração volumétrica de fibras induzidas pela compactação das fibras ao longo do escoamento do líquido (OUAGNE *et al.*, 2013).

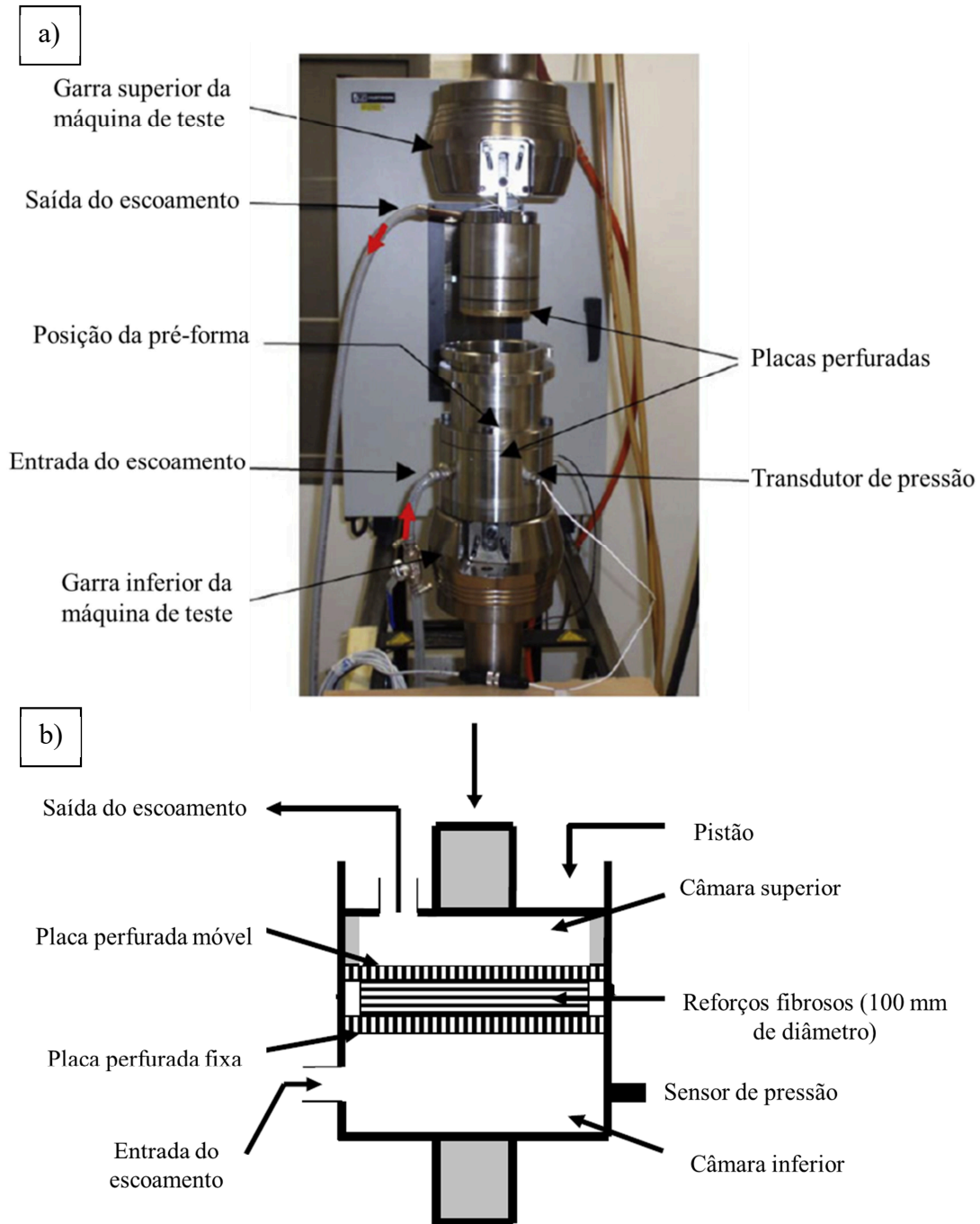


Figura 3.11 – a) Equipamento de medição de K_{zz} saturado de forma contínua e b) Representação esquemática do sistema. Fonte: Adaptado de (OUAGNE *et al.*, 2013).

Pré-formas ortogonais apresentam potencial para aproximação de feixes de diferentes camadas (emaranhamento) conforme os níveis compactação tornam-se maiores (ALI *et al.*, 2018). Usando um modelo analítico com rotação do tensor de permeabilidade e eixo de rotação dos feixes do tecido, previu-se a permeabilidade do reforço ortogonal deformado em cisalhamento, logo, com menor emaranhamento. Ao comparar esses resultados com medidas experimentais, percebeu-se que a heterogeneidade da permeabilidade causada pelo cisalhamento que gerou variação do tamanho dos espaços vazios entre os feixes dos tecidos, bem como sua localização e tamanho governam o comportamento de formação de vazios durante a impregnação (KIM *et al.*, 2019). Usando uma abordagem rápida e eficiente para caracterizar um reforço previu-se a possibilidade de formação de vazios, o que levou aos fabricantes de reforços otimizarem seus equipamentos usando as informações obtidas sobre os efeitos de variações nos seus equipamentos (YUN *et al.*, 2018).

GODBOLE *et al.* (2020) apresentaram uma metodologia para simular a permeabilidade na direção da fibra para uma ou múltiplas camadas usando um modelo semi-analítico baseado em três parâmetros: permeabilidade de feixe de fibras, espaçamento entre feixes e espaços entre camadas. Dentre os resultados mais relevantes, os autores encontraram que a compactação das camadas resulta em variações dimensionais na direção da espessura com imperceptíveis alterações nas dimensões no plano (espaçamento entre feixes e largura destes). Além destes, foi percebido que o espaçamento entre os feixes e os espaços entre as camadas fornecem caminhos para o escoamento influenciando a permeabilidade em particular para baixos valores de V_f (menos de 50%). Por fim, a permeabilidade de uma camada única se mostrou maior do que a de múltiplas camadas devido à pressão de compactação e fechamento de espaços entre feixes dado o emaranhamento de camadas adjacentes.

Um método eficiente para medir a permeabilidade usando VARTM foi apresentado, bem como um método de simular esse processo. Os autores utilizaram geometria bidimensional sob regime de escoamento insaturado e pressão de injeção constante para comparar com outros métodos já estabelecidos de RTM. Os erros encontrados entre os resultados numéricos e experimentais estiveram entre 1% e 4,7% para o RTM e entre 11,1% e 12,3% para o VARTM. Os resultados numéricos foram feitos sem considerar variações de espessura e permeabilidade que podem ocorrer no VARTM Ainda que esse método não seja adequado para prever a espessura final ou o volume de matriz injetado, ele ainda pode ser aplicado para planejar o molde e a localização das portas de entrada e saída, bem como

predizer o padrão de escoamento e prevenir a formação de vazios (HANCIOGLU; SOZER; ADVANI, 2020).

No trabalho de Zarandi et. al. (2019), foram testados quatro modelos para permeabilidade ao longo do eixo z, oito para escoamento transversal à direção da fibra e seis modelos genéricos para diferentes meios porosos (isotrópicos). Diversos fatores podem ser usados para explicar as dificuldades de cada modelo teórico, tais como dispersão do diâmetro das fibras, defeitos nas fibras, dispersão do comprimento das fibras, rugosidade da superfície etc. Também, os modelos deveriam incluir efeitos de não uniformidade na distribuição das fibras. Um novo algoritmo para criar rapidamente elementos de volume representativo (EVR) com distribuição aleatória de fibras foi apresentado (LIU *et al.*, 2020). Esse algoritmo considera microestruturas de fibras com raios constantes ou não, e pode atingir valores de V_f de 80 a 85%, respectivamente. Análises de micro-escoamento também foram realizadas usando os EVR gerados pelo algoritmo e os resultados encontrados foram semelhantes àqueles obtidos experimentalmente.

Quando calculando permeabilidades de pequenos e aleatórios Elementos de Volume Representativo (EVR), uma distribuição similar a uma Gaussiana foi encontrado (RIMMEL; MAY, 2020). Com isso, assume-se que considerar 10 EVR por conjunto de parâmetros assegura uma cobertura estatística suficiente para estimar a micro permeabilidade. Comparado a medidas reais de permeabilidade transversal, os valores simulados tenderam a ser três vezes maiores para V_f de 50%, enquanto com V_f de 60% houve grande semelhança. Uma explicação possível para isso é devido à mobilidade das fibras nas estruturas reais em V_f menor que leva a uma compactação hidrodinâmica e redução de permeabilidade quando comparada às fibras imóveis em simulações que não estão sujeitas a essa compactação. Após detalhar os requerimentos básicos para simular micro permeabilidade transversal em arranjos de fibras aleatórios, estes valores podem ser posteriormente usados para modelar modelos em escalas maiores com a micro permeabilidade como um parâmetro de entrada.

A Tabela 3.1 apresenta valores de permeabilidade transversal encontrados na literatura relacionados à fração volumétrica de fibras e ao tipo de reforço avaliado. Nota-se que os valores encontrados para amostras de fibra de vidro são em geral maiores que para fibras de carbono. Vê-se também que amostras de tecido tendem a apresentar valores menores comparados a mantas de fibras. Além disso, observa-se uma ampla faixa de permeabilidades transversais encontradas para diferentes materiais e fibras.

Tabela 3.1 – Tipos de reforços, faixa de V_f e K_{zz} encontrados na literatura.

Tipos de Fibra	Arquiteturas do reforço	Faixa de V_f	Faixa de K_{zz} [m ²]	Referência
Vidro, carbono, aramida e híbridos	Mantas, tecidos e trançados	34-50%	1×10^{-10} a 3×10^{-12}	(SHIN; SONG; YOUN, 2006)
Vidro-E e Carbono	Tecido planos e biaxiais	45-70%	3×10^{-11} a 1×10^{-13}	(SCHOLZ; GILLESPIE JR.; HEIDER, 2007)
Vidro-E, carbono e aramida	Tecidos bidirecionais e sarjas	50%	9×10^{-13} e 1×10^{-13}	(HEIDER <i>et al.</i> , 2007)
Vidro-E, carbono e linho	Cetim, tecido plano e mantas	15-40%	5×10^{-11} a 1×10^{-13}	(OUAGNE; BRÉARD, 2010)
Vidro-E, carbono e linho	Cetim, tecido entrelaçado e manta	20-65%	5×10^{-11} a 1×10^{-13}	(OUAGNE <i>et al.</i> , 2013)
Vidro-E	Tecido	45%	9×10^{-12} a 3×10^{-12}	(LUGO; SIMACEK; ADVANI, 2014)
Vidro e Carbono	Tecidos unidirecionais	45-65%	4×10^{-10} a 5×10^{-14}	(FANG <i>et al.</i> , 2014)
Carbono	Tecido unidirecional	58%	$3,8 \times 10^{-13}$ a $3,6 \times 10^{-14}$	(AZIZ <i>et al.</i> , 2017)
Carbono	Tecidos tridimensionais, ortogonais e entrelaçados	47-67%	5×10^{-11} a 1×10^{-12}	(ALI <i>et al.</i> , 2018)
Vidro-E	Tecido plano bidirecional	45%	$1,36 \times 10^{-12}$	(YUN <i>et al.</i> , 2018)
Vidro e carbono	Feixes únicos	40-50%	$3,6 \times 10^{-11}$ a 2×10^{-11}	(ZARANDI; ARROYO; PILLAI, 2019)
Vidro	Feixes únicos	40-80%	$1,5 \times 10^{-12}$ a 8×10^{-13}	(GODBOLE <i>et al.</i> , 2019)

Uma forma estruturada de analisar o escoamento transiente de matrizes incompressíveis em um processo de infusão a vácuo utilizando um método de acompanhar a frente de escoamento foi desenvolvida e apresentada. Um sistema de acompanhamento *in situ* da pressão do fluido usando sensores específicos foi desenvolvido, assim como uma forma inovadora de medir o deslocamento transversal para medir a elevação da espessura. Os autores verificaram que aumentar o número de camadas diminui o V_f e que a pré-forma

molhada é mais compactável do que esta quando está seca. Perfis de pressão gerados a partir dos modelos foram comparados com os encontrados experimentalmente e estiveram consideravelmente próximos desde os primeiros instantes do teste até seu final. Ainda, o avanço da frente de escoamento experimental e simulada foram comparadas em tempo real apresentando erro menor do que 5% (ADHIKARI; GURURAJA; HEMCHANDRA, 2021).

3.6. Modelagem e simulação aplicados à LCM

O engenheiro ou projetista incumbido de resolver um determinado problema tem à sua disposição, fundamentalmente, três elementos de análise: métodos analíticos, métodos numéricos e experimentação em laboratório (CHUNG, 2015). Os métodos analíticos apresentam limitações, pois, em geral, só podem ser aplicados com consideráveis simplificações, muitas vezes comprometendo os resultados. A experimentação em laboratório remete aos parâmetros reais do processo, porém pode ter um alto custo ou ser impossível realizá-la. No entanto, ambas têm um papel importante no que diz respeito à validação dos métodos numéricos, os quais podem resolver problemas complicados, com contornos definidos em geometrias complexas e gerando resultados em um relativamente curto período de tempo. Assim, o método numérico pode ser o mais rápido e econômico, apesar de ser necessário um conhecimento profundo sobre o fenômeno físico estudado e modelos matemáticos e numéricos adequados. Por vezes o modelo matemático é adequado, mas a discretização não é, conduzindo a soluções inconsistentes.

Neste contexto, a dinâmica de fluidos computacional (*CFD*, sigla em inglês) surgiu como ferramenta de análise de problemas físicos para investigação científica e para solução de problemas de engenharia (MALISKA, 2004). O CFD se preocupa com o movimento de fluidos (líquidos e gases) e as forças que atuam sobre eles. A palavra “Computacional” se refere aos cálculos com etapas aritméticas e não-aritméticas e que seguem um modelo bem definido de escoamentos e forças usando uma análise numérica (algoritmos que usam aproximações numéricas para problemas de análises matemáticas). A dinâmica de fluidos computacionais pode ser definida como a predição do movimento de fluidos e forças através da utilização de análises numéricas. Contudo, com o passar do tempo e o desenvolvimento de novas aplicações, esse termo foi usado para descrever uma faixa mais ampla de cálculos para diversas aplicações em ciência e engenharia como, por exemplo, motores, resfriamento de eletrônicos, turbinas, aquecedores, trocadores de calor, entre outros. Uma definição mais

moderna então engloba a predição do movimento de fluidos e forças por cálculos computacionais usando análise numérica, geralmente estendida para incluir calor, termodinâmica, química e sólidos.

O ponto de partida do CFD, e de qualquer simulação numérica, é o modelo matemático, que consiste de um conjunto de equações diferenciais parciais (EDPs) e condições de contorno que descrevem o fenômeno (BLAZEK, 2015). A partir disso, o CFD envolve a solução dessas EDPs, as quais são usualmente as leis de conservação que governam as forças e o movimento de fluidos de cada processo. Em alguns casos mais simples, essas equações apresentam soluções analíticas ou “fechadas” (*closed-form solutions*), entretanto, os problemas reais geralmente demandam o uso de CFD para calcular velocidades e pressões durante o escoamento para assim predizer, por exemplo, o desempenho aerodinâmico ou mesmo forças de arraste.

O CFD usa métodos numéricos para representar cada EDP como um arranjo de equações algébricas em pontos discretos no domínio de solução; as equações algébricas são resolvidas pela inclusão de condições de contorno adequadas. A partir do problema que se deseja representar numericamente, é definido o método a ser empregado na discretização das equações envolvidas no fenômeno, ou seja, escolhe-se um método de discretização apropriado. A solução de EDPs a partir de modelos no contínuo requer o processo de discretização para ser resolvido por uma máquina com capacidade finita em termos de poder de processamento e memória. Esse objetivo pode ser atingido por diversos métodos, sendo o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Volumes Finitos (MVF) os mais populares. Existem vantagens e desvantagens na utilização de cada método dependendo da aplicação, por isso, a decisão de qual método usar é geralmente uma questão de vivência do grupo de trabalho, experiência matemática, códigos disponíveis, infraestrutura, etc. O MEF e o MVF são os mais utilizados em estudos de escoamento de fluido em meios fibrosos, sendo amplamente aplicados ao processo LCM, como mostram os estudos de (CHOI *et al.*, 1998; JIANG *et al.*, 2007).

O método de volumes finitos é um método numérico popular que subdivide o domínio de solução em uma malha de pequenos volumes, ou células, nos quais as equações são resolvidas (THOMPSON; SONI; WEATHERILL, 1999). Cada célula inclui valores discretos (por exemplo, velocidade, pressão, etc.) tipicamente em seu centro e, em três dimensões, a malha (conjunto de células) pode ser composta por elementos prismáticos, tetraédricos, hexaédricos ou piramidais. O sistema de equações lineares produz uma matriz esparsa (com

muitos zeros) que é resolvida geralmente utilizando métodos iterativos, os quais são procedimentos matemáticos que usam uma estimativa inicial para gerar uma sequência de soluções com aproximações cada vez melhores para determinada classe de problemas, nas quais a n -ésima aproximação é derivada daquelas anteriores e, cuja solução permite calcular as variáveis de interesse do problema. A conservação das propriedades transportadas dentro do volume de controle é uma das principais características do MVF a qual provê uma estabilidade às soluções que o diferencia dos demais métodos de discretização do contínuo (MALISKA, 2004).

Um método iterativo é chamado convergente se a sequência correspondente converge para um dado conjunto de aproximações iniciais. Em contraste, os métodos diretos buscam resolver o problema através de uma sequência finita de operações. Na ausência de erros de arredondamento, métodos diretos entregam ao final uma solução exata. Ainda assim, métodos iterativos são frequentemente utilizados na resolução de problemas lineares quando o número de variáveis é particularmente grande, o que torna o método direto inviável devido ao grande número de operações necessárias. O método de volumes finitos é popular porque se presta a soluções iterativas de conjuntos complexos de equações e computação paralela por decomposição de domínio, com muitos cálculos ou processos executados simultaneamente.

Determinar intuitivamente o padrão do comportamento do escoamento da matriz através da pré-forma pode ser simples para certas geometrias, mas torna-se consideravelmente difícil pelo número de parâmetros envolvidos. Por isso, justifica a necessidade de se realizar uma análise numérica por CFD (GOKCE *et al.*, 2005). A habilidade de simular o processamento durante a moldagem líquida de compósitos pode facilitar tanto o projeto do molde quanto o processo de fabricação da peça em si e, com isso, acelerar o caminho da concepção do protótipo à produção final do componente. Fundamentalmente, é necessário prever as posições da frente de escoamento durante a impregnação dos reforços e a distribuição de pressões como função do tempo durante o ciclo de preenchimento para uma geometria de componente arbitrária.

Muitos parâmetros afetam a infiltração em processos de moldagem líquida, como: localização e formato das aberturas de entrada e saída; relação viscosidade/temperatura e reatividade do sistema polimérico (fluido); condições de injeção (pressão ou vazão); arquitetura da pré-forma fibrosa (porosidade e permeabilidade) e até características do molde como rigidez, material usado na fabricação e posição do aquecimento (quando presente). Além disso, o grande número de graus de liberdade devido à anisotropia dos reforços e a

ampla faixa de matérias-primas com diferentes características (GREVE; PICKETT, 2006). Através do estudo numérico aplicado ao processamento de materiais compósitos pode-se projetar de forma eficiente aspectos críticos do projeto como pontos de entrada e saída, pressão de injeção, tempo de preenchimento, entre outros. Além disso, é possível prever possíveis regiões secas devido a padrões de preenchimento inadequados. A previsão precisa do escoamento é de grande importância para reduzir o tempo de processamento e corrigir problemas na fabricação da peça aumentando sua qualidade final.

Os aspectos térmicos também são importantes para obter uma operação de moldagem satisfatória, pois estes têm influência no tempo total do ciclo através dos efeitos no preenchimento e no ciclo de cura. Idealmente, a cura da matriz só se inicia depois do fim da impregnação, caso contrário, o aumento de viscosidade associado pode dificultar e até impedir que o reforço seja completamente preenchido. Assim, uma abordagem isotérmica para modelagem do escoamento pode ser justificada se a transferência de calor ocorre rapidamente da parede do molde para a matriz com relação à velocidade de preenchimento e toda a impregnação ocorra dentro do tempo de gel da matriz. Caso a matriz seja não-Newtoniana, será necessário incluir no modelo matemático a relação viscosidade-taxa de cisalhamento (TAN; ROY; PILLAI, 2007). Apesar da importância desses fatores na fabricação de peças de compósitos e, conseqüentemente, na simulação, não foram considerados neste trabalho devido à necessidade de restringir as variáveis de análise para a viabilidade do estudo.

A lei de Darcy é uma equação constitutiva que descreve o escoamento do fluido em um meio poroso, a qual pode ser resolvida numericamente ou explicitamente, dependendo da complexidade da geometria do molde e da estratégia de injeção (HOLZMANN, 2017). Assim, as velocidades do fluido e a posição da frente de escoamento podem ser determinadas em qualquer tempo durante a etapa de injeção. Apesar da sua importância, a lei de Darcy não é suficiente para resolver problemas numéricos de LCM, logo, para compor o modelo matemático de forma completa faz-se necessário utilizar as equações de conservação e um método numérico capaz de resolver o conjunto de equações do modelo completo para todo o domínio. A combinação da lei de Darcy com a equação de conservação de massa leva a uma equação diferencial parcial que descreve um campo de pressões no domínio da matriz.

No mercado há aplicativos dedicados exclusivamente ao processo RTM como o PAM-RTM da ESI Group, o RTM-WORX da Polyworx e o LIMS da University of Delaware, comumente utilizados pela indústria dada a sua interface amigável e uma linguagem

computacional simples e focada apenas neste processamento. Porém, aplicativos dedicados em geral limitam estudos mais aprofundados sobre o comportamento em situações menos costumeiras. De fato, é possível empregar aplicativos comerciais, não-dedicados ao estudo de processamento de compósitos, mas que permitem uma especificação maior das variáveis do problema a ser estudado. Entre estes, encontram-se o CFX e o FLUENT, ambos da ANSYS, e o Abaqus/CFD da Simula Abaqus. Alternativamente, pode-se utilizar o OpenFOAM que é um aplicativo “*open source*” que vem gradativamente ganhando reconhecimento da comunidade de CFD para a resolução de problemas específicos de RTM (JAGANATHAN; VAHEDI TAFRESHI; POURDEYHIMI, 2008; SHI; DONG, 2011).

O software OpenFOAM[®] é um pacote de sub-rotinas criadas em C++ que podem ser utilizadas para a criação de *solvers* para as mais diversas aplicações. Ele é distribuído exclusivamente sob General Public License (GPL) e aplicado em CFD. Foi criado por Henry Weller em 1989 sob o nome de “FOAM” e lançado como software livre por Henry Weller, Chris Greenshields e Mattijs Janssens em dezembro de 2004. Desde então, novas versões são lançadas anualmente. Uma das aplicações mais comuns do OpenFOAM é para a área CFD onde o método VOF está implementado com uma formulação em volumes finitos centrados em células. O método do volume de fluido (VOF) é uma solução para um escoamento multifásico de transferência de calor e mecânica dos fluidos proposto por Hirt e Nichols (C. W. HIRT, 1981). Esse método é aplicado a fluidos imiscíveis e três equações de transporte são discretizadas e resolvidas simultaneamente. Além disso, ele é capaz de usar permeabilidades anisotrópicas localmente através das suas componentes principais de acordo com as características do reforço.

No OpenFOAM, a simulação de escoamento multifásico de dois fluidos imiscíveis e com o uso da lei de Darcy tem como base o *solver* interFoam (DESHPANDE; ANUMOLU; TRUJILLO, 2012). Este *solver* permite a modelagem do escoamento de duas fases compressíveis, i.e. dois fluidos, em meio poroso usando o método VOF para calcular a interface entre as duas fases. No contexto deste trabalho, definiu-se como as fases do escoamento o ar e a matriz, com uma fração volumétrica, f , para possibilitar a descrição do escoamento dentro do domínio computacional. Com isso, resolve-se uma nova equação diferencial para a fração volumétrica da matriz. Para tanto, o método define que o volume de uma fase não pode ser ocupado simultaneamente pelo da outra, ainda que, essas fases possam coexistir dentro de um mesmo volume desde que a soma de suas frações volumétricas não seja maior do que 1. Assim, se f for igual a zero a célula está vazia (ou seja, preenchida com

ar). Se f for igual a 1 (um) a célula está totalmente preenchida com o fluido, nesse caso, a matriz, e, se f tem valor entre 0 (zero) e 1 (um), a célula está compondo a interface entre as duas fases, ou seja, é uma região de fronteira. Neste contexto, o método do VOF parece bastante atraente para simular o processo uma vez que o preenchimento do molde depende do avanço da frente de escoamento que representa a fronteira física entre a matriz e o ar.

A própria natureza do método VOF implica que a interface entre as espécies não é computada explicitamente, mas emerge como uma propriedade do campo de fração volumétrica da fase. Como a fração volumétrica da fase pode ter qualquer valor entre 0 e 1, a interface nunca é nitidamente definida, mas encontrada em um volume em torno da região onde deve estar. Propriedades do líquido e do ar que precisam ser especificadas no início da simulação incluem viscosidade cinemática, massa específica e tensão superficial. A aceleração da gravidade é considerada uniforme através do domínio e é especificamente constante e na direção transversal ao plano. Uma abordagem numérica para modelagem 3D CV/FE CAD (KOUTSONAS, 2018) foi desenvolvida para prever o *race-tracking* em estruturas avançadas de compósito. Essa técnica de análise estocástica considera o efeito da variabilidade durante o processo de fabricação por RTM e trouxe elucidções sobre variações do escoamento e formação de vazios.

Magagnato et al. (2018) realizaram uma avaliação experimental e numérica do efeito da deformação da pré-forma causada por insertos e subsequentes variações no preenchimento do molde devido a isso. Notou-se que a presença do inserto levou à deformação das fibras no seu entorno e, assim, à formação de áreas secas a baixa fração volumétrica de fibras nessa região uma vez que a matriz acelera nessas áreas levando à formação de bolhas. A comparação da progressão da frente de escoamento da simulação com a progressão experimental mostrou uma proximidade muito grande. Kim et al. (2019) realizaram simulações e predisseram o comportamento de infiltração na produção via VARTM de peças com formatos complexos usando reforços deformados por cisalhamento. Por fim, Zarandi et al. (2019) realizaram simulações numéricas incorporando a aleatoriedade da distribuição das fibras e considerando agrupamentos de fibras.

Um modelo numérico estocástico é usado em MATSUMURA, (2014) para calcular a permeabilidade de meios porosos com diferentes frações volumétrica de fibras. Foi mostrado que usando simulações de CFD e as devidas condições de contorno é possível obter a distribuição estatística da permeabilidade saturada de meios porosos fibrosos. A incerteza nesse cálculo depende de diversos parâmetros: (1) incerteza na medida do V_f , (2) incerteza na

dimensão das fibras (diâmetro variável), (3) efeito da distribuição aleatória das fibras (ARBTER *et al.*, 2011). Exemplos onde esse comportamento pode ocorrer são: (i) combinação de escoamento micro e macro, (ii) padrões não-detectados de permeabilidade devido à distribuição heterogênea das fibras, (iii) distribuição aleatória das fibras (BODAGHI; CATALANOTTI; CORREIA, 2016).

Para predições numéricas, uma modelagem precisa da seção transversal do feixe é crucial uma vez que pode-se obter erros significativos na permeabilidade se a geometria não for precisa (ENDRUWEIT *et al.*, 2018). Os modelos geométricos propostos por WOUDBERG (2017) para meios fibrosos porosos foram usados para avaliar o efeito da orientação da fibra na permeabilidade. Esse modelo mostra que a precisão das predições depende do que é assumido no modelo e a faixa de velocidade envolvida, apesar da permeabilidade ser um parâmetro unicamente geométrico, bem como uma excelente correspondência com os dados experimentais.

Um modelo numérico versátil foi criado por (AZIZ *et al.*, 2017) e validado para correlacionar a permeabilidade transversal e a variabilidade do processo automatizado de produção de pré-formas. Outros autores encontraram, também de forma experimental e numérica, grande influência causada pela presença de insertos na pré-forma que levam à deformação das fibras no seu entorno modificando o padrão de escoamento da matriz e, assim, gerando áreas secas atrás do inserto devido à baixa fração volumétrica de fibras nas bordas do inserto (KRACKE *et al.*, 2018; MAGAGNATO *et al.*, 2018).

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo foi separada em duas partes: a metodologia experimental e a metodologia numérica.

4.1. Experimental

Inicialmente foram apresentados os diferentes reforços que foram estudados. Depois, os equipamentos e procedimentos usados nos testes de medição da permeabilidade no plano (em escoamento radial) e nos testes de medição da permeabilidade transversal.

4.1.1. Materiais

Os tecidos fibra de vidro foram fornecidos pela Owens Corning[®], assim como as mantas. Os tecidos de Kevlar foram fornecidos pela DuPont Brasil[®] e a matriz poliéster instaturada ARAZYN 50502 T10. Outras características são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características dos reforços estudados.

Nome	Tipo de fibra	Arquitetura dos reforços	Gramatura [g/m ²]	<i>tex</i>
R	Vidro-R	Plain weave	826	1856
E	Vidro-E	Plain weave	303	405
K1	Kevlar [®] 129	Plain weave	148	111
K2	Kevlar [®] 29	Basket 2x2	532	333
M1	Vidro-E	Manta	309	fibras curtas
M2	Vidro-E	Manta	462	fibras curtas

Visando analisar visualmente as diferentes características de cada tipo de reforço, foram obtidas imagens com uma vista frontal (ou seja, com a câmera perpendicular a direção das fibras) apresentadas na Figura 4.1.

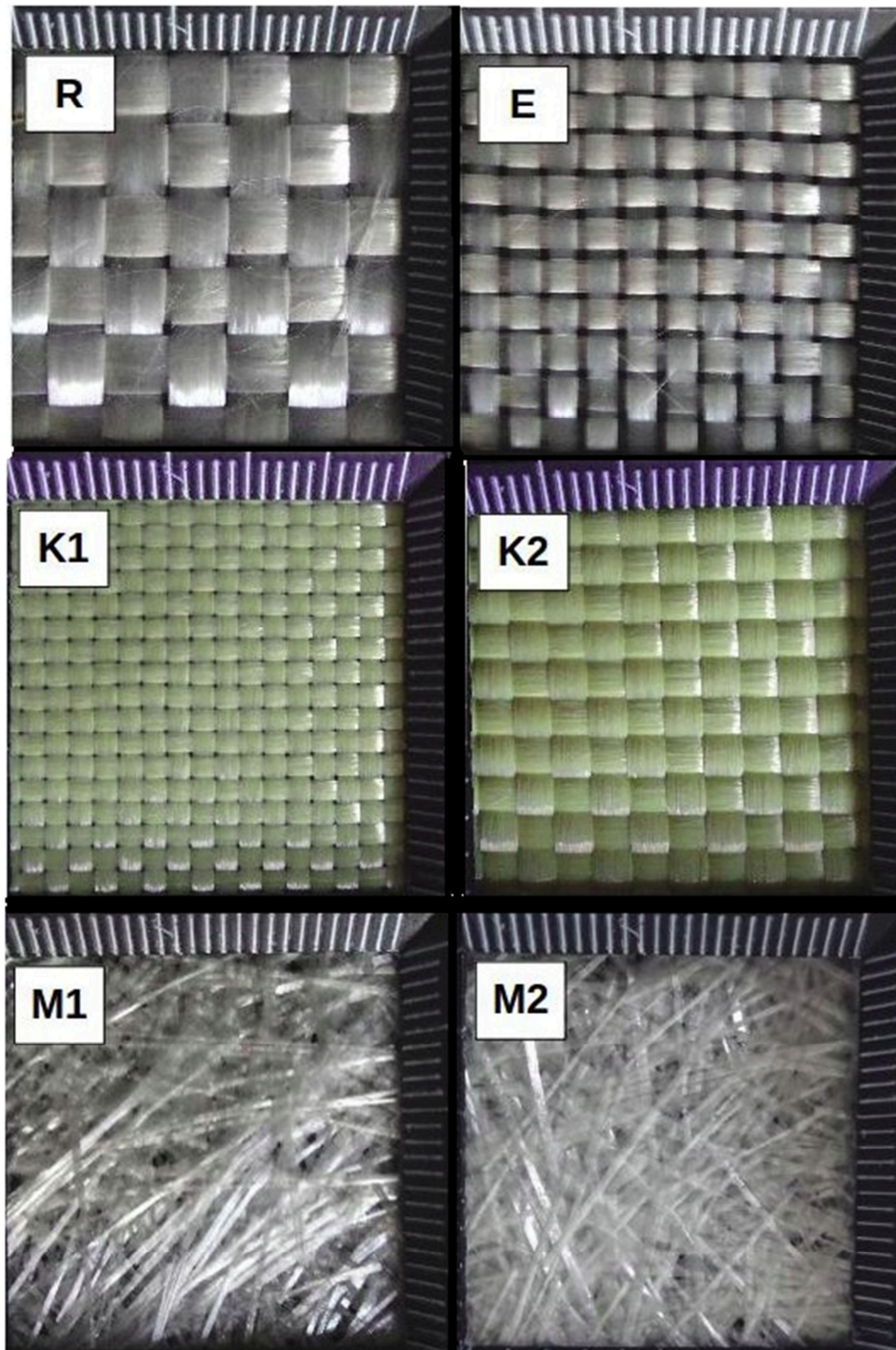


Figura 4.1 – Fotografia dos reforços (a escala mostrada pelas linhas brancas verticais e horizontais entorno de cada tipo de reforço está em mm).

A diferença clara entre alguns reforços ditará o fenômeno de escoamento dos fluidos através deles tanto no plano quanto na direção transversal. Alguns apresentam feixes maiores (maior *tex*) enquanto outros apresentam maior quantidade de espaços entre os feixes ainda que tramados. Além disso, destaca-se a ortogonalidade dos tecidos quando comparados às mantas. Neste trabalho optamos por utilizar reforços com gramaturas bastante diferentes para ampliar entendimento dos seus efeitos na permeabilidade transversal, de forma que a faixa de valores vai desde 148 g/m² até 826 g/m². Atente-se para o fato de que uma maior gramatura leva a uma maior espessura e conseqüentemente menos camadas no preenchimento da cavidade. Para destacar essa porosidade aparente vista nas fotografias, tais reforços foram colocados sobre uma placa de vidro e iluminados pelo lado oposto ao da câmera conforme a representação esquemática apresentada na Figura 4.2.

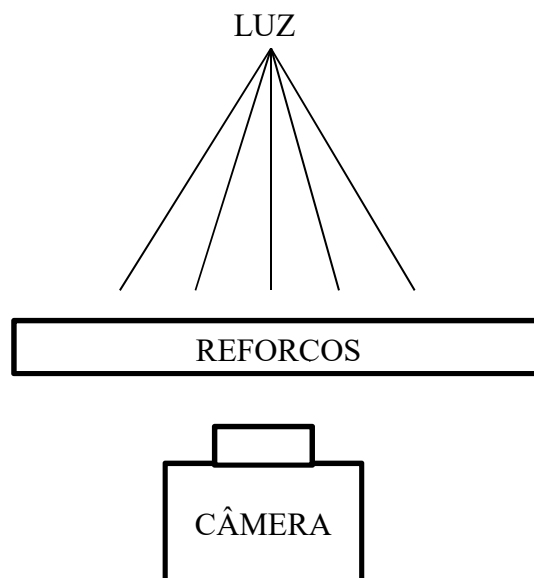


Figura 4.2 – Representação esquemática do sistema de obtenção de imagens com a luz passando através dos reforços.

Vê-se pontos luminosos que mostram os diferentes caminhos que a luz encontrou para atravessar os reforços e assim indicar os caminhos pelos quais os fluidos podem vir a escoar por tais reforços, auxiliando a discutir os resultados posteriores de permeabilidade. A ortogonalidade tem relação com os padrões de luz que atravessaram os tecidos, de forma que aqueles com maior *tex* mostraram padrões com menor número de pontos com aparente maior tamanho, por outro lado, os tecidos com menor *tex* apresentaram um maior número de pontos,

mas bem distribuídos. Já as mantas apresentaram uma maior área luminosa distribuída por toda a área mas de forma heterogênea o que sugere uma maior facilidade do fluido atravessar esses reforços.

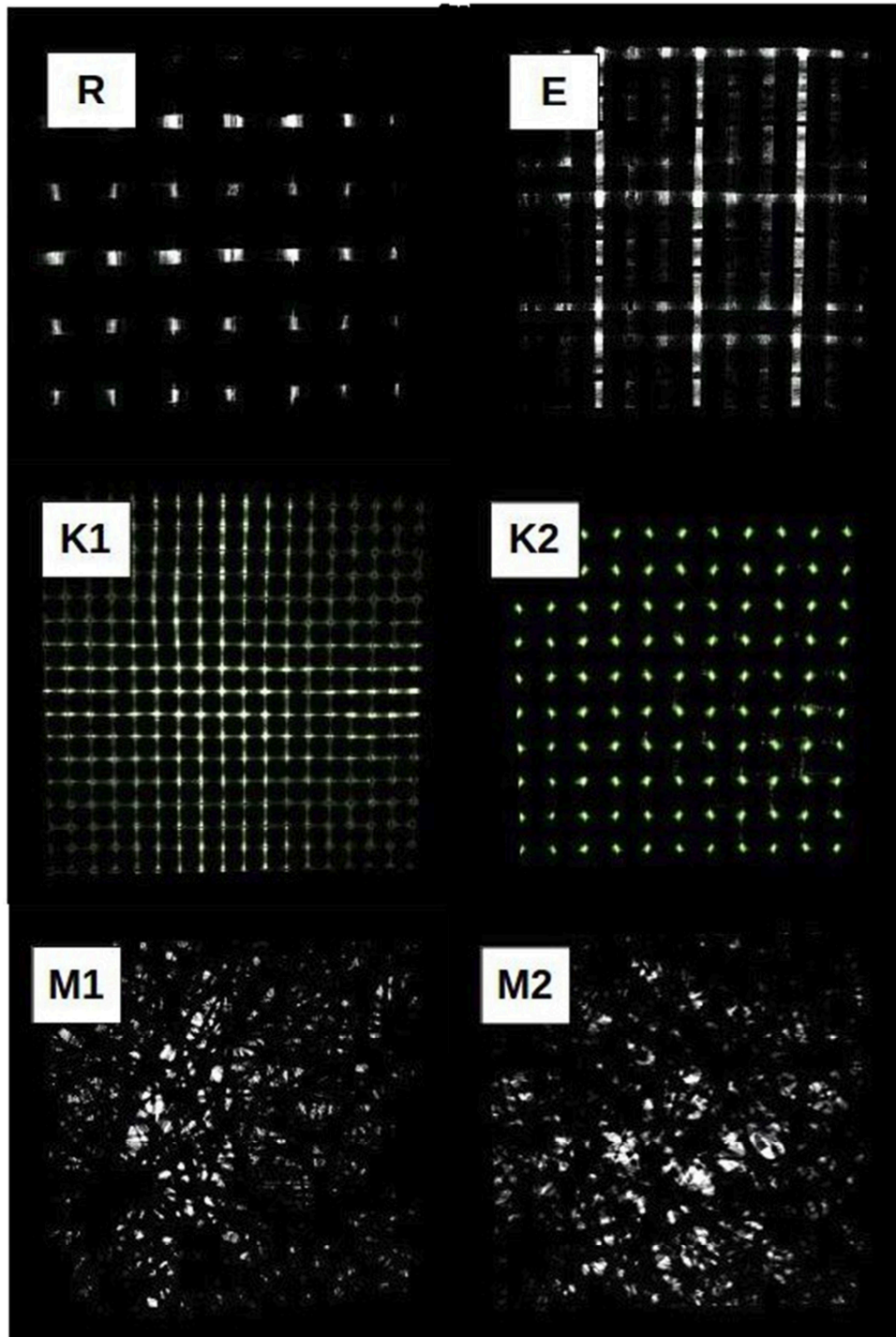


Figura 4.3 – Imagens obtidas usando o sistema apresentado na Figura 4.2 para avaliação qualitativa (escala igual à Figura 4.1).

Todos os reforços foram ensaiados sob compressão em uma máquina de ensaios universal Instron 3382 com pratos circulares paralelos (150 mm de diâmetro) e uma célula de carga de 500 kgf. O ensaio envolveu o empilhamento das camadas de cada reforço cortadas com geometria quadrada de 175 mm de lado mantendo a orientação dos feixes nas camadas adjacentes (Figura 4.4). O número de camadas foi variado para cada reforço e foi escolhido conforme o número máximo de camadas usado nos ensaios com maior espessura da pré-forma. Além disso, a aplicação de pressão a uma velocidade de ensaio constante 3 mm/min medindo-se o deslocamento do cabeçote. A distância final entre as placas foi selecionada baseado na altura máxima da cavidade (igual à espessura da pré-forma) utilizada no ensaio de permeabilidade transversal posterior. Assim, foi possível correlacionar a carga de compressão e a fração volumétrica de fibras, V_f (calculada a partir da distância entre os pratos).

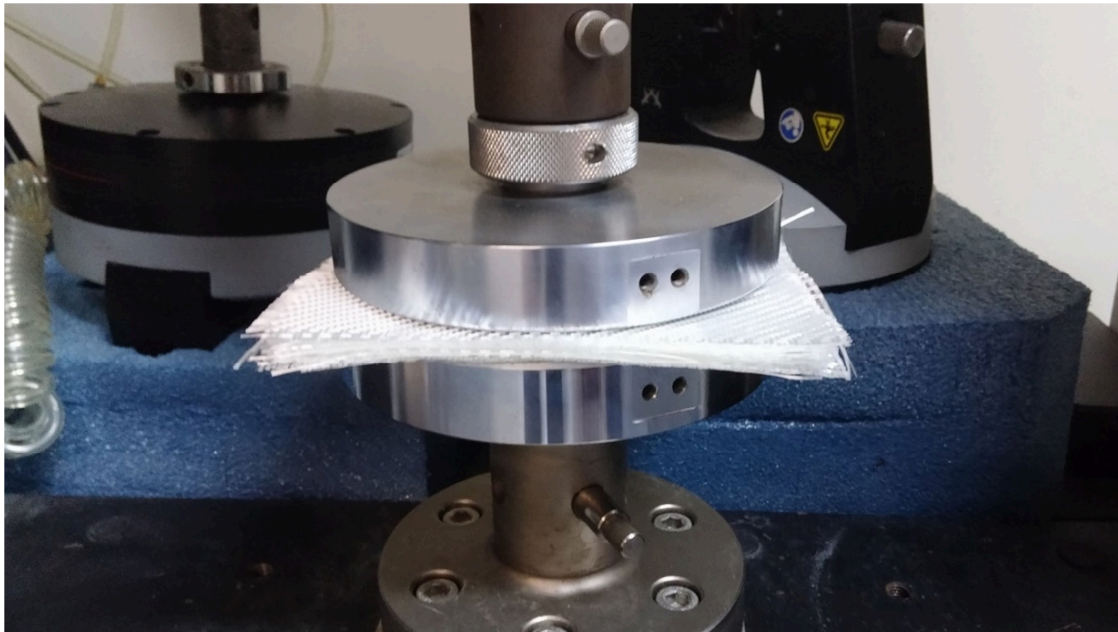


Figura 4.4 – Exemplo do posicionamento dos reforços no ensaio de compressão.

4.1.2. Caracterização da permeabilidade

Desde 1856, quando a lei de Darcy foi formulada, muitos trabalhos têm buscado estabelecer métodos confiáveis para medir permeabilidade que garantam previsões acuradas do escoamento de líquidos em meios porosos (DRAPIER *et al.*, 2002; LUCE *et al.*, 1995; NEDANOV; ADVANI, 2002; OKONKWO, 2010). Os ensaios de permeabilidade visam medir o grau de dificuldade que um líquido encontra ao avançar por dentro de um reforço

fibroso utilizando a relação entre a diferença de pressão e a velocidade do fluido. A permeabilidade é medida em metros quadrados, ou seja, ela indica a área média da seção transversal dos espaços vazios do meio poroso que o fluido atravessa ao escoar.

4.1.3. Ensaio de permeabilidade no plano

O objetivo dos ensaios experimentais foi medir as componentes principais da permeabilidade (K_{xx} , K_{yy} e K_{zz}) dos reforços estudados. A partir de testes com escoamento radial foram obtidas as componentes K_{xx} e K_{yy} e a partir de testes de escoamento transversal foi obtida a componente K_{zz} . As duas principais componentes da permeabilidade (K_{xx} e K_{yy}) foram observadas simultaneamente. Uma vez que os valores encontrados foram similares, somente a permeabilidade K_{xx} foi utilizada na continuidade do trabalho. Para as medidas de permeabilidade no plano, foi utilizado o molde de aço inoxidável. A cavidade interna é quadrada com dimensões de 300 mm de lado e altura de 3 mm. O fechamento do molde era feito com uma lâmina de vidro com espessura de 7 mm que permitia a visualização do escoamento do fluido. A abertura de entrada do fluido no interior da cavidade estava centralizada na parte inferior da cavidade de forma que o fluido ao entrar na cavidade avançava produzindo um escoamento radial em direção às bordas do molde.

A montagem do sistema envolveu a colocação do fluido de teste (a escolha do fluido de trabalho será discutida na Seção 4.1.4 no interior do vaso de pressão e a conexão deste vaso com a entrada do molde. Próximo a essa entrada foi posicionado um transdutor de pressão conectado a um sistema de aquisição de dados para medição precisa da pressão de injeção. A linha de aplicação de pressão positiva tem início em um compressor conectado ao controlador de pressão com um filtro de linha para controle da umidade do sistema que poderia danificar os equipamentos do sistema. O sistema completo está apresentado na Figura 4.5 e todos os ensaios de permeabilidade foram realizados sob pressão de injeção constante. Utilizou-se também um computador para registro dos dados adquiridos pelo transdutor.

Os ensaios de permeabilidade foram iniciados pelo corte e pesagem (para cálculo da porosidade) dos reforços e pela sua cuidadosa disposição no interior da cavidade do molde mantendo a orientação dos feixes nas camadas adjacentes dos tecidos. A partir daí, o molde foi fechado através da colocação das borrachas de vedação e da parte superior do molde de vidro. Uma pressão de injeção positiva pré-definida foi imposta ao vaso de pressão (reservatório) que continha o fluido. Este foi, então, direcionado até a abertura de entrada da

cavidade do molde passando pelo transdutor de pressão o qual aferia a pressão de injeção. Análise da curva de variação da pressão registrada pelo transdutor (Figura 4.6) revela que houve um curto período inicial de aumento da pressão de injeção até a estabilização mantida até o término do teste.

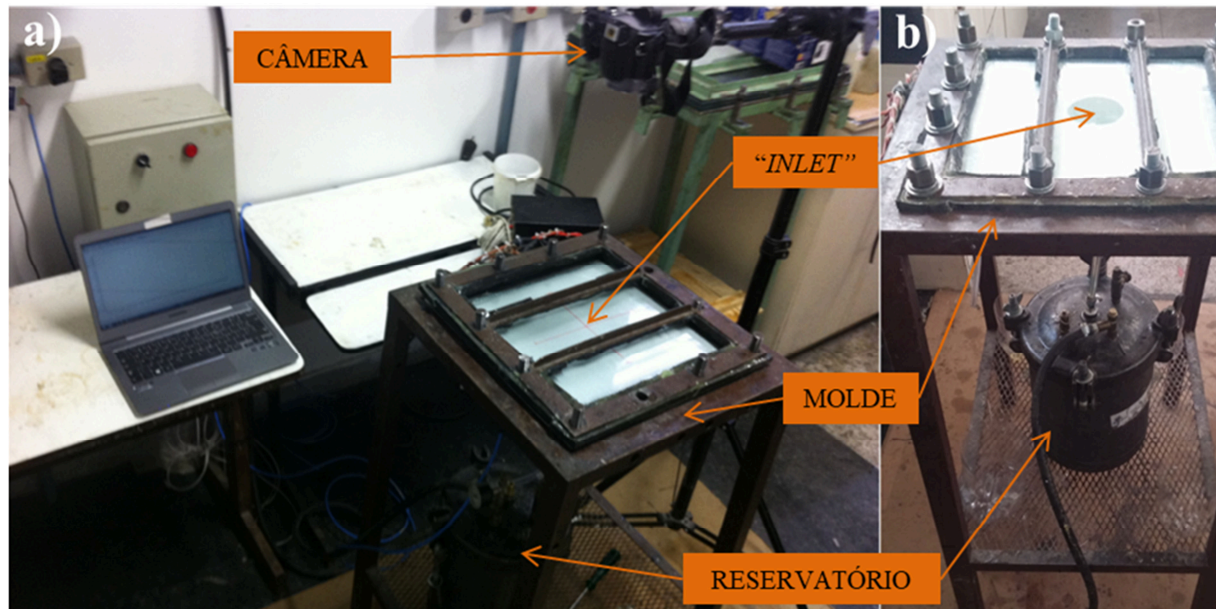


Figura 4.5 – a) Sistema utilizado para medição da permeabilidade no plano e b) Detalhe do sistema mostrando a entrada da matriz na pré-forma.

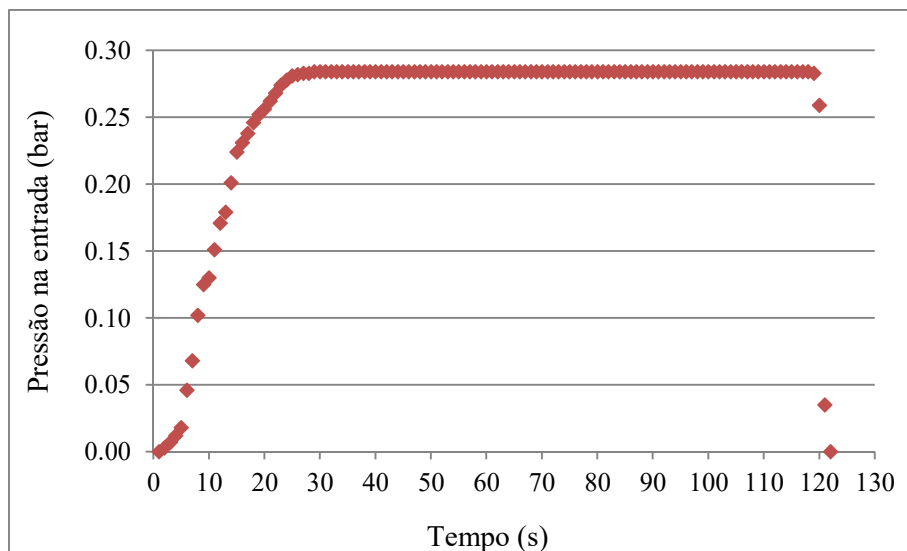


Figura 4.6 – Exemplo de curva de pressões obtida pelo transdutor localizado na entrada da cavidade do molde.

Foi necessário medir previamente as viscosidades dos fluidos utilizando-se um viscosímetro Brookfield DVII+ dentro de uma faixa de temperaturas de 15 °C a 50 °C para o posterior cálculo das permeabilidades. Uma relação linear foi ajustada entre a viscosidade e a temperatura nessa faixa de temperatura, que foi usada para o cálculo da viscosidade em cada teste específico e foi apresentada na Figura 4.7.

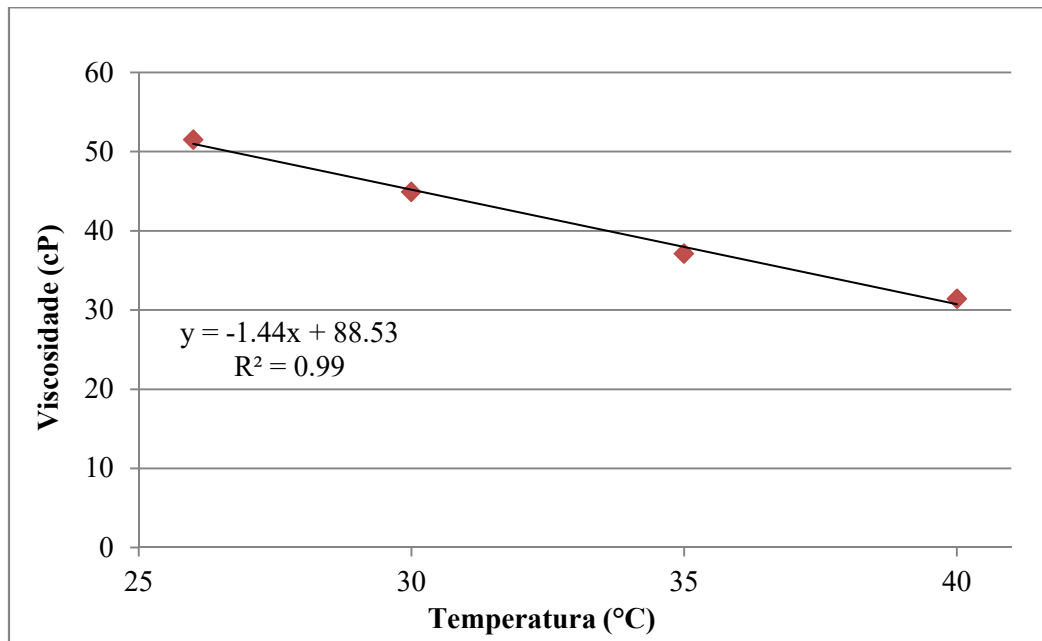


Figura 4.7 – Exemplo de curva de viscosidade do óleo de soja com relação a temperatura, bem como sua curva de ajuste linear.

A permeabilidade das amostras foi calculada usando o tempo requerido para o fluido, que passa por uma abertura de injeção com raio, r_0 , preencher uma região de raio (r_{ff}) dentro do molde:

$$t_{ff} = \left[r_{ff}^2 \left[2 \ln \left(\frac{r_{ff}}{r_0} \right) - 1 \right] + r_0^2 \right] \frac{\mu \varepsilon}{4 K P_{inj}} \quad (4.1)$$

onde r_0 é o raio da entrada (m) e r_{ff} é o raio da frente de escoamento (m).

Ensaio com escoamento saturado foram também realizados, logo após o término do ensaio insaturado, ou seja, depois da impregnação completa nos reforços e a estabilização do escoamento. Sendo assim, o sistema é o mesmo apresentado acima, porém neste registrava-se a vazão e não mais a posição da frente de fluxo. A vazão foi mensurada através do acompanhamento da massa de fluido coletado na saída em função do tempo. Com isso, foi

possível calcular a permeabilidade saturada dos reforços no plano xy (K_{xx} e K_{yy}). A metodologia para o cálculo de permeabilidade saturada é similar ao da permeabilidade transversal e será explicada em detalhes a seguir.

4.1.4. Ensaio de permeabilidade transversal

Os ensaios de permeabilidade transversal tiveram como objetivo principal medir a componente K_{zz} do tensor da permeabilidade de diferentes reforços fibrosos, possibilitando a avaliação da influência dos parâmetros de ensaio nessas medidas. Um equipamento foi especificamente projetado e construído para medir a permeabilidade transversal. Uma representação esquemática está apresentada na Figura 4.8. O equipamento metálico é formado por uma câmara de entrada (parte inferior) a qual contém uma abertura para a entrada do fluido no equipamento. Essa câmara é totalmente preenchida antes do fluido alcançar a primeira das placas perfuradas e, em seguida, a cavidade que contém a pré-forma fibrosa. Essa característica junto ao fato de que o escoamento inicia na parte inferior do equipamento, é interessante por promover um escoamento mais uniforme. O desenvolvimento desse equipamento foi realizado em cooperação com a FURG e os detalhes do projeto podem ser encontrados em (ESCHER; DOS SANTOS, 2016).

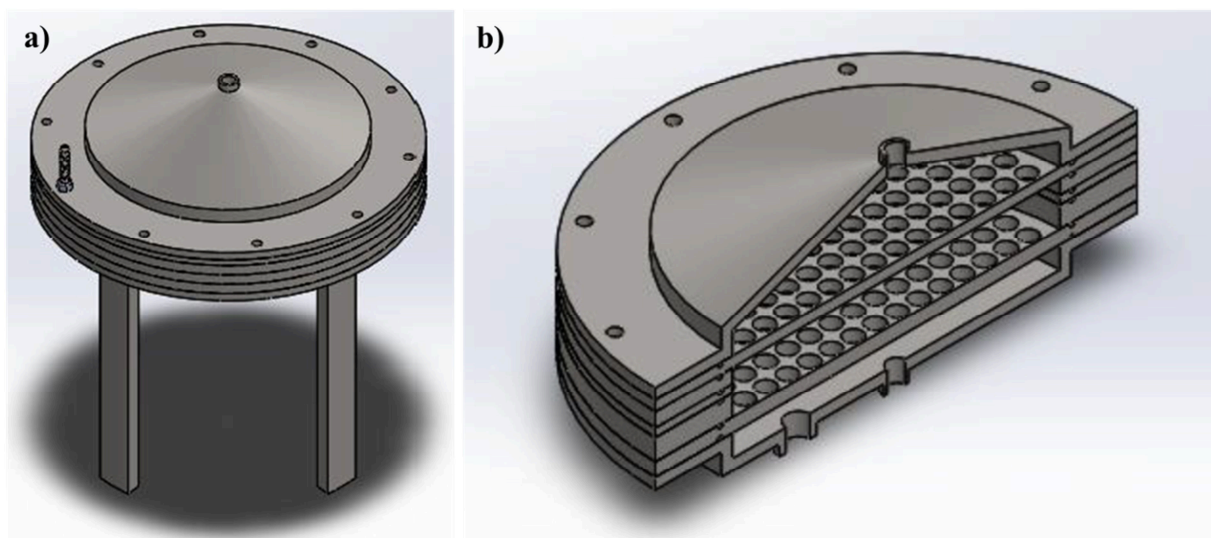


Figura 4.8 – a) Modelo 3D do equipamento de medição da permeabilidade transversal e b) detalhe interno das diferentes partes.

O projeto da placa perfurada (Figura 4.9) foi definido com base nos estudos de (CHAE; SONG; YOUN, 2007), sendo compostas por 156 aberturas (furos circulares) para entrada de fluido, com 8,3 mm de diâmetro cada um, os quais estão alinhados entre as placas superior e inferior durante a montagem do equipamento. O desenho técnico destas placas está apresentado na Figura 4.9b.

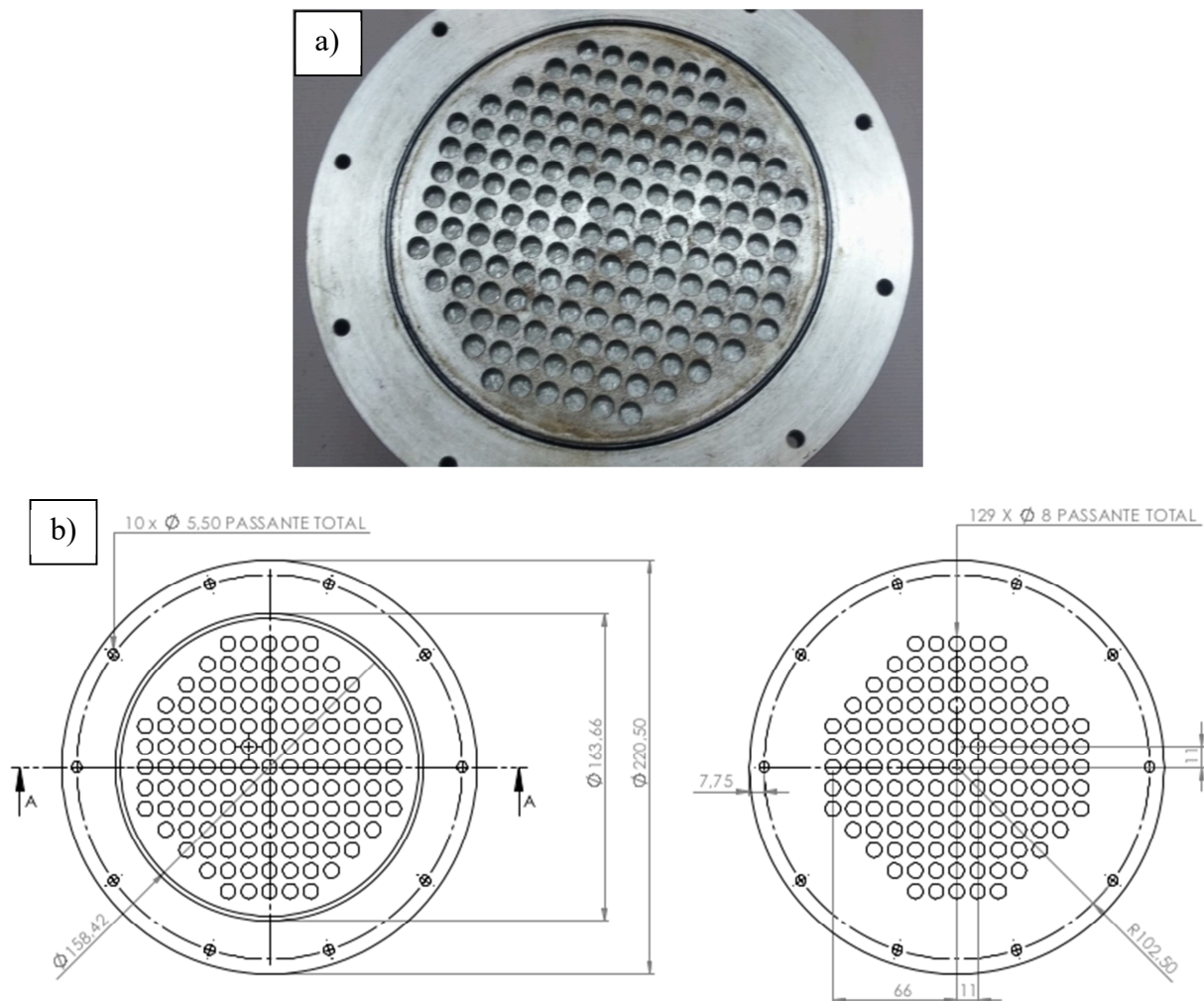


Figura 4.9 – a) Placa perfurada usada no equipamento de medição de K_{zz} e b) Desenho técnico desta placa.

A cavidade do equipamento que durante os testes contém a pré-forma é gerada pela placa perfurada superior e inferior e pelos espaçadores. Assim, a altura da cavidade pôde ser variada (3–22 mm) conforme a necessidade pela utilização de diferentes espaçadores (Figura 4.10 – Esquema mostrando a montagem das placas furadas e os espaçadores.). Essa cavidade apresenta um diâmetro interno de 163,6 mm.

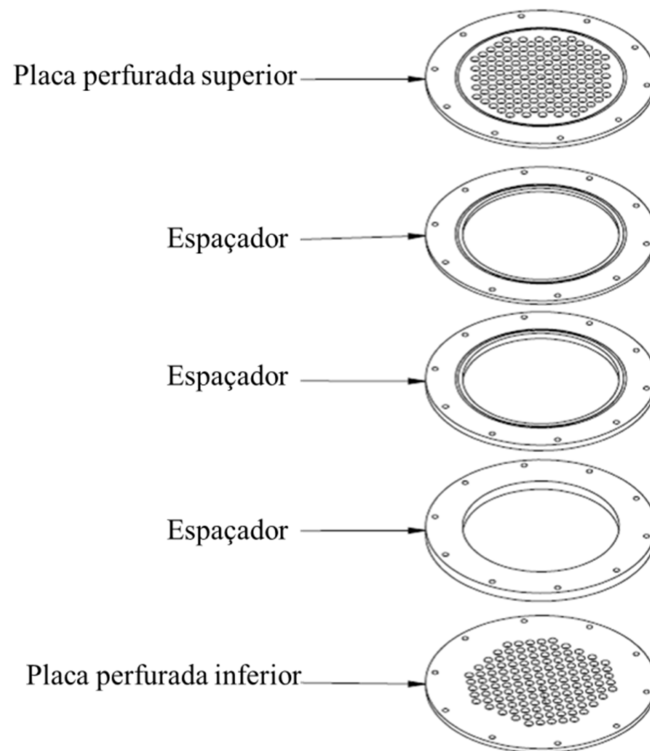


Figura 4.10 – Esquema mostrando a montagem das placas furadas e os espaçadores.

O equipamento foi projetado de forma a permitir medidas de permeabilidade transversal saturada em um tempo relativamente curto, sendo aplicável a diferentes tipos de reforços e para uma ampla faixa de teor de fibras. A Figura 4.11 apresenta uma representação esquemática do sistema completo de medida e uma foto do equipamento.

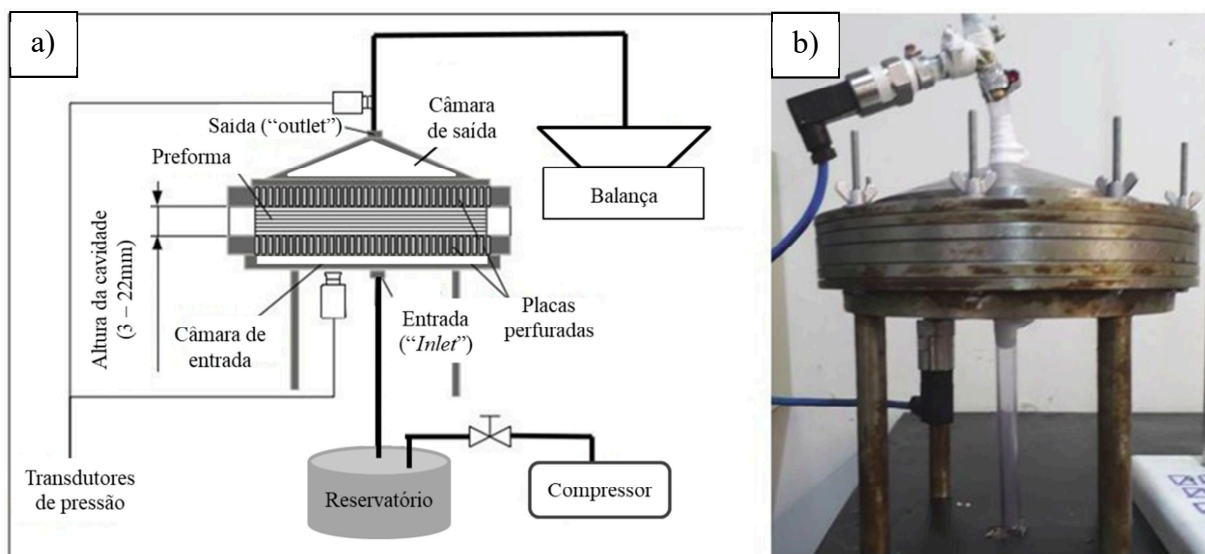


Figura 4.11 – a) Esquema de medição da permeabilidade transversal e b) equipamento.

Os ensaios de permeabilidade transversal foram iniciados pelo recorte apropriado das camadas dos reforços para caber na cavidade. A definição da quantidade de camadas foi feita com base no V_f desejado e a orientação dos reforços foi mantida igual para todas as camadas empilhadas. Seguiu-se pela sua cuidadosa disposição no interior da cavidade do equipamento através do empilhamento das camadas de reforço entre as placas perfuradas mantendo a orientação dos tecidos. Essas placas compactam o reforço e fornecem o apoio adequado para evitar variações na espessura da pré-forma e outras possíveis deformações, bem como movimentações durante os testes. A partir daí, o equipamento foi fechado pelo posicionamento da parte superior (câmara cônica) que força o fluido ascendente a convergir em direção à abertura de saída na qual o transdutor secundário está acoplado. Apesar de essa convergência do fluido poder ter influência na medição da permeabilidade, seu efeito, bem como outros contribuições de partes do equipamento, foram descontados através de ensaios realizados sem a presença de reforços (dispositivo vazio). Assim, ao estabelecer a relação Δp x Q exclusivamente devida ao equipamento pode-se subtrair esse efeito nos testes com fibras para ser mais preciso na medição do K_{zz} do reforço ensaiado.

Todas as partes do equipamento foram montadas e alinhadas manualmente e fixadas com um conjunto de 10 parafusos e porcas. Em seguida, uma pressão constante foi aplicada ao vaso de pressão contendo o fluido de trabalho o qual foi então forçado através do equipamento pela abertura de entrada. Após percorrer toda a extensão do equipamento, o fluido sai do equipamento por uma abertura na parte superior e é coletado em um béquer previamente posicionado sobre uma balança, permitindo medidas de vazão, i.e. massa do fluido coletado em um determinado tempo. Salienta-se que o teste somente foi iniciado após a impregnação total da pré-forma pelo fluido e do escoamento ter se tornado saturado. A partir disso, o procedimento de medição consistiu em aplicar uma determinada pressão de injeção e medir a vazão gerada. Assim, usando-se a lei de Darcy unidirecional, a permeabilidade transversal (K_{zz} , em m^2) poderia ser calculada diretamente pela equação:

$$K_{zz} = - \frac{Q \mu \cdot h}{\Delta p A} \quad (4.2)$$

onde: Δp é a diferença de pressão (Pa), h é a espessura da pré-forma (m) e A é a área da seção transversal ao escoamento (m^2) (SCHOLZ; GILLESPIE JR.; HEIDER, 2007). Q é a vazão volumétrica (m^3/s) e foi calculada usando:

$$Q = \frac{m}{\rho t} \quad (4.3)$$

onde: ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3), m é a massa de fluido (kg) e t é o tempo (s).

Contudo, devido a flutuação de resultados dependendo da pressão usada, optou-se por repetir o processo até obter um conjunto de relações entre a pressão aplicada e a vazão medida ao qual pode-se ajustar uma reta por regressão linear. A partir disso, utilizou-se o coeficiente angular dessa reta substituindo a razão $Q/\Delta p$ no cálculo de K_{zz} na Eq. (4.2). Um exemplo do conjunto de dados obtidos em cada teste está apresentado na Figura 4.12, a qual apresenta também a curva de ajuste a partir da qual foi calculado o K_{zz} dos reforços.

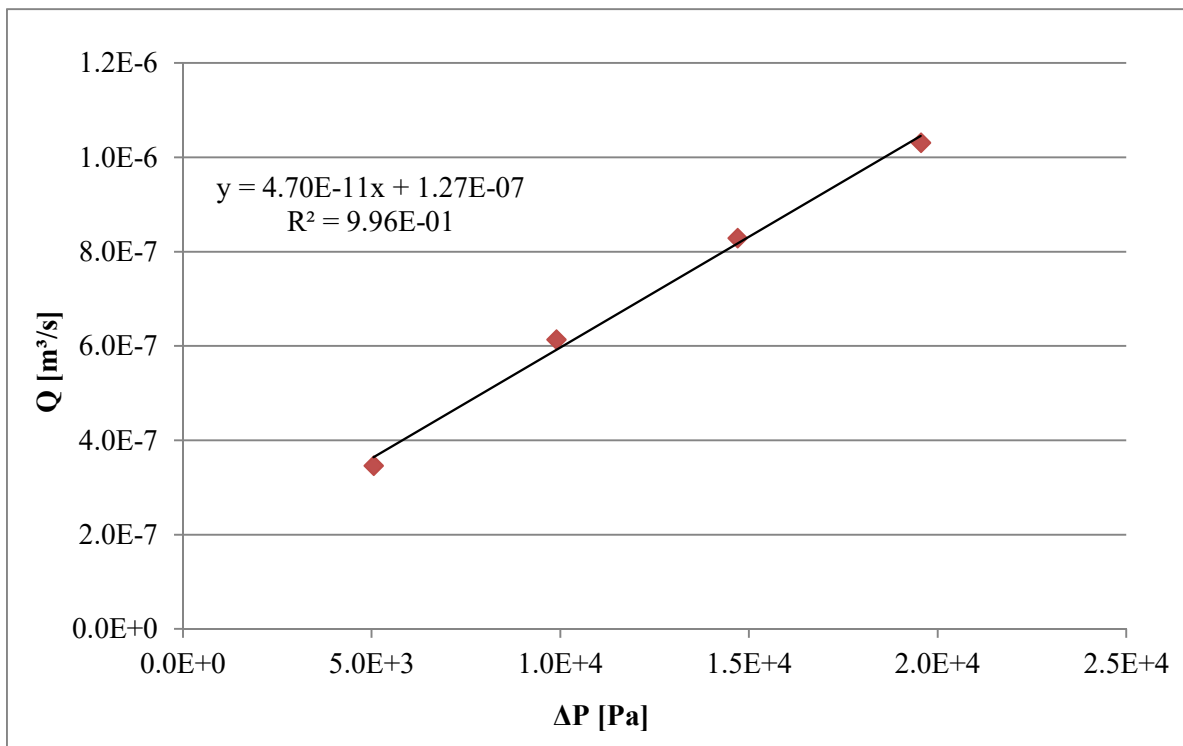


Figura 4.12 – Exemplo da curva de obtenção do coeficiente para cálculo de K_{zz} .

A

Tabela 4.2 apresenta as principais características das pré-formas construídas a partir dos reforços apresentados anteriormente. A faixa de V_f avaliados para cada tecido, bem como a faixa de alturas. O número de camadas variava conforme a altura e o V_f e a faixa de valores também está apresentada para cada reforço.

Tabela 4.2 – Parâmetros das pré-formas usados nos testes experimentais.

Reforço	Faixa de altura (mm)	Faixa de V_f (%)	Faixa de nº de camadas
R	3,8 a 22,23	34,5 a 70,8	4 a 48
E	3,8 a 22,23	34,1 a 69,7	11 a 127
K1	9,53 a 22,23	34,5 a 69,4	32 a 150
K2	9,53 a 22,23	34,9 a 64,8	9 a 42
M1	15 a 22,23	34,8 a 52	45 a 94
M2	15 a 22,23	35,5 a 50,9	30 a 60

A escolha do fluido de trabalho foi feita após ensaios de permeabilidade transversal utilizando-se todos os parâmetros iguais e variando somente o tipo de fluido. Os fluidos avaliados foram poliéster insaturado, óleo de silicone e óleo de soja comerciais. O resultado de K_{zz} obtido pela matriz polimérica foi utilizada como parâmetro de comparação para os outros fluidos uma vez que esta é utilizada na fabricação dos compósitos. A escolha pelo óleo de silicone foi porque este apresenta uma viscosidade próxima àquela da matriz polimérica e o óleo de soja porque este apresenta baixa toxicidade, baixo custo e fácil acesso. A matriz foi utilizada sempre sem a adição do catalisador para evitar a cura da matriz durante os testes.

Com o objetivo de visualizar a microestrutura do conjunto matriz e reforço, foram produzidas placas de compósitos para cada reforço estudado em dois valores de V_f . Essas placas foram analisadas em um microscópio óptico (já que a matriz utilizada é transparente) e as imagens armazenadas. Uma vez que a determinação da proporção de fases não é um processo simples, após a aquisição das imagens, com o auxílio de um analisador digital de imagens “IMAGE J” versão 1.8.0, foram realizadas medições mais precisas de cada região, seja ela de reforço ou de matriz usando uma ferramenta específica do software para medir área sobre a imagem. Assim, foram produzidos placas com dois V_f para cada reforço estudado e estas placas foram analisadas de topo (visualização transversal ao plano dos tecidos) e lateral (visualização da seção transversal do plano dos tecidos). Esse procedimento foi repetido diversas vezes em todas as imagens obtidas.

4.2. Simulação Numérica

O estudo numérico foi utilizado para avaliar o efeito das diferentes permeabilidades no escoamento da matriz no reforço fibroso e, principalmente, para estabelecer uma metodologia numérica para prever o comportamento do escoamento transversal. Nas simulações computacionais realizadas utilizou-se uma combinação de três softwares. O aplicativo usado na discretização do domínio computacional, ou seja, na concepção e produção de todas as geometrias e malhas usadas neste estudo foi o GMSH (<http://gmsh.info/>). O aplicativo utilizado para o processamento e as simulações (soluções numéricas) foi o OpenFOAM (<http://www.openfoam.org/>), e o aplicativo de pós-processamento para análise dos resultados foi o Paraview (<https://www.paraview.org/>).

O software livre de CFD OpenFOAM (versão 7) foi usado para simular o escoamento de fluidos em volumes porosos. O *solver* utilizado foi o *interFoam*, que é disponibilizado pelo OpenFOAM para a solução de escoamentos multifásicos de dois fluidos imiscíveis através do método VOF. Nos casos estudados, os fluidos considerados são o ar e a matriz (ou um óleo). O início de cada ensaio numérico se dá ao importar a malha gerada pelo GMSH para o OpenFOAM, a qual é composta por elementos hexaédricos e prismáticos. Segue-se as etapas de definição dos parâmetros (condições de contorno) e inclusão desses valores no OpenFOAM. Variáveis como permeabilidade (K_{xx} , K_{yy} , K_{zz}), viscosidade e massa específica dos fluidos, pressão de injeção e demais condições de contorno são aplicadas. O método dos volumes finitos (MVF) foi utilizado pelo software na discretização das equações.

O algoritmo aplicado na resolução do problema de acoplamento pressão-velocidade foi o PIMPLE, o qual é uma combinação do SIMPLE e do PISO, que são algoritmos comumente utilizados nesse tipo de solução (HOLZMANN, 2017). A estabilidade da solução foi controlada através do número de Courant (Co) considerando o passo de integração variável no tempo de forma a manter $Co \leq 0,5$, valor recomendado para este *solver* *interFoam*. Além disso, o passo de integração máximo foi limitado a 0,1 s. A limitação do valor de Co é um critério de estabilidade da solução que restringe o passo de tempo em função da velocidade do escoamento e da discretização utilizada. Os parâmetros de controle da simulação são apresentados na Tabela 4.3, assim como os diferentes métodos escolhidos para resolver as diferentes equações envolvidas na solução numérica desse escoamento. Além disso, reitera-se

que os resultados numéricos foram comparados aos resultados obtidos analiticamente e com aqueles obtidos experimentalmente.

Tabela 4.3 – Parâmetros usados na solução numérica.

Variável	Parâmetro
Algoritmo	PIMPLE
Solvers	
Velocidade	smoothSolver
Pressão	Preconditioned Conjugate Gradient (PCG)
Esquemas de interpolação	
Transiente	Euler
Gradiente	Gauss linear
Divergentes	Gauss linear
div(phi,b,alpha)	Gauss interfaceCompression
div(rho*phi,U)	Gauss linearUpwind grad(U)
div(phi,alpha)	Gauss vanLeer

O problema de mecânica dos fluidos é resolvido com apenas um conjunto de equações de conservação da massa e quantidade de movimento. O mesmo campo de velocidades (e pressões) é “compartilhado” pelos dois fluidos e a fração volumétrica da matriz, calculada para cada célula do domínio computacional, é rastreada através da adição de uma equação de transporte adicional para f . A formulação para um problema incompressível é composta pelas equações da continuidade, fração volumétrica e quantidade de movimento descritas a seguir:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial(f)}{\partial t} + \nabla \cdot (f\vec{V}) = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \overline{\rho\vec{g}} + \vec{F} \quad (4.6)$$

onde: \vec{V} é o vetor velocidade (m/s), t o tempo (s), f a fração volumétrica, \vec{g} a aceleração da gravidade (m/s²), $\bar{\tau}$ o tensor de tensões (Pa) e \vec{F} o termo fonte ou forças externas (HOLZMANN, 2017).

Nas simulações LCM, o termo fonte, \vec{F} , é obtido a partir da lei de Darcy. Ou seja, ele é utilizado em problemas de meios porosos para incluir um termo de força resistiva na equação do movimento e, assim, simular o efeito da porosidade no escoamento. Então, pode-se escrever:

$$\vec{F} = \nabla P = -\frac{\mu}{K}\vec{V} \quad (4.7)$$

As propriedades físicas precisam ser ponderadas em função da quantidade de cada fase dentro dos volumes de controle. Desta forma, segundo (SHI; DONG, 2011):

$$\rho = f\rho_{resina} + (1 - f)\rho_{ar} \quad (4.8)$$

$$\mu = f\mu_{resina} + (1 - f)\mu_{ar} \quad (4.9)$$

4.2.1. Simulações com regime saturado e insaturado

Para o regime saturado, a variação temporal foi desconsiderada, ou seja, a totalidade do domínio computacional estava preenchida de matriz desde o início de cada ensaio e a fração volumétrica é sempre igual a 1 (um). A simulação com escoamento saturado apresenta como vantagem um custo computacional menor já que apenas dados de vazão volumétrica e do campo de pressões são usados na comparação entre os resultados numéricos e experimentais. Os parâmetros que indicam as características do meio poroso foram iguais ao reforço “fibra E”. A vazão foi mantida constante enquanto a diferença de pressão foi utilizada como parâmetro de controle e os resultados obtidos foram comparados com os resultados experimentais.

Nas simulações do escoamento insaturado, inicialmente todos os volumes do domínio são definidos com $f = 0$, ou seja, todos os volumes estão preenchidos com ar (vazios). Conforme o tempo avança ($t > 0$), ocorre o avanço da matriz ao longo do domínio computacional. As simulações que consideraram um escoamento insaturado iniciam com

todos os volumes igual a 0 (zero), ou seja, preenchido somente com ar. Com a injeção de matriz através dos furos inferiores (ou parte inferior do molde) os valores de f aumentam até no máximo 1 (um) que significa volume totalmente preenchido com o fluido de trabalho.

A diferença (%) entre os resultados foi calculada segundo a Eq. (4.10):

$$Diferença (\%) = \frac{(\Delta p_{exp} - \Delta p_{num})}{\Delta p_{exp}} \times 100 \quad (4.10)$$

Essa diferença foi utilizada na comparação entre os resultados experimentais e numéricos, numéricos e analíticos e ainda durante a independência de malha.

4.2.2. Domínios computacionais e malhas

As diferentes malhas foram construídas para discretizar o domínio computacional, o qual, representa a cavidade (Figura 4.10) do equipamento de medições experimentais. A Figura 4.13 apresenta os diferentes domínios computacionais usados nas simulações, bem como as condições de contorno (as demais são descritas em cada etapa). Na entrada (*inlet*) pode ser especificada a condição de pressão ou vazão prescrita (dependendo do caso) e fração volumétrica igual a 1. Na saída (*outlets*) é especificada a condição de pressão prescrita igual a zero e a derivada nula da fração volumétrica na direção do escoamento. Finalmente, nas paredes é especificada a condição de contorno de não deslizamento (velocidade nula) e impermeabilidade (derivada nula da fração volumétrica f na direção normal à parede).

Os diferentes estudos foram subdivididos entre aqueles realizados sob regime de escoamento saturado e insaturado. O estudo saturado tem uma motivação muito clara de assemelhar-se aos testes experimentais de medição da permeabilidade transversal e, com isso, ser possível utilizar os mesmos parâmetros usados e medidos experimentalmente. Assim, adaptar a metodologia numérica à essas condições e partir daí aprofundar e expandir o entendimento das relações entre parâmetros. O estudo insaturado foi motivado pela necessidade de estabelecer a precisão se utilizar o K_{zz} saturado em testes insaturados. Dessa forma, pode-se expandir a aplicação da metodologia numérica juntamente a uma obtenção mais simples da permeabilidade transversal.

Os testes sob regime saturado seguem o fluxograma apresentado na Figura 4.14 e compõem os casos 1, 2 e 3. Os resultados sob regime saturado foram obtidos partindo-se da malha apresentada na Figura 4.15.

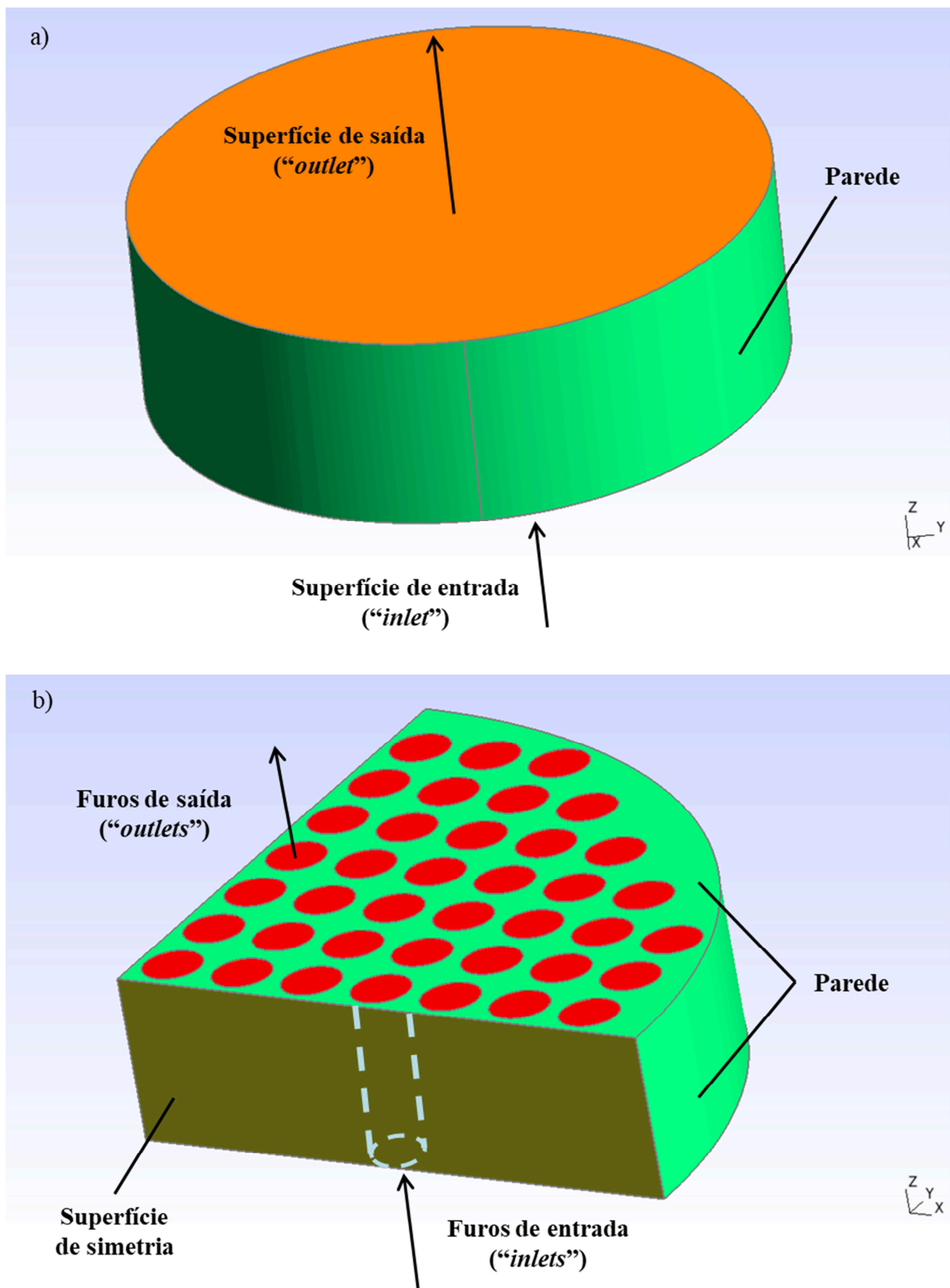


Figura 4.13 – Representação esquemática do domínio computacional e das condições de contorno usadas: a) cavidade inteira e b) usando simetria considerando os furos.

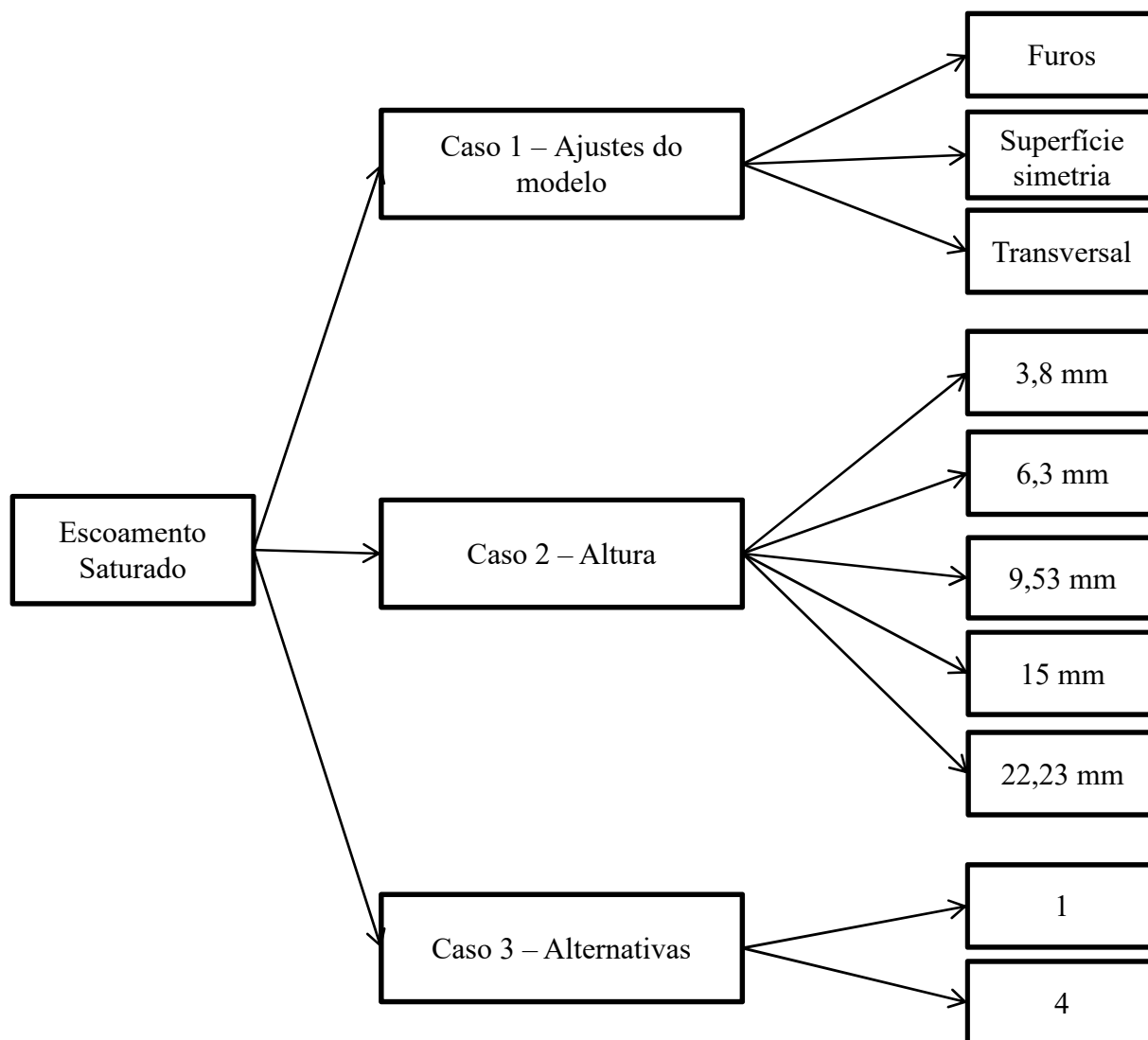


Figura 4.14 – Fluxograma dos casos numéricos estudados sob regime saturado.

Caso 1: Ajustes do modelo - Independências de malha

Neste estudo os ajustes do modelo foram feitos com foco nos testes de independência das malhas. Assim, foram avaliados a influência do número de volumes utilizados para discretizar determinadas regiões do domínio computacional estudado (Figura 4.13b). Inicialmente, foi verificada a influência da quantidade de volumes no plano no escoamento saturado. Esses resultados foram subdivididos em: número de volumes nos furos nos quais ocorre a entrada de fluido na cavidade e o número de volumes nas superfícies de simetria. Essa subdivisão foi necessária ao invés de uma avaliação da quantidade total no plano por causa da importância dos volumes que compõem a entrada de fluido no equipamento com

relação aos demais. Alguns parâmetros foram iguais em todos os testes como, por exemplo, a altura da geometria de 22 mm, o número de volumes na parede externa igual a 700, a velocidade do fluido nos furos foi de $3,55 \times 10^{-5}$ m/s e o k_{zz} foi de $2,47 \times 10^{-12}$ (m²).

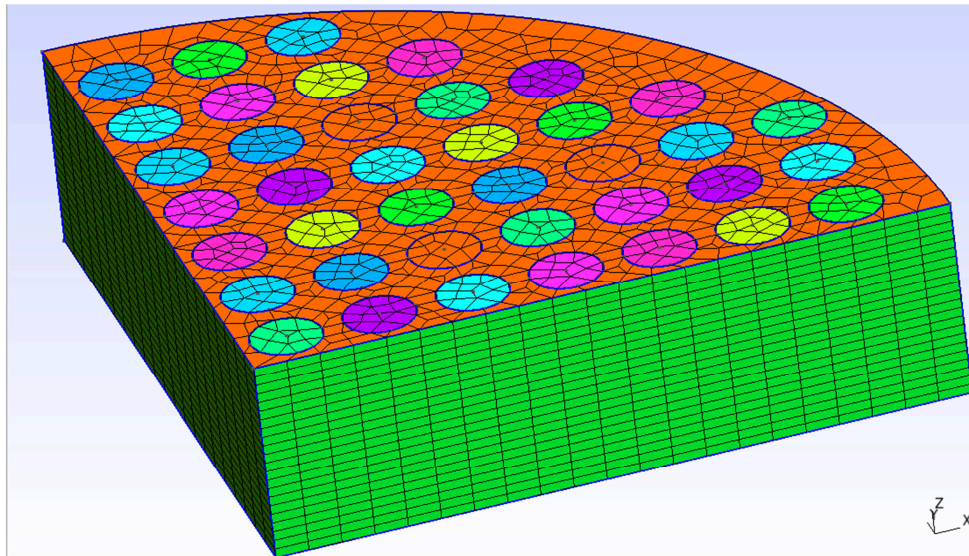


Figura 4.15 – Malha utilizada nos estudos numéricos sob regime saturado (Casos 1 e 2).

Uma vez definidas as quantidades de volumes necessários para obter a independência de malha no plano, foi determinado o número de volumes na direção z (transversal ao plano xy) para o qual se obtém a independência de malha. Para tanto, outros parâmetros mantidos constantes: o número de volumes da malha nos furos iguais a 58, o número de volumes nas paredes de simetria iguais a 450 e o número de volumes na parede externa igual a 700. Além desses, a velocidade do fluido nos furos foi de $3,55 \times 10^{-5}$ m/s e a permeabilidade transversal (k_{zz}) foi de $2,47 \times 10^{-12}$ (m²). Para cada discretização, o valor da variável de interesse, Δp (Pa), foi calculado e avaliada a diferença com o valor da mesma para a discretização anterior.

Caso 2: Altura

O próximo passo do estudo teve como objetivo avaliar a influência da altura da pré-forma no escoamento saturado de forma semelhante ao que foi feito experimentalmente (Figura 5.1). Para tanto, utilizamos como condições iniciais os parâmetros usados nos testes experimentais: propriedades do fluido, dimensões da geometria, vazão e permeabilidade transversal usando a diferença de pressão como parâmetro de comparação entre os testes

experimentais e numéricos. Visando facilitar a comparação entre os testes e a apresentação dos resultados a vazão foi convertida em velocidade do fluido (m/s) e, da mesma forma que nos testes experimentais, foram testados diferentes relações entre vazão e diferença de pressão para cada altura.

Caso 3: Geometrias alternativas

As malhas apresentadas na Figura 4.16 foram estudadas para averiguar a possibilidade de trocar a disposição das portas de entrada no fluido no equipamento e possivelmente facilitar sua construção. Um formato avaliado foi de um único furo com 8,3 mm de diâmetro posicionado na parte central da malha (Figura 4.16a). Outro formato avaliado foi com quatro furos também posicionados na parte central (Figura 4.16b). Além disso, a Tabela 4.4 apresenta as características das malhas de geometria alternativa mencionadas acima sendo essas o número de volumes em z e o total de volumes que compõem a malha.

Tabela 4.4 – Características das malhas das geometrias alternativas.

	Nº de volumes em z	Nº total de volumes na malha
1 furo	5	3558
	10	6098
	15	8638
	20	11178
	25	13718
4 furos	5	4922
	10	8432
	15	11942
	20	15452
	25	18962

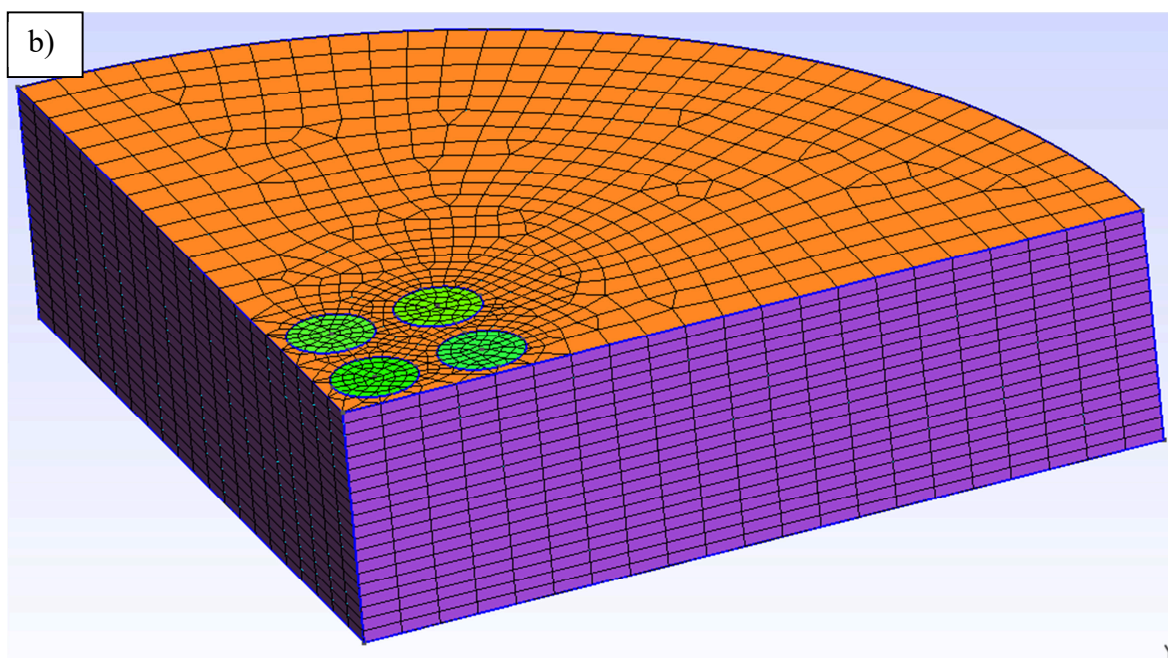
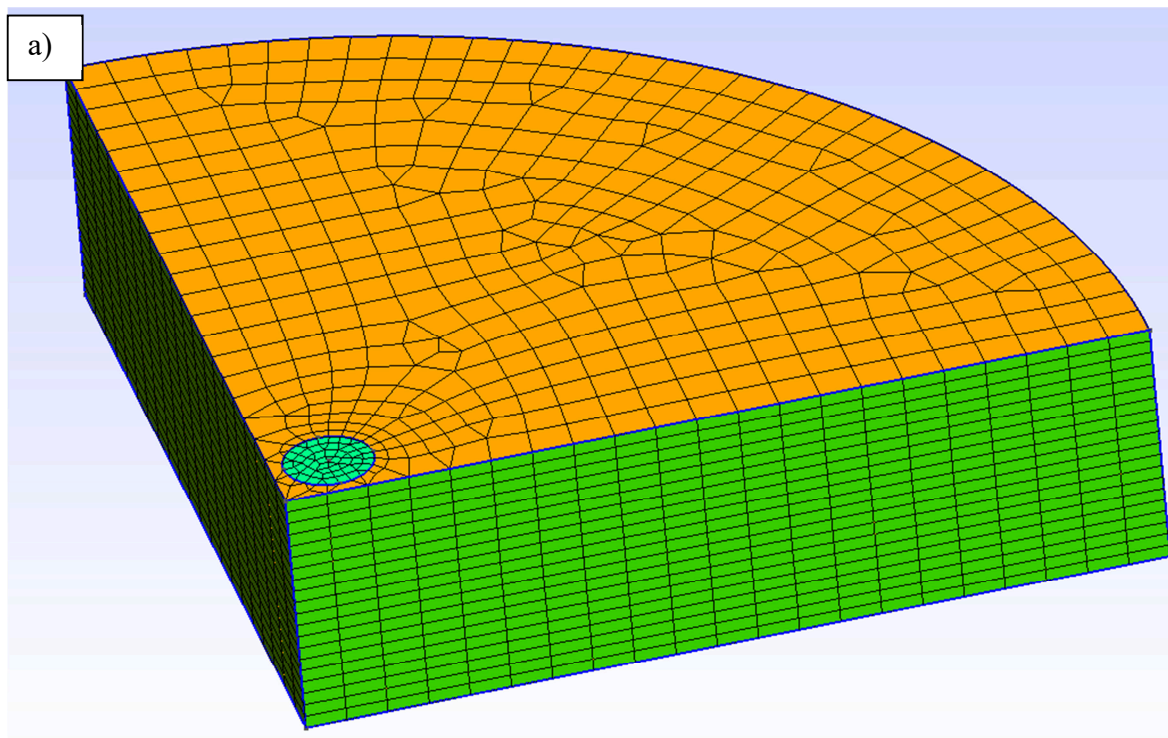


Figura 4.16 – Malhas alternativas: a) malha construída usando um furo central, b) quatro furos centrais.

Os testes sob regime insaturado seguem o fluxograma apresentado na Figura 4.17 e compõem os casos 4 e 5. Estas foram desenvolvidas com diferentes níveis de complexidade

buscando uma similaridade cada vez maior ao equipamento usado nos testes experimentais e foram apresentadas em cada um dos casos.

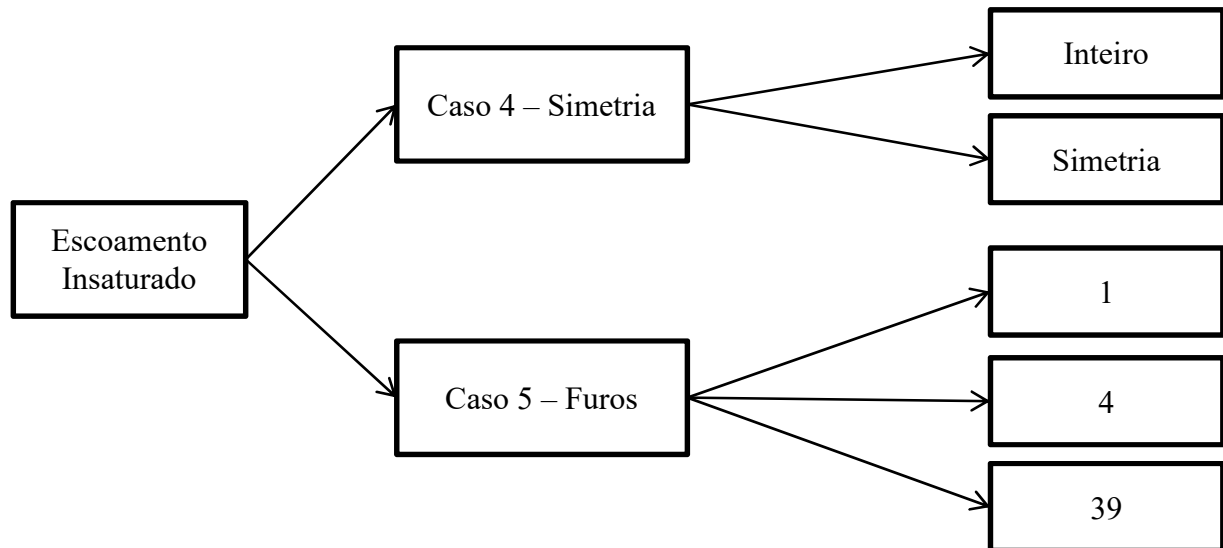


Figura 4.17 – Fluxograma dos casos numéricos estudados sob regime insaturado.

Caso 4: Inteiro/Simetria

Uma malha foi concebida para representar a geometria mais simples da cavidade utilizada nas medidas experimentais (Figura 4.18), ou seja, com as mesmas dimensões do equipamento. Os furos de entrada e saída na cavidade do equipamento experimental foram omitidos e a área total da seção transversal superior e inferior foi considerada como entrada (*inlet*) e saída (*outlet*) do fluido, respectivamente.

Na Tabela 4.5 são apresentados parâmetros relacionados à malha, como número de volumes na direção transversal (eixo “z”) e número total de volumes usados. Os parâmetros constantes para todas as malhas são o raio com 79,2 mm e a espessura de 50 mm e o número de volumes na direção do plano XY é igual a 365.

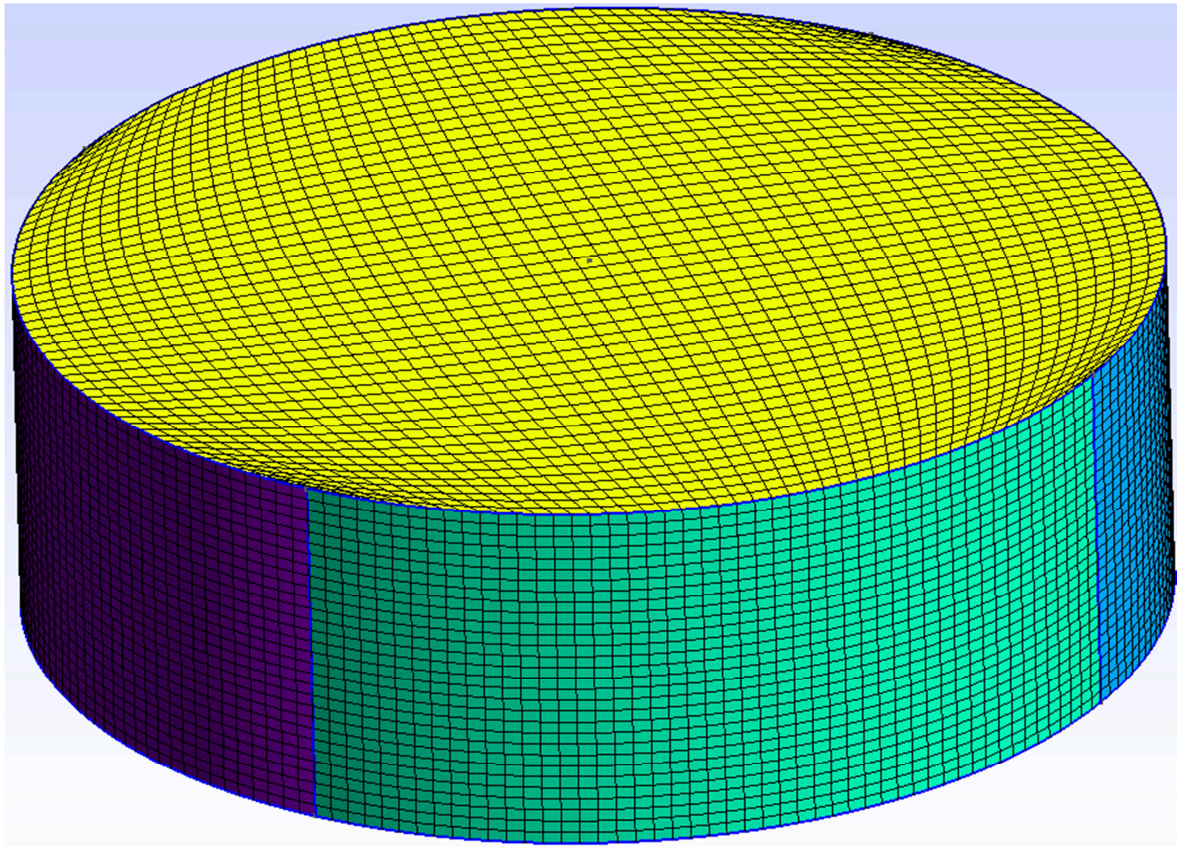


Figura 4.18 – Malha inteira construída para simular a cavidade do equipamento.

Tabela 4.5 – Características das malhas iniciais.

Nº de volumes em z	Nº total de volumes na malha
5	849
10	1454
15	2059
20	2664
25	3269
30	3874
40	5084
50	6294

Em seguida, foram construídas malhas com base no domínio computacional apresentado na Figura 4.13b. Essas malhas têm em comum o uso de superfícies de simetria modelando-se somente um quarto da geometria (Figura 4.13a) sem necessariamente reduzir a qualidade ou precisão dos cálculos. A geometria inteira (cavidade do equipamento) tem a forma de um cilindro, utiliza-se dois planos de corte ortogonais (planos XZ e YZ) passando pelo centro da seção transversal do cilindro gerando, assim, um modelo igual a um quarto do modelo inteiro. Dessa forma, reduziu-se o elevado número de volumes utilizados na simulação, reduzindo também o tempo e a demanda computacional.

A influência do número de células na direção transversal ao plano xy (direção “z”) foi analisada com o objetivo de comparar os resultados e verificar a possibilidade de se utilizar somente a malha com simetria equivalente a um quarto da geometria inteira. Nesta análise ainda não foram incluídos os furos, e toda a área inferior é considerada como entrada e toda a área superior é considerada como saída (Figura 4.13b). O número de volumes na direção transversal (eixo “z”) e o número total de volumes usados nas malhas geradas para esses testes são apresentados na Tabela 4.6. Outros parâmetros importantes e mantidos constantes para essas malhas são: raio igual a 75 mm, espessura igual a 22 mm. Tais valores foram variados com relação ao primeiro conjunto de testes para manter a relação entre a área do furo e a área total, e número de volumes no plano XY igual a 663.

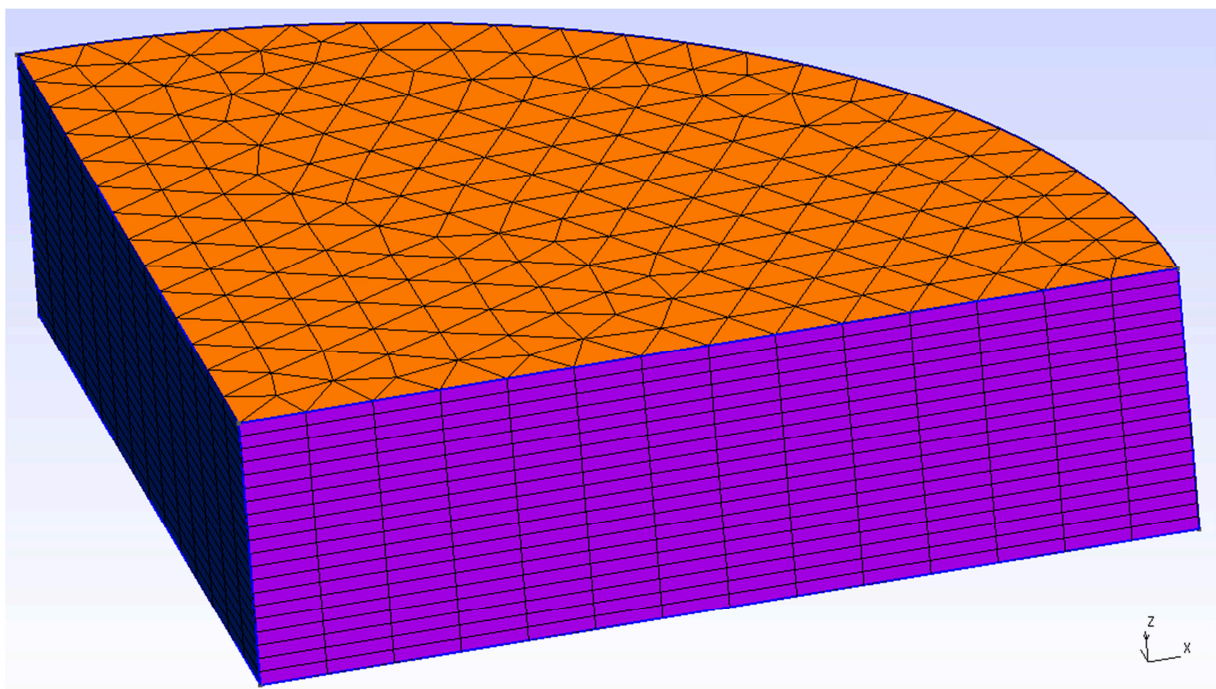


Figura 4.19 – Malha construída usando planos de simetria.

Tabela 4.6 – Características das malhas construídas usando planos de simetria.

Nº de volumes em z	Nº total de volumes na malha
5	1547
10	2652
15	3757
20	4862
25	5967
30	7072
40	9282
50	11492

Caso 5: Furos

O estudo da influência da presença dos furos pelos quais o fluido de trabalho de fato entra e sai da cavidade do equipamento onde está a preforma. Contudo, dada a complexidade da inclusão de todos os furos, optou-se por avançar tacitamente, ou seja, optou-se por incluir primeiramente somente um furo, depois quatro e, por fim, todos (Figura 4.20 e Tabela 4.7) e, dessa forma investigar com maior precisão o efeito dos mesmos. Para tanto, optou-se por manter a área total de entrada de fluido constante com relação a área total das faces superior (e inferior) da cavidade independentemente da quantidade de furos usados. Dessa forma, somente variou-se a distribuição da área de entrada e não o seu valor relativo à área total.

A malha apresentada na Figura 4.20a foi construída partindo-se da malha feita anteriormente (Figura 4.19) usando planos de simetria e adicionando-se um único furo. Variou-se o número de volumes na direção transversal (direção “z”) com o objetivo de comparar os resultados das malhas e definir um valor mínimo que mantenha a precisão dos resultados. As características das diferentes malhas que estão apresentadas na Tabela 4.7 são o número de volumes na direção transversal (eixo “z”) e o número total de volumes usados na malha, enquanto os parâmetros constantes para essas malhas são o raio dos furos de entrada e saída de 13 mm, a espessura de 15 mm e o número de volumes no plano XY de 590.

Em seguida, foi gerada a malha apresentada na Figura 4.20b considerando quatro furos. A Tabela 4.7 mostra o número de volumes na direção transversal (eixo “z”) e o número total de volumes usados na malha. Os parâmetros constantes neste caso são o raio dos furos de entrada e saída com 26 mm, a espessura da cavidade de 15 mm e o número de volumes no plano XY de 2621. Por fim, a malha foi construída com a mesma quantidade de furos do equipamento usada nos testes experimentais já havia sido apresentada na Figura 4.15, uma vez que foi utilizada nos testes saturados.

Tabela 4.7 – Características das malhas considerando um, quatro furos e 39 furos.

Número de furos	Nº de volumes em z	Nº total de volumes na malha
1 furo	5	1374
	10	2354
	15	3334
	20	4314
	25	5294
4 furos	10	10460
	15	14815
	20	19170
	25	23525
	30	27880
39 furos	10	23514
	15	33279
	20	43044
	25	52809

O número de volumes na direção transversal (eixo “z”) e o número total de volumes usados na malha são apresentados na Tabela 4.7. Considerou-se constante o raio de 75 mm e o número de volumes no plano XY de 5937. As malhas construídas considerando todos os furos são aquelas com maior proximidade em relação ao aparato experimental, com diâmetro e número de furos iguais, assim como o diâmetro total da cavidade. A influência da espessura das malhas (que equivalem à altura da pré-forma no estudo experimental) também foi avaliada já que sua influência na medição experimental da permeabilidade foi verificada. Por outro lado, o número de volumes no plano XY (que foi estudado nas malhas anteriores) não foi reavaliado, sendo mantido proporcional à espessura das malhas em cada caso.

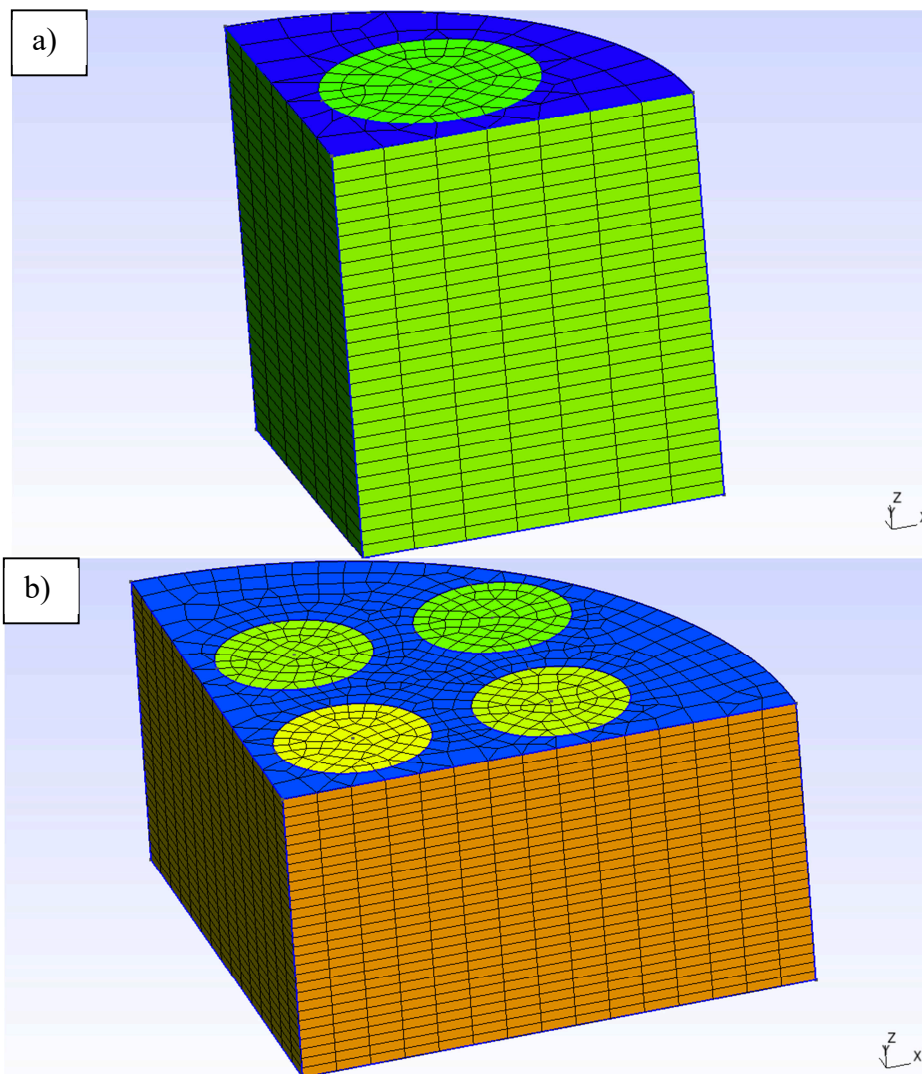


Figura 4.20 – a) Malha construída usando simetria e um furo e b) quatro furos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta tese foram divididos em duas partes. Os resultados obtidos experimentalmente foram apresentados primeiro e incluíram os testes em regime de escoamento insaturado e saturado no plano e na direção transversal utilizando um sistema RTM para medir a permeabilidade no plano e o equipamento desenvolvido para medir a permeabilidade transversal com diferentes reforços e V_f . Os resultados numéricos foram apresentados na sequência e também abordam regimes de escoamento insaturado e saturado, para escoamentos no plano e transversais. Avaliou-se diferentes malhas para representar a cavidade do equipamento utilizado nos testes experimentais. Os valores de permeabilidade encontrados experimentalmente foram aplicados às soluções numéricas e os resultados numéricos e experimentais comparados entre si e com resultados obtidos de forma analítica.

5.1. Resultados experimentais

5.1.1. Avaliação dos parâmetros de testes

Uma vez que o objetivo da tese foi avaliar o escoamento transversal de fluidos no interior de diferentes reforços, foi necessário, inicialmente avaliar a influência dos parâmetros dos testes como: fluidos de testes, espessura da pré-forma e temperatura do ensaio. Testes preliminares foram realizados para verificar a influência do tipo de fluido de trabalho nas medidas de permeabilidade transversal. Nesses, a espessura da pré-forma foi mantida em 15 mm e 65 camadas de tecidos da fibra de vidro tipo E foram usadas sempre mantendo a orientação dos tecidos em todas as camadas. A pressão de injeção foi variada para cada teste visando manter vazões similares em todos os experimentos apesar das diferentes características de cada fluido.

Os resultados de K_{zz} para os três fluidos testados foram apresentados na Tabela 5.1. É importante mencionar que como somente testes em regimes saturados foram realizados, é esperado que a energia superficial de cada fluido tenha pouca ou nenhuma influência nos resultados de permeabilidade. A permeabilidade calculada em comparação com a referência estabelecida pelo resultado da matriz polimérica foi inferior a 10%, o que está dentro de uma faixa aceitável para este tipo de experimento.

Tabela 5.1 – Comparação entre os diferentes fluidos de trabalho.

Fluido de trabalho	Viscosidade dinâmica (cP)	$K_{zz} \times 10^{12}$ (m ²)	Diferença com relação à matriz polimérica [%]
Matriz polimérica	994	3,17	x
Óleo de silicone	989	3,43±0,18	8,2
Óleo de soja	74	3,46±0,16	9,1

Assim, o óleo de soja foi escolhido como fluido de trabalho para todos os demais testes devido a vantagens como, baixo custo, menor toxicidade e periculosidade, além de ser mais fácil de manusear do que os demais. Outra importante vantagem de utilizar óleo de soja foi o menor tempo necessário para atingir a condição saturada nos testes, uma vez que apresenta uma viscosidade bem inferior.

É importante também avaliar a influência da espessura da pré-forma uma vez que já havia sido reportado sua influência nos resultados (SYERKO *et al.*, 2017). A espessura foi definida pela altura da cavidade do equipamento que por sua vez foi definido pelo uso de espessadores conforme apresentado anteriormente. Neste conjunto de teste, foram usados os tecidos R, E, K1 e K2, as espessuras 3, 6, 9 15 e 22 mm e, ainda, seis teores de fibras (35%, 41%, 50%, 57%, 65% e 70%) e os resultados são mostrados na Figura 5.1.

A influência da espessura da pré-forma nos resultados de permeabilidade foi evidente para todas as fibras, o que pode estar relacionado com o caminho do fluido (estrutura de poros das camadas, porosidade entre os feixes e espaço entre as camadas) através das fibras (camadas), ou talvez pelo fato de que havendo um número maior de camadas aumenta a possibilidade de um escoamento mais homogêneo.

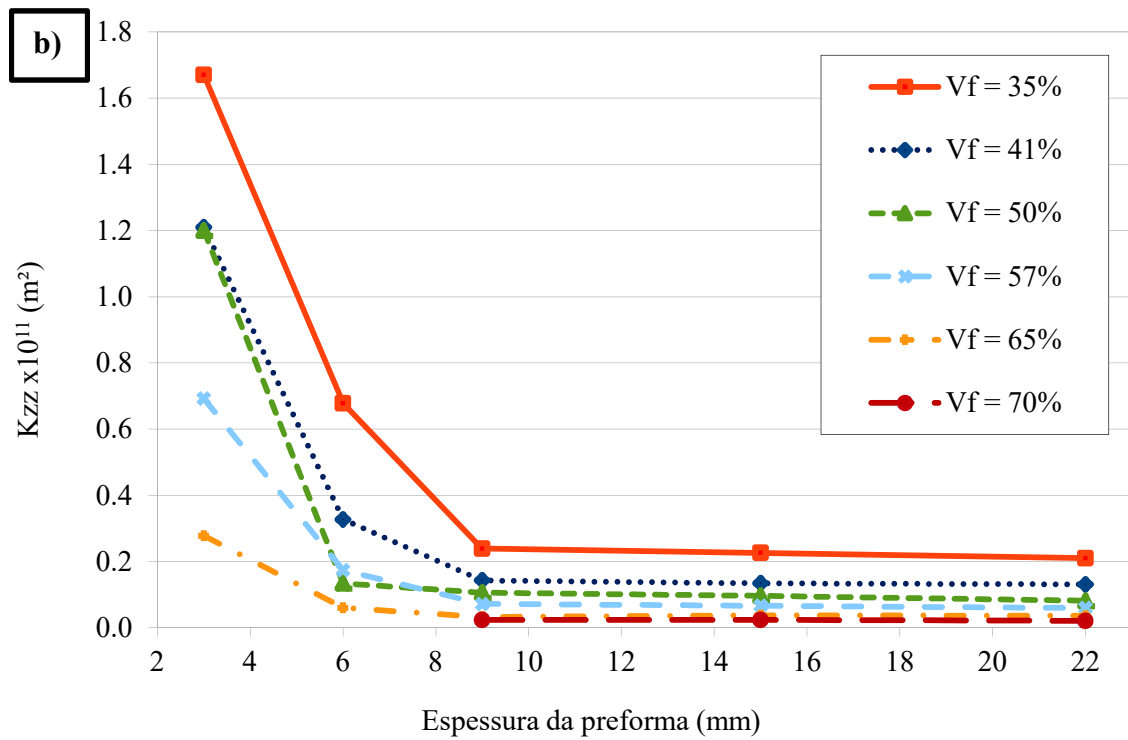
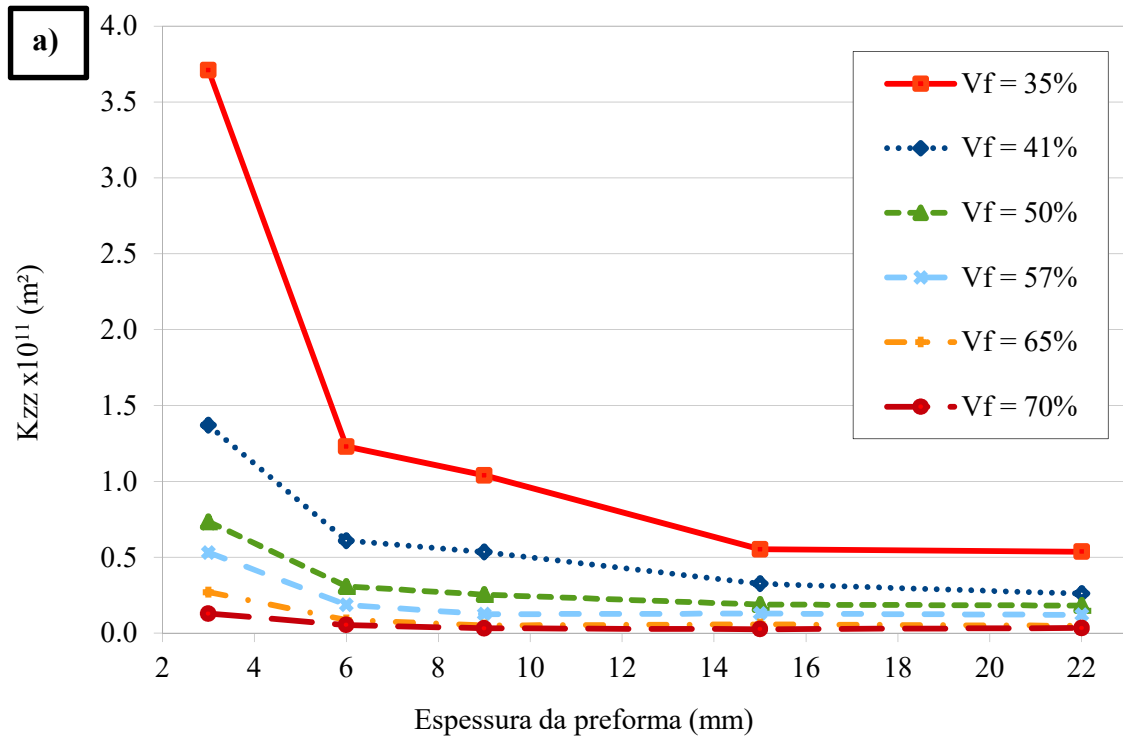


Figura 5.1 – Efeito da espessura da pré-forma e do teor de fibras no K_{zz} : a) para vidro-E e b) para o vidro-R.

Para o vidro-E, um decréscimo significativo no K_{zz} foi percebido entre os resultados de 3 mm e 6 mm, seguido por um decréscimo menos acentuado para os resultados de 15 mm e praticamente estável para os demais resultados de espessuras maiores. Além disso, para valores maiores de V_f os valores de K_{zz} estabilizam antes, ou seja, medidas para V_f menor são mais prováveis de se obter resultados imprecisos devido ao maior espaço interno para rearranjo das fibras durante a compactação e, logo, um maior número de possíveis caminhos podem ser estabelecidos (heterogeneidade). Para o vidro-R, um padrão similar foi encontrado, ou seja, um decréscimo significativo e uma posterior estabilização dos resultados de permeabilidade transversal. Entretanto, a estabilização ocorreu antes em termos de aumento de espessura com relação ao tecido de fibra de vidro-E devido ao maior *tex* e gramatura do tecido de fibra de vidro-R. Ou seja, um menor número de camadas e feixes levaram a uma menor heterogeneidade para as fibras compactarem e formarem os possíveis caminhos para o fluido.

Em seguida, estudou-se a influência da temperatura (Figura 5.2) nas medidas de permeabilidade transversal. A espessura da pré-forma foi mantida em 15 mm, o tipo de reforço foi a fibra E e o fluido de trabalho, o óleo. O aquecimento foi realizado no fluido de trabalho previamente a sua disposição no reservatório. Além disso, foram posicionados aquecedores ao redor do equipamento para diminuir o gradiente de temperatura. Ainda assim, a estabilização do escoamento foi obtida durante a realização de cada teste. Viu-se pouca influência da temperatura para os teores de fibra avaliados. Isso se deve ao fato de que a redução da viscosidade do fluido de trabalho com o aumento de temperatura foi compensada na relação entre diferença de pressão e vazão. Também não foi notada uma tendência de variação já que os testes realizados a 57°C apresentaram valores de permeabilidade maiores do que aqueles feitos a 21°C, mas menores do que aqueles realizados a 40°C. Ou seja, foi considerado que esse parâmetro tem uma influência pouco significativa. Os demais testes experimentais de permeabilidade transversal foram realizados dentro dessa faixa de temperatura, que era medida em cada teste. Esse estudo permitiu uma grande praticidade na realização dos testes uma vez que não havia a necessidade de uma climatização precisa do ambiente de testes.

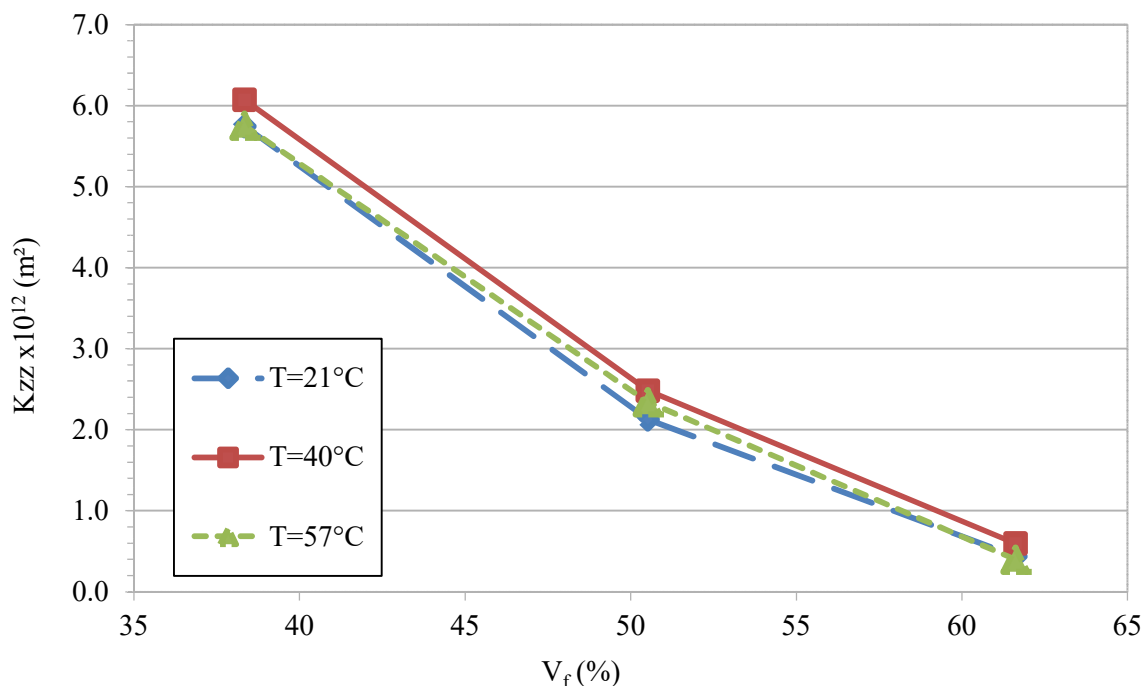


Figura 5.2 – Efeito da temperatura e do teor de fibras no K_{zz} para a Fibra E (com óleo de soja e espessura da preforma de 15 mm).

5.1.2. Permeabilidade transversal

Baseado nos experimentos preliminares, optou-se por manter a espessura da pré-forma em 15 mm para variações no valor de K_{zz} (como nos resultados apresentados anteriormente) e utilizar o óleo como fluido de trabalho. Com relação à temperatura, ao invés de utilizar uma temperatura única em todos os testes, a opção foi por registrar a temperatura durante cada teste e utilizá-la para calcular a viscosidade do fluido com a curva de ajuste da viscosidade do fluido. Assim, além de se obter resultados mais precisos de viscosidade e, portanto, de permeabilidade, a realização dos testes foi simplificada já que garantir a temperatura constante em todos os experimentos seria uma tarefa mais complexa no laboratório do que o seu simples registro.

Os resultados de permeabilidade transversal foram apresentados na Figura 5.3. Como esperado, o V_f teve grande influência na permeabilidade transversal de todos os reforços. Um V_f menor indica menos quantidade de fibras e, também, menor grau de compactação da pré-forma. Uma variação considerável na permeabilidade foi observada para valores de V_f menores que 50% para as amostras K1, E, M1 e M2, e menor para as fibras R e K2. Isso

ocorreu provavelmente devido ao maior *tex* dos feixes que compõem esses tecidos (com maior gramatura) e que acabam fazendo destes tecidos mais rígidos tendo menor deflexão e movimento de feixes ainda que em valores menores de V_f . Para valores de V_f maiores que 50%, as variações na permeabilidade foram menores, e todas convergiram para o valor de $3,0 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ quando o V_f se aproximou de 70%.

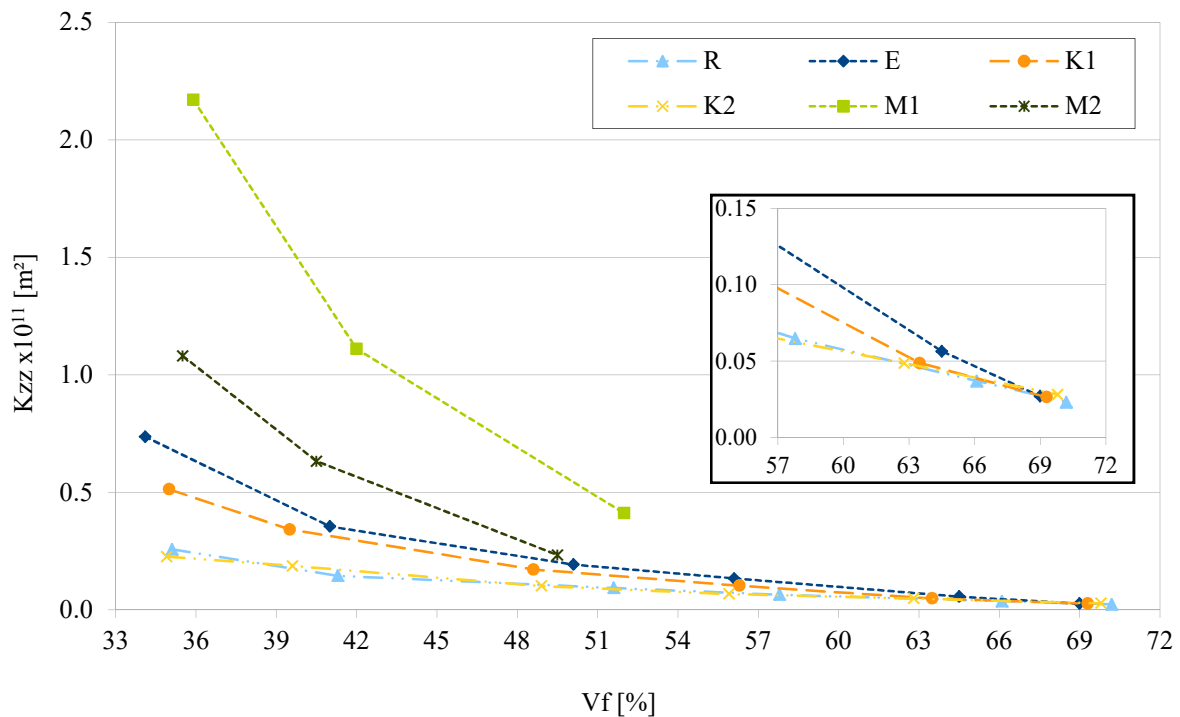


Figura 5.3 – Resultados de permeabilidade transversal para todos os reforços (com óleo de soja e espessura da preforma de 15 mm).

As mantas apresentaram os maiores valores de K_{zz} entre os reforços avaliados devido a sua arquitetura com fibras curtas aleatoriamente distribuídas e, portanto, menos próximas umas das outras em comparação aos demais reforços, com maiores e mais numerosos espaços entre os feixes de fibras levando a caminhos de escoamento do fluido mais diretos e sem desvios por dentro do reforço. A disposição interna das fibras (construção) nas mantas aleatórias M1 e M2 foram bastante similares de forma que a única diferença importante seria a gramatura dessas mantas, ou seja, uma maior quantidade de camadas foi necessária para atingir o V_f desejado para a M1, o qual tem menor gramatura. Dessa forma, uma vez que a permeabilidade das mantas foi diferente, possivelmente houve influência da maior quantidade

de interfaces entre as camadas, ou seja, na preforma há um maior espaço entre camadas já que estas são regiões com menor quantidade de fibras.

Considerando os tecidos de fibras avaliados, a amostra E apresentou a maior permeabilidade transversal, sendo seguida de perto pela amostra K1, o que indica a importância da porosidade entre os feixes. Como apresentado na Figura 4.3, K1 possui um grande número de poros entre feixes, contudo, estes apresentam um menor tamanho, em oposição ao apresentado pela amostra E (Figura 5.4a). Isto sugere que o tamanho desses poros tem uma importância maior na permeabilidade transversal do que sua quantidade, talvez devido ao fato de os pequenos poros entre feixes serem facilmente obstruídos por feixes das camadas adjacentes.

Os menores valores de K_{zz} foram encontrados para as amostras R e K2 com pequena diferença entre eles para toda a faixa de V_f avaliada (Figura 5.4b). Baseado na Figura 4.3, somente pequenos poros entre feixes são vistos para as amostras R e K2, o que possivelmente foi responsável pela baixa permeabilidade transversal. Assim, para estes reforços, quando o V_f está próximo de 50% ocorre o escoamento localizado no plano entre as camadas até encontrar o espaço entre os feixes na camada adjacente (Figura 5.4c).

Quando o V_f é ainda mais elevado, o escoamento intra-feixe pôde ganhar importância com relação ao escoamento total já que o escoamento entre os feixes foi reduzido. Soma-se a isso, sua elevada gramatura e o menor número de camadas necessário para atingir cada V_f avaliado, gerando assim, menos espaços entre camadas. Esses reforços também apresentaram os maiores valores de tex , o que contribui para atrasar o escoamento devido a uma maior tortuosidade no caminho do fluido durante o escoamento transversal, com menos fluido escoando através dos espaços entre camadas e ao redor dos feixes já que estes são maiores e em menor quantidade.

Para valores de V_f acima de 60-65%, K_{zz} para todos os reforços foi próximo, o que é justificado considerando que o escoamento intra-feixe é significativo para elevados V_f já que a porosidade entre os feixes e o espaço entre as camadas são reduzidos, o que força o fluido a escoar preferencialmente através dos feixes (Figura 5.4d). Sendo assim, e considerando também que o escoamento foi saturado, não há muita diferença entre os reforços e as características iniciais das suas arquiteturas tornam-se menos importantes.

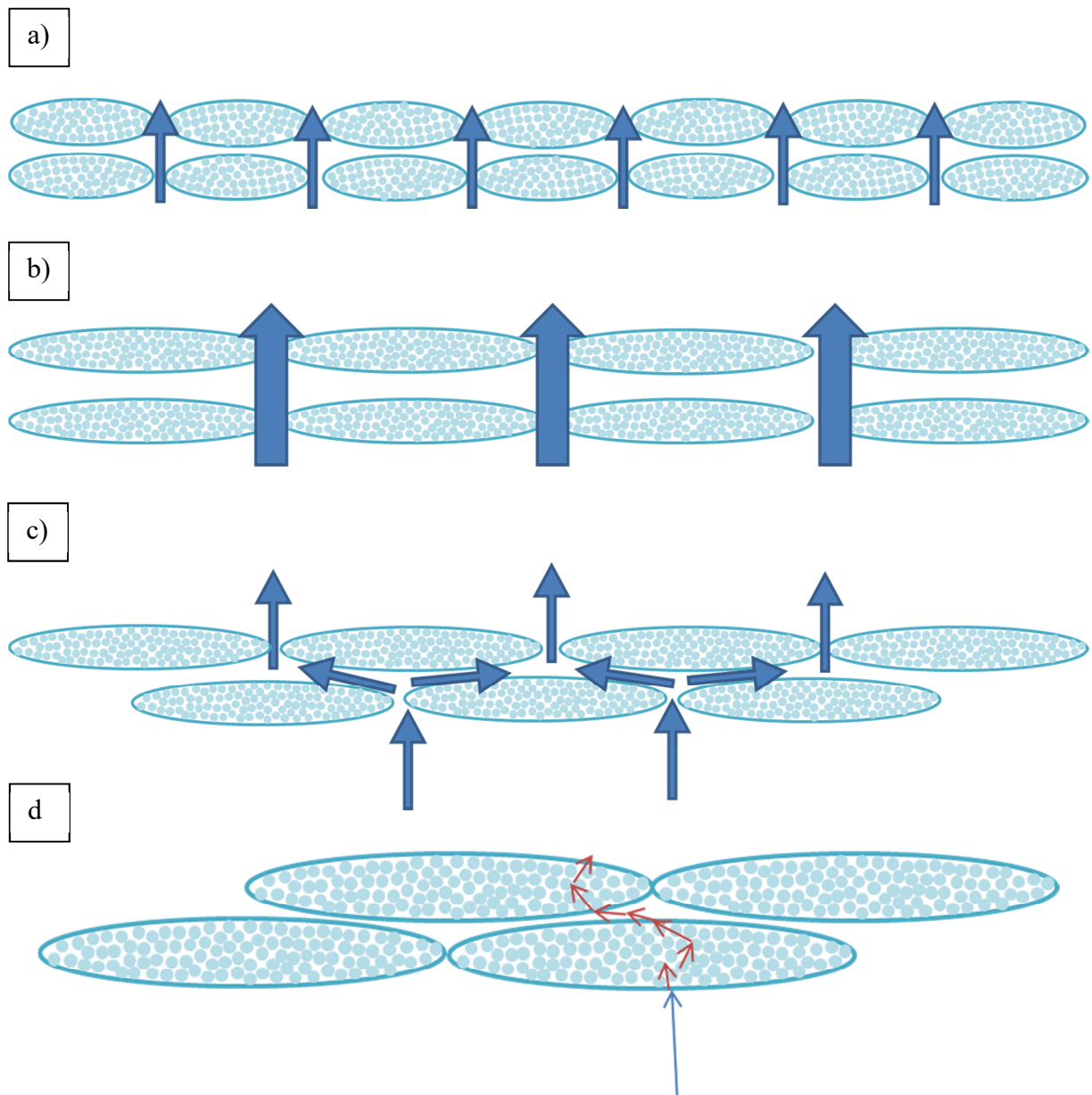


Figura 5.4 – Representação esquemática dos feixes (seção trasnversal) e do escoamento. a) feixes de menor tex; b) feixes de maior tex; c) maior emaranhamento ($V_f \approx 50\%$); d) V_f muito elevado com escoamento intra-feixe .

Para auxiliar na investigação do comportamento observado na permeabilidade transversal, testes de compressão dos reforços nas faixas de V_f estudados foram realizados. Estes ensaios foram apresentados na Figura 5.5. As mantas aleatórias apresentaram novamente uma clara diferença de comportamento com relação aos tecidos. De fato, não foi possível realizar testes de permeabilidade com V_f acima de 55% para as mantas devido à carga excessiva necessária para confinar a pré-forma no interior da cavidade do equipamento. As mantas foram produzidas com fibras curtas e dispostas aleatoriamente com muitas

sobreposições e pontos de intersecção entre fibras de cada camada e também entre as camadas empilhadas, tornando a compactação mais difícil.

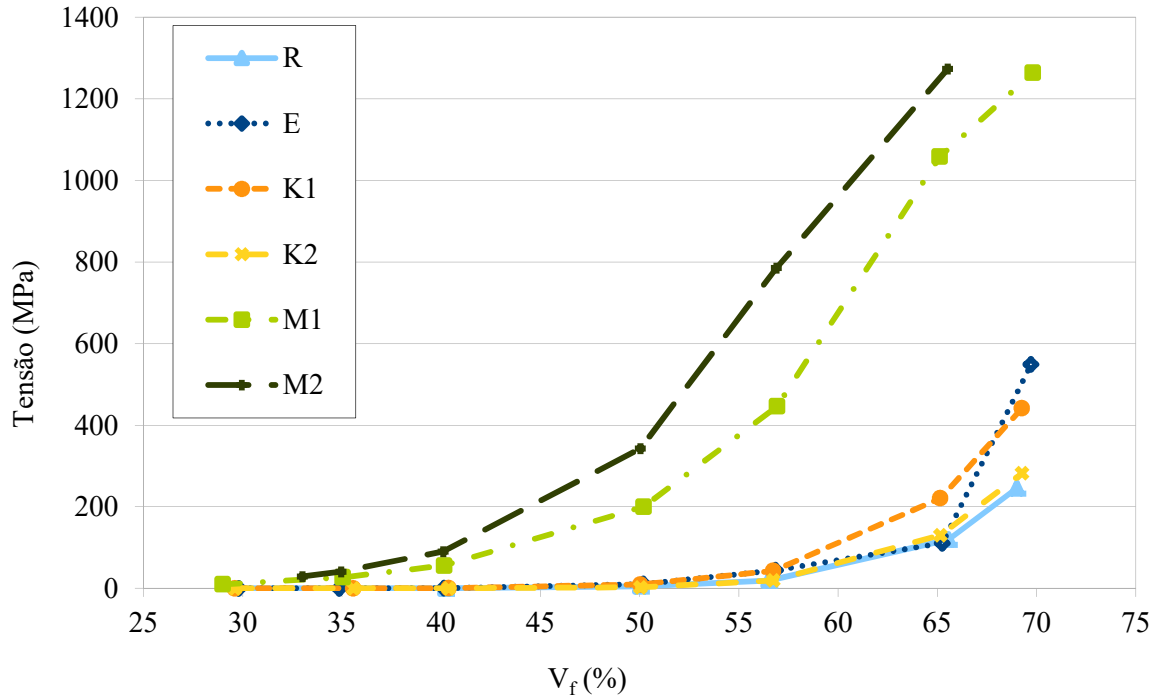


Figura 5.5 – Resultados dos testes de compressão dos reforços.

Os demais reforços foram mais fáceis de serem confinados até que se atingisse o teor de fibras desejado, assim, uma perturbação mínima na arquitetura desses reforços é esperada até um V_f de 57%. Enquanto a carga de compressão não cresceu exponencialmente, pode-se assumir que o emaranhamento das fibras não era máximo. Ou seja, o feixe de uma camada pode estar diretamente acima daquele da camada adjacente, levando a um alinhamento dos poros entre feixes de camadas adjacentes e, assim, a caminhos mais diretos (menos tortuosos) para o escoamento do fluido na direção transversal. Conforme a carga de compressão começou a subir, as fibras iniciaram um processo de compressão de feixes e escorregamento lateral a partir de sua posição original, para uma melhor distribuição da carga, com um efeito inicial de redução de porosidade entre os feixes. Posteriormente, a carga compressiva sobre as camadas de tecido aumentou significativamente e a porosidade intra-feixe foi reduzida.

Dentre os tecidos, K1 e E apresentaram um aumento significativo na carga de compressão antes dos demais tecidos e antes mesmo do máximo emaranhamento ser atingido.

Uma vez que os tecidos R e K2 com maior gramatura e R muito maior *tex* (o que leva a um número menor de feixes por área) apresentaram maior dimensão de seus feixes, houve menos possibilidades de reposicionamento para esses feixes rearranjarem-se conforme foram sendo comprimidos e movidos lateralmente até acomodarem-se próximo aos feixes de camadas adjacentem fazendo com que menos heterogeneidade ocorrem nos resultados.

5.1.3. Variação da razão K_{xx}/K_{zz}

A permeabilidade no plano (K_{xx}) foi medida para os reforços estudados e os resultados foram apresentados na Figura 5.6. A faixa de frações volumétricas foi estreitada devido às limitações experimentais de fechamento do molde RTM. A permeabilidade no plano diminuiu para maiores valores de V_f , conforme o esperado. Já é bem estabelecido que o escoamento no plano ocorre principalmente através da porosidade entre os feixes com pequena influência da porosidade dentro destes até frações volumétricas de 50% serem atingidas, especificamente para escoamentos saturados.

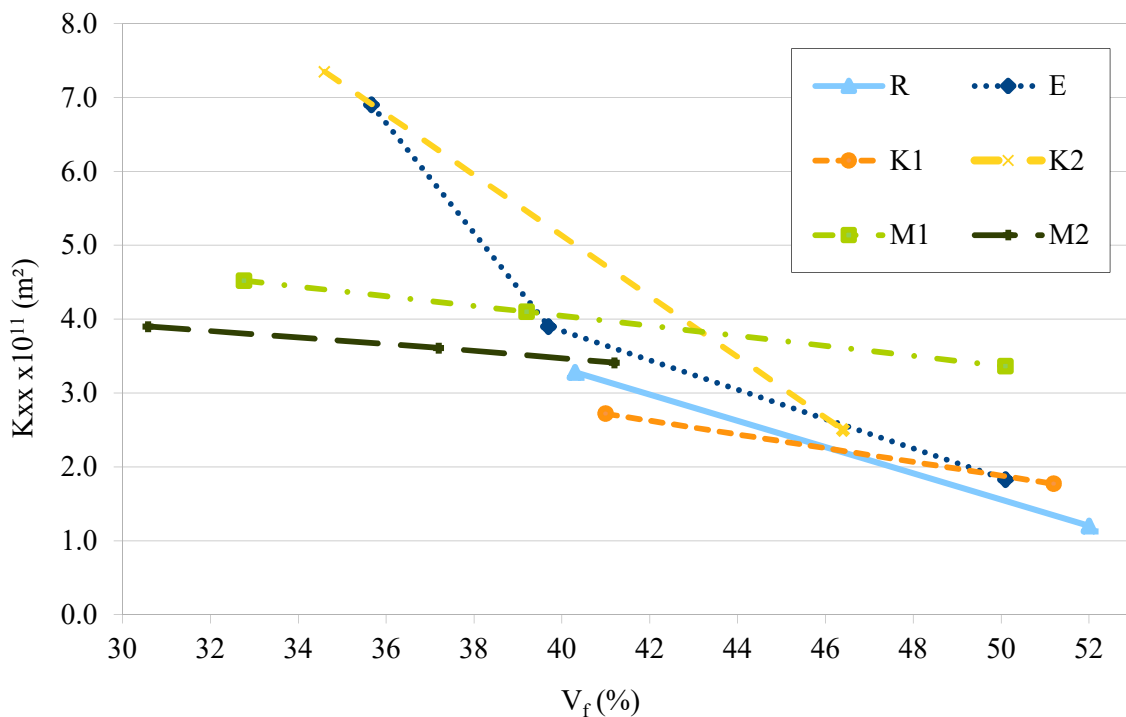


Figura 5.6 – Resultados de permeabilidade no plano.

Para valores de V_f baixos, a permeabilidade no plano diminuiu rapidamente com o aumento do V_f , tornando-se menos pronunciado para altos V_f (40-50%). Para as mantas aleatórias um comportamento mais linear foi percebido e, novamente, M1 foi mais permeável do que M2, apesar das suas características serem similares, com exceção da gramatura (mais alta para M2). Considerando os demais tecidos, nos quais as características diferiam em relação ao *tex* e à arquitetura, uma estimativa prévia do K_{xx} com base somente na gramatura não é válida. Os resultados de K_{zz} foram anteriormente discutidos com base no número (quantidade) e tamanho dos poros entre feixes, mas isso não justifica os resultados de K_{xx} , uma vez que esses poros contribuem menos para o escoamento no plano.

A razão ψ , definida por K_{xx}/K_{zz} (para V_f similar), foi então calculada (Figura 5.7). É interessante notar que, apesar de ambas as permeabilidades transversal e no plano diminuírem com o aumento do V_f (Figura 5.3 e Figura 5.6), a variação da razão ψ foi diversa. De fato, a tendência encontrada para R e K2, para os quais houve redução de ψ com o aumento de V_f , foi oposta à encontrada para K1, M1 e M2. Enquanto a amostra E não mostrou uma tendência clara com o aumento de V_f . Além disso, o primeiro grupo apresentou maiores valores para ψ devido ao seu reduzido K_{zz} (comparado aos demais) ao longo da faixa de V_f . Já o segundo grupo, assumindo-se que a porosidade entre feixes ditou a resistência ao escoamento através das fibras e que os valores foram consideravelmente diferentes nas direções transversal e no plano (espaço entre camadas), foi possível justificar a variação do K_{zz} e K_{xx} com V_f e, para essa faixa de V_f estudada, K_{zz} apresentou uma variação menor do que o K_{xx} .

Forçar o fluido a escoar através de uma direção no plano foi mais fácil comparado à direção transversal, como indicam os valores de $\psi > 1$. Quando o V_f era alto, a resistência ao escoamento imposta pelo reforço também aumentou e a dificuldade de escoar na direção transversal foi maior do que no plano. Dessa forma, uma menor compactação sugere mais espaços entre as camadas favorecendo o escoamento no plano (YUN *et al.*, 2017b).

Para o escoamento transversal através dos poros entre feixes um elevado *tex* força o fluido a escoar por um caminho muito tortuoso e essa tortuosidade do reforço tem um efeito mais pronunciado nesse tipo de escoamento. Reforços nos quais a estrutura de poros entre feixes não envolve uma excessiva tortuosidade apresentarão uma maior permeabilidade transversal em elevadas frações volumétricas de fibras. Entretanto, o espaçamento entre feixes dentro de uma mesma camada não é tão importante para o escoamento no plano. Em menores V_f , o escoamento transversal avança através dos poros entre feixes até a próxima camada e, então, escoar localmente no plano até encontrar os poros entre feixes na camada adjacente,

assim, a permeabilidade transversal está relacionada com o espaço entre camadas e a resistência ao escoamento de um furo (nesse caso o poro entre feixes) o qual é dependente das dimensões do furo (YUN *et al.*, 2017b).

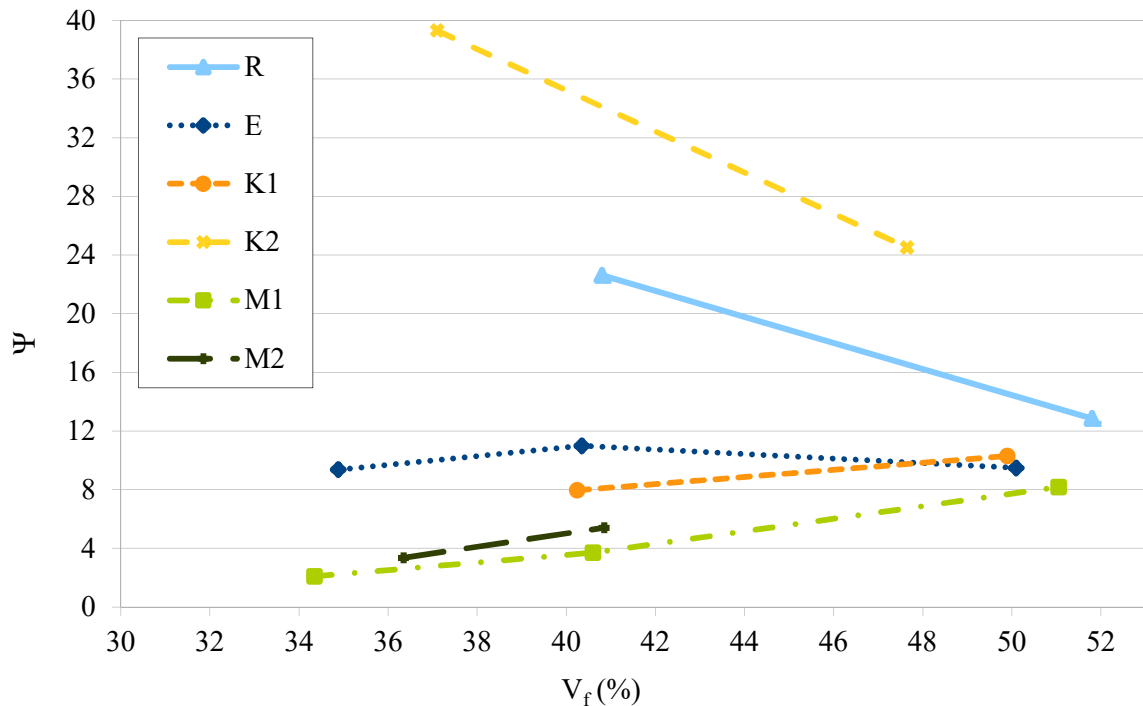


Figura 5.7 – Variação da razão entre as permeabilidades no plano e transversal (ψ) com o teor de fibras.

Isso demonstra que há uma dependência dos fatores que governam o comportamento do escoamento nessa faixa de V_f . O escoamento no plano ocorre nos espaços entre camadas indicado pelo percentual de áreas ricas em matriz da seção transversal, enquanto o escoamento transversal ocorre na porosidade intra-feixe, no espaço entre feixes e espaço entre camadas, com importância relativa entre eles variável conforme o V_f . No caso do escoamento transversal em um V_f alto, o escoamento local é alterado de primariamente no plano (progredindo em torno dos feixes de formato plano) para um caminho mais direto através da espessura apresentando valores mais baixos de K_{zz} devido à maior resistência ao escoamento dentro do feixe. Para entender o envolvimento da micro porosidade no escoamento transversal e no plano, placas de compósito foram usadas para visualizar a estrutura em um microscópio óptico. As Figura 5.8 e Figura 5.9 ilustram algumas imagens obtidas nas quais a escala foi mantida igual. Na primeira imagem as formas mais próximas à geometria elíptica são as

seções transversais dos feixes enquanto os feixes longitudinais aparecem como linhas de um lado ao outro da imagem. As regiões entre eles formam a área preenchida pela matriz.

Nas imagens dos reforços visualizados de topo (Figura 5.9) notou-se na região mais central da imagem a porosidade entre feixes que atravessa a camada de reforço. Foi possível notar, a partir dessas imagens, as diferenças em tamanho e distribuição das áreas ricas em matriz e o tamanho dos feixes. As amostras R e K2 apresentaram amplas e concentradas áreas ricas em matriz, enquanto as amostras E e K1 apresentaram menores e mais distribuídas regiões entre feixes que anteriormente à impregnação pela matriz faziam parte da porosidade. A redução em geral das áreas ricas em matriz para alto V_f foi bem clara. Esta área foi mais diretamente relacionada à permeabilidade no plano uma vez que apresentou um caminho através do qual o escoamento ocorreu. A distância entre as camadas e o tamanho e distribuição dos poros entre feixes estão relacionados à permeabilidade transversal (SYERKO *et al.*, 2017).

Devido à dificuldade em estimar a distância entre as camadas, optou-se por discutir os resultados baseado na fração da área rica em matriz. Diversas imagens foram usadas para cada um dos reforços (similares às mostradas na Figura 5.9) e os valores médios das áreas ricas em matriz e os respectivos desvios-padrão foram avaliados usando o software de análise de imagens *Image J* (SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012). Esses resultados foram compilados e apresentados na Figura 5.10, onde se nota que alguns resultados apresentaram elevado desvio devido à heterogeneidade na compactação dos reforços. Ressalta-se que essa análise não foi realizada nas mantas M1 e M2 dada a dificuldade em identificar os diferentes regiões e a separação entre as camadas nas micrografias.

A amostra K2 apresentou baixo K_{zz} (Figura 5.3) apesar do K_{xx} e ψ estarem entre os mais elevados devido ao elevado percentual de área rica em matriz. Isto sugere que o espaço entre as camadas no plano teve pequeno efeito na permeabilidade transversal e que o K_{zz} estava mais relacionado aos poros entre feixes que, para este tecido, foram de pequenas dimensões e em pequeno número. A redução de ψ em V_f elevado ocorreu devido à redução no K_{xx} uma vez que K_{zz} permaneceu praticamente inalterado e ψ foi o mais elevado devido ao reduzido valor de K_{zz} . O comportamento da amostra R foi similar ao da amostra K2 com relação a K_{zz} e ψ . Entretanto, K_{xx} , e conseqüentemente ψ , foram muito menores. O teor de áreas ricas em matriz foi o menor entre todas as amostras, o que possivelmente justifica os valores de K_{xx} e as características dos poros.

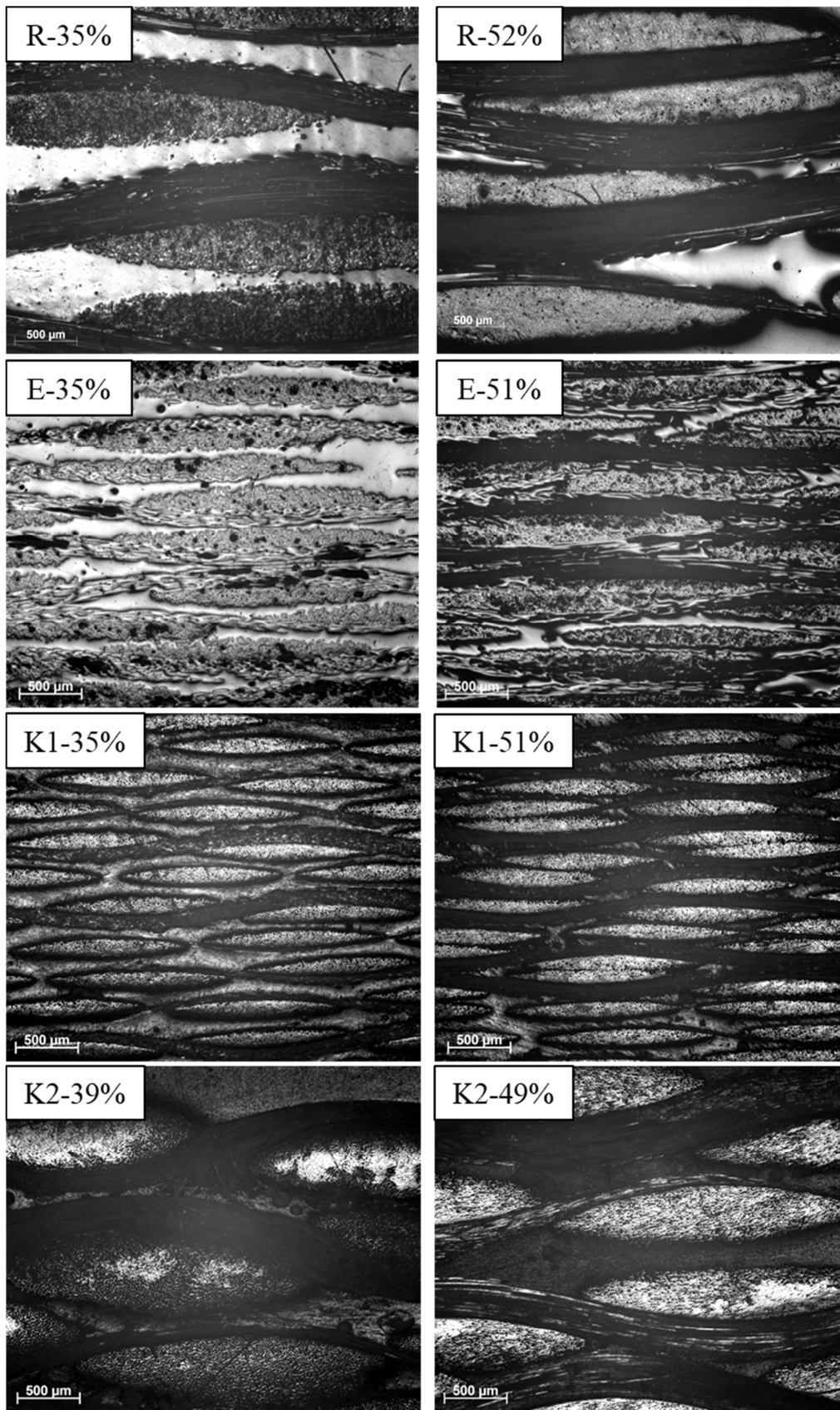


Figura 5.8 – Micrografias das seções transversais dos compostos com diferentes reforços.

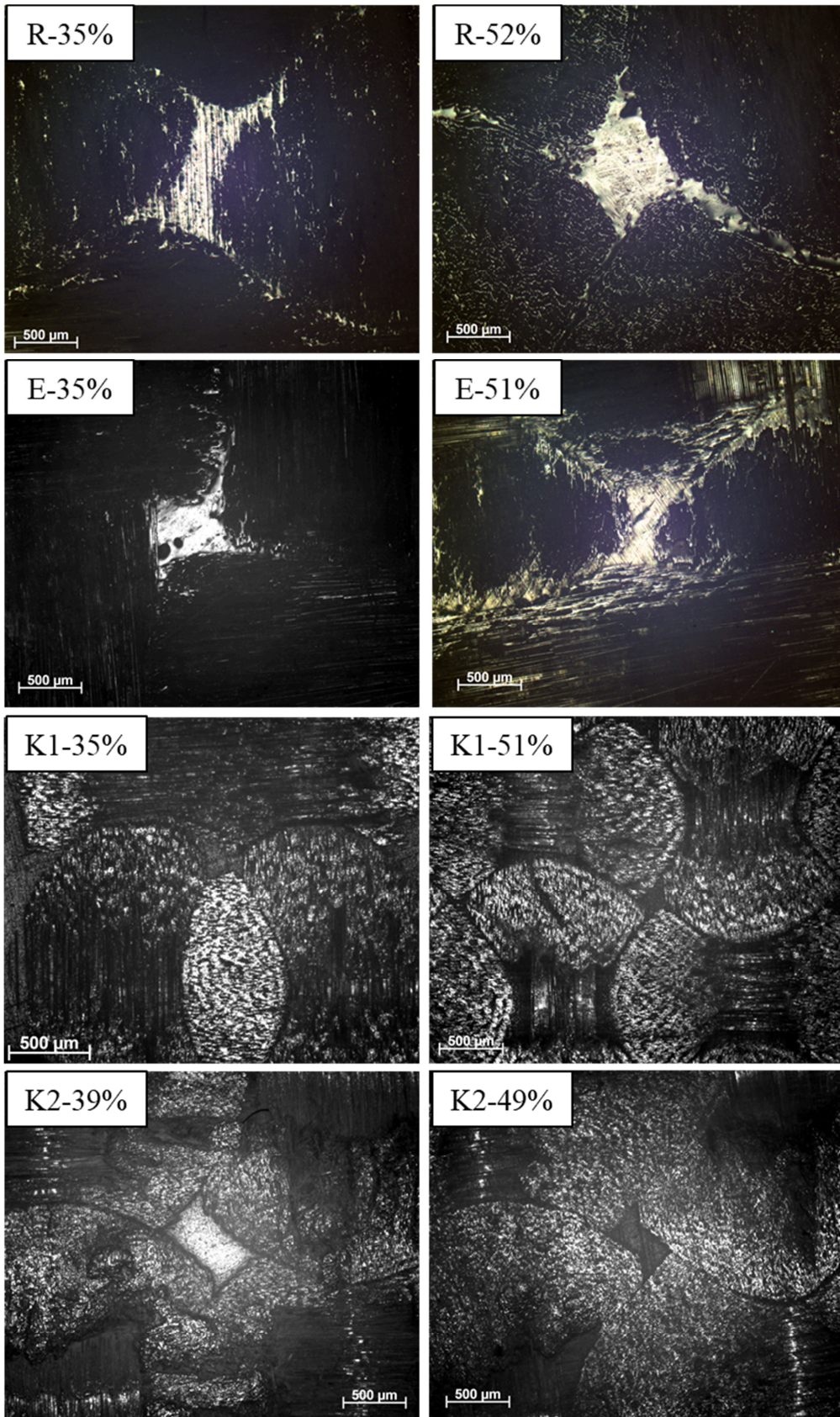


Figura 5.9 – Micrografias da superfície (visão de topo) dos compósitos com diferentes reforços.

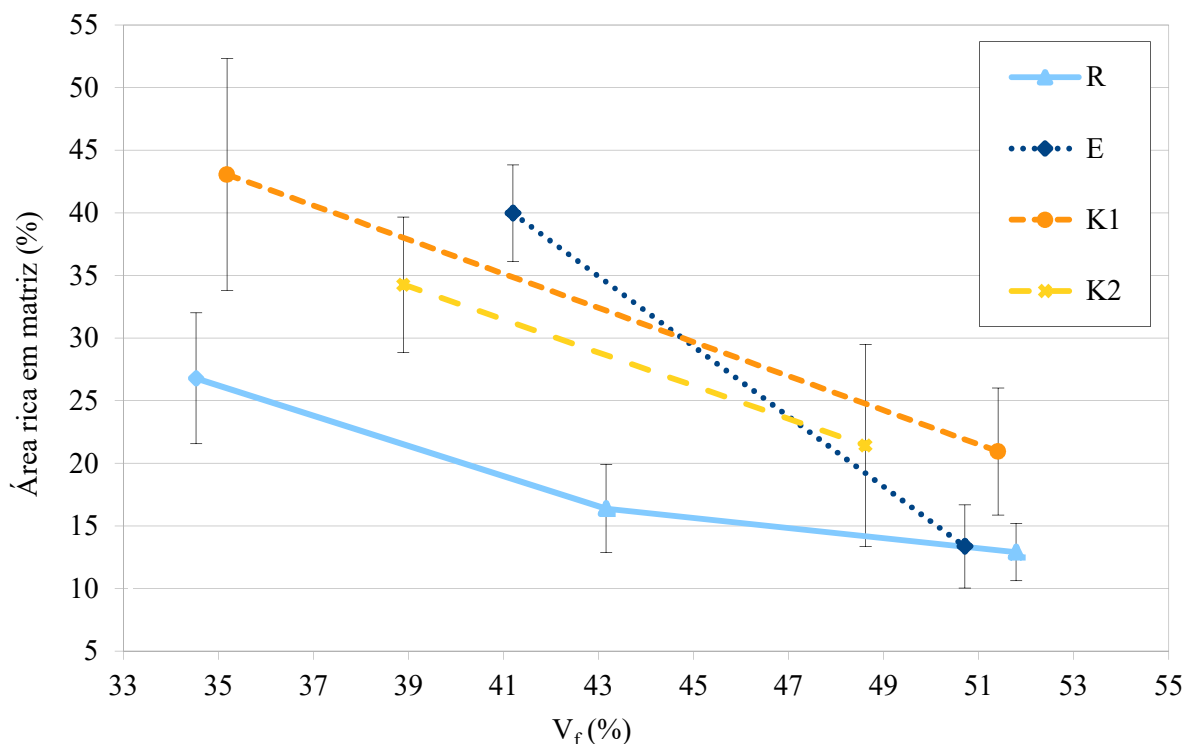


Figura 5.10 – Fração de área da matriz observada nas seções transversais dos compósitos.

A amostra E apresentou elevados valores de K_{xx} e K_{zz} com um valor de ψ médio. Esses resultados foram justificados pelo elevado percentual de áreas ricas em matriz encontrados, com um caminho mais fácil para o fluido escoar. A razão ψ variou apenas levemente talvez porque essas variações estão se contrabalanceando. A amostra K1 apresentou uma variação com relação ao percentual de área, com baixos valores de K_{xx} e valores de K_{zz} médios. A razão ψ aumentou levemente com o V_f devido à variação no K_{zz} o qual, por sua vez, foi alterado devido a uma combinação dos poros entre feixes e de uma ampla área rica em matriz.

5.2. Resultados numéricos

O estudo numérico do escoamento foi realizado simulando a cavidade do equipamento (Figura 4.8). Para isso, foram criadas diferentes geometrias e malhas (Figura 4.18, Figura 4.19, Figura 4.20), considerando os domínios computacionais apresentados na Figura 4.13. Uma vez que o objetivo foi reproduzir o procedimento experimental, todos os testes consideraram um escoamento unidirecional de um fluido incompressível desde a superfície inferior até a superfície superior, transversal ao plano das camadas de reforço. As simulações

consideraram a presença das fibras através da inclusão dos valores das componentes principais da permeabilidade (K_{xx} , K_{yy} e K_{zz}). Os valores dos parâmetros constantes usados nas simulações, tanto saturada quanto insaturada, foram apresentados na Tabela 5.2. Esses valores foram mantidos constantes para que os parâmetros estudados tivessem seu efeito isolado sem influência de outros parâmetros. Assim, a definição da viscosidade e da massa específica teve o objetivo de imitar os valores do fluido usado nos ensaios experimentais. Da mesma forma, as componentes da permeabilidade foram escolhidas para assemelhem-se a pré-forma de tecido de fibra de vidro-E, bem como a porosidade definida por ser um valor intermediário e comumente encontrado em MLC. Se, eventualmente, alguma dessas constantes foi diferente em determinados testes, o valor usado foi indicado no texto.

Tabela 5.2 – Parâmetros constantes usados nas simulações.

Viscosidade dinâmica (Pa s)	Massa específica do fluido (kg m^{-3})	$K_{xx} = K_{yy}$ (m^2)	K_{zz} (m^2)	Porosidade (%)
0,06	920	$1,83 \times 10^{-11}$	$1,54 \times 10^{-12}$	50

Os resultados numéricos foram subdivididos entre os testes feitos com escoamento saturado (a matriz já estava presente em todos os volumes) nos quais foi aplicada uma vazão inicial nos volumes definidos como *inlet*, que estavam, neste caso, localizados nos furos. Assim, após o final do teste, a diferença de pressão (Δp) foi usada como parâmetro de comparação. A realização desses testes teve como objetivo avaliar a independência de malha na direção transversal, no plano e, ainda, avaliar o efeito da altura da pré-forma (neste caso a altura da geometria usada) comparando com os resultados obtidos experimentalmente.

Os testes sob escoamento insaturados (volumes inicialmente preenchidos com ar) tiveram como objetivo avaliar também a independência de malha porque uma vez que o regime do escoamento foi alterado, também os parâmetros das malha podem ter que sofrer alterações. Assim, as diferentes malhas foram testadas para avaliar a independência com relação ao número de volumes na direção transversal para em seguida serem comparadas entre si e com relação à solução analítica. A solução analítica foi obtida resolvendo a Eq. (4.2) e os mesmos parâmetros usados para obter as soluções numéricas, ou seja, a mesma pressão de injeção, os mesmo valores para as componentes da permeabilidade, as mesmas

propriedades de fluido, etc. O estudo também avaliou o uso de simetria e o efeito da presença ou não dos furos como entrada do fluido na cavidade.

5.2.1. Simulações com escoamento saturado

Os resultados usados para definir a independência de malha com relação aos volumes que compõem os furos, ou seja, a região onde o fluido entra na cavidade, foram apresentados na Tabela 5.3. Os demais parâmetros foram mantidos constantes para ter sua avaliação realizada posteriormente e para isolar o efeito dessa discretização específica (nos furos). Esses parâmetros foram: o número de volumes na transversal igual a 20 volumes e o número de volumes na parede de simetria igual 450 volumes.

Tabela 5.3 – Independência de malha: número de volumes nos furos.

Volumes nos furos	Volumes totais	Δp (Pa)	Diferença (%) (Eq.(4.10))
1	19680	2911	-
6	28084	4322	-48,44
14	43044	4526	-4,73
39	93974	4620	-2,09
58	127128	4636	-0,33
80	165342	4645	-0,21

Observa-se que a independência da quantidade de volumes nos furos ocorreu a partir de 58 volumes (127128 volumes totais) para o qual a diferença percentual da variável de interesse (Δp) foi menor do que 1%. Os resultados usados para definir a independência de malha com relação aos planos de simetria foram apresentados na Tabela 5.4. Os demais parâmetros mantidos constantes foram: o número de volumes em z igual a 20 e o número de volumes nos furos igual a 58.

Tabela 5.4 – Independência de malha: número de volumes nos planos de simetria.

Volumes nas paredes de simetria	Volumes totais	Δp (Pa)	Diferença (%) (Eq.(4.10))
100	41394	4516	-
300	42648	4524	-0,17
450	43044	4526	-0,05
600	43506	4522	0,09
750	44584	4520	0,03
900	45156	4518	0,03

Neste caso, uma vez que não houve variação significativa dos resultados verificada pela reduzida diferença percentual entre o Δp obtido por cada malha, não observou-se uma independência de malha. Dessa forma, apesar de que o menor número de volumes (100) pudesse ser utilizado nos demais testes, 450 volumes para a parede de simetria foi mantido constante para todos os demais testes em função de manter uma relação mais próxima de tamanho com relação aos demais volumes.

Tabela 5.5 – Independência de malha: número de volumes na direção z.

Volumes na direção z	Volumes totais	Δp (Pa)	Diferença(%) (Eq.(4.10))
1	5937	5629	-
5	13749	4597	18,32
10	23514	4519	1,70
15	33279	4516	0,07
20	43044	4526	-0,21
25	52809	4537	-0,25

Assim, foi verificado que a independência de malha logrou-se a partir de 15 volumes em z (33279 volumes totais), quando a diferença percentual da variável de interesse (Δp) foi menor do que 1%. Uma vez que estes resultados foram obtidos para uma malha de altura de 22 mm, notou-se que a relação de 0,68 volumes/mm na direção z foi aquela onde ocorreu a independência da malha nessas condições. Assim, deve-se observar que a variável importante não foi exatamente o número de volumes, mas sim o tamanho dos mesmos com relação à dimensão da geometria. Desta forma, uma espessura menor de pré-forma pode demandar um número menor de volumes na direção z, desde que seu tamanho (dz) seja igual ou menor ao tamanho definido no teste de independência de malha. Uma vez definidas as quantidades de volumes necessários na direção transversal e no plano para se obter resultados independentes da malha, foram realizados testes comparativos com os resultados experimentais. Assim, para todas as malhas foram utilizados 58 volumes nos furos, 300 volumes nos planos de simetria e 700 na parede externa, enquanto na direção z foram variados de acordo com a altura. A malha construída utilizando estes parâmetros foi apresentada na Figura 5.11

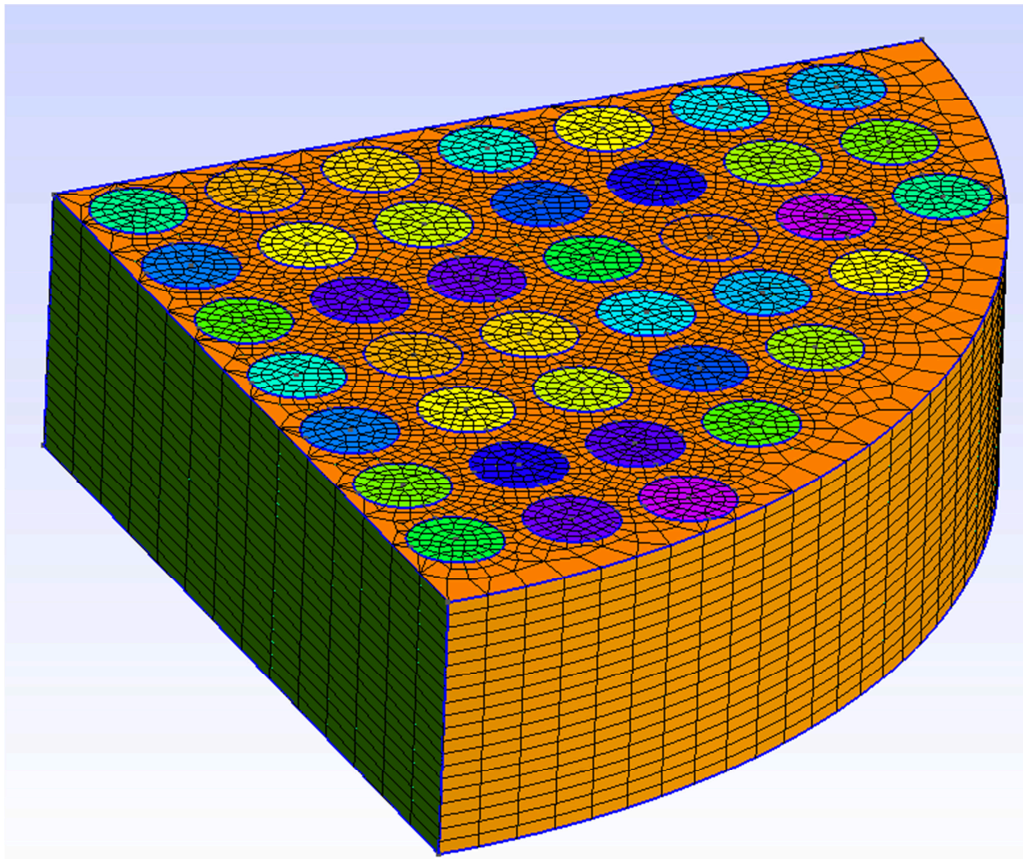


Figura 5.11 – Malha com os parâmetros definidos pelo testes de independência de malha.

Os resultados apresentados na Tabela 5.6 compilam os valores obtidos no escoamento saturado, sendo U (m/s) a velocidade do fluido, Δp_{num} (Pa) a variação de pressão obtida numericamente, Δp_{exp} (Pa) a variação de pressão obtida experimentalmente, e na última coluna, a razão entre ambas diferenças de pressões.

A Tabela 5.6 mostra os resultados para malhas de 22 mm, 15 mm, 9,53 mm 6,3 mm e 3,8 mm de altura. Os parâmetros utilizados em todos os testes foram de 58 volumes nos furos, 300 volumes nos planos de simetria, 700 na parede externa. Para manter a relação mínima de 0,68 volumes/mm na direção z foram utilizados 20 volumes para a malha de 22 mm e 15 mm, 9,53 volumes para a malha de 9 mm.

Observa-se que os resultados obtidos pela simulação numérica se aproximam de forma muito satisfatória dos resultados obtidos experimentalmente. Nestes casos de menor altura (6,63 mm e 3,8mm), o número de volumes na direção z utilizados foram de 7 e 4 respectivamente, os demais parâmetros foram mantidos iguais aos das tabelas anteriores. Para estas malhas de menor altura se observou que os valores obtidos numericamente divergiram significativamente dos experimentais, indicando uma possível imprecisão dos resultados experimentais nestas alturas.

Nos resultados, discutidos na seção 5.1.1 e apresentados na Figura 5.1, foi observado que os testes experimentais que usaram os menores valores de espessura apresentaram maiores valores de permeabilidade. Fato este inusitado já que a permeabilidade é uma propriedade da pré-forma que normalmente não varia em função da sua altura da pré-forma (RUDD; SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1997).

Uma das motivações para a realização desta série de testes numéricos foi entender esses resultados obtidos experimentalmente. Isto prova que os resultados obtidos por simulação numérica condizem com a teoria e que o método experimental de medição para malhas de espessura mais fina deve ser reformulado. Assim, uma vez que tanto os testes experimentais quanto os numéricos apresentaram inconformidades quando a espessura das pré-formas foi inferior a 9,5 mm, entendemos que a medição dessa componente da permeabilidade deve ser evitada para espessuras muito reduzidas.

Tabela 5.6 – Resultados comparativos para malhas de 3,8 mm até 22 mm de altura.

Altura da malha (mm)	$U \times 10^{-5}$ (m/s)	Δp_{num} (Pa)	Δp_{exp} (Pa)	Diferença (%) (Eq.(4.10))
22,23	2,08	9649	9640	-0,09
	2,92	14059	14483	2,93
	3,55	18500	19426	4,77
	4,19	22926	24349	5,84
	4,67	27284	29248	6,71
15	3,47	9893	10178	2,80
	4,69	14697	14767	0,47
	5,84	19553	19383	-0,88
	6,73	24337	23873	-1,94
9,53	7,05	10882	10242	-6,25
	9,62	15630	14945	-4,58
	11,7	20380	19727	-3,31
	16,7	25025	24425	-2,46
6,3	1,98	1688	1126	-49,91
	9,27	7400	5551	-33,31
	14,9	13045	10089	-29,30
	19,5	18571	14630	-26,94
3,8	1,45	4730	2810	-68,33
	2,29	6907	4081	-69,25
	3,89	12857	7828	-64,24

Por fim, considerando-se a dificuldade na fabricação das placas perfuradas usados no equipamento experimental, foram avaliadas outros formatos para a entrada de fluido da cavidade e seu efeito no escoamento sob regime saturado visando encontrar alternativas menos dispendiosas para o equipamento. Os parâmetros mantidos constantes foram: a altura de 22 mm, a velocidade do fluido nos furos foi de $3,55 \times 10^{-5}$ m/s e a permeabilidade transversal (k_{zz}) foi de $2,47 \times 10^{-12}$ (m²). A Tabela 5.7 apresenta os resultados de independência de malha com relação a quantidade de volumes de direção transversal para as malhas com um e quatro furos centrais. Já a Tabela 5.8 mostra a comparação entre os resultados obtidos pelas malhas de diferentes disposições e geometrias para as portas de entrada (geometrias alternativas).

Tabela 5.7 – Independência de malha na direção transversal geometrias alternativas.

Nº de furos	Volumes na direção z	Volumes totais	Δp_{num} (Pa)	Diferença (%) (Eq.(4.10))
1	5	3558	2036	-
	10	6098	1764	13,38
	15	8638	1721	2,44
	20	11178	1716	0,27
	25	13718	1721	-0,28
4	5	4922	2794	-
	10	8432	2609	6,61
	15	11942	2581	1,08
	20	15452	2580	0,04
	25	18962	2586	-0,22

Tabela 5.8 – Comparação dos resultados das geometrias alternativas com os experimentais.

Tipos	Volumes na direção z	Volumes totais	Δp_{num} (Pa)	Δp_{exp} (Pa)	Diferença (%) (Eq.(4.10))
um furo	20	11178	6864	19426	64,66
quatro furos	20	15452	10319	19426	46,88

Os resultados se mostraram muito distantes daqueles obtidos experimentalmente e também daqueles obtidos numericamente mas com a mesma distribuição de furos do equipamento experimental. Assim, nenhuma das geometrias alternativas testadas numericamente apresentou resultados próximos àqueles obtidos pelas malhas com todos os furos de forma que a geometria usada no equipamento experimental é, aparentemente, a forma mais confiável de medir a permeabilidade transversal de reforços fibrosos.

5.2.2. Simulações com escoamento insaturado

Uma vez que no escoamento insaturado há o avanço da frente de escoamento, esta foi utilizada como parâmetro de controle e a variação da sua posição com relação ao tempo foi acompanhada em cada ensaio. A frente de escoamento foi considerada como sendo a região em que $0 < f < 1$ (Eq. (4.5), ou seja, a região no domínio computacional onde os volumes estavam parcialmente preenchidos pelo fluido. Os resultados numéricos dos testes com escoamentos insaturados foram comparados aos resultados da solução analítica obtidos através da Eq. (4.2 utilizando-se as mesmas condições de contorno. A pressão de injeção aplicada nos “*inlets*” foi de 10 kPa para todos os testes insaturados.

Assim, foi realizada uma comparação entre a malha da cavidade inteira e aquela com um quarto do tamanho pelo uso da ferramenta de simetria. Para tanto, inicialmente determinou-se a independência de malha com relação ao número de volumes na direção z. Esses resultados foram apresentados na Tabela 5.9 e na Tabela 5.10. Uma vez que o escoamento neste teste era retilíneo (ainda que na direção transversal) e não havia a presença dos furos, o número de volumes no plano XY o foi mantido constante e igual a 663 volumes.

Tabela 5.9 – Independência de malha na direção transversal usando a malha inteira.

Nº volumes em z	Tempo até 15 mm (s)	Diferença (%) (Eq.(4.10))
5	157,7	-
10	187,4	18,83
15	198,0	5,66
20	203,5	2,78
25	206,9	1,67
30	209,2	1,11

Tabela 5.10 – Independência de malha na direção transversal usando simetria.

Nº volumes em z	Tempo até 15 mm [s]	Diferença (%) (Eq.(4.10))
5	196,3	-
10	205,1	4,48
15	210,2	2,49
20	212,7	1,19
25	214,3	0,75

Pôde-se verificar pelos resultados apresentados na Tabela 5.9 que, conforme o número de volumes foi aumentado, a diferença em relação ao resultado anterior foi reduzindo até uma aparente estabilização da solução e, assim, considerou-se que a independência dos resultados com relação à malha foi atingida. A partir da malha com 25 volumes, a diferença com relação ao resultado anterior foi menor que 2% de forma que esta malha foi considerada independente para os objetivos deste trabalho. Os resultados obtidos nos testes de independência de malha para aquela que utiliza simetria mostraram que a partir de 20 volumes na direção z a diferença com relação ao resultado anterior foi menor do que 2%.

Na Tabela 5.11 foi apresentada a comparação entre as malhas inteira e com simetria já independentes e o resultado obtido pela solução analítica. Nesta análise, o tempo para que o fluido avance 15 mm dentro do molde foi utilizado como parâmetro de comparação.

Tabela 5.11 – Comparação entre as malhas inteira e com simetria, já independentes, e em relação ao modelo analítico.

	Nº volumes em z	Tempo até 15 mm [s]	Diferença com relação à solução analítica (%) (Eq.(4.10))
Modelo analítico	-	219,7	-
Inteira	25	206,9	5,6
Simetria	20	212,7	3,0

Viu-se que a diferença entre os resultados foi pequena (<10%) quando estes foram comparados ao modelo analítico. Além disso, a malha usando simetria apresentou uma diferença com relação ao resultado analítico ainda menor do que a malha inteira usando um menor número de volumes. Assim, optou-se por utilizar a malha com simetria na continuidade do estudo pois esta apresenta menor demanda computacional e consome um menor tempo para as simulações acelerando a obtenção dos resultados.

O estudo teve seguimento pela realização de simulações visando avaliar a influência da presença de furos de entrada e saída do fluido. Essas simulações foram separadas em 3 níveis de complexidade, incluindo um único furo na malha usando planos de simetria e quatro furos (Tabela 5.12), e usando a mesma quantidade de furos que o equipamento experimental (39 por quadrante) (Tabela 5.13). Da mesma forma que nas análises anteriores, aumentou-se o número de volumes na direção do eixo “z” até haver uma estabilização dos resultados.

Foi possível obter uma estabilização da solução com uma diferença menor que 1% para a malha com somente um furo com relativamente poucos volumes na direção transversal (25) e semelhante aos resultados encontrados nos testes anteriores. De forma similar, os resultados com quatro furos também tenderam a uma diferença entre eles de menos de 1%. O número de volumes que primeiro atingiu esse valor de diferença foi 25, sendo essa a malha considerada independente. Os resultados da malha com a mesma quantidade de furos do equipamento

experimental apresentados na Tabela 5.13 e mostraram valores muito similares aos obtidos anteriormente, com 25 volumes na direção transversal sendo considerada a malha independente já que a diferença com relação ao resultados anterior foi menor do que 1%.

Tabela 5.12 – Solução na direção transversal usando simetria e um furo ou quatro furos.

	Nº volumes em z	Tempo até 12 mm (s)	Diferença (%) (Eq.(4.10))
1 furo	5	206,1	-
	10	173,2	15,96
	15	166,3	3,98
	20	163,6	1,62
	25	162,2	0,86
4 furos	10	175,0	-
	15	169,0	3,43
	20	166,5	1,48
	25	165,2	0,78
	30	164,5	0,42

Tabela 5.13 – Solução na direção transversal usando simetria e todos os furos.

Nº de volumes em z	Tempo até 12 mm (s)	Diferença (%) (Eq.(4.10))
10	169,5	-
15	162,0	4,4
20	159,0	1,9
25	158,9	0,1

Assim, todas as malhas com simetria apresentaram independência com 25 volumes. O que se notou foi que a inclusão de um furo fez com a diferença dos resultados com relação aos resultados analíticos aumentasse. Além disso, notou-se que ao aumentar o número de volumes na direção z, o erro foi reduzido até apresentar uma aparente estabilização a partir de 25 volumes. Da mesma forma que nas análises anteriores, conforme aumentou o número de volumes na direção do eixo “z”, houve uma aproximação em relação aos resultados obtidos analiticamente.

Por fim, na Tabela 5.14 foi apresentada a comparação dos resultados das malhas independentes com a solução analítica e entre si utilizando o tempo que a frente de escoamento do fluido levou para percorrer a distância de 12 mm transversalmente desde a superfície inferior da geometria.

Tabela 5.14 – Comparação entre os resultados obtidos pelas malhas usando simetria: entrada igual a área total, com um furo e com quatro furos.

nº de furos	Tempo até 12 mm (s)	Diferença com relação à solução analítica (%) (Eq.(4.10))
Solução analítica	140,3	-
0	134,6	4,2
1	162,2	16,6
4	165,2	18,7
39	158,9	13,3

Para fins de comparação, optou-se pela comparação com o tempo que o fluido levou para atingir uma determinada altura, neste caso 12 mm. Assim, a partir da solução analítica, obteve-se o tempo total de 140,3 segundos e este resultado foi utilizado como parâmetro de comparação para os resultados obtidos numericamente. Considerando-se novamente que a área total de entrada de fluido foi mantida constante e o número de entradas aumentou, percebe-se que o aumento da distribuição da entrada não teve efeito perceptível no escoamento.

Notou-se que os resultados obtidos para a malha sem utilização de furos foi a mais próxima da solução analítica. Isso ocorreu devido a simplicidade da malha e do fato de o escoamento ser fundamentalmente retilíneo nessas condições o que aproxima o resultado numérico do analítico. Contudo, essa malha seria impossível de reproduzir experimentalmente uma vez que as camadas de reforço não teriam suporte o que tornaria a moldagem impossível. Ainda assim, foi um resultado interessante uma vez que apresentou uma diferença que somente pode ser atribuída aos erros da solução numérica sendo, dessa forma, inerentes desses testes. Assim, tomou-se esse erro como o mínimo possível para essa comparação.

Em seguida, consideramos as comparações com relação a diferentes quantidade de furos e percebemos que aquela com maior semelhança com o equipamento experimental apresentou resultados mais próximos à solução numérica. A partir disso, reiteramos a ideia de que uma melhor distribuição das portas de entrada com relação à área transversal total no qual ocorreu o escoamento é desejável uma vez a frente de escoamento avança de forma mais rápida e homogênea. Comparando os resultados de independência de malha obtidos pelos testes saturados e insaturados, percebemos uma proximidade muito grande com relação à quantidade de volumes em z , apesar de uma necessidade maior dos insaturados. Isso se deve à maior complexidade na solução das equações porque no regime saturado a fração volumétrica (4.5) é constante ao longo do tempo.

6. CONCLUSÕES

- Um equipamento para medidas de permeabilidade transversal foi projetado, construído e usado com sucesso na avaliação da permeabilidade saturada transversal de reforços fibrosos em uma ampla faixa de condições de teste.
- Uma ampla faixa de V_f foi avaliada, de 35 a 70%, e um perfil de comportamento similar foi verificado para todos os reforços, ou seja, um decréscimo da permeabilidade transversal com o aumento do teor de fibras.
- A porosidade entre feixes, está relacionada ao nível de compressão ao qual as camadas de reforços estão submetidas e têm um papel importante no escoamento transversal.
- Quando o nível de compressão é alto, o espaço entre as camadas é reduzido e, assim, o escoamento intra-feixe torna-se mais relevante que o escoamento entre os feixes reduzindo então o K_{zz} .
- O escoamento no plano ocorre nos espaços entre camadas, enquanto o escoamento transversal ocorre na porosidade intra-feixe, no espaço entre feixes e espaço entre camadas, com importância relativa entre eles variável conforme o V_f .
- No escoamento transversal (V_f alto), o escoamento local é alterado de primariamente no plano (progredindo em torno dos feixes de formato plano) para um caminho mais direto através da espessura apresentando valores mais baixos de K_{zz} devido à maior resistência ao escoamento dentro do feixe.
- Foi verificado que há uma espessura mínima da pré-forma que deve ser utilizada nos testes. Além disso, as medidas se mostraram independentes do tipo de fluido de teste e da temperatura de ensaio na faixa de 21°C a 57°C foi mínima.
- A razão K_{xx}/K_{zz} (ψ) dentro da faixa de 2 a 40 para os diversos reforços e variou de maneira diferente com o V_f para os diferentes reforços, aumentando para uns e decrescendo ou permanecendo quase constante para outros.
- Uma metodologia de estudo do escoamento de fluidos viscosos através de meios fibrosos foi aplicada e adaptada para as condições utilizadas no estudo experimental, ou seja, em regime saturado.

- Os resultados obtidos mostraram-se similares àqueles obtidos experimentalmente após terem sido realizados os testes de independência de malha para os volumes no plano e transversal.
- Relação entre a quantidade de volumes na direção $z = 0,68$ volumes/mm considerando que a utilização de alturas reduzidas das pré-formas em estudos de escoamento transversal é desaconselhável.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

- Automatização do registro e análise dos dados.
- Desenvolver um equipamento e uma metodologia para medir a permeabilidade transversal insaturada já que esta situação é mais próxima das condições reais de moldagem líquida de compósitos.
- Ensaiar reforços com arquiteturas distintas, preferencialmente, aqueles com costuras tridimensionais ou sem costura.
- Simular um domínio menor tratando mais especificamente da porosidade entre os feixes e o caminho médio do fluido ao escoar transversalmente através das camadas de reforço;
- Avaliar a influência da câmara cônica.
- Projetar e construir um cortador para as diferentes camadas de reforços.

7. REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, Debabrata; GURURAJA, Suhasini; HEMCHANDRA, Santosh. Vacuum infusion in porous preform with different mould configurations: Flow simulation and experimental validation. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, [s. l.], v. 40, n. 7–8, p. 321–338, 2021.
- AHN, Sung Hoon; LEE, Woo Il; SPRINGER, George S. Measurement of the Three-Dimensional Permeability of Fiber Preforms Using Embedded Fiber Optic Sensors. **Journal of Composite Materials**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 714–733, 1995.
- ALI, M.A. *et al.* Application of X-ray computed tomography for the virtual permeability prediction of fiber reinforcements for liquid composite molding processes: A review. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 184, p. 107828, 2019a.
- ALI, M.A. *et al.* Non-destructive evaluation of through-thickness permeability in 3D woven fabrics for composite fan blade applications. **Aerospace Science and Technology**, [s. l.], v. 82–83, p. 520–533, 2018.
- ALI, M.A. *et al.* XCT-scan assisted flow path analysis and permeability prediction of a 3D woven fabric. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 176, p. 107320, 2019b.
- AMICO, Sandro Campos. **Permeability and Capillary Pressure in the Infiltration of Fibrous Porous Media in Resin Transfer Moulding**. 2000. doctoral - University of Surrey, [s. l.], 2000. Disponível em: <http://epubs.surrey.ac.uk/1011/>. Acesso em: 11 jan. 2016.
- ARBTER, R. *et al.* Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 1157–1168, 2011.
- ASAAD, J.N.; TAWFIK, S.Y. Polymeric composites based on polystyrene and cement dust wastes. **Materials & Design**, [s. l.], v. 32, n. 10, p. 5113–5119, 2011.
- AZIZ, A.R. *et al.* Transverse permeability of dry fiber preforms manufactured by automated fiber placement. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 152, p. 57–67, 2017.
- BLAZEK, Jiri. **Computational fluid dynamics: principles and applications**. Boston, MA: Elsevier, 2015.
- BODAGHI, Masoud; CATALANOTTI, Giuseppe; CORREIA, Nuno. On the statistics of transverse permeability of randomly distributed fibers. **Composite Structures**, [s. l.], v. 158, p. 323–332, 2016.
- BUNTAIN, M. J.; BICKERTON, S. Compression flow permeability measurement: a continuous technique. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 34, n. 5, p. 445–457, 2003.
- C. W. HIRT, B. D. Nichols. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundary. **Journal of Computational Physics**, [s. l.], v. 39, n. 1, 1981.
- CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Materials science and engineering: an introduction**. 9th edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2014.

- CHAE, Hee-Sook; SONG, Young-Seok; YOUN, Jae-Ryoun. Transverse permeability measurement of a circular braided preform in liquid composite molding. **Korea-Australia Rheology Journal**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 17–25, 2007.
- CHIU, Tzu-Heng *et al.* Estimation of local permeability/porosity ratio in resin transfer molding. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, [s. l.], v. 91, p. 32–37, 2018.
- CHOI, Mi Ae *et al.* Permeability modeling of fibrous media in composite processing. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 79, n. 2–3, p. 585–598, 1998.
- CHUNG, Deborah D.L. **Composite Materials**. London: Springer London, 2010. (Engineering Materials and Processes). *E-book*. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-84882-831-5>. Acesso em: 14 maio 2021.
- CHUNG, T. J. **Computational Fluid Dynamics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- COMAS-CARDONA, S.; BINETRUY, C.; KRAWCZAK, P. Unidirectional compression of fibre reinforcements. Part 2: A continuous permeability tensor measurement. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 67, n. 3–4, p. 638–645, 2007.
- DESHPANDE, Suraj S; ANUMOLU, Lakshman; TRUJILLO, Mario F. Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam. **Computational Science & Discovery**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 014016, 2012.
- DRAPIER, S *et al.* Influence of the stitching density on the transverse permeability of non-crimped new concept (NC2) multiaxial reinforcements: measurements and predictions. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 62, n. 15, p. 1979–1991, 2002.
- ENDRUWEIT, A. *et al.* Effect of yarn cross-sectional shape on resin flow through inter-yarn gaps in textile reinforcements. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 104, p. 139–150, 2018.
- ESCHER, Mateus; DOS SANTOS, Daniel Borges. **Projeto mecânico de um equipamento para teste da permeabilidade transversal**. 2016. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, 2016.
- FANG, Liangchao *et al.* Effect of Nesting on the Out-of-Plane Permeability of Unidirectional Fabrics in Resin Transfer Molding. **Applied Composite Materials**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 231–249, 2014.
- GEBART, B.R. Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM. **Journal of Composite Materials**, [s. l.], v. 26, n. 8, p. 1100–1133, 1992.
- GODBOLE, Mayur G. *et al.* A semi-analytical model to characterize single ply and multiple plies UD-fabric permeability. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 136, p. 105951, 2020.
- GODBOLE, Mayur G. *et al.* Influence of filament distribution on transverse tow permeability: Model predictions and experimental validation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 118, p. 150–161, 2019.

GOKCE, Ali *et al.* Permeability estimation algorithm to simultaneously characterize the distribution media and the fabric preform in vacuum assisted resin transfer molding process. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 65, n. 14, p. 2129–2139, 2005.

GOURICHON, Boris *et al.* Dynamic void content prediction during radial injection in liquid composite molding. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 46–55, 2008.

GREVE, L.; PICKETT, A.K. Delamination testing and modelling for composite crash simulation. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 66, n. 6, p. 816–826, 2006.

HAN, Kerang *et al.* Flow modeling and simulation of SCRIMP for composites manufacturing. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 79–86, 2000.

HANCIOGLU, Mert; SOZER, E Murat; ADVANI, Suresh G. Comparison of in-plane resin transfer molding and vacuum-assisted resin transfer molding ‘effective’ permeabilities based on mold filling experiments and simulations. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, [s. l.], v. 39, n. 1–2, p. 31–44, 2020.

HEIDER, Dirk *et al.* Infusion design methodology for thick-section, low-permeability preforms using inter-laminar flow media. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 38, n. 2, p. 525–534, 2007.

HOLZMANN, Tobias. **Mathematics, Numerics, Derivations and OpenFOAM(R)**. [S. l.]: Holzmann CFD, 2017. *E-book*. Disponível em: <https://Holzmann-cfd.de>.

ILANKEERAN, Prasanna Kumar; MOHITE, Preetamkumar M.; KAMLE, Sudhir. Axial Tensile Testing of Single Fibres. **Modern Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 02, n. 04, p. 151–156, 2012.

JAGANATHAN, S.; VAHEDI TAFRESHI, H.; POURDEYHIMI, B. A realistic approach for modeling permeability of fibrous media: 3-D imaging coupled with CFD simulation. **Chemical Engineering Science**, [s. l.], v. 63, n. 1, p. 244–252, 2008.

JIANG, Shunliang *et al.* PCG solver and its computational complexity for implicit control-volume finite-element method of RTM mold filling simulation. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 67, n. 15–16, p. 3316–3322, 2007.

KIM, Jae-In *et al.* Prediction of the vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process considering the directional permeability of sheared woven fabric. **Composite Structures**, [s. l.], v. 211, p. 236–243, 2019.

KIM, Sun K; DANIEL, Isaac M. Determination of three-dimensional permeability of fiber preforms by the inverse parameter estimation technique. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 34, n. 5, p. 421–429, 2003.

KOŁODZIEJ, Jan A.; DZIECIELAK, Ryszard; KOŃCZAK, Zenon. Permeability Tensor for Heterogeneous Porous Medium of Fibre Type. **Transport in Porous Media**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 1–19, 1998.

- KOUTSONAS, Spiridon. Modelling race-tracking variability of resin rich zones on 90° composite 2.2 twill fibre curved plate. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 168, p. 448–459, 2018.
- KRACKE, C. *et al.* Interaction of textile variability and flow channel distribution systems on flow front progression in the RTM process. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 106, p. 70–81, 2018.
- LAURENZI, S. *et al.* Process simulation for a large composite aeronautic beam by resin transfer molding. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 57, p. 47–55, 2014.
- LECLERC, Jean Sébastien; RUIZ, Edu. Porosity reduction using optimized flow velocity in Resin Transfer Molding. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 39, n. 12, p. 1859–1868, 2008.
- LEKAKOU, C.; BADER, M.G. Mathematical modelling of macro- and micro-infiltration in resin transfer moulding (RTM). **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 29, n. 1–2, p. 29–37, 1998.
- LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- LIAKOPOULOS, A. C. DARCY'S COEFFICIENT OF PERMEABILITY AS SYMMETRIC TENSOR OF SECOND RANK. **International Association of Scientific Hydrology. Bulletin**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 41–48, 1965.
- LIAKOPOULOS, Aristides C. Variation of the permeability tensor ellipsoid in homogeneous anisotropic soils. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 135–141, 1965.
- LIU, Junling *et al.* Micro-flow model with a new algorithm of random fiber distribution over the transverse cross-section. **Polymer Composites**, [s. l.], v. 41, n. 12, p. 5006–5015, 2020.
- LUCE, Thomas L. *et al.* Permeability characterization. Part 2: Flow behavior in multiple-layer preforms. **Polymer Composites**, [s. l.], v. 16, n. 6, p. 446–458, 1995.
- LUGO, J.; SIMACEK, P.; ADVANI, S. G. Analytic method to estimate multiple equivalent permeability components from a single rectilinear experiment in liquid composite molding processes. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 67, p. 157–170, 2014.
- MAGAGNATO, Dino *et al.* Experimental and numerical study of the influence of integrated load transmission elements on filling behavior in resin transfer molding. **Composite Structures**, [s. l.], v. 198, p. 135–143, 2018.
- MALISKA, Clovis R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2a edição. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2004.
- MATSUMURA, Y.; JACKSON, T. L. Numerical simulation of fluid flow through random packs of polydisperse cylinders. **Physics of Fluids**, [s. l.], v. 26, n. 12, p. 123302, 2014.
- MERHI, D. *et al.* Transverse permeability of chopped fibre bundle beds. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 38, n. 3, p. 739–746, 2007.

MIKITAEV, Abdulakh K; LIGIDOV, Mikhail Kh; ZAIKOV, G. E. **Polymers, polymer blends, polymer composites, and filled polymers: synthesis, properties, and applications.** New York: Nova Science Publishers, 2006. *E-book*. Disponível em: <http://site.ebrary.com/id/10660349>. Acesso em: 14 maio 2021.

MORREN, Gerd *et al.* A reference specimen for permeability measurements of fibrous reinforcements for RTM. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 40, n. 3, p. 244–250, 2009.

MORREN, Gerd; BOSSUYT, Sven; SOL, Hugo. 2D permeability tensor identification of fibrous reinforcements for RTM using an inverse method. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 39, n. 9, p. 1530–1536, 2008.

NAIK, N. K.; SIRISHA, M.; INANI, A. Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM. **Progress in Aerospace Sciences**, [s. l.], v. 65, p. 22–40, 2014.

NASSEH, Jorge. **BARCOS - MÉTODOS AVANÇADOS DE CONSTRUÇÃO EM COMPOSITOS**. Rio de Janeiro: Própria, 2007.

NEDANOV, Pavel B.; ADVANI, Suresh G. A Method to Determine 3D Permeability of Fibrous Reinforcements. **Journal of Composite Materials**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 241–254, 2002.

OKONKWO, Kenneth. **3D permeability characterization of fibrous media**. 2010. Thesis - University of Delaware, [s. l.], 2010. Disponível em: <http://udspace.udel.edu/handle/19716/5953>. Acesso em: 31 maio 2016.

OKONKWO, K. *et al.* Characterization of 3D fiber preform permeability tensor in radial flow using an inverse algorithm based on sensors and simulation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 42, n. 10, p. 1283–1292, 2011.

OUAGNE, Pierre *et al.* Continuous measurement of fiber reinforcement permeability in the thickness direction: Experimental technique and validation. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 609–618, 2013.

OUAGNE, P.; BRÉARD, J. Continuous transverse permeability of fibrous media. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 41, n. 1, Special Issue: Flow Processes in Composite Materials, p. 22–28, 2010.

POODTS, E. *et al.* Fabrication, process simulation and testing of a thick CFRP component using the RTM process. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 56, p. 673–680, 2014.

RIMMEL, Oliver; MAY, David. Modeling transverse micro flow in dry fiber placement preforms. **Journal of Composite Materials**, [s. l.], v. 54, n. 13, p. 1691–1703, 2020.

RUDD, Chris D.; SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (org.). **Liquid moulding technologies: resin transfer moulding, structural reaction injection moulding and related processing techniques**. Cambridge: Woodhead Publ, 1997.

SAOUAB, A. *et al.* Injection simulations of thick composite parts manufactured by the RTM process. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 61, n. 3, p. 445–451, 2001.

SAS, Hatice S. *et al.* Effect of relative ply orientation on the through-thickness permeability of unidirectional fabrics. **Composites Science and Technology**, [*s. l.*], v. 96, p. 116–121, 2014.

SCHNEIDER, Caroline A; RASBAND, Wayne S; ELICEIRI, Kevin W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, [*s. l.*], v. 9, n. 7, p. 671–675, 2012.

SCHOLZ, Sebastian; GILLESPIE JR., John W.; HEIDER, Dirk. Measurement of transverse permeability using gaseous and liquid flow. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [*s. l.*], v. 38, n. 9, p. 2034–2040, 2007.

SHI, Fei; DONG, Xianghuai. 3D numerical simulation of filling and curing processes in non-isothermal RTM process cycle. **Finite Elements in Analysis and Design**, [*s. l.*], v. 47, n. 7, p. 764–770, 2011.

SHIN, K.S.; SONG, Y.S.; YOUN, J.R. Radial flow advancement in multi-layered preform for resin transfer molding. **Rheology Journal**, [*s. l.*], v. 18, n. 4, p. 217–224, 2006.

SHOU, Dahua; FAN, Jintu; DING, Feng. Hydraulic permeability of fibrous porous media. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [*s. l.*], v. 54, n. 17–18, p. 4009–4018, 2011.

SYERKO, Elena *et al.* A numerical approach to design dual-scale porosity composite reinforcements with enhanced permeability. **Materials & Design**, [*s. l.*], v. 131, p. 307–322, 2017.

TAN, Hua; ROY, Tonmoy; PILLAI, Krishna M. Variations in unsaturated flow with flow direction in resin transfer molding: An experimental investigation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [*s. l.*], v. 38, n. 8, p. 1872–1892, 2007.

THOMPSON, Joe F.; SONI, B. K.; WEATHERILL, N. P. (org.). **Handbook of grid generation**. Boca Raton, Fla: CRC Press, 1999.

TREVINO, L. *et al.* Analysis of resin injection molding in molds with preplaced fiber mats. I: Permeability and compressibility measurements. **Polymer Composites**, [*s. l.*], v. 12, n. 1, p. 20–29, 1991.

VAFAI, K. (org.). **Handbook of porous media**. Third editioned. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.

VAIDYA, U.K; ABRAHAM, A; BHIDE, S. Affordable processing of thick section and integral multi-functional composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [*s. l.*], v. 32, n. 8, p. 1133–1142, 2001.

VERNET, N. *et al.* Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [*s. l.*], v. 61, p. 172–184, 2014.

WEITZENBÖCK, J. R.; SHENOI, R. A.; WILSON, P. A. Measurement of three-dimensional permeability. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [*s. l.*], v. 29, n. 1, Selected Papers Presented at the Fourth International Conference on Flow Processes in Composite Material, p. 159–169, 1998.

WOERDEMAN, Dara L.; PHELAN, Frederick R.; PARNAS, Richard S. Interpretation of 3-D permeability measurements for RTM modeling. **Polymer Composites**, [s. l.], v. 16, n. 6, p. 470–480, 1995.

WOUDBERG, S. Permeability prediction of an analytical pore-scale model for layered and isotropic fibrous porous media. **Chemical Engineering Science**, [s. l.], v. 164, p. 232–245, 2017.

WU, Cheng-Hsien; JAMES WANG, T.; JAMES LEE, L. Trans-plane fluid permeability measurement and its applications in liquid composite molding. **Polymer Composites**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 289–298, 1994.

YAZDCHI, K.; SRIVASTAVA, S.; LUDING, S. Microstructural effects on the permeability of periodic fibrous porous media. **International Journal of Multiphase Flow**, [s. l.], v. 37, n. 8, p. 956–966, 2011.

YENILMEZ, Bekir; SENAN, Murat; MURAT SOZER, E. Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 69, n. 11–12, Experimental Techniques and Design in Composite Materials (ETDCM8) with Regular Papers, p. 1710–1719, 2009.

YI, Xiao-Su; DU, Shanyi; ZHANG, Litong (org.). **Composite Materials Engineering, Volume 1**. Singapore: Springer Singapore, 2018. *E-book*. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-5696-3>. Acesso em: 14 maio 2021.

YUN, Minyoung *et al.* Characterization of 3D fabric permeability with skew terms. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], 2017a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X16304456>. Acesso em: 6 fev. 2017.

YUN, Min-young *et al.* Manifold embedding of heterogeneity in permeability of a woven fabric for optimization of the VARTM process. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 168, p. 238–245, 2018.

YUN, Minyoung *et al.* Stochastic modeling of through the thickness permeability variation in a fabric and its effect on void formation during Vacuum Assisted Resin Transfer Molding. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 149, p. 100–107, 2017b.

ZARANDI, M. Amin F.; ARROYO, Salvador; PILLAI, Krishna M. Longitudinal and transverse flows in fiber tows: Evaluation of theoretical permeability models through numerical predictions and experimental measurements. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 119, p. 73–87, 2019.

ZHU, Q. Y. *et al.* A fractal model for the coupled heat and mass transfer in porous fibrous media. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 54, n. 7–8, p. 1400–1409, 2011.

ZIMMERMANN, K.; ZENKERT, D.; SIEMETZKI, M. Testing and analysis of ultra thick composites. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 326–336, 2010.