

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

DETERMINAÇÃO NUMÉRICO-ANALÍTICO-EXPERIMENTAL DA PERMEABILIDADE
TRANSVERSAL DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS UTILIZADOS EM PROCESSOS DE
MOLDAGEM LÍQUIDA

por

Cristiano Peres Oliveira

Tese de Doutorado para obtenção do Título de Doutor em Modelagem Computacional

Rio Grande, dezembro de 2019.

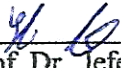
Cristiano Peres Oliveira

“Determinação Numérico-Analítico-Experimental da Permeabilidade Transversal de Compósitos Híbridos Utilizados em Processos de Moldagem Líquida”

Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor. Área concentração: Modelagem Computacional.

Aprovado em

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jeferson Avila Souza
Orientador – FURG



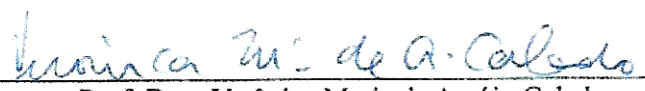
Prof. Dr. Sandro Campos Amico
Coorientador – UFRGS



Prof. Dr. Liércio André Isoldi
FURG



Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
FURG



Prof. Dra. Verônica Maria de Araújo Calado
UFRJ

Ficha Catalográfica

O48d Oliveira, Cristiano Peres.

Determinação numérico-analítico-experimental da permeabilidade transversal de compósitos híbridos utilizados em processos de moldagem líquida / Cristiano Peres Oliveira. – 2019.
141 f.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS, 2019.

Orientador: Dr. Jeferson Avila Souza.

Coorientador: Dr. Sandro Campos Amico.

1. Permeabilidade 2. Simulação Numérica 3. Axissimétrico
4. Tridimensional 5. Ensaios Experimentais 6. Volumes Finitos
I. Souza, Jeferson Avila II. Amico, Sandro Campos III. Título.

CDU 004.383.4

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer à Deus, pelo dom da vida, pela chance de recomeçar e reescrever a minha história.

Ao meu orientador Prof. Jeferson, exemplo de profissional. Por toda dedicação, ensinamentos e pela confiança.

Ao meu coorientador Prof. Sandro Amico, por ter compartilhado seus conhecimentos.

À CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro na realização desse trabalho.

À Unipampa por me liberar dos meus encargos docentes para me dedicar a esse trabalho.

À todos que diretamente contribuíram nessa caminhada, meu amor, meus pais, irmã, filhas e amigos. Essa conquista é um pouco de cada um de vocês, pois na vida não se faz nada sozinho.

“É exatamente disso que a vida é feita: de momentos! Momentos os quais temos que passar, sendo bons ou não, para o nosso próprio aprendizado, por algum motivo. Nunca esquecendo do mais importante: nada na vida é por acaso...”

Francisco Cândido Xavier

RESUMO

Este trabalho concentra-se em determinar a permeabilidade transversal de compósitos homogêneos e híbridos. Baseado nos dados de pressão e vazão, obtidos experimentalmente, um modelo matemático baseado na resistência ao escoamento foi desenvolvido com o objetivo de determinar as permeabilidades dos materiais utilizados no composto híbrido (kevlar e vidro-E). Em uma etapa seguinte, a modelagem numérica foi realizada a partir dos dados provenientes dos ensaios experimentais. Dois tipos de simulações numéricas foram testados e validados por comparação direta com dados experimentais: axissimétrico e tridimensional. Os dois métodos numéricos apresentaram resultados muito similares, portanto, o modelo axissimétrico, que tem menor tempo de processamento, foi selecionado e utilizado em todas as simulações. Como primeiro resultado deste trabalho, foi proposto e verificado que a área da secção transversal usada para determinar a permeabilidade deve ser a área real do escoamento, ou seja, deve-se considerar apenas a área dos furos da placa perfurada. Todos os trabalhos encontrados na literatura utilizam a área total da secção transversal. Outra contribuição deste trabalho, para o estado da arte, diz respeito ao desenvolvimento do modelo axissimétrico, o qual permitiu, com um menor tempo de simulação, a geração de resultados praticamente idênticos aos obtidos com o modelo numérico tridimensional. O último resultado importante está relacionado à metodologia proposta para determinação da permeabilidade transversal, que é capaz de calcular, por meio de um único experimento, a permeabilidade de cada um dos reforços fibrosos (de diferentes materiais) em compósitos híbridos multicamadas. Isto foi possível aliando-se a utilização de dados experimentais, o modelo analítico desenvolvido e um conjunto de simulações numéricas.

Palavras-chave: Permeabilidade, Simulação Numérica, Axissimétrico, Tridimensional, Ensaios Experimentais, Volumes Finitos.

ABSTRACT

This work focuses on determining the transverse permeability of homogeneous and hybrid composites (of different materials). Based on the pressure and flow data experimentally obtained, a mathematical model based on the flow resistance was developed in order to determine the materials permeabilities of the hybrid compound (kevlar and E-glass). In a following step, numerical modeling was performed based on data from experimental tests. Two types of numerical simulations were tested and validated by direct comparison with experimental data: axisymmetric and three-dimensional. The two numerical methods presented very similar results; therefore, the axisymmetric model, which running time is much smaller, was selected and used in all simulations. As a first result of this work, it was proposed and verified that the cross-section area used to determine the permeability must be the actual flow area, that is, only the holes area of the perforated plate must be considered. All works found in the literature have used the total cross-sectional area. Another current work contribution to the State of the Art concerns to the development of the axisymmetric model, which allowed, with a shorter simulation time, the attainment of results practically identical to those obtained with the three-dimensional numerical model. The last important result is related to the proposed methodology for the transverse permeability determination, which is able to calculate, through a single experiment, the permeability of each of the fibrous reinforcements (of different materials) in multilayered hybrid composites. This was possible by combining the use of experimental data, the developed analytic model and a set of numerical simulations.

Keywords: Permeability, Numerical Simulation, Axisimetric, Three Dimensional, Experimental Tests.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Hipótese Científica.....	18
1.2. Motivações.....	18
1.3. Objetivo.....	19
2. ESTADO DA ARTE.....	21
2.1. O Processo de Moldagem Líquida.....	21
2.2. A Importância dos Estudos Numéricos.....	23
2.3. Permeabilidade Transversal.....	26
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	34
3.1. Modelagem Numérica.....	34
3.1.1. Volume of Fluid (VOF).....	34
3.2. Resistências ao Escoamento.....	36
4. Modelagem Computacional.....	41
4.1. Simulação Numérica.....	43
5. Ensaios Experimentais.....	47
5.1. Materiais Utilizados.....	47
5.1.1. Ensaios Homogêneos – Grupo LaPol.....	52
5.1.2. Ensaios de Espessura de Camadas.....	55
6. RESULTADOS.....	56
6.1. Resultados Experimentais.....	56
6.1.1. Resultados dos Ensaios Homogêneos.....	56
6.1.2. Resultados dos Ensaios Homogêneos da Literatura – Nova Proposta.....	60
6.1.3. Resultados dos Ensaios Híbridos.....	62
6.1.4. Experimentos para Determinação da Espessura de Camadas.....	71
6.1.5. Experimento sem Reforço Fibroso.....	73
6.2. Resultados Analíticos.....	73
6.3. Resultados Numéricos.....	81
6.3.1. Estudo de solução independente de malha.....	81
6.3.1.1. Modelo Axissimétrico.....	81
6.3.1.2. Modelo Tridimensional.....	82
6.3.2. Validação dos Modelos Numéricos.....	82
6.3.3. Comparação entre os modelos axissimétrico e tridimensional nas soluções com reforço fibroso.....	84

6.3.4. Simulação dos ensaios homogêneos.....	87
6.3.5. Simulação dos Ensaios Híbridos.....	94
7. CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE.....	100
8. REFERÊNCIAS.....	103
Apêndice A – Resultados Experimentais.....	111
Apêndice B – Comparação Axissimétrica x Tridimensional.....	116
Apêndice C – Equações de Ajuste da Permeabilidade nos Ensaios Híbridos.....	122
Apêndice D – Resultados Numéricos.....	125
Apêndice E – Tutorial.....	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Esquema de arranjo de fibras e as resistências de cada meio poroso.....	37
Figura 4.1. Domínio computacional tridimensional (a) Vista superior (b) Corte no plano xz.....	41
Figura 4.2. Condições de contorno do modelo tridimensional (Fonte: Elaborado pelo autor).....	42
Figura 4.3. Condições de contorno do modelo axissimétrico (Fonte: Elaborado pelo autor).....	43
Figura 5.1. Representação do molde experimental (Fonte: Escher e Santos, 2016).....	47
Figura 5.2. Tecido da fibra de vidro-E.....	48
Figura 5.3. Tecido da fibra de kevlar.....	48
Figura 5.4. Visão em corte do molde experimental (Fonte: Escher e Santos, 2016).....	49
Figura 5.5. Detalhes do molde: (a) Placa perfurada. (b) Tampa superior. (Fonte: Escher e Santos, 2016).....	50
Figura 5.6. Aparato experimental (Fonte: Elaborado pelo autor).....	51
Figura 5.7. Relação permeabilidade x altura com kevlar. Fonte: (Trindade et al., 2019).....	53
Figura 5.8. Relação permeabilidade x altura com vidro-E. Fonte: (Trindade et al., 2019).....	54
Figura 5.9. Prensa hidráulica.....	55
Figura 6.1. Representação da placa perfurada com 56 furos tapados.....	58
Figura 6.2. Relação V_f x permeabilidade para os ensaios homogêneos.....	59
Figura 6.3. Comparação dos valores de permeabilidade do kevlar utilizando a metodologia proposta neste trabalho.....	60
Figura 6.4. Comparação dos valores de permeabilidade de vidro-E utilizando a metodologia proposta neste trabalho.....	61
Figura 6.5. Comparação ensaios híbridos x ensaios homogêneos 15,88 mm - V_f de 36%.....	64
Figura 6.6. Comparação ensaios híbridos x ensaios homogêneos 15,88 mm - V_f de 50%.....	64
Figura 6.7. Teste de Fisher para a altura de 15,88 mm - V_f de 36%.....	65
Figura 6.8. Teste de Fisher para a altura de 15,88 mm - V_f de 50%.....	66
Figura 6.9. Comparação ensaios híbridos x ensaios homogêneos - V_f de 36%, altura de 22,23 mm.	68
Figura 6.10. Comparação dos ensaios híbridos x ensaios homogêneos - V_f de 50%.....	69
Figura 6.11. Teste de Fisher para a altura de 22,23 mm - V_f de 36%.....	69
Figura 6.12. Teste de Fisher para a altura de 22,23 mm - V_f de 50%.....	70
Figura 6.13. Ensaio de compressão V_f de 36%: a) 24G14K, b) 33G11K, c) 42G8K.....	71
Figura 6.14. Ensaio de compressão V_f de 50%: a) 30G20K, b) 45G15K, c) 61G10K.....	72

Figura 6.15. Gráfico resistência x altura para os ensaios de vidro-E.....	76
Figura 6.16. Gráfico resistência x altura para os ensaios de kevlar.....	76
Figura 6.17. Resistência total dos híbridos com Vf de 36% x homogêneos – kevlar.....	78
Figura 6.18. Resistência total dos híbridos com Vf de 36% x homogêneos – vidro-E.....	79
Figura 6.19. Resistência total dos híbridos com Vf de 50% x homogêneos – kevlar.....	80
Figura 6.20. Resistência total dos híbridos com Vf de 50% x homogêneos – vidro-E.....	80
Figura 6.21. Comparação Gradiente de Pressão: a) Vf = 34,91%, b) Vf = 49,88%.....	93
Figura 6.22. Comparação Linhas de Corrente: a) Vf 34,91%, b) Vf 49,88%.....	94
Figura 6.23. Domínio computacional axissimétrico utilizado em simulações de casos híbridos.....	95
Figura 6.24. Relação ΔP Numérico x ΔP Experimental – 33G11K.....	97
Figura C1. Relação ΔP Numérico x ΔP Experimental – 24G14K.....	122
Figura C2. Relação ΔP Numérico x ΔP Experimental – 42G8K.....	122
Figura C3. Relação ΔP Numérico x ΔP Experimental – 30G20K.....	123
Figura C4. Relação ΔP Numérico x ΔP Experimental – 45G15K.....	123
Figura C5. Relação ΔP Numérico x ΔP Experimental – 61G10K.....	124
Figura E1. Condições de contorno arquivo boundary.....	135
Figura E2. Condições de contorno arquivo transportProperties.....	136
Figura E3. Condições de contorno arquivo p_rgh: a) Pressão constante, b) Variação de Pressão...136	136
Figura E4. Condições de contorno arquivo U.....	137
Figura E5. Condições de contorno arquivo alpha.resin.....	137
Figura E6. Exemplo do arquivo pressureTable.txt.....	138
Figura E7. Condições do arquivo fvOptions.....	139
Figura E8. Esquema de interpolação do termo divergente.....	139
Figura E9. Configuração arquivo setFields.....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Parâmetros de controle da solução numérica.....	45
Tabela 5.1. Dados experimentais para reforços homogêneos de kevlar.....	52
Tabela 5.2. Dados experimentais para reforços homogêneos de vidro-E (Trindade et al., 2019).....	54
Tabela 6.1. Dados experimentais de permeabilidade para reforços homogêneos de kevlar – Vf 36,5%.....	57
Tabela 6.2. Dados experimentais de permeabilidade para reforços homogêneos.....	59
Tabela 6.3. Dados experimentais de permeabilidade para reforços híbridos com 15,88 mm – 36% Vf	63
Tabela 6.4. Dados experimentais de permeabilidade para reforços híbridos 22,23 mm – 36% Vf....	67
Tabela 6.5. Resultados da espessura de camadas para reforços híbridos – 36% Vf.....	71
Tabela 6.6. Resultados da espessura de camadas para reforços híbridos – 50% Vf.....	72
Tabela 6.7. Dados experimentais do experimento sem o reforço fibroso.....	73
Tabela 6.8. Resistência total para o reforço de vidro-E.....	74
Tabela 6.9. Resistência total para o reforço de kevlar.....	75
Tabela 6.10. Resistências do caso 24G14K.....	77
Tabela 6.11. Resumo do cálculo das resistências para os experimentos híbridos.....	77
Tabela 6.12. Estudo de solução independente de malha axissimétrica.....	81
Tabela 6.13. Estudo de solução independente de malha tridimensional.....	82
Tabela 6.14. Validação do modelo numérico axissimétrico e tridimensional.....	83
Tabela 6.15. Comparação numérico axissimétrica x tridimensional – Kevlar Vf = 34,91%.....	85
Tabela 6.16. Comparação numérico axissimétrica x tridimensional para diferentes Vf – Kevlar....	86
Tabela 6.17. Comparação numérico axissimétrica x tridimensional – Vidro-E Vf = 34,13%.....	86
Tabela 6.18. Comparação numérico axissimétrica x tridimensional para diferentes Vfs – Vidro-E.....	87
Tabela 6.19. Resultados dos ensaios homogêneos de kevlar - Vf de 50%.....	88
Tabela 6.20. Resultados da determinação da permeabilidade com o processo iterativo.....	90
Tabela 6.21. Resultados dos ensaios homogêneos de kevlar – Vf de 50% Permeabilidade corrigida $K_{num} = 1,16 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$	91
Tabela 6.22. Parâmetros de entrada das simulações homogêneas.....	91
Tabela 6.23. Resumo dos resultados dos ensaios homogêneos.....	92
Tabela 6.24. Dados de entrada para as simulações dos ensaios híbridos.....	95
Tabela 6.25. Resultados numéricos para o ensaio 33G11K.....	96
Tabela 6.26. Resultados numéricos do ensaio 33G11K com a permeabilidade corrigida.....	98

Tabela 6.27. Resumo dos resultados numéricos para os ensaios híbridos.....	99
Tabela A1. Recompilação dos dados experimentais de Trindade et al. (2019) para a determinação da permeabilidade transversal – Kevlar.....	111
Tabela A2. Recompilação dos dados experimentais de Trindade et al. (2019) para a determinação da permeabilidade transversal – Vidro-E.....	111
Tabela A3. Dados experimentais para reforços híbridos: 15,88 mm – 36% Vf.....	112
Tabela A4. Dados experimentais para reforços híbridos: 15,88 mm – 50% Vf.....	113
Tabela A5. Dados experimentais para reforços híbridos: 22,23 mm – 36% Vf.....	114
Tabela A6. Dados experimentais para reforços híbridos: 22,23 mm – 50% Vf.....	115
Tabela B1. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Kevlar Vf 41,56%.....	116
Tabela B2. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Kevlar Vf 49,88%.....	117
Tabela B3. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Kevlar Vf 56,53%.....	117
Tabela B4. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Kevlar Vf 63,18%.....	118
Tabela B5. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Kevlar Vf 69,83%.....	119
Tabela B6. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Vidro-E Vf 40,63%.....	119
Tabela B7. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Vidro-E Vf 49,30%.....	120
Tabela B8. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Vidro-E Vf 64,46%.....	120
Tabela B9. Comparação numérico axissimétrico x experimental – Vidro-E Vf 68,80%.....	121
Tabela D1. Resultados dos ensaios homogêneos de kevlar - Vf de 36%.....	125
Tabela D2. Resultados numéricos para o processo iterativo kevlar Vf de 36%.....	125
Tabela D3. Resultados numéricos dos ensaios homogêneos de kevlar – Vf de 36% Permeabilidade corrigida.....	126
Tabela D4. Resultados numéricos dos ensaios homogêneos de vidro-E - Vf de 50%.....	126
Tabela D5. Resultados numéricos do processo iterativo vidro-E Vf de 50%.....	127
Tabela D6. Resultados numéricos dos ensaios homogêneos de vidro-E – Vf de 50% Permeabilidade corrigida.....	127
Tabela D7. Resultados numéricos dos ensaios homogêneos de vidro-E - Vf de 36%.....	128
Tabela D8. Resultados numéricos do processo iterativo vidro-E Vf de 36%.....	128
Tabela D9. Resultados numéricos dos ensaios homogêneos de vidro-E – Vf de 36% Permeabilidade corrigida.....	129
Tabela D10. Resultados numéricos para o ensaio 24G14K.....	129
Tabela D11. Resultados numéricos do ensaio 24G14K com a permeabilidade corrigida.....	130
Tabela D12. Resultados numéricos do ensaio 42G8K.....	130
Tabela D13. Resultados numéricos do ensaio 42G8K com a permeabilidade corrigida.....	131

Tabela D14. Resultados numéricos do ensaio 30G20K.....	131
Tabela D15. Resultados numéricos do ensaio 30G20K com a permeabilidade corrigida.....	132
Tabela D16. Resultados numéricos do ensaio 45G15K.....	132
Tabela D17. Resultados numéricos do ensaio 45G15K com a permeabilidade corrigida.....	133
Tabela D18. Resultados numéricos do ensaio 61G10K.....	133
Tabela D19. Resultados numéricos do ensaio 61G10K com a permeabilidade corrigida.....	134

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área [m ²]
Co	Número de Courant
D	Diferença média entre o ΔP numérico e o ΔP experimental [%]
E	Potencial elétrico [V]
f	Fração volumétrica
f'	Derivada da função
$\vec{F}$	Termo fonte [N]
$\vec{g}$	Aceleração da gravidade [m/s ²]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² ·K]
h_g	Altura de vidro-E [mm]
h_k	Altura de kevlar [mm]
h_p	Passo de integração
h_1, h_2	Altura de cada camada [m]
I	Corrente elétrica [A]
k	Condutividade térmica [W/(m·K)]
K	Permeabilidade do meio poroso [m ²]
K_{exp}	Permeabilidade medida experimentalmente [m ²]
K_{num}	Permeabilidade medida numericamente [m ²]
$\bar{\bar{K}}$	Tensor de permeabilidade [m ²]
L	Comprimento [m]
m_c	Massa por camada [kg]
m_f	Massa de fibras [kg]
n	Número de iterações
n_c	Número de camadas
P	Pressão [Pa]
q_x	Taxa de transferência de calor [W]
R_e	Resistência elétrica [Ω]
R_g	Resistência de vidro-E [N·s/m ³]
R_k	Resistência de kevlar [N·s/m ³]
R_t	Resistência térmica total [K/W]
$R_{t,cond}$	Resistência térmica por condução [K/W]
$R_{t,conv}$	Resistência térmica por convecção [K/W]
t	Tempo [s]

T	Temperatura [K]
$\vec{v}$	Vetor velocidade [m/s]
$\dot{V}$	Vazão Volumétrica [m³/s]
V	Volume do Molde [m³]
V_f	Volume de Fibras [%]
V_{f_c}	Volume de Fibras por camada [%]
$v_{f_{g-35}}$	Volume de Fibras de Vidro-E com 35%
$v_{f_{g-40}}$	Volume de Fibras de Vidro-E com 40%
$v_{f_{k-35}}$	Volume de Fibras de Kevlar com 35%
$v_{f_{k-40}}$	Volume de Fibras de Kevlar com 40%
x, y, z	Eixos coordenados [m]

Símbolos gregos

ΔP	Diferença de pressão [Pa]
Δz	Altura de cada camada [m]
ΔP_{exp}	Diferença de pressão obtida experimentalmente [Pa]
ΔP_{num}	Diferença de pressão obtida numericamente [Pa]
ε	Porosidade
μ	Viscosidade [Pa·s]
ρ	Massa Específica [m³/kg]
σ	Condutividade Elétrica [1/(Ω·m)]
$\bar{\tau}$	Tensor de Tensões [Pa]

Subíndices

exp	Experimental
G	Vidro-E
K	Kevlar
num	Numérico

LISTA DE ABREVIATURAS

FE/CV	Elementos finitos/Volume de controle
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
LabSin	Laboratório de Simulação Numérica
LaPol	Laboratório de Polímeros
LIMS	<i>Liquid Injection Molding Simulation</i>
ML	Moldagem Líquida
PPG3M	Programa de Pós-Graduação em Minas, Metalurgia e Materiais
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VARTM	Moldagem à Vácuo por Transferência de Resina
VOF	<i>Volume of Fluid</i>

1. INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação estão em constantes transformações que, invariavelmente, visam a diminuir custos, otimizar e aumentar a produção. Nesse contexto, encontram-se também os processos de Moldagem Líquida (ML), que com o avanço do consumo de materiais compósitos têm despertado interesse industrial e, consequentemente, empreendido esforços na busca de alternativas que otimizem os processos de fabricação.

Destaca-se que os processos de moldagem realizados em moldes fechados têm se propagado como uma alternativa bastante interessante do ponto de vista industrial, pois possibilitam a produção em larga escala (Yashiro et al. 2019), além de apresentarem um menor custo de fabricação (Godbole et al. 2019). Resumidamente, a fabricação por moldagem líquida compreende uma gama de processos de injeção em que uma resina polimérica é injetada na cavidade de um molde (metálico ou não) previamente preenchido com um reforço fibroso. Após a cura, o molde é aberto e a peça encontra-se (normalmente) já na sua forma final, sem a necessidade de processos adicionais de acabamento (Amorim, 2007). Como exemplos desse tipo de processo, podem ser citados o RTM (*Resin Transfer Molding*), RTM-Light, infusão, entre outros.

Inúmeros processos utilizam-se de materiais compósitos. No entanto, este trabalho se dedicará a discutir um dos processos de moldagem líquida em moldes fechados denominado Moldagem por Transferência de Resina (RTM). Destaca-se que esses processos têm um menor impacto ambiental, ponto importantíssimo na conjuntura atual, em que a sociedade exige um maior cuidado e a preservação do meio ambiente.

Um dos objetivos principais da indústria é a obtenção de peças com boa qualidade e, para isso, é necessário um controle preciso das variáveis do processo. No caso de problemas de Moldagem Líquida, destaca-se a pressão de injeção, localização dos pontos de injeção e saída de resina/ar, as propriedades físicas da resina, tais como viscosidade e massa específica, e as propriedades físicas do reforço fibroso, como volume de fibras e permeabilidade. Considerando que os processos de Moldagem Líquida ainda estão em expansão, principalmente no Brasil, essas variáveis de interesse ainda requerem um maior estudo por parte da comunidade científica. Nesse sentido, o presente trabalho buscará apresentar respostas efetivas, principalmente no que tange à permeabilidade transversal do meio poroso em moldes preenchidos com diferentes reforços fibrosos que, oportunamente, serão definidos como moldagem líquida multicamadas. Destaca-se que, apesar de se encontrar inúmeros trabalhos com o foco na determinação da permeabilidade, tanto do plano

como transversal, há uma dificuldade em padronizar a forma como é determinada a permeabilidade. Outra dificuldade constatada na literatura refere-se à variabilidade dos valores encontrados por diferentes grupos de pesquisadores, a qual fica evidenciada no trabalho de Vernet et al. (2014) em que no segundo *benchmark* internacional ficou decidido que diferenças de até 25% seriam consideradas aceitáveis, desde que os experimentos tivessem valores similares de parâmetros como volume de fibras, pressão de injeção e viscosidade do fluido.

No presente trabalho, foram realizados ensaios em laboratório na UFRGS juntamente ao Programa de Pós-Graduação em Minas, Metalurgia e Materiais (PPG3M) no LaPol. Nos ensaios experimentais, foram utilizadas fibras como Kevlar e Vidro-E em diferentes empilhamentos para que se pudesse avaliar a efetiva influência da interface nos problemas de Moldagem Líquida.

Posteriormente, junto ao Laboratório de Simulação Numérica (LabSiN) da FURG, foi desenvolvido o modelo numérico e realizadas as simulações dos experimentos. No estudo numérico, foram utilizados softwares livres em todas as etapas do estudo. No pré-processamento, para geração da malha e discretização do domínio computacional, foi utilizado o Gmsh. No processamento da simulação, foi utilizado o método dos Volumes Finitos por meio do OpenFOAM 6.0 (Weller, Greenshields, Rouvray, 2015) e para o pós-processamento foi utilizado o software VisIt 2.10.

1.1. Hipótese Científica

Provar que é possível, a partir de dados experimentais de um experimento híbrido (multicamadas), combinado com uma formulação analítica para a resistência total do meio poroso, determinar-se a permeabilidade dos diferentes materiais.

1.2. Motivações

A indústria pauta seu trabalho na busca constante por aprimoramento de processos de produção e, conseqüentemente, incentiva com essa prática o desenvolvimento de pesquisas científicas que visem a dar subsídios para que novas técnicas sejam utilizadas. Essas práticas precisam aliar desenvolvimento e inovação tecnológica, redução de custos e, conseqüentemente, maior retorno financeiro. Nesse sentido, destaca-se o crescimento de utilização de materiais compósitos.

No processo de busca por maior retorno financeiro pode-se recorrer ao estudo de Amorim (2007) quando cita que o foco de desenvolvimento dos compósitos mudou durante os anos 80 e 90, de *design for minimal weight* (projeto para mínimo peso) para *design for cost* (projeto para mínimo custo).

A fabricação de uma peça de material compósito exige que sejam estabelecidos alguns parâmetros do projeto como: tamanho, forma, peso, tensões que deve suportar, entre outras características. A partir disso, parâmetros como permeabilidade, densidade, tipo de resina e meio poroso adequados devem ser escolhidos a fim de que a peça possua as características desejadas.

Dentre todos os parâmetros citados, neste trabalho foram empreendidos esforços para estudar a importância da permeabilidade transversal no escoamento da resina dentro do molde. A permeabilidade transversal é um parâmetro importante na modelagem de problemas de moldagem líquida, pois quando se tem um escoamento em placa espessa não se pode negligenciar a permeabilidade na direção normal às fibras, ou seja, a permeabilidade transversal.

Observa-se na literatura uma série de trabalhos distintos que abordam o problema de determinação da permeabilidade transversal, contudo, as diferenças entre os valores calculados por diferentes experimentos e diferentes grupos (pesquisadores) alcançam valores de 20% ou mais. Nesse sentido, entende-se que existe ainda muito a ser explorado sobre o tema, buscando-se procedimentos ou métodos que possam, de alguma maneira, contribuir para a padronização da forma como a permeabilidade é determinada e também à obtenção de medições mais precisas.

1.3. Objetivo

- Propor uma metodologia para a determinação das permeabilidades dos diferentes materiais em compósitos multicamadas, por meio de um único experimento em laboratório e com o auxílio da modelagem numérica do escoamento da resina dentro do molde.

1.3.1. Objetivos Específicos:

- Realizar ensaios experimentais para meios homogêneos e híbridos.
- Determinar a permeabilidade de meios porosos.
- Determinar a resistência ao escoamento a partir de ensaios experimentais.
- Estimar a espessura de meios porosos em ensaios híbridos.

- Propor um modelo analítico capaz de estimar o valor da permeabilidade de cada um dos meios porosos utilizados em ensaios híbridos.
- Desenvolver modelos numéricos axissimétrico e tridimensional e validá-los.
- Comparar os modelos axissimétrico e tridimensional.
- Resolver problemas de moldagem líquida, numericamente, sendo capaz de reproduzir adequadamente os ensaios experimentais.

2. ESTADO DA ARTE

A revisão do estado da arte neste trabalho foi dividida em três seções: na primeira abordou-se aspectos gerais do processo de moldagem líquida e as dificuldades enfrentadas para resolver este tipo de problema, a segunda seção foi dedicada a revisar os trabalhos referentes às simulações numéricas de processos de moldagem líquida, finalmente, a terceira seção foi dedicada ao tema central desta tese que é a determinação da permeabilidade transversal.

2.1. O Processo de Moldagem Líquida

O processo de moldagem líquida, segundo Konstantopoulos et al. (2019) é atraente para a produção de compósitos poliméricos reforçados com fibras devido à vantagem econômica, à capacidade de produzir peças de alto desempenho e seu potencial para otimização de processos. No entanto, nesses processos de fabricação é necessário controlar a impregnação do reforço fibroso, sendo apontado no estudo de LeBel, Ruiz e Trochu (2019) como sendo um fator fundamental, pois os defeitos não têm apenas impacto negativo nas propriedades mecânicas, mas também criam problemas de absorção de umidade e início de trincas. Os autores destacam que é necessário minimizar os vazios nos compósitos produzidos por moldagem líquida e para isso necessita-se estudar os escoamentos insaturados nos reforços fibrosos e sua relação com as condições de moldagem, objetivando produzir peças com alta qualidade o que é fundamental para mercados como o aeroespacial.

Procurando-se compreender melhor o processo e as variáveis de interesse no estudo de problemas de moldagem líquida recorreu-se à literatura para se fazer um breve resumo dos estudos realizados nos últimos 15 anos.

Um dos pontos que empreendeu esforços da comunidade científica esteve centrado na discussão sobre a formação de vazios. Os estudos sobre a formação de vazios se tornaram extremamente abrangentes, pois acabaram envolvendo outras variáveis dos processos de moldagem líquida, como projeção correta dos pontos de entrada e saída da resina, pressão de injeção, velocidade do escoamento e a permeabilidade do reforço, tema central desta tese. Essas variáveis, se não forem definidas adequadamente, dificultam ou até inviabilizam o processo e, exatamente por isso, despertam interesse do meio científico.

Destaca-se que a definição correta dos aspectos citados anteriormente pode evitar que o

compósito produzido tenha problemas estruturais, ou ainda que nem possa ter sua produção concluída, pois como foi citado, fibras que não forem completamente impregnadas pela resina ocasionam a produção de peças com vazios e essas com certeza não possuirão as propriedades mecânicas projetadas. Essa afirmação está apoiada nos estudos de Jinlian et al. (2004), em que afirmam que a presença de vazios tem um efeito prejudicial sobre as propriedades mecânicas dos compósitos, por esse motivo em seu trabalho desenvolveram um modelo matemático capaz de descrever a formação de vazios entre os reforços multicamadas.

Outros pesquisadores também se dedicam a identificar formas de evitar a formação de vazios no compósito produzido. Cita-se o trabalho de Ruiz et al. (2006), que destaca que a velocidade do escoamento é fator fundamental na ocorrência ou não de vazios na peça, o que pode ser justificado pela atuação de duas forças que induzem o movimento do fluido no meio poroso: a força viscosa e a força capilar. Os efeitos dessas forças na formação de vazios podem ser avaliados por meio de uma grandeza adimensional denominada número capilar.

No trabalho de Ruiz et al. (2006), observa-se que há um número capilar ideal a fim de minimizar os efeitos na formação de vazios. Nesse sentido, pode-se inferir que a velocidade de impregnação em qualquer estágio do processo de infiltração deve ser ideal, o que minimizará os efeitos de formação de vazios na peça. No caso do processamento por moldagem líquida, a velocidade de impregnação corresponde à velocidade da linha de frente do escoamento da resina. Na prática, é necessário definir uma velocidade ideal da linha de frente. Isso ocorrerá a partir do controle de vazão de injeção da resina, o que, segundo os autores, deve ser feito a partir de uma otimização da vazão de entrada, o que permitirá que o número capilar tenha um valor ótimo na linha de frente do escoamento durante todo o processo de infiltração.

Percebe-se que a preocupação histórica acerca de vazios no preenchimento do molde e a consequente degradação do compósito produzido, fazem parte do cotidiano acadêmico e industrial de todos que se envolvem com processos de moldagem líquida. No estudo de Mehdikhani et al. (2018), os autores destacam que os estudos sobre os vazios iniciaram há, aproximadamente, meio século e continuam despertando o interesse dos envolvidos. Os pesquisadores destacam que, devido à grande importância e influência dos vazios nas propriedades físicas e termodinâmicas dos compósitos, existem três linhas para investigar esses fenômenos, que seriam, a formação dos vazios, características e efeitos mecânicos. Fazem ainda, um resumo de vários estudos realizados sobre o tema e concluem que é possível estimar o efeito dos vazios no comportamento mecânico do compósito e escolher os limites e critérios de acordo com a peça projetada, o que abriria caminho para um projeto de fabricação consciente do desempenho da peça. Acreditam que com um impulso

da indústria em processos de fabricação mais robustos e com menor variabilidade de propriedades, seria possível obter um projeto mais confiável, seguro e sustentável e assim, os estudos sobre a formação de vazios seriam, provavelmente, intensificados em um futuro próximo.

À medida que os processos de moldagem líquida avançam na produção de peças complexas, como cascos de barcos, pás eólicas e peças aeroespaciais, faz-se necessário um maior cuidado com algumas variáveis, principalmente no que tange à formação de vazios. No trabalho de Yalcinkaya, Sozer e Altan (2019), cita-se a limitação de laminados fabricados no processo de Moldagem a Vácuo por Transferência de Resina (VARTM), devido à variação de propriedades, formação de vazios, entre outras causas.

Nesse sentido, recorre-se ao estudo de Zhao et al. (2019) que declara que a formação de vazios é um dos defeitos mais comuns nos compósitos produzidos por moldagem líquida. Esses vazios, segundo os autores, degeneram significativamente o desempenho mecânico das peças, diminuindo, por exemplo, a resistência ao cisalhamento interlaminar, resistência à flexão e à compressão. Diante desse cenário, reconhece-se a necessidade da correta definição de propriedades dos processos como, velocidade do escoamento, definição da pressão de injeção, tempo de cura, permeabilidade transversal, entre outros.

2.2. A Importância dos Estudos Numéricos

Ensaaios experimentais podem ser muito onerosos em termos de custo e tempo. Uma alternativa para amenizar essas dificuldades é associar resultados experimentais à solução numérica. Os dados experimentais são usados para ajustar e validar os modelos numéricos que podem, posteriormente, ser utilizados para simular (com menor custo e em um menor espaço de tempo) um grande número de casos de interesse. Essa busca por aliar métodos numéricos em comparação com dados experimentais ocorre há bastante tempo na indústria e no meio acadêmico, como pode-se observar na sequência temporal de estudos que seguem.

No estudo de Gauvin e Trochu (1998), já se abordava a necessidade de se aliar ensaios experimentais e modelos numéricos. Nesse estudo, os autores abordam a questão do custo do molde ter um valor crescente à medida que a complexidade da peça também aumentava e que, para casos dessa natureza, tornar-se extremamente importante e necessário desenvolver um modelo numérico. No decorrer do estudo, os autores discutem a importância do modelo numérico e como ele serviu para discutir dificuldades específicas da moldagem. Entre as dificuldades enfrentadas por Gauvin e Trochu (1998), cita-se a medição da permeabilidade e a comparação com os dados experimentais.

Esse processo de comparação entre a solução numérica e os dados experimentais se deu considerando os efeitos de borda, escoamentos multicamadas, entre outros. Os pesquisadores indicaram que os resultados estiveram adequados e que o modelo numérico desenvolvido com a utilização de elementos finitos se mostrou compatível e com dois aspectos que mereceram destaque: o primeiro, a conservação precisa da massa de resina, e o segundo, que não se fez necessário um maior refinamento da malha perto dos limites internos, local que, de acordo com os autores, a permeabilidade varia muito.

A pesquisa de Simacek e Advani (2003) apresentou a necessidade de desenvolvimento de um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos/volume de controle (FE/CV). Segundo os autores, essa abordagem traz como uma das vantagens, o fato do problema continuar sendo linear e o escoamento poder ser calculado explicitamente no domínio. A segunda vantagem é inerente à incorporação de efeitos de saturação para a simulação do escoamento poder ser incorporada em pacotes já existentes. Os pesquisadores apresentam o exemplo do pacote LIMS (*Liquid Injection Molding Simulation*) que foi capaz de fornecer dados de saturação durante o enchimento da peça e pode capturar a influência da saturação na pressão de enchimento ou na vazão. Os autores acreditavam que isso seria útil para determinar o tempo necessário para saturar completamente os fios da fibra, fator fundamental para o desempenho da peça e também, porque permitiu explicar a variação na pressão de injeção. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios e estavam de acordo com os dados experimentais em casos de injeção linear. Eles destacaram também que foi possível variar as propriedades, o que propiciou que a abordagem pudesse ser utilizada para modelar o enchimento de um domínio complexo e prever o tempo de enchimento desse domínio.

No trabalho de Kim e Daniel (2003) foi empregada uma técnica experimental que se utilizou de duas placas transparentes, em que as posições da linha de frente do escoamento eram observadas. De posse dessas informações os pesquisadores utilizaram o método FE/CV e simularam o escoamento através da preforma, em que a diferença entre os tempos da posição da linha de frente observada e calculada é minimizada usando uma técnica de otimização. O tempo de preenchimento observado pelas linhas de frente em vários locais da preforma foi comparado com o tempo estimado de chegada usando o método numérico.

Outro trabalho que aliou estudos experimentais e simulações numéricas foi o conduzido por Zhou et al. (2006). Nesse estudo os autores utilizaram uma técnica iterativa de ajuste entre valores numéricos e experimentais. O algoritmo funcionava, resumidamente, da seguinte maneira: o primeiro passo iniciava determinando a inclinação da reta (*slope*) por meio da relação entre a

pressão de entrada e o tempo de infiltração. Com essa informação a permeabilidade planar era estimada. No passo seguinte a permeabilidade transversal era calculada a partir do perfil de pressão, determinado na entrada do molde, no momento em que a linha de frente do escoamento atinge o ponto de saída. Em seguida era calculado o tempo de enchimento do molde e determinado o perfil de pressão na entrada por meio de um modelo analítico. O processo era repetido até que o perfil de pressão do modelo analítico coincidissem com o perfil de pressão experimental; nessa condição as permeabilidades calculadas estavam corretas. Os autores concluíram que os dados experimentais aliados ao modelo analítico forneceram informações cruciais sobre a preforma e que a partir desses se podia prever o escoamento da linha de frente e a saturação das fibras.

No trabalho de Schell et al. (2007), os autores apresentaram uma comparação numérica e experimental relativo à formação de vazios. O método numérico estudado pelos pesquisadores previa a criação de vazios de mesoescala e sua evolução. A validação foi realizada por meio da medição dos vazios de partes do compósito produzido utilizando tomografia computadorizada. O modelo desenvolvido foi considerado satisfatório pelos autores. Os resultados também apontaram a importância do volume de fibras na geração de vazios de mesoescala.

Os estudos numéricos e experimentais seguem ao longo dos anos. Entre os mais recentes, cita-se o de Yashiro et al. (2019), em que os autores desenvolveram uma abordagem numérica baseada no método FE/CV que se concentrou no desenvolvimento de um método de análise de fluxo macroscópico para prever a impregnação de feixes de fibras. Os autores consideraram que o processo de impregnação e formação de vazios concordou com as observações empíricas. Os resultados obtidos estavam de acordo com o esperado pelos pesquisadores, pois a relação obtida reproduziu as tendências do experimento utilizado para validar o modelo.

No trabalho de Chebil, Lagardère e Park (2019), os autores se detiveram em desenvolver um modelo numérico que fosse capaz de reduzir o custo computacional de simulações tridimensionais. Para isso, propuseram uma simulação de escoamento de resina tridimensional em preformas laminadas compostas de múltiplas camadas com diferentes permeabilidades em cada camada. Indicaram que devido à pequena espessura de cada camada, um grande número de nós é necessário para a simulação do escoamento tridimensional. Eles ainda afirmaram que se somente elementos sólidos fossem adotados, o custo computacional para realização da simulação aumentaria consideravelmente, mesmo com processamento em paralelo. Por esse motivo, ao invés de utilizarem elementos sólidos tridimensionais, propuseram a utilização de elementos de cascas para camadas múltiplas. Os resultados do estudo de Chebil, Lagardère e Park (2019), foram considerados adequados, pois em comparação com os dois critérios adotados obtiveram boa concordância. O

primeiro critério foi sugerido a partir da razão entre o tamanho do elemento e a espessura da camada e a razão entre a permeabilidade planar e a permeabilidade da espessura da preforma. O segundo critério, mediu quantitativamente a eficiência computacional em termos do tamanho do elemento. Por fim, os autores salientaram que os resultados da simulação do método do elemento de camada múltipla representaram adequadamente, as características particulares do escoamento tridimensional da resina, diminuindo consideravelmente o tempo de processamento em comparação com modelos numéricos que se utilizam de elementos sólidos.

A pesquisa de Zhao et al. (2019) aponta para a necessidade, ainda atual, de prever a formação de vazios, diante do aumento da complexidade das geometrias utilizadas para produção de peças em compósitos. Os autores ressaltam que os vazios formados durante a moldagem líquida do compósito degeneram significativamente o desempenho mecânico do produto final. Por esse motivo, torna-se importante uma previsão precisa da formação desses vazios e, também, que se possa dimensionar o tamanho do mesmo. Os pesquisadores destacam que o método do VOF (*Volume of Fluid*) foi utilizado na modelagem do problema e que o modelo tridimensional e a força capilar foram atualizadas em tempo real para garantir a precisão da simulação. Os resultados apontaram uma boa concordância entre a solução numérica e os dados experimentais no que se refere à formação e medição dos vazios. Dessa forma os autores consideraram que o modelo numérico desenvolvido foi capaz de resolver os problemas propostos.

Pode-se perceber que, ao longo dos anos, as dúvidas acerca das mais diferentes variáveis foram sendo esclarecidas. No entanto, à medida que a produção de compósitos por meio de processos de moldagem líquida vai se expandindo, cresce também a dificuldade e a exigência do mercado e da indústria. Por esse motivo, ainda hoje, a discussão acerca da formação de vazios ou dificuldades no processamento de moldagem líquida multicamadas continua sendo foco de estudos, inclusive expandindo a necessidade de aprofundamento de pesquisas no que tange a outras variáveis.

Entre as variáveis de interesse, além das citadas até este momento, encontra-se a permeabilidade transversal, tema central deste trabalho. A correta determinação da permeabilidade tanto do plano como a transversal consiste em um problema importante no estudo do processo de moldagem líquida.

2.3. Permeabilidade Transversal

À medida que os estudos avançam, novas possibilidades são consideradas e as discussões

são aprofundadas. Dessa forma, cabe citar outro fator importante que tem sido alvo de esforços da comunidade científica que diz respeito à medição da permeabilidade, tanto no plano, como na transversal.

No estudo desenvolvido por Calado e Advani (1996), os pesquisadores apresentaram um novo esquema para a estimação da permeabilidade efetiva que considerava o escoamento transversal entre as camadas adjacentes. Essa permeabilidade efetiva estaria em função da permeabilidade do plano e da permeabilidade transversal. Os resultados apresentados foram para problemas com duas e três camadas e apresentaram a influência da permeabilidade transversal na pressão de entrada e discutiram as diferenças do escoamento entre as camadas.

Nos estudos de Ballata et al. (1999) e Visconti et al. (2003), os autores discutiram a determinação da permeabilidade transversal. Segundo os pesquisadores, a permeabilidade transversal é uma propriedade importante a ser determinada quando a espessura do compósito não pode ser negligenciada e o escoamento da resina é tridimensional. Além disso, essa propriedade se torna fundamental para modelar o escoamento da resina em moldes multicamadas, pois nesse caso é importante quantificar corretamente o escoamento transversal e para isso é necessário que se conheça o valor da permeabilidade na direção transversal.

Na pesquisa de Liu et al. (2004), os autores realizaram um estudo sobre a compressibilidade e permeabilidade efetiva de meios multicamadas. Foram realizados testes de fluxo radial de compactação utilizando três diferentes reforços de fibras de vidro e os resultados indicam que a compressibilidade efetiva em reforços híbridos é predominantemente determinada pela proporção de compressibilidade dos reforços utilizados. Já a permeabilidade efetiva é encontrada pela orientação e proporcionalidade das fibras nas camadas superficiais exteriores.

O trabalho de Chen and Hongyuan (2004) abordou a medida de uma permeabilidade média em moldes multicamadas e salientou a inviabilidade de se usar essa média em casos em que o escoamento de resina entre as camadas é muito significativo. Diz ainda que faltava uma investigação mais minuciosa acerca de como ocorria o escoamento entre as camadas. Nos resultados apresentados, os autores destacaram que não foi considerado o escoamento entre as camadas, o que declararam ser uma forma negligente de modelar o problema, pois se utilizaram apenas de uma permeabilidade efetiva e que assim não obtiveram bons resultados. Com o objetivo de evidenciar a importância do escoamento entre as camadas, os autores realizaram um ensaio de um caso isotrópico e mesmo nesse experimento, teoricamente mais simples, houve a criação de canais entre as camadas.

No estudo de Schell et al. (2007) foi realizada uma medida de permeabilidade transversal e

longitudinal. Para realização das medidas experimentais, foi utilizado o Princípio da Medição da Permeabilidade Saturada e bons resultados foram obtidos. Os autores apontaram que uma das possíveis causas para as diferenças obtidas, entre os dados experimentais e o modelo numérico desenvolvido, pode ter ocorrido pela existência de possíveis canais que se formaram durante os ensaios experimentais os quais, aumentariam o valor da permeabilidade determinada experimentalmente.

No estudo de Wu, Li e Shenoi (2007), os autores recorreram a uma técnica experimental que consistiu em uma infiltração radial. O rolo de fibras foi colocado em formato circular ao redor do ponto de entrada da resina, forçando para que o escoamento ocorresse na direção transversal. Os autores realizaram ensaios para quatro diferentes volume de fibra, com valores entre 28,5% e 32,8%, estimando a permeabilidade transversal com valores entre $1,73 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ e $0,55 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, indicando que a técnica era promissora e precisava de sequência no seu estudo.

Observa-se que a permeabilidade transversal tem relevância significativa na modelagem de problemas de moldagem líquida. Comprova-se essa importância ao observar o trabalho de Sharma e Siginer (2008), quando citam que a determinação da permeabilidade é ponto crítico na modelagem de escoamento em meio poroso. Os autores relataram também que alguns pesquisadores buscavam alternativas para medir a permeabilidade transversal, visto que a discussão sobre a permeabilidade no plano já fora discutida em uma vasta quantidade de estudos ao longo dos anos. Os autores citaram o trabalho de Weitzenbock, Shenoi e Wilson (1998), quando estes já haviam indicado, na década anterior, que a medição da permeabilidade tridimensional não deveria ser feita pelo monitoramento da linha de frente do escoamento em condições insaturadas.

A metodologia numérica de estimar o tensor de permeabilidades a partir de dados experimentais já ocorrera em estudos anteriores. Cita-se o trabalho de Okonkwo et al. (2011) que apresenta resultados de medida de componentes do tensor de permeabilidade. Para tanto se utilizaram de um algoritmo que ajusta os valores desse tensor de permeabilidade a partir dos tempos de injeção da resina em um ensaio experimental de fluxo radial. Os autores apresentaram uma forma de calcular quatro componentes do tensor de permeabilidades, três no plano e uma transversal. Salientaram, como resultados importantes, o fato de que com essa abordagem foram capazes de obter, com um só experimento, quatro componentes do tensor permeabilidade sem necessitar de outros ajustes e nem conhecer o valor da permeabilidade principal ou efetiva do meio poroso.

No estudo de Kuppusamy et al. (2012), os autores utilizaram a Lei de Darcy, para, por meio de ensaios experimentais, medir a permeabilidade efetiva do meio poroso. Salientaram também, que

os modelos analíticos disponíveis na literatura não levavam em consideração, por exemplo, se a placa do compósito a ser produzido era fina e não consideraram a interação entre a resina e o reforço fibroso. Para compreenderem melhor como se dava o escoamento da resina dentro do molde, os autores recorreram à análise de sensibilidade e com isso acreditaram conseguir mensurar melhor a interação resina/reforço fibroso.

Buscando compreender melhor como se dá o escoamento no interior da preforma, o estudo de Souza et al. (2012) sugeriu uma metodologia numérica para determinar a permeabilidade média nas três direções a partir de dados experimentais. Destaca-se que a utilização de métodos numéricos se tornam fundamentais, pois como se pode observar é necessário que inúmeros ensaios sejam realizados para que se possa estimar o valor da permeabilidade transversal e, conforme já citado, geralmente esses ensaios possuem custos elevados.

A ideia de aliar o estudo numérico aos ensaios experimentais é bastante comum em processos de engenharia. Quando o problema a ser resolvido envolve variáveis as quais se possui um elevado grau de incerteza, o uso de metodologias numéricas pode ajudar a reduzir o número de experimentos realizados e consequentemente diminuir o custo. Sendo assim, justifica-se a importância do estudo numérico aliado aos estudos experimentais. Anterior ao trabalho de Souza et al. (2012) encontra-se na literatura o estudo realizado por Oliveira (2010) quando indicou que há influência da permeabilidade transversal (K_{zz}) em reforços híbridos. Nesse trabalho ele desenvolveu um algoritmo numérico iterativo que assumia como satisfatório o valor de K_{zz} capaz de reproduzir numericamente os dados obtidos experimentalmente.

Na pesquisa conduzida por Sas et al. (2014), os autores realizaram uma série de experimentos utilizando fibras unidirecionais e calcularam a permeabilidade relativa à altura do reforço fibroso. Concluíram, os pesquisadores, que uma orientação diferente das fibras entre as camadas poderia ocasionar uma alteração significativa no valor da permeabilidade relativa à altura, devido à alteração dos caminhos no escoamento da resina. No decorrer do trabalho os autores desenvolveram um modelo numérico e inferiram que, a partir dos resultados desse modelo, não se poderia desconsiderar a importância da sequência do empilhamento, pois esta influenciava de maneira relevante a permeabilidade estimada. Concluíram ainda, que pequenos desalinhamentos entre as camadas não modificaram substancialmente o escoamento transversal.

Dos trabalhos discutidos nesta revisão, pode-se perceber que pequenas alterações na forma de estimação da permeabilidade acarretam mudanças nos valores determinados. Por esse motivo Vernet et. al (2014) realizaram o segundo *benchmark* internacional. Esse encontro foi conduzido por doze grupos de pesquisa em todo o mundo e definiram que era preciso obter resultados comparáveis

visando à padronização das medidas de permeabilidade. Nesse sentido, conduziram injeções unidirecionais para determinar o tensor de permeabilidade no plano insaturado e todos os participantes foram convidados a usar os mesmos valores para parâmetros como volume de fibras, pressão de injeção e viscosidade do fluido a fim de minimizar os efeitos de dispersão. Os pesquisadores concluíram que os resultados foram animadores visto que, diferenças menores a 25% foram encontradas, desde que as diretrizes fossem respeitadas. Observaram ainda que, nos casos em que os parâmetros não se encontravam de acordo com o que fora recomendado no segundo *benchmark*, os resultados encontrados não foram considerados satisfatórios.

Na sequência de revisão de trabalhos na literatura pode-se perceber que uma contribuição importante pode ser encontrada no trabalho de Trindade et al. (2015). Nesse estudo, os autores apresentaram uma forma de medir a permeabilidade e destacaram que variações no volume de fibras e a pressão de injeção influenciaram diretamente no cálculo da permeabilidade.

Aspectos relativos à forma como ocorre o escoamento também passaram a ser investigados; cita-se o trabalho de Yun et al. (2017) quando evidenciou que a inclinação do escoamento através de um desvio afeta o escoamento da resina. Esse desvio, resumidamente, é uma combinação de diferentes valores para permeabilidade transversal. No estudo, os autores estimam seis componentes do tensor de permeabilidade e conseguiram evidenciar que o fluxo radial assumia um comportamento elíptico, exatamente pela influência existente em cada uma das componentes do tensor.

No estudo de Godbole et al. (2019), os pesquisadores apresentam uma nova metodologia para medir a permeabilidade transversal entre as fibras. O processo de VARTM foi utilizado e os promotores de fluxo foram colocados entre regiões que a permeabilidade planar já era conhecida. Os promotores de fluxo ficaram posicionados a uma distância conhecida do ponto de injeção, de forma que o tempo de infiltração seria mensurável e a perda na compactação fosse mínima devido ao acúmulo do fluido. Os autores destacaram que, quando o escoamento atingisse o promotor, ele continuaria por este de forma unidimensional e transversal à direção da fibra, de forma que o tempo de chegada e saída do promotor fossem registrados. Essa medição era saturada e portanto a pressão capilar não desempenhava papel relevante. Dessa forma, a partir do equacionamento apresentado, o grupo foi capaz de estimar o valor da permeabilidade entre as fibras. Os autores concluíram que os resultados obtidos foram satisfatórios e que possíveis razões para pequenas variações nos resultados da permeabilidade experimental poderiam ser atribuídas a pequenas volubilidades na colocação do tubo de entrada, ensacamento a vácuo e variações na viscosidade do fluido utilizado de um experimento para o outro. Consideraram ainda que, os valores encontrados estavam dentro de uma

mesma ordem de grandeza e que o Desvio-Padrão entre estes foi uma ordem de grandeza menor que a média, o que consideraram suficiente para validar o modelo. Ainda no estudo de Godbole et al. (2019) um modelo iterativo para o cálculo da permeabilidade a partir dos dados experimentais foi realizado e previu corretamente a tendência de aumento da pressão de entrada. Os valores encontrados na primeira iteração foi de $1,136 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ enquanto que, na nona iteração foi de $1,1621 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$.

O estudo de Huang et al. (2019) também reconheceu a importância da determinação da permeabilidade como sendo fundamental para processos de moldagem líquida. A permeabilidade no plano foi determinada em um escoamento radial insaturado, por meio da utilização da posição da linha de frente do escoamento, tempo de infiltração e pressão de entrada. A permeabilidade fora do plano foi estimada considerando o escoamento saturado, por meio da medição da taxa de escoamento em estado estacionário, pesando a vazão do fluido durante a medição e determinando o gradiente de pressão usando a diferença de pressão entre a entrada e saída do molde. Em ambos os casos, permeabilidade no plano e transversal, foram utilizados quatro variações do volume de fibra. A análise numérica foi realizada utilizando-se um método de homogeneização, que se trata de uma abordagem computacional que pode levar à substituição de um material heterogêneo por um homogêneo equivalente que possua as mesmas propriedades médias. Essa metodologia, segundo os autores, tem sido bastante difundida, pois pode prever as propriedades físicas do material. Os pesquisadores destacaram que calcularam o campo de velocidades e depois utilizando a Lei de Darcy calculavam a permeabilidade. Os autores afirmaram que os resultados obtidos nesse estudo numérico e experimental foram robustos, mas alguns ajustes ainda se faziam necessários para que se pudesse melhorar as previsões.

Em seu trabalho, Trindade et al. (2019) apresentou um estudo experimental acerca da permeabilidade transversal. Um molde metálico foi construído especialmente para a realização dos experimentos e a medição da permeabilidade transversal era obtida através de um experimento saturado em que eram conhecidas a diferença de pressão e a vazão volumétrica. Na validação da técnica experimental foi utilizada a influência da espessura da preforma e em seguida foi investigada a relação entre os tipos de fibra e o volume de fibras na determinação da permeabilidade. Os autores avaliaram que os resultados foram satisfatórios e foram capazes de indicar uma espessura mínima da preforma para que se pudesse medir a permeabilidade transversal.

Pode-se ainda recorrer ao estudo de Karaki et al. (2019) que apresentou uma revisão bastante ampla do que fora desenvolvido nos últimos anos sobre as variáveis de interesse em processos de moldagem líquida. Eles destacaram que foi dedicada grande atenção à avaliação do

tensor de permeabilidade e que vários métodos foram implementados, tanto experimentais, quanto numéricos e até mesmo analíticos. Porém, segundo os autores, os resultados estariam ainda longe de corresponderem à realidade. Salientaram que, apesar de todos os esforços, inúmeros problemas ainda restam em estudos experimentais. Citaram a dependência de vários parâmetros, incluindo o desempenho pessoal, preparação de amostras, precisão do equipamento e técnicas de medição. Quaisquer erros nesses parâmetros poderiam ser explicações para medidas inconsistentes o que resultaria em avaliações sobre a permeabilidade pouco confiáveis.

Karaki et al. (2019) consideraram que os diferentes métodos usados para medir a permeabilidade acarretariam em resultados que, geralmente, não seriam concordantes. Ainda em seu trabalho, Karaki et al. (2019), expuseram que pequenas mudanças nos procedimentos experimentais afetariam significativamente os valores medidos e ressaltaram que, a partir do segundo *benchmark* internacional, pode-se ter, finalmente, determinado, um método de medição da permeabilidade no plano e acreditavam que esse método poderia ser adotado como referência em estudos futuros.

O estudo de Ali et al., (2019) teve como tema central a permeabilidade planar em um formato tridimensional. Os pesquisadores utilizaram reforços híbridos e desenvolveram um modelo numérico que foi validado a partir dos dados experimentais. A abordagem híbrida proposta pelos autores fez o uso de imagens de tomografia computadorizada e um tecido ortogonal tridimensional em diferentes níveis de compactação. A partir das imagens foi possível a geração de modelos tridimensionais e por meio desses extrair células computacionais unitárias que foram utilizadas para obterem as soluções numéricas utilizando as equações governantes do problema, oriundas da dinâmica dos fluidos. A infiltração radial foi utilizada para os ensaios experimentais nesse estudo, e os autores destacaram que o tamanho dos canais entre as fibras, bem como a forma do fio de ligação na direção transversal desempenharam um papel vital na determinação de valores globais de permeabilidade no plano. Percebe-se, nesse trabalho, mais um indício que a influência da interface entre as camadas interfere na forma como se dá o escoamento em processos de moldagem líquida. Entre os resultados obtidos em sua pesquisa, Ali et al. (2019) indicaram que a solução numérica obtida apresentou boa concordância com os dados de referência, salientaram ainda que na vizinhança dos fios de ligação na direção transversal a vazão volumétrica parecia ser baixa indicando que uma região de baixa permeabilidade em sua vizinhança foi observada.

No estudo de Ali, Umer e Khan (2019) foi realizado uma homogeneização multiescala. Segundo os autores, os reforços fibrosos utilizados na fabricação de estruturas compostas têm essa natureza multiescala com a permeabilidade variável dependendo da porosidade local. A partir dessa premissa os pesquisadores realizaram uma analogia entre o escoamento da resina e a resistência

elétrica em série e paralela. Os autores realizaram o estudo utilizando-se de três regiões adjacentes e consideraram que a permeabilidade equivalente ao meio poroso seria a média aritmética das permeabilidades das regiões individuais no caso da analogia ser feita com a resistência elétrica paralela e a média harmônica na analogia à resistência elétrica em série. O modelo proposto no artigo foi validado utilizando-se as simulações numéricas e os pesquisadores ressaltaram ainda que em regiões adjacentes em que as permeabilidades diferem mais de três ordens de magnitude o modelo não funcionou muito bem, mas confirmaram que os modelos são aplicáveis na homogeneização de regiões porosas multiescala que são encontradas na fabricação de compósitos.

Ressalta-se que, a partir dos trabalhos citados, pode-se observar que uma combinação dos métodos numéricos e experimentais é capaz de auxiliar na busca de respostas para problemas de moldagem líquida multicamadas, principalmente no que tange à hipótese de tese apresentada neste trabalho que se refere à busca e um modelo computacional que aliado a um equacionamento analítico e aos ensaios experimentais, seja capaz de minimizar o número de ensaios e determinar o valor de permeabilidade de meios porosos híbridos a partir de apenas um experimento.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente trabalho apresenta a fundamentação teórica em dois tópicos. No primeiro é explorado o modelo matemático e as equações que governam os problemas estudados, enquanto que, no segundo aborda-se o modelo das resistências ao escoamento e a analogia criada entre a resistência provocada pela permeabilidade do meio poroso e as resistências estudadas em problemas térmicos.

3.1. Modelagem Numérica

Os problemas de moldagem líquida são modelados com o auxílio da Lei de Darcy que foi apresentada por Henry Darcy em 1856 e entre inúmeros trabalhos que a citam, encontra-se em Rudd et al, 1997 uma dessas citações, indicando que é uma equação constitutiva que descreve o escoamento do fluido em um meio poroso e pode ser descrita por:

$$\vec{v} = -\frac{\bar{K}}{\mu} \nabla P \quad (3.1)$$

em que, $\vec{v}$ é o vetor velocidade (m/s), $\bar{K}$ é o tensor de permeabilidade (m²), μ é a viscosidade (Pa·s) e P é a pressão (Pa).

Apenas a Lei de Darcy não é suficiente para resolver problemas de moldagem líquida. São necessárias outras equações para compor o modelo matemático, bem como a definição de um método que seja capaz de resolver esse conjunto de equações.

A discretização foi realizada com o método de volume finitos e o software utilizado para tanto foi o OpenFOAM. O método *Volume of Fluid* (VOF) (Hirt e Nichols, 1981) foi utilizado para resolver o escoamento da resina e ar dentro do molde. Neste modelo são resolvidas as equações da conservação da massa, quantidade de movimento e fração volumétrica da resina. A Lei de Darcy é acoplada ao modelo através dos termo fonte da equação da quantidade de movimento.

3.1.1. Volume of Fluid (VOF)

O método *Volume of Fluid* (VOF) é utilizado para resolver problemas multifásicos de transferência de calor e mecânica dos fluidos. Este foi proposto por Hirt e Nichols (1981).

O VOF, segundo Minussi (2007), Luoma (2000) e Maliska et al. (1998), é aplicado a

fluidos imiscíveis em que três equações de transporte são discretizadas e resolvidas simultaneamente. Nesse método as fases são bem definidas; ou seja, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra simultaneamente, porém dentro de um mesmo volume podem coexistir mais de uma fase.

Considerando que os casos estudados neste trabalho são relativos a problemas de moldagem líquida, explicitam-se as fases do escoamento como sendo ar e resina e recorre-se à definição de fração volumétrica f , para que se possa compreender como se dá o escoamento das duas fases dentro do domínio computacional. Supõe-se que as frações são contínuas no espaço e no tempo e sua soma dentro de cada volume é igual a um. Portanto, células que tenham valor entre zero e um estarão com as duas fases (ar e resina) presentes ao mesmo tempo, ou seja, nesse caso se contém a interface entre as duas fases dentro do volume de controle. Por outro lado, se o valor de f for igual a zero, o volume estará preenchido apenas com ar, enquanto que, se o valor de f for igual a um, o volume estará preenchido somente com resina, conforme Savino (2009).

Nessa metodologia, são resolvidas as equações da continuidade, da fração volumétrica e da quantidade do movimento (Fox, McDonald e Pritchard, 2004). Para um escoamento incompressível, estas são descritas, respectivamente, nas equações que seguem:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.2)$$

em que, t é o tempo (s), ρ é a massa específica (kg/m³) e $\vec{V}$ é o vetor velocidade (m/s).

$$\frac{\partial (\rho f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho f \vec{V}) = 0 \quad (3.3)$$

em que, f é a fração volumétrica da fase i .

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.4)$$

em que, $\bar{\tau}$ é o tensor de tensões (Pa), $\vec{g}$ é a aceleração da gravidade (m/s²) e $\vec{F}$ é o termo fonte (N/m³).

Observa-se que, para os problemas de moldagem líquida, o termo fonte é obtido a partir da Lei de Darcy (Sharma e Siginer, 2008). Este é escrito na forma:

$$\vec{F} = -\frac{\mu}{K} \vec{V} \quad (3.5)$$

Nesse modelo, as propriedades termofísicas da mistura, são aproximadas em função da fração volumétrica f como (Srinivasan, Salazar e Saito 2011):

$$\rho = f \rho_{resina} + (1-f) \rho_{ar} \quad (3.6)$$

$$\mu = f \mu_{resina} + (1-f) \mu_{ar} \quad (3.7)$$

A partir da resolução numérica desse conjunto de equações, é possível descrever o comportamento da resina dentro do molde.

3.2. Resistências ao Escoamento

A solução de problemas de moldagem líquida depende de inúmeras variáveis que despertam interesse de pesquisadores e da indústria. Nos trabalhos de Amorim (2007) e Alves (2006), os autores citam alguns exemplos de variáveis de interesse, como: a definição de posição de pontos de injeção e de saída da resina, pressão de injeção, formação de vazios, tempo de cura e permeabilidade do meio poroso. O presente trabalho se dedica a compreender e a evidenciar a influência da permeabilidade na moldagem.

O conceito de permeabilidade pode ser encontrado de uma forma simples e resumida no trabalho de Yun et al. (2018) quando cita que a permeabilidade é a medida do quão facilmente a resina escoa através do reforço fibroso. O tensor de permeabilidades pode ser observado na Eq. (3.8):

$$\bar{\bar{K}} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Considerando um escoamento simétrico, o tensor de permeabilidades se reduz a seis componentes, pois $K_{xy} = K_{yx}$, $K_{xz} = K_{zx}$ e $K_{yz} = K_{zy}$. As componentes K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} são os valores da permeabilidade em cada uma das direções ox , oy e oz .

Já as componentes do tensor K_{xy} , K_{xz} e K_{yz} fornecem informações sobre os ângulos entre a direção principal do tecido e a direção escolhida do sistema de coordenadas, as quais serão nulos quando as coordenadas coincidirem com as direções principais do reforço (Yun et al., 2018).

No entanto, o tensor de permeabilidades apresentado na Eq. (3.8) não fornece informações sobre como o escoamento da resina se dá entre as camadas; ou seja, não considera a influência da interface no escoamento. O trabalho de Chen (2004), já devidamente explorado em tópico anterior,

aponta para a existência de um escoamento entre as camadas e que esse fator influencia diretamente a forma como o escoamento ocorre. Os autores salientam que a forma negligente de tratar essa variável simplifica muito o problema e com certeza influencia a solução obtida. Citam que mesmo em um caso simples de escoamento isotrópico foi constatado que houve a criação de canais entre as camadas, o que evidencia a existência de uma resistência ao escoamento e que ela depende diretamente da forma como houve o empilhamento das fibras, volume de fibras, entre outros fatores.

Para melhor compreender a resistência ao escoamento em molde multicamadas, observa-se na Fig. 3.1 um esquema de arranjo do meio poroso, composto de dois tipos de fibras.

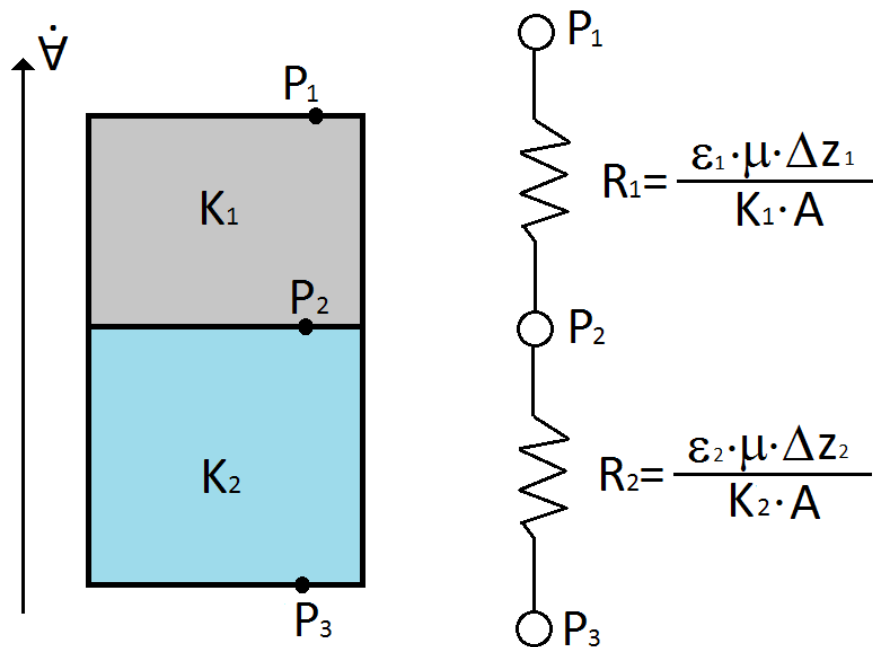


Figura 3.1. Esquema de arranjo de fibras e as resistências de cada meio poroso.

Cada um dos meios porosos possui uma permeabilidade transversal, denominadas por K_1 e K_2 , o que acarreta a se ter duas resistências R_1 e R_2 . A determinação das resistências depende do tipo de materiais envolvidos, a forma como são colocados, o volume de fibras, entre outros fatores.

Objetivando compreender melhor a influência da permeabilidade e a relação que ela tem com a resistência ao escoamento, busca-se em Incropera et al. (2008) uma analogia entre problemas clássicos de resistência térmica e resistência elétrica com a resistência ao escoamento nos problemas de moldagem líquida. Segundo Incropera et al. (2008), a taxa de transferência de calor por condução é dada pela equação:

$$q_x = -k \cdot A \frac{dT}{dx} \approx \frac{k \cdot A}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}) \quad (3.9)$$

em que q_x é a taxa de transferência de calor (W), k é condutividade térmica (W/m·K), A é a área normal ao fluxo de calor (m²) e T a temperatura (K) e L o comprimento (m).

Os autores ainda descrevem que existe uma analogia entre a taxa de fluxo de calor e a corrente elétrica, explicitam que, da mesma forma que uma resistência elétrica está associada à condução de eletricidade, uma resistência térmica pode estar associada à condução de calor e, portanto, definem resistência como a razão entre um potencial motriz e a correspondente taxa de transferência. Como decorrência da Eq. 3.9, definem a resistência térmica para a condução dada por:

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (3.10)$$

sendo $R_{t,cond}$ a resistência térmica por condução (K/W).

Analogamente, tem-se a equação para condução elétrica definida em Incropera et al. (2008), assim a resistência elétrica fica descrita na seguinte forma:

$$R_e = \frac{E_{s,1} - E_{s,2}}{I} = \frac{L}{\sigma \cdot A} \quad (3.11)$$

sendo σ a condutividade elétrica (1/Ω·m).

Ainda por analogia, uma resistência térmica para convecção pode ser obtida, segundo Incropera et al. (2008) e expressa por:

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (3.12)$$

em que $R_{t,conv}$ é a resistência térmica por convecção (K/W) e h o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m²·K).

Finalmente, segundo Incropera et al. (2008), a taxa de transferência de calor pode ser determinada considerando-se cada elemento da rede, pois q_x é constante ao longo de toda a rede:

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{1/h_1 \cdot A} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{L/k \cdot A} = \frac{T_{s,2} - T_{\infty,2}}{1/h_2 \cdot A} \quad (3.13)$$

Portanto a resistência total pode ser observada na equação:

$$R_t = \frac{1}{h_1 \cdot A} + \frac{L}{k \cdot A} + \frac{1}{h_2 \cdot A} \quad (3.14)$$

Com base na analogia descrita acima, podemos reescrever a Lei de Darcy na forma:

$$\frac{\Delta P}{\dot{V}} = \frac{\mu \cdot \Delta z}{K \cdot A} \quad (3.15)$$

sendo $\dot{V}$ a vazão volumétrica (m³/s), μ a viscosidade da resina (Pa·s), Δz a altura de cada camada (m), K a permeabilidade do meio poroso (m²) e A a área (m²).

Rearranjando os termos de forma a ficar mais explícita a relação que se pretende estabelecer e baseando-se na teoria de resistência térmica total aliada a uma analogia entre a permeabilidade do meio poroso e à resistência térmica total, pode-se inferir que a vazão do escoamento é proporcional ao quociente entre a variação de pressão e a resistência ao escoamento. Desta forma, a Eq. (3.15) pode ser reescrita na forma:

$$\dot{V} = \frac{\Delta P}{\frac{\mu \cdot \Delta z}{K \cdot A}} \quad (3.16)$$

Com base no exposto acima é possível escrever uma equação para a resistência total ao escoamento através do meio poroso multicamadas tal que:

$$R_{total} = \frac{\mu \cdot h}{K_{zz} \cdot A} = \frac{\mu \cdot h_1}{K_1 \cdot A} + \frac{\mu \cdot h_2}{K_2 \cdot A} \quad (3.17)$$

onde h é a espessura total do reforço fibroso (m²) e h_1 e h_2 são as espessuras dos reforços referentes aos diferentes materiais.

Dessa forma, a Eq. (3.17) pode ser reescrita na forma:

$$R_{total} = R_1 + R_2 \quad (3.18)$$

e cada termo da Eq. (3.18) é definido pela razão que segue:

$$R_i = \frac{\mu \cdot h_i}{K_i \cdot A} \quad (3.19)$$

Para determinar a resistência de cada meio poroso, utilizaram-se os resultados experimentais

de Trindade et al. (2019). Nesse estudo foram apresentados vários ensaios experimentais para medir a permeabilidade transversal em meios homogêneos, utilizando-se de fibras de vidro e de kevlar e com volume de fibras variando entre 36% e 70%. Nos ensaios com vidro-E, deferentes utilizadas as alturas para o reforço fibroso foram utilizadas: 3,80 mm (3,175 mm = 1/8”), 6,35 mm (1/4”), 9,53 mm (3/8”), 15,88 mm (5/8”) e 22,23 mm (7/8”). Já nos ensaios com kevlar as alturas utilizadas foram: 9,53 mm, 15,88 mm e 22,23 mm. Segundo Trindade et al. (2019), para as mantas de kevlar não foi possível utilizarem as alturas de 6,35 mm e 3,80 mm, pois havia uma limitação experimental para o fechamento do molde, impedindo que para essas alturas mantivessem o volume de fibras entre os valores de 36% e 70%.

A partir dos dados experimentais de Trindade et al. (2019), neste trabalho realizaram-se regressões lineares a fim de se obter uma equação linear passando pela origem para cada um dos volumes de fibra. Salienta-se que a condição de passar pela origem é necessária, pois precisa-se garantir a premissa de que a resistência é nula se a altura é nula.

4. Modelagem Computacional

A modelagem computacional dos problemas estudados no presente trabalho foi desenvolvida com o apoio de três softwares livres. Para o pré-processamento, foi utilizado o Gmsh (Geuzaine et al., 2009), na discretização do domínio computacional e a geração da malha. O processamento e a solução numérica foram obtidos com a utilização do OpenFOAM (Weller, Greenshields, Rouvray, 2015) e o pós-processamento e análise dos resultados foram realizados com o VisIt (Childs et al., 2012). Salienta-se também que a modelagem computacional na execução deste trabalho consistiu em construir dois modelos computacionais, o primeiro sendo um modelo axissimétrico e o segundo um modelo tridimensional.

Um modelo tridimensional foi desenvolvido para a modelagem do problema. A geometria do molde é mostrado na Fig. 4.1. Aproveitando a simetria do problema, somente um quarto do molde foi discretizado. A malha gerada pode ser observada na Fig. 4.1. Nesta pode-se observar a vista superior na Fig. 4.1 (a), em que as células em verde representam o local de saída do fluido. Já na Fig. 4.1 (b) visualiza-se a lateral do molde, em que se pode perceber as duas placas perfuradas por onde o fluido escoar e impregna o meio poroso.

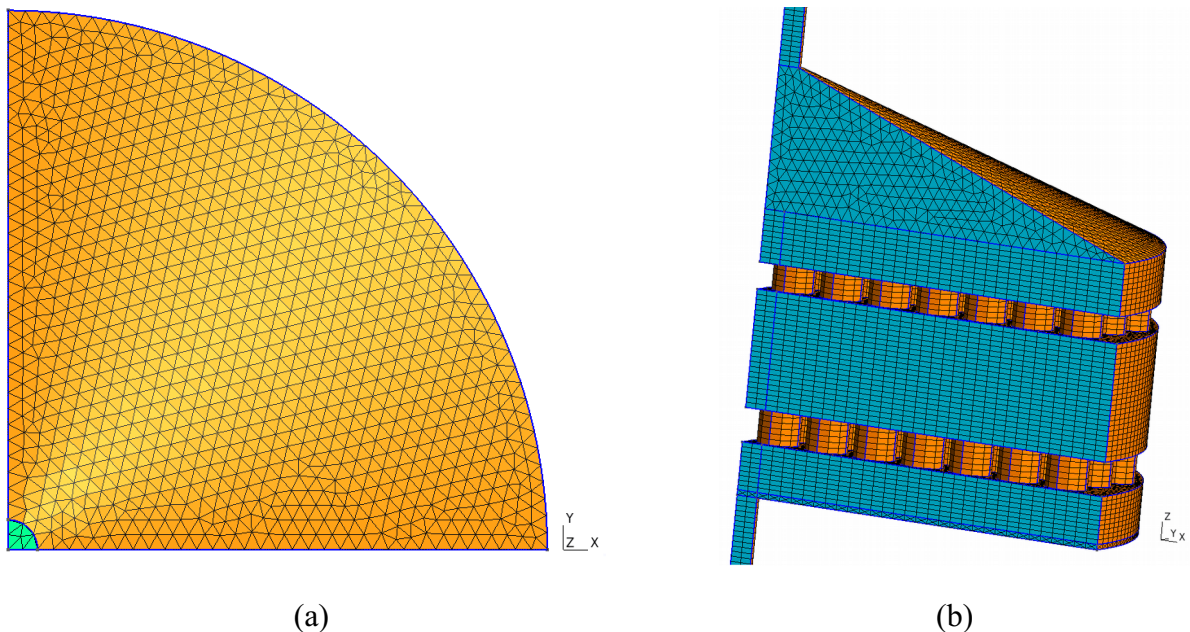


Figura 4.1. Domínio computacional tridimensional (a) Vista superior (b) Corte no plano xz

As condições de contorno do problema são mostradas na Fig. 4.2. Na seção de saída são prescritas pressão zero e derivada nula na direção do escoamento para a fração volumétrica. Na

entrada são especificadas a velocidade do escoamento e uma fração volumétrica $f = 1$. Nas paredes do molde aplica-se a condição de não deslizamento para o escoamento e derivada nula (normal a superfície) para a fração volumétrica. Como somente um quarto do molde foi discretizado, a condição de simetria foi aplicada nas faces em azul da Fig. 4.2. Ainda na Fig. 4.2, em laranja observa-se os tubos e em vermelho as secções de entrada e saída do molde.

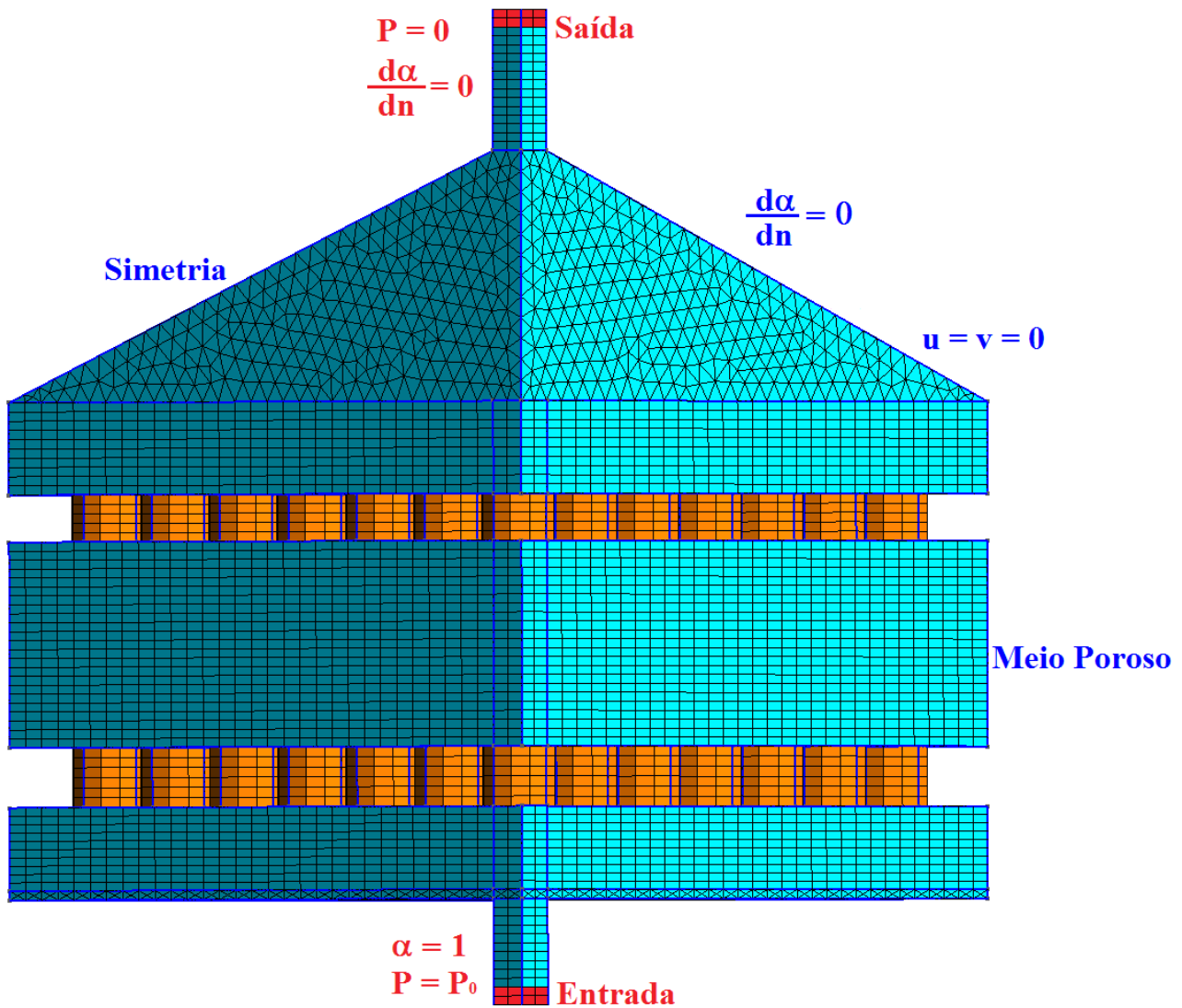


Figura 4.2. Condições de contorno do modelo tridimensional (Fonte: Elaborado pelo autor)

O modelo axissimétrico desenvolvido para a representação do molde visto na Fig. 4.3 trata de uma simplificação do modelo tridimensional. Essa simplificação resulta em um custo computacional menor o que justifica a tentativa de utilizá-la. Conforme mostrado na Fig. 4.3, no modelo axissimétrico, somente uma “fatia” do domínio computacional é considerada. Desta forma, a discretização no plano xoy passa a ter apenas um volume, diminuindo assim significativamente o

tamanho da malha. A aproximação axissimétrica modifica o problema de maneira que os furos do modelo tridimensional são convertidos em anéis no modelo axissimétrico. O diâmetro dos furos, anéis no modelo axissimétrico, precisa ser corrido para que a área total de passagem da resina seja a mesma em ambas as simulações. Mesmo com esta simplificação, os resultados de ambas as simulações foram muito parecidas conforme apresentado no item 6.3.3.

Na Figura 4.3 são também mostradas as condições de contorno do problema que são as mesmas já discutidas para o caso 3D, com exceção da condição de simetria que foi substituída pela condição de axissimetria.

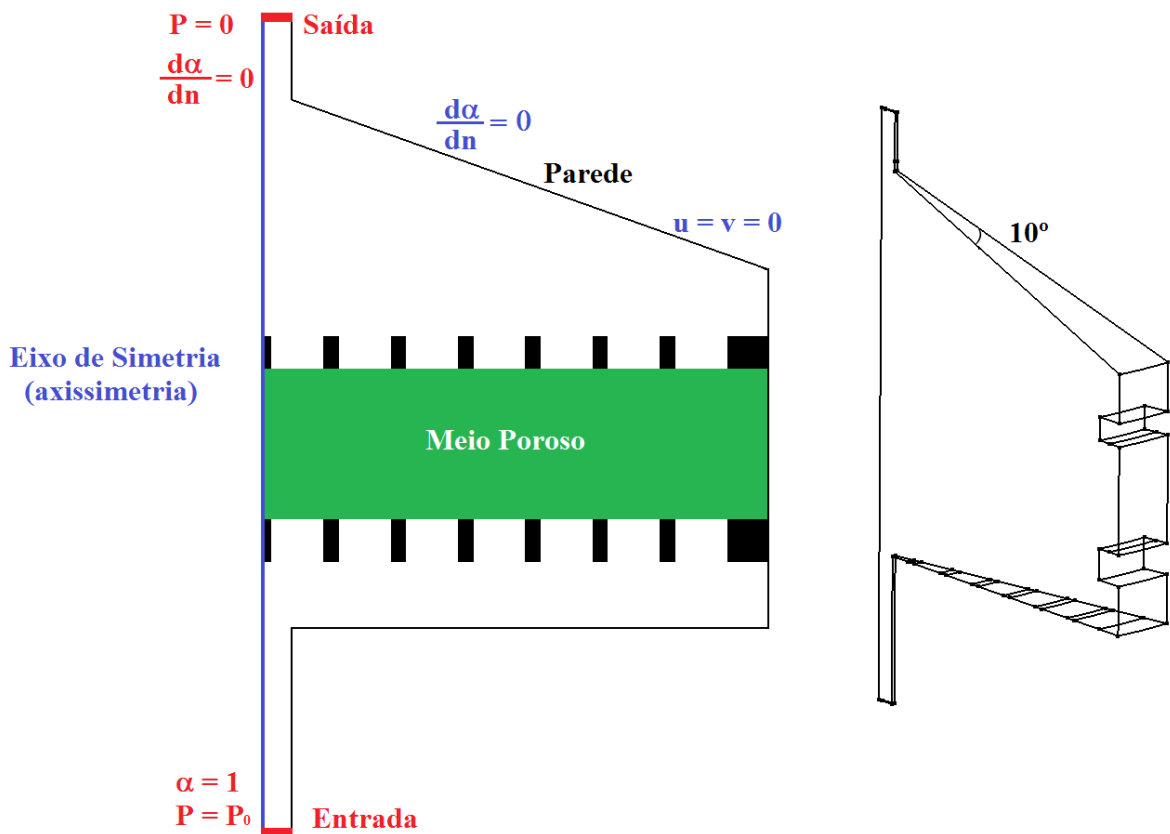


Figura 4.3. Condições de contorno do modelo axissimétrico (Fonte: Elaborado pelo autor).

4.1. Simulação Numérica

Os modelos numéricos desenvolvidos para resolver os problemas de moldagem líquida estudados neste trabalho foram desenvolvidos no software livre OpenFOAM (2017). Nesse software, é realizado o processamento da solução numérica pelo solver *interFoam*.

De acordo com a documentação do OpenFOAM (2017), o solver *interFoam* é baseado no método VOF e é adotado em casos que se utilizam dois fluidos imiscíveis. Em casos de problemas

de moldagem líquida, esses dois fluidos são ar e resina.

Por tratar-se de um domínio computacional complexo, em um primeiro momento foi utilizada a estratégia de realizar a simulação numérica utilizando-se um modelo axissimétrico, considerando apenas uma “fatia” do molde para que se pudesse compreender melhor o modelo, aliando a isso um custo computacional menor, se comparado ao modelo tridimensional. Em um segundo momento, um modelo tridimensional foi elaborado, considerando apenas um quarto do molde, conforme já relatado anteriormente.

O primeiro passo a ser seguido no OpenFOAM é importar a malha gerada pelo Gmsh. A malha utilizada neste trabalho é composta por elementos hexaédricos e prismas. Após isso, são realizadas as etapas de configuração dos casos a serem estudados. Variáveis como permeabilidade, porosidade, viscosidade dos fluidos, massa específica, pressão de injeção e condições de contorno são definidas nos diversos arquivos de cada uma das simulações. Salienta-se que todo tutorial para realização das simulações numéricas encontra-se no Apêndice I deste trabalho.

A estabilidade da solução foi controlada pelo número de *Courant* (Co), o qual foi mantido abaixo de 0,5, valor esse recomendado para o solver *interFoam*. Como o número de elementos da malha é mantido constante e estabelecido no estudo de solução independente de malha, o passo de integração no tempo varia de maneira a manter $Co \leq 0,5$. Além disso, o passo de integração máximo foi limitado a 0,1 s.

A discretização do domínio computacional no software OpenFOAM foi realizada por meio do método dos volumes finitos. Esse método, segundo Maliska (2010), transforma uma equação diferencial em um sistema de equações algébricas. À partir da solução do sistema de equações algébricas é possível calcular as variáveis de interesse do problema. A principal característica do método de volumes finitos é a conservação das propriedades transportadas dentro do volume de controle, a qual dá estabilidade às soluções e o diferencia de outros métodos como diferenças finitas e elementos finitos.

Ressalta-se que, para iniciar a simulação em regime permanente, o molde é considerado cheio de fluido, ou seja, a fração volumétrica é igual a um. Salienta-se que as simulações deste trabalho foram todas realizadas em regime permanente. A opção por realizar as simulações em regime permanente ocorreu para se evitar um custo computacional desnecessário, pois apenas os dados de vazão volumétrica e do campo de pressão em regime permanente foram utilizados na comparação numérico e experimental. Os parâmetros de controle da simulação são mostrados na Tab. 4.1.

Tabela 4.1. Parâmetros de controle da solução numérica

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

Uma etapa crucial para o bom funcionamento e estabilidade da solução numérica diz respeito à definição das funções de interpolação utilizadas, as quais são definidas no arquivo *fvSchemes*. Maiores informações sobre as funções de interpolação de cada um dos termos podem ser obtidas no Apêndice I.

Outro arquivo fundamental para a simulação numérica é o *controlDict*. Nesse arquivo, informações quanto ao tempo de simulação que deve ser adotado, bem como funções de monitoramento de variáveis tais como vazão volumétrica ou do gradiente de pressão, podem ser inseridas, além, é claro, de definir uma variável importante que é o *Courant Number*. O número de *Courant*, já citado anteriormente, é um critério de estabilidade da solução que restringe o passo de tempo em função da velocidade do escoamento e da discretização utilizada. Na definição do valor para o *Courant Number*, recorreu-se aos tutoriais do OpenFOAM¹, indicando que a utilização do *Courant Number* em 0,5 oferece uma estabilidade numérica para todos os casos do seu estudo. Como se procurava neste trabalho uma boa estabilidade numérica, optou-se por tentar esse valor e, desde as primeiras simulações, bons resultados foram obtidos, não necessitando assim, empreender mais esforços acerca dessa variável.

O algoritmo utilizado para resolver o problema de acoplamento pressão-velocidade foi o PIMPLE, que é uma combinação do SIMPLE e do PISO, que são algoritmos já reconhecidos no meio acadêmico.

Salienta-se, mais uma vez, que todas as simulações realizadas na execução deste trabalho

¹ <https://cfd.direct/openfoam/user-guide>

foram feitas com o escoamento em regime permanente, ou seja, com o molde totalmente preenchido de fluido. Além disso, ressalta-se que o tempo de processamento de casos axissimétricos era de aproximadamente 10 min, enquanto que nos casos tridimensionais o tempo era de, aproximadamente, 8 h, ou seja, 48 vezes maior que o tempo do modelo axissimétrico.

5. Ensaios Experimentais

Os ensaios experimentais apresentados neste trabalho foram realizados no LaPol/UFRGS e foram divididos em dois grupos:

I) Ensaios Homogêneos: foram realizados ensaios experimentais com utilização de reforço fibroso constituído de apenas um material. Esses ensaios serviram para a validação do modelo computacional desenvolvido, bem como para definir a metodologia a ser considerada para a estimação da permeabilidade do meio poroso;

II) Ensaios Híbridos: nessa seção foram realizados ensaios experimentais com dois diferentes volumes de fibras e a utilização de diferentes empilhamentos dos materiais utilizados: tais como tecido de fibra de Vidro-E e tecido de Kevlar.

5.1. Materiais Utilizados

Na realização dos ensaios experimentais, utilizou-se um molde circular. Uma representação esquemática e da montagem do mesmo podem ser vistas na Fig. 5.1.

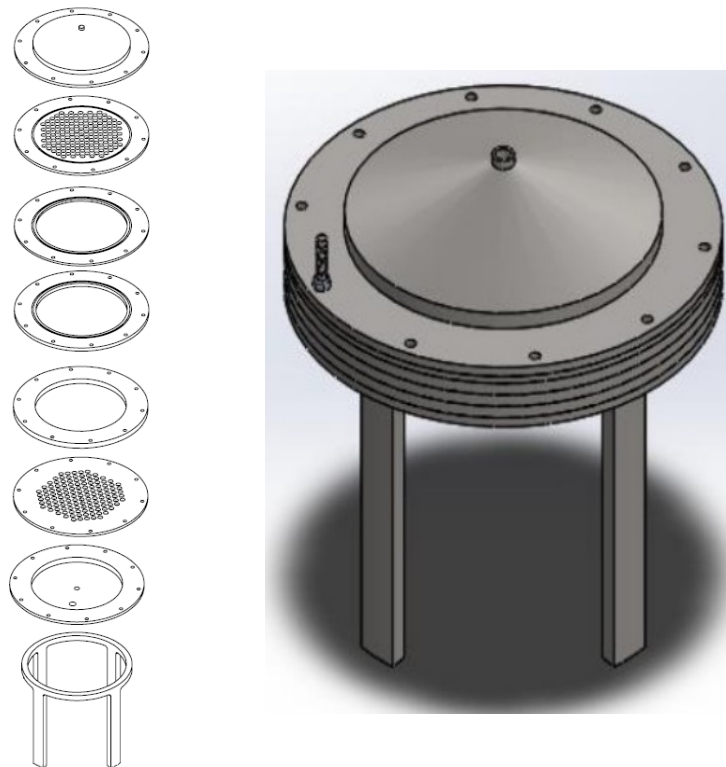


Figura 5.1. Representação do molde experimental (Fonte: Escher e Santos, 2016)

Além do molde, foram utilizados três tipos de fibra:

- Tecido de Vidro-E com gramatura $0,303 \text{ kg/m}^2$ e massa específica de 2520 kg/m^3 ;
- Tecido de Vidro-E com gramatura $0,330 \text{ kg/m}^2$ e massa específica de 2772 kg/m^3 ;
- Tecido de Kevlar com gramatura $0,532 \text{ kg/m}^2$ e massa específica de 1440 kg/m^3 ;
- Óleo de soja comercial para as infiltrações com viscosidade variando entre $0,0535 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$) e $0,0611 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (temperatura de $19 \text{ }^\circ\text{C}$), em substituição à resina polimérica.

O tecido de fibra de vidro-E com gramatura de $0,303 \text{ kg/m}^2$ pode ser visto na Fig. 5.2.

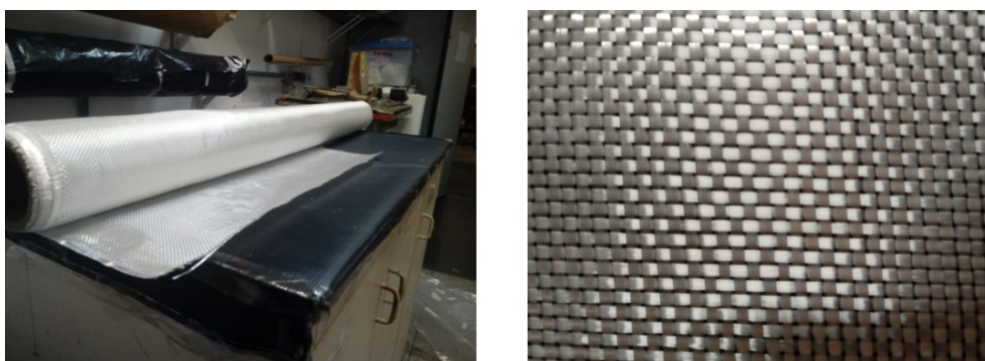


Figura 5.2. Tecido da fibra de vidro-E

Na Fig. 5.2, observa-se, à esquerda, o rolo de tecido de fibra de vidro-E e à direita o tecido de fibra de vidro-E em uma visualização aproximada.

Na Fig. 5.3, observa-se, à esquerda, o rolo do tecido de kevlar e à direita uma imagem aproximada do tecido da fibra de kevlar. Esse tecido de kevlar tem uma gramatura de $0,532 \text{ kg/m}^2$ e massa específica de 1440 kg/m^3 .

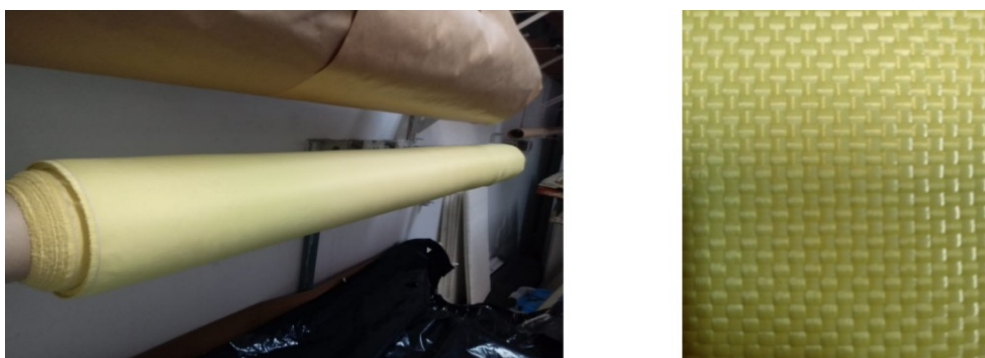


Figura 5.3. Tecido da fibra de kevlar

O molde apresentado na Fig. 5.1 é metálico e composto por um espaço compreendido entre

duas placas perfuradas onde o reforço fibroso deve ser colocado. A parte interna do molde pode ser observada no corte mostrado na Fig. 5.4.

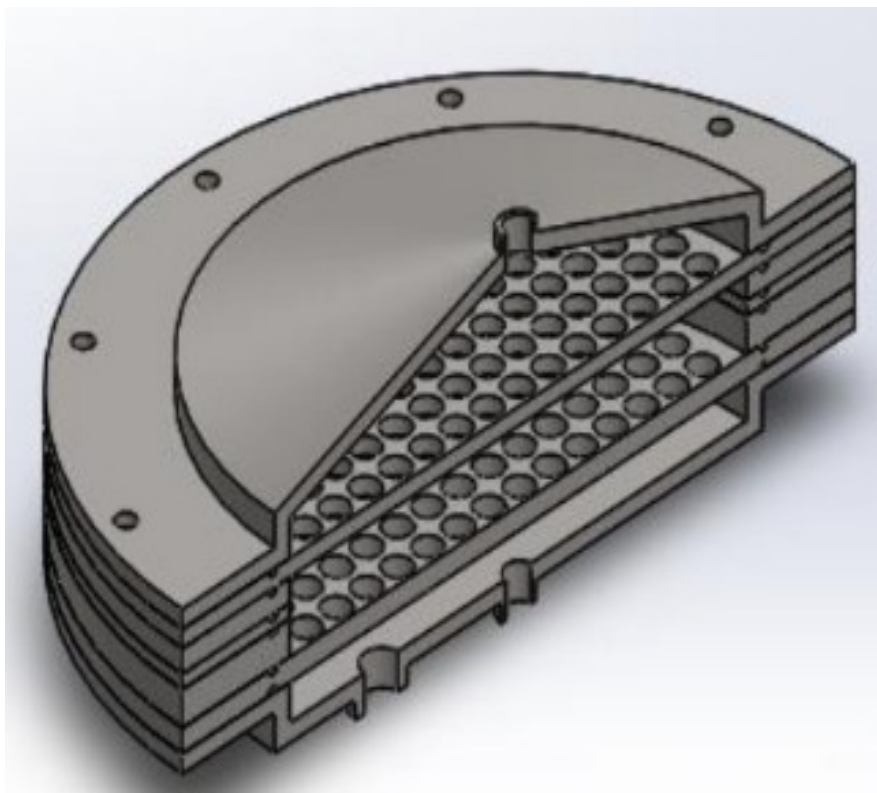


Figura 5.4. Visão em corte do molde experimental (Fonte: Escher e Santos, 2016)

Uma representação do molde pode ser visto na Fig. 5.4, nela se observa o dispositivo usado neste trabalho para a determinação da permeabilidade transversal. No molde da Fig. 5.4 é possível observar a cavidade onde será colocada a pré-forma fibrosa, a qual é disposta entre as duas placas perfuradas utilizadas para forçar um escoamento unidimensional na direção perpendicular aos tecidos. O posicionamento dos furos segue a recomendação sugerida por Chae, Song e Youn (2007).

Salienta-se que a altura entre as duas placas perfuradas é definida pelos espaçadores. Estes são anéis metálicos com diâmetro interno igual a secção transversal do molde (por onde passa a resina) e podem ser montados de maneira que o espaçamento entre as placas perfuradas possa atingir alturas de 3,80 mm, 6,35 mm, 9,53 mm, 15,88 mm e 22,23 mm.

Cada placa perfurada possui 156 furos com 8 mm de diâmetro cada um. Os pontos de entrada e saída do fluido possuem 8,3 mm de diâmetro, enquanto que o diâmetro interno do molde é de 163,66 mm.

Para ajudar o leitor a visualizar como é constituída a placa perfurada e a tampa superior que

fecha o molde, a seguir apresenta-se na Fig. 5.5 essas representações e suas respectivas medidas em milímetros.

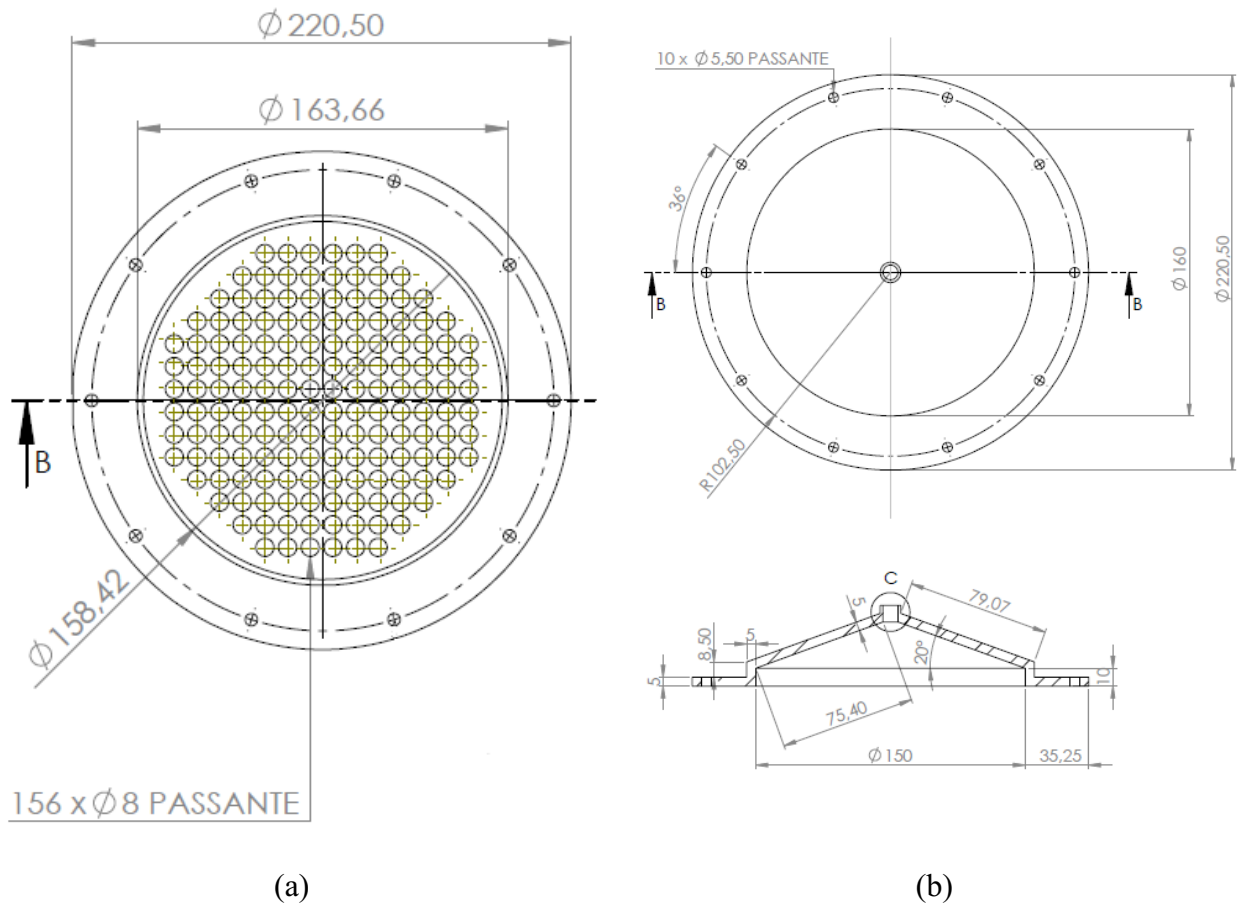


Figura 5.5. Detalhes do molde: (a) Placa perfurada. (b) Tampa superior. (Fonte: Escher e Santos, 2016)

Na Fig. 5.5 (a), pode-se visualizar como são distribuídos os 156 furos na placa perfurada; ressalta-se que as duas placas perfuradas que compõem o molde possuem a mesma quantidade e localização dos furos. Já na Fig. 5.5 (b), visualiza-se o cilindro superior, que serve para fechamento do molde e onde está localizado o ponto de saída do fluido. Ressalta-se que a dimensão do ponto de saída é igual à do ponto de entrada, tornando-se desnecessária a inserção da imagem do cilindro inferior para mostrar a representação e as medidas dele.

Neste experimento, a pressão é controlada na entrada do dispositivo (pela parte inferior) e a vazão correspondente medida com o auxílio de uma balança de precisão que mede a quantidade (massa) de resina que passa através do equipamento em função do tempo. Essa vazão mássica é posteriormente convertida em vazão volumétrica. Na Fig. 5.6 observa-se o aparato experimental

utilizado para as medições da permeabilidade. Neste estudo, utilizou-se uma balança de precisão Shimadzu modelo AX 200 (0,1 g), um *notebook* para a aquisição dos dados de pressão por meio do software FieldChart, molde metálico já descrito anteriormente, câmera digital para registro das fotos das medidas de massa, cronômetro, vaso de pressão, transdutores de pressão calibrados e um controlador eletrônico de pressão (*druck*).



Figura 5.6. Aparato experimental (Fonte: Elaborado pelo autor)

A partir de uma razão entre a vazão e a pressão, é possível estimar o valor da permeabilidade do reforço fibroso utilizado. Essa razão é uma variação da Eq. (3.16) e pode ser observada a seguir:

$$K = \frac{\dot{V} \cdot \mu \cdot h}{\Delta P \cdot A} \quad (5.1)$$

sendo K a permeabilidade (m^2), $\dot{V}$ é a vazão volumétrica (m^3/s), μ é a viscosidade do óleo ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), h é a altura (m), ΔP é a variação de pressão (Pa) e A é a área da seção transversal (m^2). Salienta-se ainda que o volume de fibras foi determinado a partir da resolução das Eqs. 5.2-5.4:

$$m_f = n_c \cdot m_c \quad (5.2)$$

$$V_{f_c} = \frac{m_f}{\rho} \quad (5.3)$$

$$V_f = \frac{V_{f_c}}{V} = \frac{n_c \cdot m_c}{\rho h} \times 100 \quad (5.4)$$

sendo m_f a massa de fibras (kg), n_c o número de camadas, m_c a gramatura (kg/m²), Vf_c o volume de fibras por camada (%), ρ a massa específica (kg/m³), Vf o volume de fibras (%) e V o volume do molde (m³).

5.1.1. Ensaios Homogêneos – Grupo LaPol

As informações foram compiladas a partir de dados disponíveis em Trindade et al. (2019). A partir dos ensaios realizados por Trindade et al. (2019)², pode-se perceber a influência do volume de fibras na obtenção da permeabilidade, bem como a importância da compactação das fibras nessa medição. Os ensaios realizados por Trindade et al. (2019) consideraram diferentes volumes de fibras, com valores entre 35% e 70%, e com a utilização de tecido de Kevlar e espaçadores de 9,53 mm, 15,88 mm e 22,23 mm; também foram utilizados tecido de fibra de vidro-E com o uso de espaçadores de 3,80 mm, 6,35 mm, 9,35 mm, 15,88 mm e 22,23 mm.

Convém ressaltar que a altura do espaçador é definida pela distância entre as placas perfuradas que compõem o molde. Na determinação da permeabilidade através da Eq. 5.1, Trindade et al. (2019) utilizou a área total da seção transversal do molde. Os resultados para os ensaios com fibras de kevlar e espaçador de 22,23 mm podem ser observados na Tab. 5.1.

Tabela 5.1. Dados experimentais para reforços homogêneos de kevlar

(Fonte: Trindade et al., 2019)

22,23 (mm)			15,88 (mm)			9,35 (mm)		
Vf (%)	n_c	K_{zz} (m ²)	Vf (%)	n_c	K_{zz} (m ²)	Vf (%)	n_c	K_{zz} (m ²)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	34,90	9	4,25x10 ⁻¹²
34,91	21	2,09x10 ⁻¹²	34,91	15	2,26x10 ⁻¹²	38,78	10	2,54x10 ⁻¹²
41,56	25	1,51x10 ⁻¹²	39,57	17	1,87x10 ⁻¹²	42,66	11	1,85x10 ⁻¹²
49,88	30	8,83x10 ⁻¹³	48,87	21	1,02x10 ⁻¹²	46,54	12	1,44x10 ⁻¹²
56,53	34	5,98x10 ⁻¹³	55,86	24	6,79x10 ⁻¹³	50,42	13	1,06x10 ⁻¹²
63,18	38	3,78x10 ⁻¹³	62,84	27	4,87x10 ⁻¹³	54,29	14	8,52x10 ⁻¹³
69,83	42	1,71x10 ⁻¹³	69,82	30	2,83x10 ⁻¹³	62,05	16	5,60x10 ⁻¹³
-----	-----	-----	-----	-----	-----	69,81	18	3,72x10 ⁻¹³

2 As planilhas originais do trabalho de Trindade et al. (2019) foram disponibilizadas na íntegra para este trabalho.

Os resultados da Tab. 5.1 estão de acordo com o que era esperado; ou seja, o valor da permeabilidade diminuiu à medida que o volume de fibras aumentou, deixando evidente que essas duas variáveis são inversamente proporcionais.

Nota-se que, considerando o V_f de aproximadamente 35%, obteve-se uma permeabilidade de $4,25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ para a altura de 9,35 mm. Já na altura de 15,88 mm, o valor encontrado foi de $2,26 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ e na altura de 22,23 mm a permeabilidade medida foi de $2,09 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, indicando que a medição da permeabilidade é influenciada pela espessura do reforço. Este comportamento é repetido para os demais V_f s conforme mostrado na Fig. 5.7. Para os menores V_f s (35% e 40%) a variação com a espessura do molde é bem mais pronunciada do que para os V_f s maiores. Nos V_f s maiores, a compactação do reforço é maior, diminuindo os caminhos através dele fazendo com que a espessura do molde tenha menos influência no valor da permeabilidade. No entanto, nota-se para todos os casos, uma tendência de diminuição da permeabilidade com o aumento da espessura do reforço. Isto é devido ao fato de que a cada camada de reforço adicionada, o número de caminhos possíveis para a passagem da resina diminui, diminuindo assim o valor da permeabilidade transversal. Deve-se lembrar que este comportamento é diferente ao que acontece com a medição das permeabilidades no plano, onde a resina passa entre as camadas do reforço e a distância a ser percorrida pela mesma (resina) tem menos influência (normalmente esta é ignorada) no valor da permeabilidade.

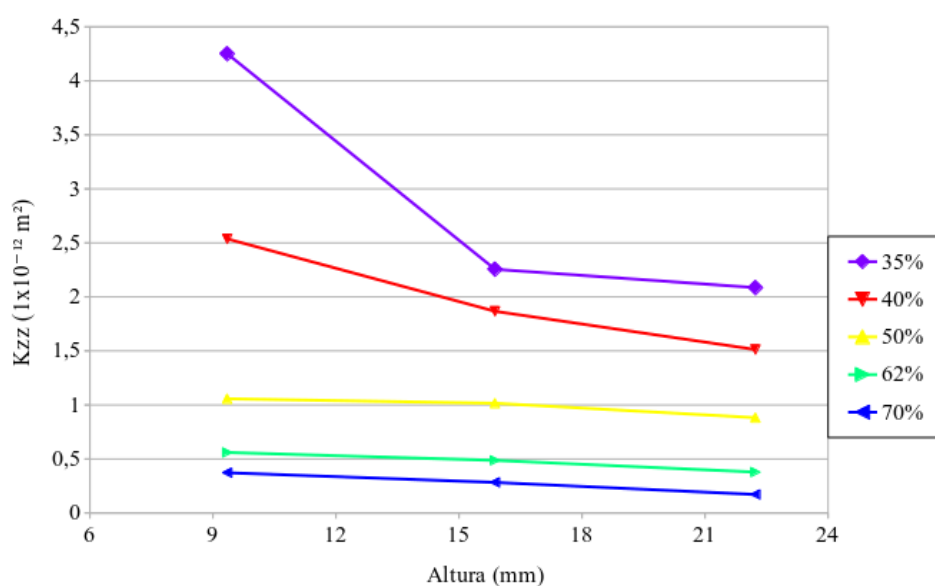


Figura 5.7. Relação permeabilidade x altura com kevlar. Fonte: (Trindade et al., 2019)

No estudo de Trindade et al. (2019), também foram realizados ensaios homogêneos com

fibra de vidro-E. Observa-se, nos resultados com a utilização da fibra de vidro-E apresentados na Tab. 5.2, uma mesma tendência que já havia sido observada nos ensaios com a utilização de tecido de kevlar; ou seja, à medida que o V_f aumenta, a permeabilidade diminui. O estudo de Trindade et al. (2019) utilizou mantas de vidro-E com gramatura de 0,303 kg/m² e os resultados vistos na Tab. 5.2.

Tabela 5.2. Dados experimentais para reforços homogêneos de vidro-E (Trindade et al., 2019)

22,23 (mm)			15,88 (mm)			9,35 (mm)			6,35 (mm)			3,80 (mm)		
V_f (%)	n_c	K_{zz} (m ²)	V_f (%)	n_c	K_{zz} (m ²)	V_f (%)	n_c	K_{zz} (m ²)	V_f (%)	n_c	K_{zz} (m ²)	V_f (%)	n_c	K_{zz} (m ²)
34	35	6,35x10 ⁻¹²	34	35	7,37x10 ⁻¹²	34	35	1,04x10 ⁻¹¹	34	35	1,42x10 ⁻¹¹	35	35	3,20x10 ⁻¹¹
41	41	2,75x10 ⁻¹²	41	41	3,55x10 ⁻¹²	40	41	5,57x10 ⁻¹²	40	41	7,27x10 ⁻¹²	41	41	1,69x10 ⁻¹¹
49	51	1,54x10 ⁻¹²	50	51	2,56x10 ⁻¹²	49	51	2,95x10 ⁻¹²	50	51	4,47x10 ⁻¹²	51	51	9,68x10 ⁻¹²
56	57	1,22x10 ⁻¹²	56	57	1,34x10 ⁻¹²	57	57	1,27x10 ⁻¹²	57	58	1,99x10 ⁻¹²	57	58	5,26x10 ⁻¹²
65	65	5,04x10 ⁻¹³	65	65	5,65x10 ⁻¹³	63	65	5,24x10 ⁻¹³	65	66	8,69x10 ⁻¹³	63	66	2,69x10 ⁻¹²
69	70	3,41x10 ⁻¹³	69	70	2,71x10 ⁻¹³	68	70	3,29x10 ⁻¹³	69	70	5,40x10 ⁻¹³	70	70	1,28x10 ⁻¹²

Nota-se na Fig. 5.8, assim como fora na Fig. 5.7, que à medida que o V_f aumenta, fica menos perceptível a diminuição da permeabilidade. Como já explicado, isto é devido a uma maior compactação das fibras em volumes de fibras maiores.

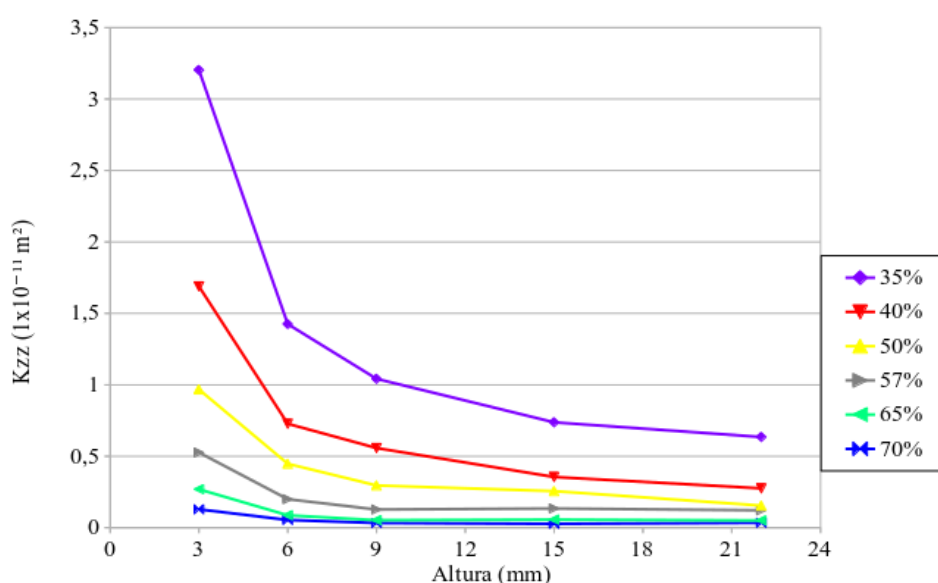


Figura 5.8. Relação permeabilidade x altura com vidro-E. Fonte: (Trindade et al., 2019)

5.1.2. Ensaio de Espessura de Camadas

O ensaio de espessura de camadas é feito por compressão, em que as fibras secas foram colocadas na prensa e comprimidas até que atingissem a altura de 22,23 mm. A prensa pode ser observada na Fig. 5.9. Como no experimento de infiltração as fibras são comprimidas antes da injeção do óleo, foi assumido que a saturação do meio não influencia na espessura final das camadas dos diferentes reforços.



Figura 5.9. Prensa hidráulica.

Após comprimir as fibras até a altura de 22,23 mm, foram tiradas fotografias para se estimar a altura de cada um dos reforços fibrosos. Salienta-se que, assim como nos ensaios de permeabilidade, foram realizadas três repetições para cada experimento e a altura considerada era a média obtida em cada ensaio.

6. RESULTADOS

Os resultados apresentados neste trabalho serão divididos em três seções. A primeira refere-se à parte experimental realizada com o auxílio do grupo do LaPol/UFRGS. A segunda parte dos resultados refere-se à solução analítica obtida a partir do equacionamento proposto. Finalmente a terceira parte foi obtida pelas soluções numéricas desenvolvidas com o auxílio dos recursos computacionais mencionados anteriormente.

6.1. Resultados Experimentais

Os dados experimentais deste trabalho são apresentados em três grupos: o primeiro refere-se aos resultados de ensaios homogêneos realizados pelo grupo do LaPol; o segundo se refere aos resultados dos ensaios homogêneos e híbridos realizados durante a execução deste trabalho e, finalmente, o terceiro, que é o estudo da espessura de camadas.

6.1.1. Resultados dos Ensaios Homogêneos

Nesta seção, são apresentados os resultados dos ensaios homogêneos realizados durante a execução deste trabalho. Para este estudo foram utilizados dois tipos de fibras: tecido de fibra de vidro-E e tecido de fibra de kevlar. Os ensaios foram realizados para a altura de 22,23 mm.

Os resultados com a utilização de kevlar e um V_f de 36,5% são mostrados na Tab. 6.1.

A partir deste ponto, a área da secção transversal da Eq. 5.1, A , será redefinida para contemplar o valor correto utilizado, desta forma:

$A = A_t$ indica que a área da secção transversal é utilizada;

$A = A_{156}$ indica que a área de 156 furos (todos) é utilizada;

$A = A_{56}$ indica que a área de 56 furos é utilizada.

Salienta-se que, a medida de permeabilidade obtida nestes ensaios está de acordo com a Eq. (5.1) e os dados apresentados na Tab. 6.1 foram obtidos de quatro formas distintas, contudo, apenas a área variou.

Tabela 6.1. Dados experimentais de permeabilidade para reforços homogêneos de kevlar – V_f 36,5%

Experimento	K_{zz} (m ²)			
	1	2	3	4
	($A = A_t$)	($A = A_{156}$)	($A = A_t$)	($A = A_{100}$)
	56 furos tapados		56 furos tapados	
1	$5,43 \cdot 10^{-12}$	$1,22 \cdot 10^{-11}$	$3,72 \cdot 10^{-12}$	$1,31 \cdot 10^{-11}$
2	$5,07 \cdot 10^{-12}$	$1,14 \cdot 10^{-11}$	$3,56 \cdot 10^{-12}$	$1,25 \cdot 10^{-11}$
3	$4,92 \cdot 10^{-12}$	$1,11 \cdot 10^{-11}$	$3,51 \cdot 10^{-12}$	$1,23 \cdot 10^{-11}$
4	$4,77 \cdot 10^{-12}$	$1,07 \cdot 10^{-11}$	$3,13 \cdot 10^{-12}$	$1,10 \cdot 10^{-11}$
5	$4,66 \cdot 10^{-12}$	$1,05 \cdot 10^{-11}$	$3,02 \cdot 10^{-12}$	$1,06 \cdot 10^{-11}$
Média	$4,97 \cdot 10^{-12}$	$1,12 \cdot 10^{-11}$	$3,39 \cdot 10^{-12}$	$1,19 \cdot 10^{-11}$
Desvio-Padrão	$2,68 \cdot 10^{-13}$	$5,98 \cdot 10^{-13}$	$2,67 \cdot 10^{-13}$	$9,43 \cdot 10^{-13}$

Os resultados do experimento 1 foram obtidos com a utilização da área correspondente à seção transversal do molde, o que corresponde a $A_t = 0,0176625$ m², desconsiderando que o escoamento se dava por meio de uma placa perfurada. Com o objetivo de aprofundar a discussão acerca da área que deve ser considerada para estimar a permeabilidade, resolveu-se, a partir do mesmo experimento, recalculer o valor da permeabilidade, considerando como área da seção transversal, apenas a área dos furos da placa perfurada. Neste caso, foram utilizados 156 furos e a área correspondente a eles é de $A_{156} = 0,0078414$ m² e esses resultados podem ser observados no experimento 2.

No experimento 3, os resultados foram obtidos por meio de um ensaio com 56 furos tapados, porém no cálculo da permeabilidade foi usado $A_t = 0,0176625$ m². Finalmente no experimento 4, os valores do ensaio com 56 furos tapados foram obtidos com $A_{100} = 0,005026548$ m², por onde efetivamente ocorreu o escoamento.

Salienta-se que os furos foram tapados aleatoriamente conforme apresentado na representação vista na Fig. 6.1.

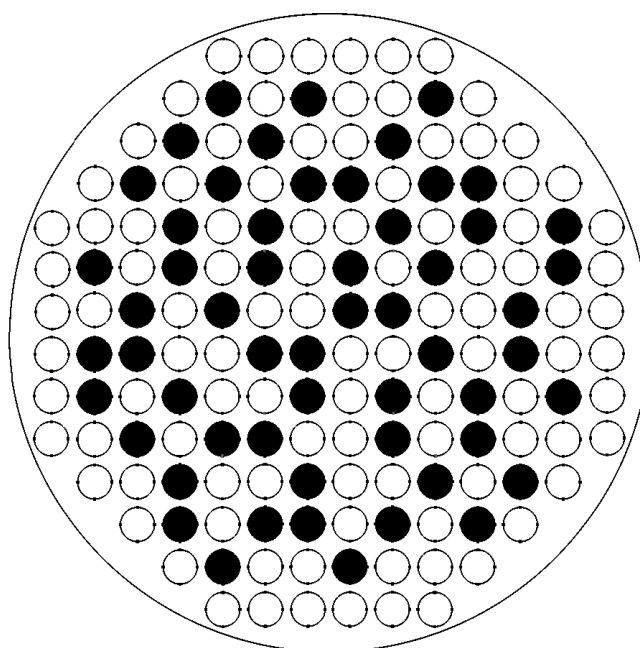


Figura 6.1. Representação da placa perfurada com 56 furos tapados.

Nota-se que nos resultados do experimento 2 os valores de permeabilidade calculados são superiores aos calculados no experimento 1. Analisando-se os resultados do experimento 3, percebe-se que os valores encontrados foram muito maiores que os encontrados no experimento 1, evidenciando que a quantidade de furos da placa perfurada influencia diretamente nos valores de permeabilidade encontrados. Essa teoria é ratificada quando se observa os resultados do experimento 4, pois esses se aproximam bastante dos resultados do experimento 2, indicando que, independente da quantidade de furos utilizados, a área que se deve considerar para a estimativa da permeabilidade é a área dos furos em que, de fato, houve o escoamento.

Quantificando os resultados, percebe-se que na metodologia de considerar a área total da seção transversal, houve uma diferença de mais de 30% entre os dados dos experimento 1 e 3, enquanto que, utilizando-se a área dos furos, a diferença entre os resultados dos experimentos 2 e 4, cai para aproximadamente 6%, indicando assim que a metodologia de considerar a área dos furos que efetivamente foram utilizados para o escoamento é a melhor alternativa.

Dessa forma, os demais ensaios realizados durante a execução deste trabalho foram feitos de acordo com o que fora explanado anteriormente, ou seja, considerando para o cálculo da permeabilidade, a área dos 156 furos ($A_{156} = 0,0078414 \text{ m}^2$) da placa perfurada.

Na Tab. 6.2, são apresentados os resultados dos ensaios para fibra de kevlar com V_f de 50% e fibra de vidro-E com V_f de 36% e 50%.

Tabela 6.2. Dados experimentais de permeabilidade para reforços homogêneos

Ensaio	K_{zz} (m ²)		
	Kevlar – V_f 50%	Vidro-E – V_f 36%	Vidro-E – V_f 50%
1	$4,69 \cdot 10^{-12}$	$1,26 \cdot 10^{-11}$	$6,46 \cdot 10^{-12}$
2	$4,49 \cdot 10^{-12}$	$1,17 \cdot 10^{-11}$	$6,43 \cdot 10^{-12}$
3	$4,36 \cdot 10^{-12}$	$1,15 \cdot 10^{-11}$	$6,40 \cdot 10^{-12}$
4	$4,33 \cdot 10^{-12}$	$1,15 \cdot 10^{-11}$	$6,38 \cdot 10^{-12}$
5	$4,34 \cdot 10^{-12}$	$1,07 \cdot 10^{-11}$	$6,33 \cdot 10^{-12}$
Média	$4,44 \cdot 10^{-12}$	$1,16 \cdot 10^{-11}$	$6,40 \cdot 10^{-12}$
Desvio-Padrão	$1,37 \cdot 10^{-13}$	$6,07 \cdot 10^{-13}$	$4,43 \cdot 10^{-14}$

Todos os ensaios homogêneos foram realizados para uma altura de 22,23 mm e volume de fibras de 36% e 50%. Os resultados apresentados na Tab. 6.2 indicam uma diminuição no valor da permeabilidade média à medida que o V_f aumenta.

Na Figura 6.2 são compilados os ensaios de kevlar e vidro-E para os dois volumes de fibras considerados e altura de 22,23 mm. Esta ajuda a evidenciar as variações entre os dois tipos de material entre si e entre os diferentes volumes de fibra.

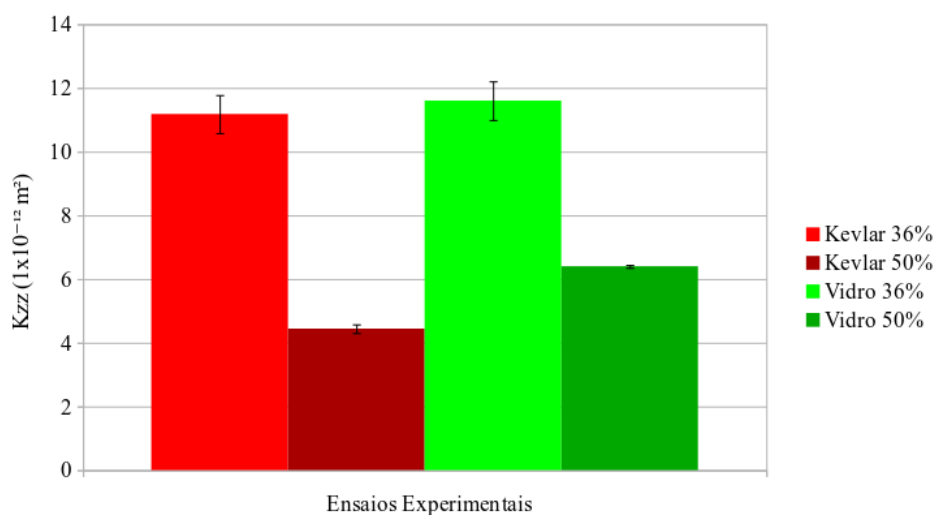


Figura 6.2. Relação V_f x permeabilidade para os ensaios homogêneos.

Os resultados da permeabilidade média apresentados na Fig. 6.2, estão de acordo com o

esperado. Os valores da permeabilidade do reforço de vidro-E é maior que o de kevlar para os dois volumes de fibra estudados e a permeabilidade diminui à medida que o volume de fibras aumenta.

Outro resultado que deve ser discutido está relacionado à compactação das fibras. Conforme dito anteriormente, para o V_f de 36%, há uma menor compactação das fibras, tanto de vidro-E como de kevlar, exatamente porque esse volume de fibras compreende a menor quantidade de material possível para preencher a altura de 22,23 mm do molde. No entanto, o kevlar sofre uma maior compactação que o vidro-E, pois a gramatura desse material é maior, efeito este que é melhor observado para o V_f de 50%.

6.1.2. Resultados dos Ensaios Homogêneos da Literatura – Nova Proposta

Os resultados experimentais de Trindade et al. (2019), apresentados no capítulo 4, foram recalculados de acordo com a metodologia proposta na seção anterior; ou seja, utilizavam os mesmos dados experimentais relativos à vazão volumétrica e às medidas de pressão, alterando apenas a área considerada, que deixou de ser a área total da seção transversal e passou a ser a área dos 156 furos da placa perfurada.

Os resultados recalculados podem ser observados no Apêndice A. Na Fig. 6.3, apresenta-se o gráfico com os resultados dos valores de permeabilidade com as duas metodologias.

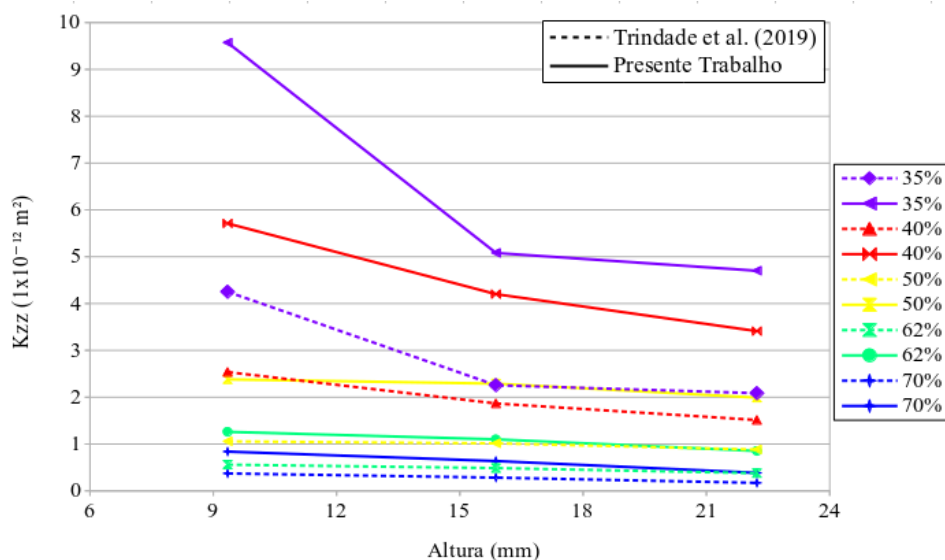


Figura 6.3. Comparação dos valores de permeabilidade do kevlar utilizando a metodologia proposta neste trabalho.

Pode-se visualizar, nos resultados apresentados na Fig. 6.3, que, o valor da permeabilidade,

utilizando-se a metodologia proposta, é maior que o valor medido de acordo com o procedimento proposto por Trindade et al. (2019). O aumento da permeabilidade é proporcional à relação entre as áreas, no caso em que $A_t = 0,0177 \text{ m}^2$, enquanto que $A_{156} = 0,0078 \text{ m}^2$, ou seja o valor da área dos furos é aproximadamente 2,25 menor que a área transversal. Dessa forma, a permeabilidade foi calculada pela Eq.(5.1), reescrita na forma:

$$K = \frac{\dot{V} \cdot \mu \cdot h}{\Delta P \cdot A_{156}} \quad (6.1)$$

onde $A_{156} = A/2,25$.

Na Fig. 6.4 observa-se os resultados da comparação entre as duas metodologias para os casos em que foram utilizadas mantas de vidro-E.

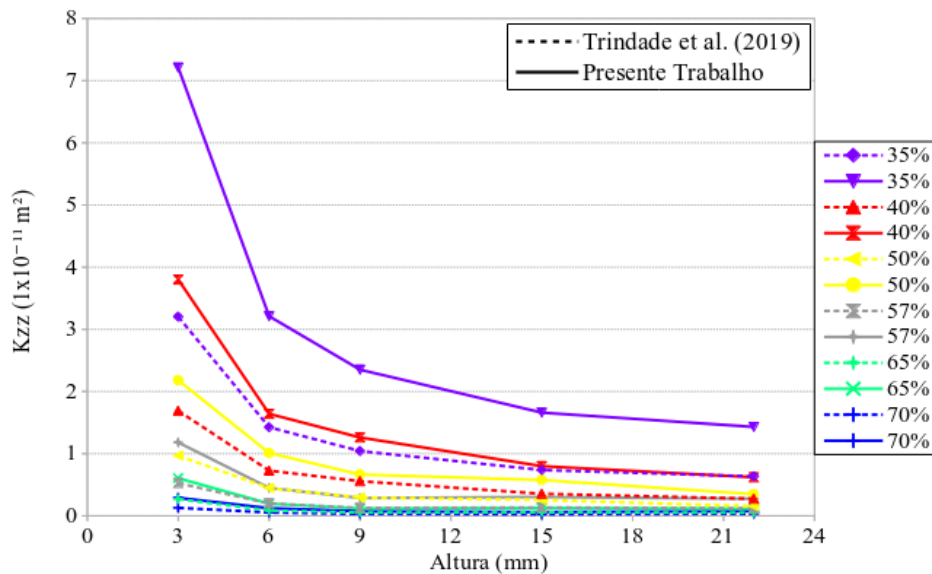


Figura 6.4. Comparação dos valores de permeabilidade de vidro-E utilizando a metodologia proposta neste trabalho.

Como a permeabilidade é inversamente proporcional à área, tem-se que à medida que o valor da área diminui o da permeabilidade aumenta. Dessa forma, os resultados apresentados na Fig. 6.4, obviamente, indicam o mesmo comportamento nos ensaios de vidro-E que foram obtidos nos ensaios com kevlar; ou seja, a permeabilidade considerando a área dos 156 furos é, aproximadamente, 2,25 vezes maior que considerando a área total da seção transversal.

6.1.3. Resultados dos Ensaios Híbridos

Os ensaios híbridos foram realizados com a utilização de tecidos de fibras de vidro-E e kevlar, para as alturas de 22,23 mm e 15,88 mm, e dois volumes de fibra diferentes, 36% e 50%, aproximadamente. Esses valores foram definidos a partir do limite mínimo do volume de fibras para fechamento do molde e do limite máximo que se conseguia colocar no molde sem comprometer o fechamento dele. O empilhamento dos tecidos foi definido com a ideia de se manter quantitativos de mantas que contemplassem os volumes de fibras definidos. Em três desses ensaios o número de mantas foi mantido constante; um com duas pilhas (kevlar e vidro-E) com apenas uma troca de materiais (interface) e em outro mantendo o empilhamento de 3 mantas de vidro-E para 1 manta de kevlar, alternadamente. O V_f foi medido de acordo com a Eq. 5.4. Inicialmente, apresentam-se os resultados dos ensaios híbridos para a altura de 15,88 mm. Os experimentos para o V_f de 36% e 15,88 mm de altura seguiram as seguintes configurações:

- Ensaio I (18G9K): 18 mantas de Vidro-E (parte inferior) e 9 mantas de Kevlar (parte superior); nesse ensaio há apenas uma interface.
- Ensaio II (24G7K): 24 mantas de Vidro-E (parte inferior) e 7 mantas de Kevlar (parte superior); nesse ensaio há apenas uma interface.
- Ensaio III (30G5K): 30 mantas de Vidro-E (parte inferior) e 5 mantas de Kevlar (parte superior); nesse ensaio há apenas uma interface.
- Ensaio IV (24G7K_{Alternado}): 24 mantas de Vidro-E e 7 mantas de Kevlar, sendo colocadas alternadamente 3 mantas de Vidro-E (parte inferior) e 1 manta de Kevlar (parte superior); até o total mencionado. Nesse caso há 14 interfaces.

Os experimentos para a altura de 15,88 mm e V_f de 50% seguiram as seguintes configurações:

- Ensaio V (24G12K): 24 mantas de Vidro-E (parte inferior) e 12 mantas de Kevlar (parte superior); nesse ensaio há apenas uma interface.
- Ensaio VI (30G10K): 30 mantas de Vidro-E (parte inferior) e 10 mantas de Kevlar (parte superior); nesse ensaio há apenas uma interface.
- Ensaio VII (39G7K): 39 mantas de Vidro-E (parte inferior) e 7 mantas de Kevlar (parte superior); nesse ensaio há apenas uma interface.
- Ensaio VIII (30G10K_{Alternado}): 30 mantas de Vidro-E e 10 mantas de Kevlar, sendo colocadas alternadamente 3 mantas de Vidro-E (parte inferior) e 1 de Kevlar (parte superior); até o total mencionado. Nesse caso há 19 interfaces.

Os resultados obtidos para os ensaios com altura de 15,88 mm são mostrados na Tab. 6.3. As linha em negrito indicam os experimentos com o mesmo número de camadas para os caso de V_f de 36% (cinza) e V_f de 50%, respectivamente.

Tabela 6.3. Dados experimentais de permeabilidade para reforços híbridos com 15,88 mm – 36% V_f

Ensaio	V_f (%)	K_{zz} (m ²)	Desvio-Padrão (m ²)
18G9K	36	$8,52 \cdot 10^{-12}$	$8,61 \cdot 10^{-13}$
24G7K	36	$1,01 \cdot 10^{-11}$	$9,39 \cdot 10^{-13}$
30G5K	36	$1,08 \cdot 10^{-11}$	$5,36 \cdot 10^{-13}$
24G7K_{Alternado}	36	$8,54 \cdot 10^{-12}$	$5,51 \cdot 10^{-13}$
24G12K	50	$3,60 \cdot 10^{-12}$	$4,64 \cdot 10^{-13}$
30G10K	50	$8,41 \cdot 10^{-12}$	$1,37 \cdot 10^{-13}$
39G7K	50	$5,39 \cdot 10^{-12}$	$3,63 \cdot 10^{-13}$
30G10K_{Alternado}	50	$5,01 \cdot 10^{-12}$	$1,88 \cdot 10^{-13}$

Os resultados apresentados na Tab. 6.1 indicam que no experimento 24G7K (V_f de 36%) a permeabilidade média é um pouco maior que a permeabilidade média no ensaio 24G7K_{Alternado}, o qual possui o mesmo número de mantas, porém empilhadas de forma alternada, totalizando 14 trocas de materiais. No experimento 24G7K temos que $9,161 \times 10^{-12} < K_{zz} < 1,104 \times 10^{-11}$ enquanto que no experimento 24G7K_{Alternado} temos que $7,989 \times 10^{-11} < K_{zz} < 9,091 \times 10^{-12}$. De forma mais pronunciada, para o experimento 30G10K (V_f de 50%) a permeabilidade média é, aproximadamente, 67% maior que a permeabilidade do experimento alternado (30GK_{Alternado}), em que houve 19 trocas de materiais. Desta forma, conclui-se que a ordem de empilhamento influencia no valor da permeabilidade do híbrido, sendo esta influência mais pronunciada para valores altos de V_f .

Nas Figs. 6.5 e 6.6, são apresentados os gráficos dos resultados dos ensaios híbridos de 15,88 mm de altura e volume de fibras de 36% e 50%, respectivamente. Salienta-se que os dados dos ensaios homogêneos foram recalculados a partir do trabalho de Trindade et al. (2019), o qual não apresenta o desvio padrão.

Observa-se ainda nos ensaios, para a altura de 15,88 mm, que para o V_f de 36% a maior

permeabilidade é a do ensaio homogêneo de vidro-E; no entanto, para o V_f de 50% esse comportamento não se repete, pois a permeabilidade do ensaio híbridos 30G10K supera a do ensaio homogêneo de vidro-E.

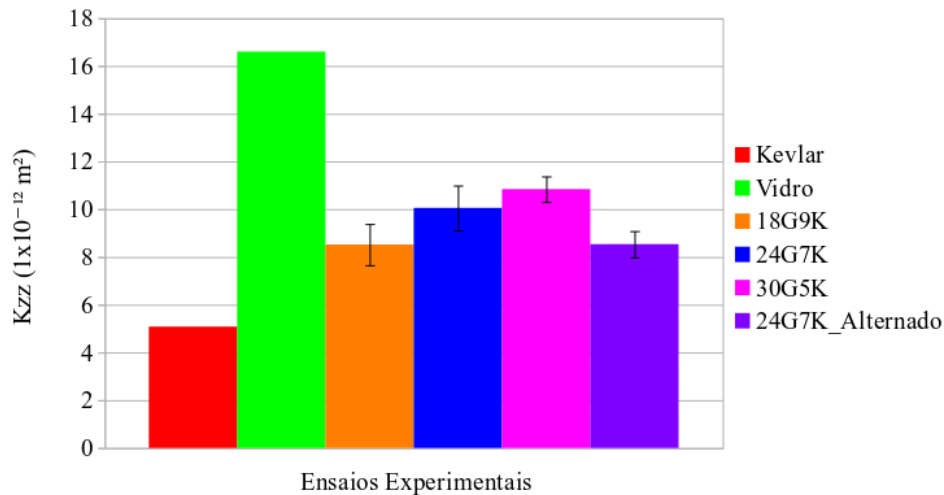


Figura 6.5. Comparação ensaios híbridos x ensaios homogêneos 15,88 mm - V_f de 36%

Pode-se perceber, analisando o gráfico da Fig. 6.5, que as permeabilidades medidas nos ensaios híbridos para V_f de 36% têm aproximadamente, o mesmo valor de permeabilidade (a permeabilidade do caso 30G5K é igual ao caso 24G7K e um pouco maior que os demais). Isto já não se repete nos ensaios com V_f de 50% conforme pode ser visto no gráfico da Fig. 6.6.

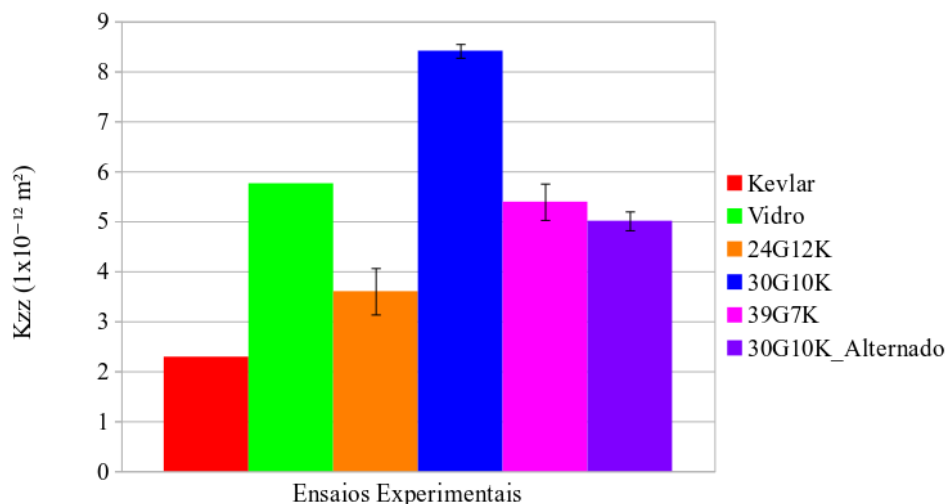


Figura 6.6. Comparação ensaios híbridos x ensaios homogêneos 15,88 mm - V_f de 50%

Com o propósito de aprofundar a discussão acerca dos resultados experimentais, foi realizada uma análise estatística com auxílio do Teste de Fisher (Maroco, 2018). Para o V_f de 36%

os resultados podem ser vistos na Fig. 6.7. O processamento da análise estatística foi utilizado o programa ACTION³.

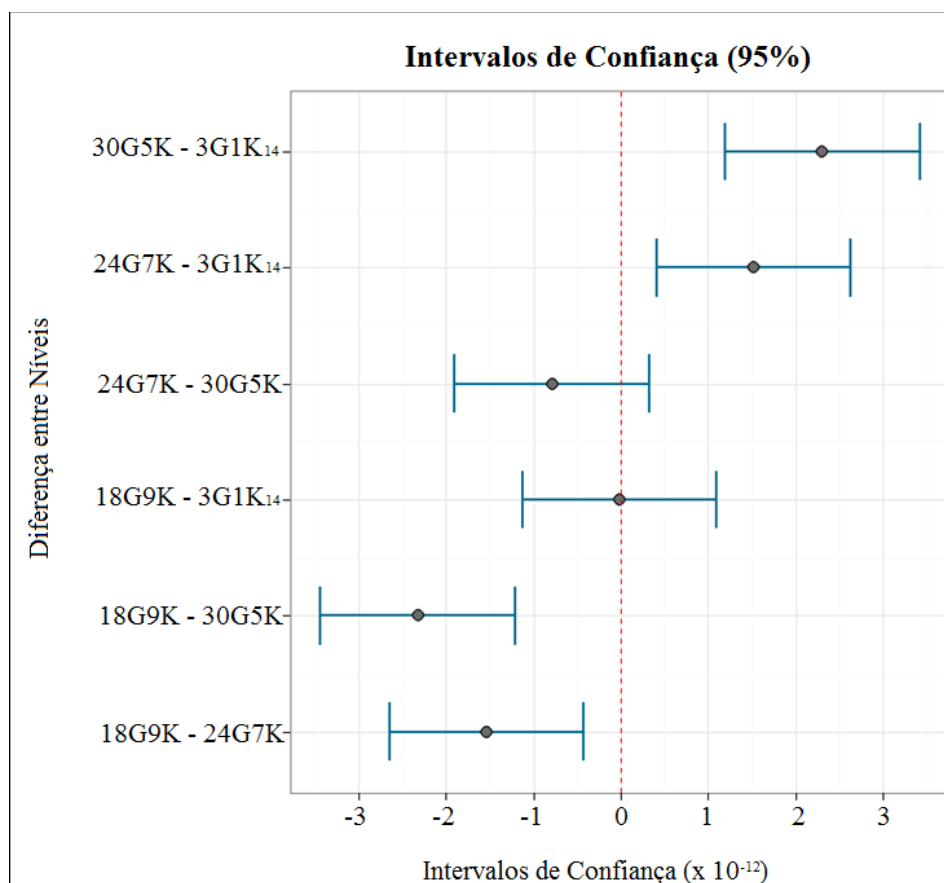


Figura 6.7. Teste de Fisher para a altura de 15,88 mm - V_f de 36%.

Nesse caso, com os resultados obtidos para um nível de significância de 5%, não se rejeita a hipótese de igualdade entre os valores de permeabilidade dos ensaios 24G7K e 30G5K e dos ensaios 18G9K e 3G1K₁₄, conforme já observado na Fig. 6.5 com a análise das médias e desvios padrão.

A análise estatística para a altura de 15,88 mm e V_f de 50% pode ser observada na Fig. 6.8.

Os resultados disponíveis na Fig. 6.8 mostram que considerando-se um nível de significância de 5%, não se rejeita a hipótese de igualdade entre os valores de permeabilidade dos ensaios 39G7K e 3G1K₁₉.

3 Disponível em: <<https://www.portalaction.com.br/anova/32-teste-de-fisher>>. Acesso em 17 de janeiro de 2020.

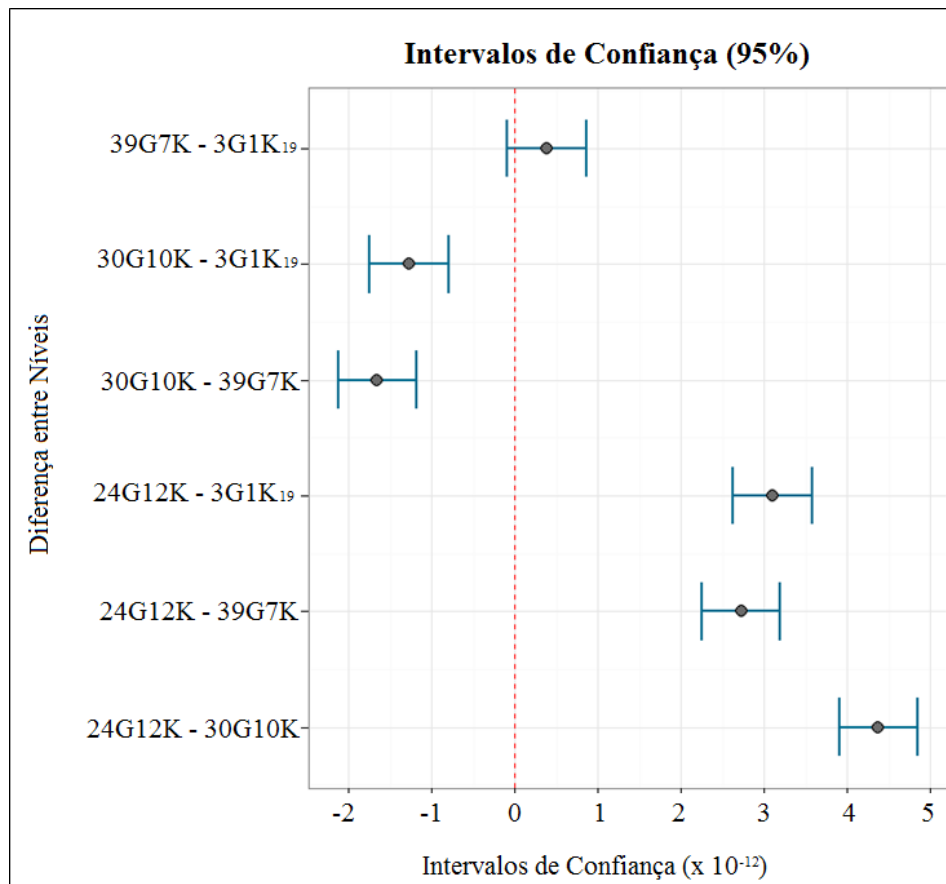


Figura 6.8. Teste de Fisher para a altura de 15,88 mm - V_f de 50%.

A seguir, apresentam-se os resultados de ensaios híbridos para a altura de 22,23 mm. Para cada ensaio, três repetições foram realizadas.

Conforme já citado anteriormente, de acordo com a limitação do dispositivo, foram definidos dois volumes de fibra: um de aproximadamente 36% e outro de aproximadamente 50%. A partir desses valores de V_f , realizaram-se algumas variações no empilhamento das mantas dos tecidos, de modo a evidenciar a importância desse na determinação da permeabilidade. Os experimentos IX ao XII, referentes ao V_f de 36% e os ensaios do XIII ao XVI, referentes ao V_f de 50%, seguiram as seguintes configurações:

- Ensaio IX (24G14K): 24 mantas do tecido de Vidro-E (parte inferior) e 14 mantas do tecido de Kevlar (parte superior), nesse ensaio há apenas uma interface.
- Ensaio X (33G11K): 33 mantas do tecido de Vidro-E (parte inferior) e 11 mantas do tecido de Kevlar (parte superior), nesse ensaio há apenas uma interface.
- Ensaio XI (42G8K): 42 mantas do tecido de Vidro-E (parte inferior) e 8 mantas do tecido de Kevlar (parte superior), nesse ensaio há apenas uma interface.
- Ensaio XII (33G11K_{Alternado}): 33 mantas do tecido de Vidro-E e 11 mantas do tecido de

Kevlar, sendo colocadas, alternadamente, 3 mantas do tecido de Vidro-E (parte inferior) e 1 do tecido de Kevlar (parte superior), até o total mencionado. Nesse caso há 21 interfaces.

- Ensaio XIII (30G20K): 30 mantas do tecido de Vidro-E (parte inferior) e 20 mantas do tecido de Kevlar (parte superior), nesse ensaio há apenas uma interface.
- Ensaio XIV (45G15K): 45 mantas do tecido de Vidro-E (parte inferior) e 15 mantas do tecido de Kevlar (parte superior), nesse ensaio há apenas uma interface.
- Ensaio XV (61G10K): 61 mantas do tecido de Vidro-E (parte inferior) e 10 mantas do tecido de Kevlar (parte superior), nesse ensaio há apenas uma interface.
- Ensaio XVI (45G15K_{Alternado}): 45 mantas do tecido de Vidro-E e 15 mantas do tecido de Kevlar, sendo colocadas alternadamente 3 mantas do tecido de Vidro-E (parte inferior) e 1 do tecido de Kevlar (parte superior), até o total mencionado. Nesse caso há 29 interfaces.

Salienta-se que, nos ensaios IV, VIII, com altura de 15,88 mm, definiu-se uma configuração com mais troca de materiais; ou seja, no ensaio IV houve 14 trocas de material, enquanto que, no ensaio VIII, houve 19 trocas de material. Já nos experimentos feitos com altura de 22,23 mm, nos ensaios XII e XVI, também utilizou-se a mesma estratégia e houve 21 e 29 trocas de material, respectivamente.

Os resultados com as médias e desvio-padrão obtidos para os ensaios com V_f de 36% e de 50% são mostrados na Tab. 6.4. Detalhes destes resultados podem ser vistos no Apêndice A.

Tabela 6.4. Dados experimentais de permeabilidade para reforços híbridos 22,23 mm – 36% V_f

Ensaio	V_f (%)	Média K_{zz} (m ²)	Desvio-Padrão (m ²)
24G14K	36	$7,93 \cdot 10^{-12}$	$1,66 \cdot 10^{-13}$
33G11K	36	$1,19 \cdot 10^{-11}$	$2,36 \cdot 10^{-12}$
42G8K	36	$1,10 \cdot 10^{-11}$	$9,18 \cdot 10^{-13}$
33G11K_{Alternado}	36	$8,57 \cdot 10^{-12}$	$2,46 \cdot 10^{-13}$
30G20K	50	$5,15 \cdot 10^{-12}$	$4,84 \cdot 10^{-13}$
45G15K	50	$5,00 \cdot 10^{-12}$	$1,60 \cdot 10^{-13}$
61G10K	50	$4,25 \cdot 10^{-12}$	$5,28 \cdot 10^{-13}$
45G15_{Alternado}	50	$4,17 \cdot 10^{-12}$	$1,71 \cdot 10^{-13}$

Os resultados apresentados na Tab. 6.4 para o V_f de 36% podem ser melhor avaliados observando-se o gráfico da Fig. 6.9.

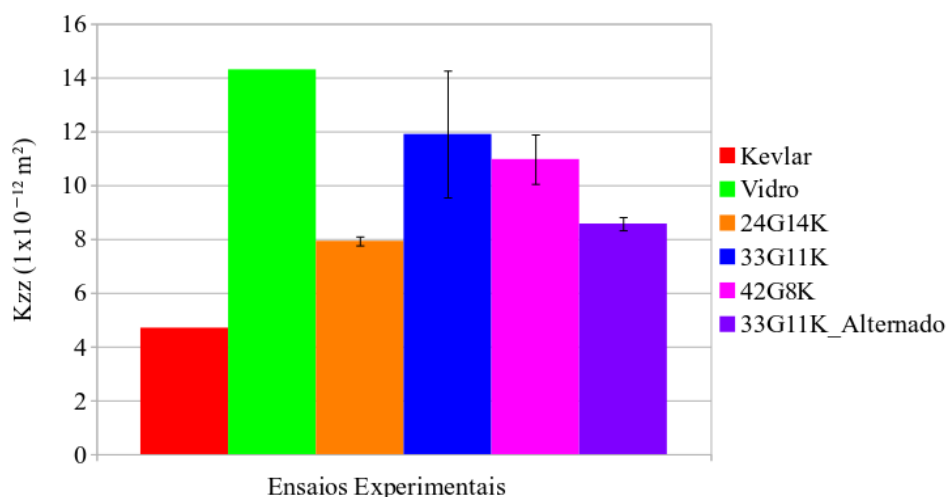


Figura 6.9. Comparação ensaios híbridos x ensaios homogêneos - V_f de 36%, altura de 22,23 mm.

O Desvio-Padrão dos ensaios 33G11K e 42G8K, mostrado na Fig. 6.9, deixa claro que ambos os empilhamentos são idênticos em termos de permeabilidade média do reforço. Da mesma forma que observado antes para o espaçador de 15,88 mm, comparando o ensaio 33G11K, com seu equivalente alternado, 3G1K₂₁, percebe-se que o caso alternado tende a diminuir o valor da permeabilidade. Observou-se que no ensaio 3G1K₂₁ a permeabilidade média foi aproximadamente 38% menor que a permeabilidade média do ensaio 33G11K.

Os resultados apresentados na Tab. 6.4 para o V_f de 50% podem ser melhor avaliados observando-se o gráfico da Fig. 6.10.

A comparação, na Fig. 6.10, dos casos 30G20K e 45G15K, mostra que estatisticamente o mesmo valor de permeabilidade foi obtido para ambos os ensaios. Além disso, devido ao grande desvio padrão observado no ensaio 61G10K, é também possível dizer que a permeabilidade deste híbrido é igual a permeabilidade do híbrido 30G20K.

Observa-se nos resultados para o volume de fibras de 50% que o Desvio-Padrão apresentou pequenas variações nos ensaios 45G15K e em sua forma alternada (3G1K₂₉), o que leva a ratificar o que já fora discutido em relação aos ensaios em que o empilhamento ocorreu de forma alternada. Nesses casos a permeabilidade diminuiu em comparação ao mesmo quantitativo de mantas, mas com apenas uma troca de materiais, indicando assim que a resistência ao fluxo aumenta, dependendo da forma como é realizada a configuração de empilhamento das mantas.

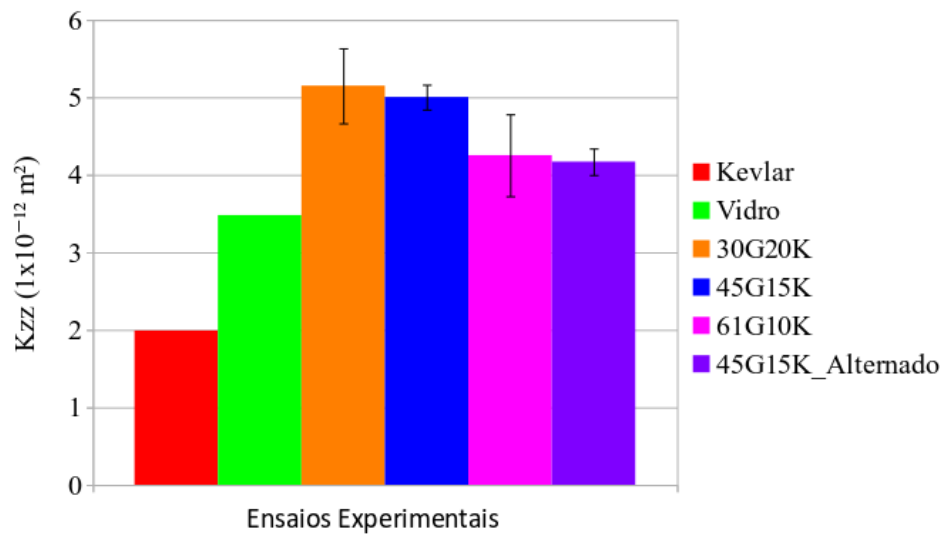


Figura 6.10. Comparação dos ensaios híbridos x ensaios homogêneos - V_f de 50%.

Assim como para a altura de 15,88 mm, na altura de 22,23 mm também foi utilizado o teste de Fisher para comparar os resultados, utilizando-se os mesmos parâmetros definidos anteriormente e o resultado para o V_f de 36% pode ser observado na Fig. 6.11.

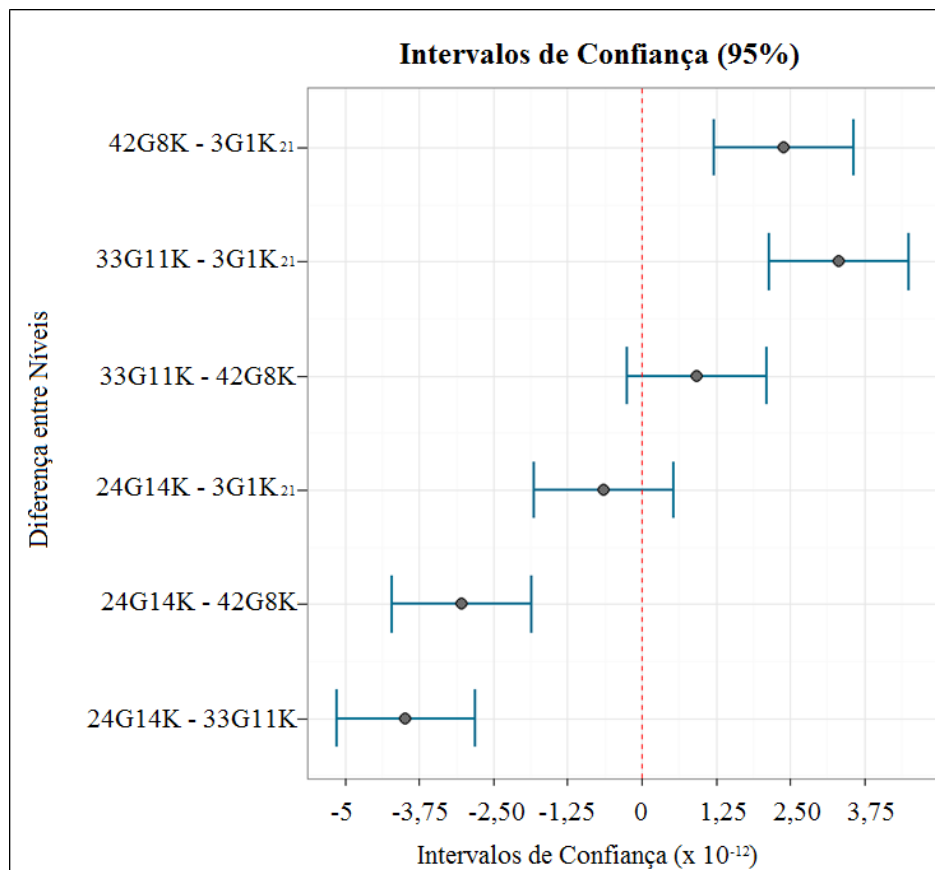


Figura 6.11. Teste de Fisher para a altura de 22,23 mm - V_f de 36%.

Os resultados disponíveis na Fig. 6.11 mostram que considerando-se um nível de significância de 5%, não se rejeita a hipótese de igualdade entre os valores de permeabilidade dos ensaios 33G11K e 42G8K e dos ensaios 24G14K e 3G1K₂₁. Esse resultado reitera que os ensaios 33G11K e sua forma alternada (3G1K₂₁) apresentam resultados distintos.

Na Fig. 6.12 apresenta-se a análise estatística para o volume de fibras de 50%.

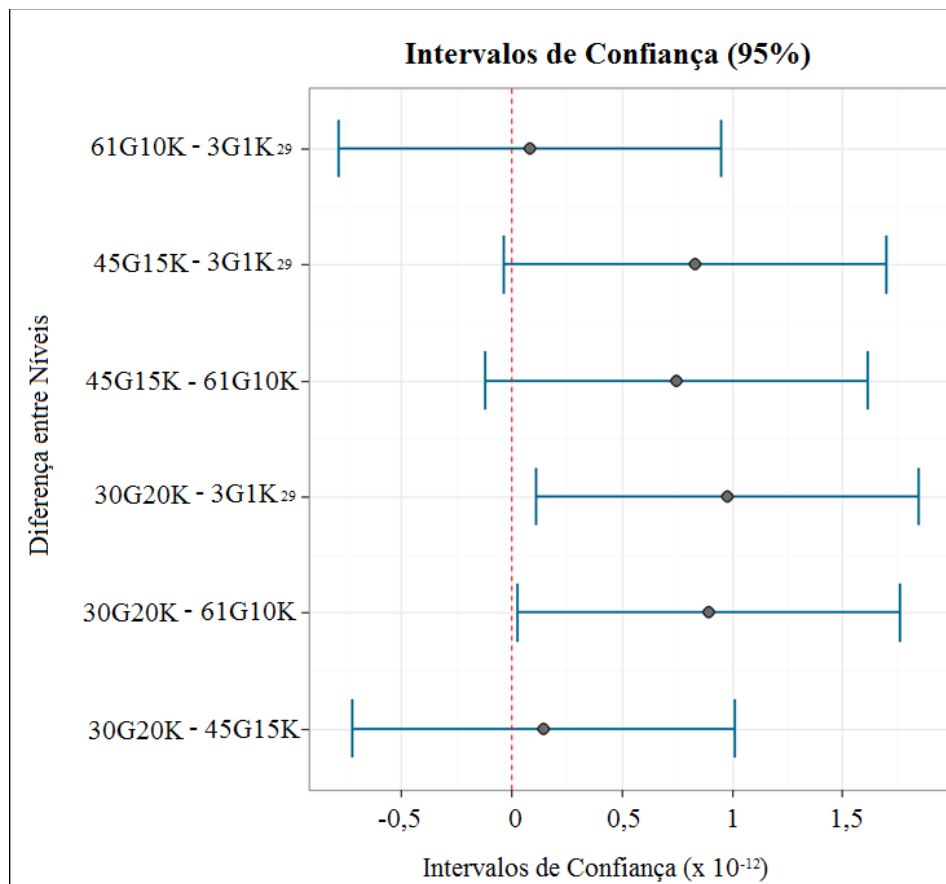


Figura 6.12. Teste de Fisher para a altura de 22,23 mm - V_f de 50%

Os resultados disponíveis na Fig. 6.12 mostram que considerando-se um nível de significância de 5%, não se rejeita a hipótese de igualdade entre os valores de permeabilidade dos ensaios 30G20K e 45G15K, dos ensaios 45G15K e 61G10K, dos ensaios 61G10K e 3G1K₂₉ e dos ensaios 45G15K e 3G1K₂₉. Nessa análise estatística, não se pode descartar que os ensaios 45G15K e sua forma alternada (3G1K₂₉) apresentem valores iguais, diferente do que pode ser observado apenas com a análise do desvio padrão, conforme observado na Fig. 6.10. Esse resultado nos leva a inferir que quando o volume de fibras aumenta e a altura é superior a 22 mm as diferenças na forma de empilhamento das fibras influenciam menos que para V_f 's e alturas menores. Para fins de

comparação com o mesmo V_f (50%) e altura de 15,88 mm se teve apenas um par de ensaios que pode ser considerado igual, dentro da margem de erro.

A partir dos ensaios realizados, pode-se perceber o alto grau de dificuldade em fazer a estimativa de medidas de permeabilidade, fato esse amplamente discutido nos estudos referenciados neste trabalho. Pequenas alterações nos procedimentos podem ocasionar importantes variações nos valores medidos e todos esses fatores devem ser cuidadosamente definidos para se obter resultados confiáveis.

6.1.4. Experimentos para Determinação da Espessura de Camadas

Objetivando resolver com maior precisão a Eq. (3.17) realizou-se um experimento com o interesse de medir a espessura de cada camada nos experimentos híbridos. Para isso foram utilizadas as mesmas configurações dos ensaios híbridos para os V_f s de 36% e 50%, exceto os ensaios que as fibras foram colocadas alternadamente, ou seja, três camadas de vidro-E e uma camada de kevlar.

Na Fig. 6.13, podem ser observadas as imagens dos experimentos 24G14K, 33G11K e 42G8K durante a compressão a seco.

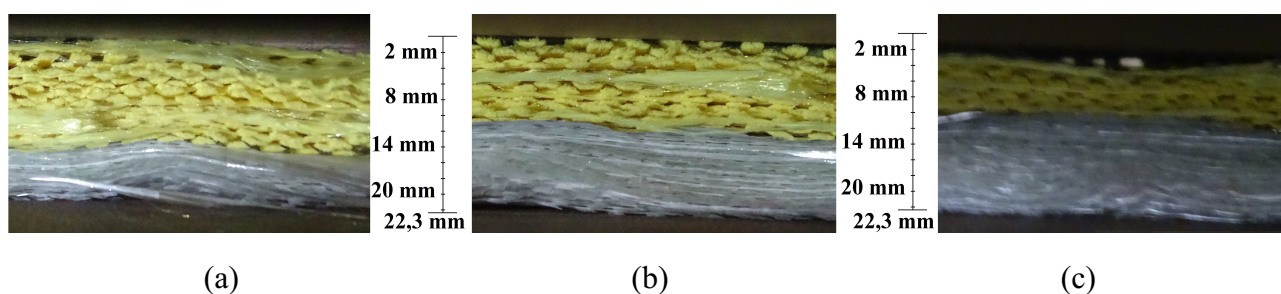


Figura 6.13. Ensaio de compressão V_f de 36%: a) 24G14K, b) 33G11K, c) 42G8K

Os resultados das medições são mostrados na Tab. 6.5.

Tabela 6.5. Resultados da espessura de camadas para reforços híbridos – 36% V_f

Ensaio	Vidro-E – h (mm)	Kevlar – h (mm)
24G14K	$8,22 \pm 0,23 \cdot 10^{-3}$	$14,01 \pm 0,07 \cdot 10^{-3}$
33G11K	$11,19 \pm 0,10 \cdot 10^{-3}$	$11,02 \pm 0,25 \cdot 10^{-3}$
42G8K	$14,94 \pm 0,04 \cdot 10^{-3}$	$7,19 \pm 0,15 \cdot 10^{-3}$

Percebe-se nos resultados apresentados na Tab. 6.5, que no ensaio 24G14K a altura de vidro foi maior que a altura de kevlar no ensaio 42G8K, indicando assim que o vidro-E sofre menos compactação que o kevlar.

Na Fig. 6.14 são apresentadas as imagens com o ensaio de espessura de camadas para o V_f de 50%. Nesta, observa-se em (a) o ensaio 30G20K, em (b) o ensaio 45G15K e em (c) o ensaio 61G10K.

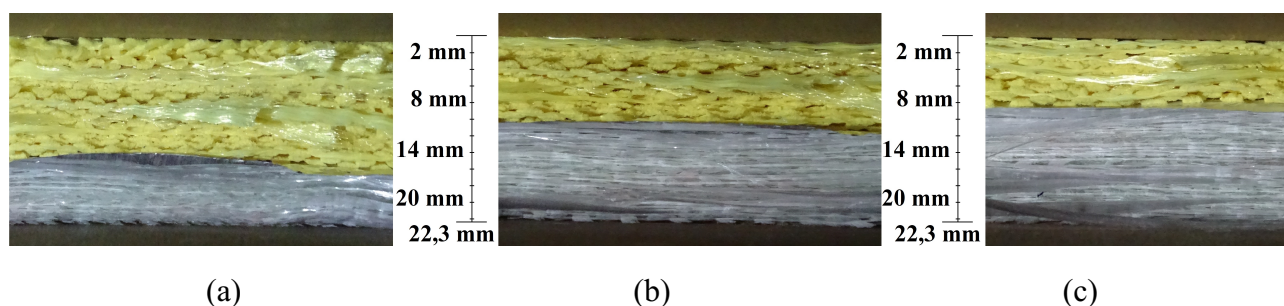


Figura 6.14. Ensaio de compressão V_f de 50%: a) 30G20K, b) 45G15K, c) 61G10K

Os resultados das médias das alturas encontradas podem ser vistos na Tab. 6.6.

Tabela 6.6. Resultados da espessura de camadas para reforços híbridos – 50% V_f

Ensaio	Vidro-E – h (mm)	Kevlar – h (mm)
30G20K	$8,06 \pm 0,18 \cdot 10^{-3}$	$14,16 \pm 0,20 \cdot 10^{-3}$
45G15K	$12,18 \pm 0,07 \cdot 10^{-3}$	$10,04 \pm 0,24 \cdot 10^{-3}$
61G10K	$13,78 \pm 0,05 \cdot 10^{-3}$	$8,42 \pm 0,06 \cdot 10^{-3}$

Observa-se nos resultados apresentados na Tab. 6.6 que, diferentemente do que ocorrera no V_f de 36%, nesse conjunto de ensaios, o vidro foi mais comprimido que o kevlar, pois para o volume ocupado por cada reforço fibroso, teve-se a proporção de dois terços de vidro-E para um terço de kevlar no ensaio 30G20K e o contrário no ensaio 61G10K, enquanto que o ensaio 45G15K a proporção foi meio a meio. No entanto, em todos os casos, o kevlar superou os valores de altura do vidro-E, evidentemente, que se comparando a proporcionalidade em relação ao volume ocupado, confirma-se assim, que o vidro-E teve uma maior compactação que o kevlar.

Salienta-se que os dados apresentados para a espessura de camadas nas Tabs. 6.5 e 6.6 servirão como premissa fundamental na modelagem matemática e numérica dos problemas estudados e que serão apresentados no decorrer deste trabalho.

6.1.5. Experimento sem Reforço Fibroso

Com o objetivo de validar o modelo numérico, foi realizado um conjunto de ensaios com o molde sem reforço fibroso. A finalidade era simplificar o problema, eliminando a dificuldade já conhecida de medição da permeabilidade. Sendo assim, com o molde vazio, o ensaio consistiu em preencher o volume do molde com óleo de soja e realizar o monitoramento da pressão e da vazão do ensaio, quando este estivesse em regime permanente. Salienta-se que foram utilizadas quatro pressões de injeção e foram realizados três ensaios. Os valores médios dos resultados são apresentadas na Tab. 6.7.

Tabela 6.7. Dados experimentais do experimento sem o reforço fibroso

<i>P</i> Controlador de Pressão (bar)	ΔP (Pa)	Vazão (m³/s)
0,13	2228	$1,93 \cdot 10^{-6} \pm 6,57 \cdot 10^{-8}$
0,15	2382	$4,02 \cdot 10^{-6} \pm 2,47 \cdot 10^{-8}$
0,18	2844	$7,57 \cdot 10^{-6} \pm 1,12 \cdot 10^{-7}$
0,20	3017	$9,35 \cdot 10^{-6} \pm 5,99 \cdot 10^{-9}$

Conforme já fora mencionado, o ensaio compreendeu quatro variações de pressão e consequentemente quatro vazões volumétricas distintas e os resultados serviram para a etapa de validação do modelo numérico. Salienta-se que os valores de pressão utilizados tiveram que ser baixos e próximos, pois como o molde não tinha reforço fibroso a vazão resultante era alta. Se valores de pressão maiores fossem utilizados seria difícil monitorar a vazão do óleo através da medição da massa de fluido que passa pelo molde. No controlador de pressão foram estabelecidas as pressões de 0,13 bar como a pressão mínima necessária para o escoamento, ou seja, vencer a pressão devida ao próprio peso do fluido. Pressões de 0,15 bar, 0,18 bar e 0,20 bar foram utilizadas para realização das outras três medições.

6.2. Resultados Analíticos

Os resultados analíticos apresentados nesta seção referem-se à solução da Eq. (3.18) para cada um dos experimentos híbridos com altura de 22,23 mm. Essa altura foi definida em

conformidade com a recomendação do trabalho de Trindade et al. (2019), onde foi observado que a influência da espessura do reforço na medição da permeabilidade torna-se muito pequena (desprezível) para valores maiores do que 15,88 mm.

Salienta-se que, além dos dados dos ensaios híbridos, utilizou-se a espessura de camadas apresentada nas Tabs. 6.5 e 6.6.

Inicialmente, calcula-se a resistência total, segundo Eq. 3.17, para todos os experimentos apresentados na seção 6.1.2. As resistências calculadas para os reforços de vidro-E e kevlar são mostrados nas Tabs. 6.8 e Tab. 6.9, respectivamente.

Tabela 6.8. Resistência total para o reforço de vidro-E

22,23 (mm)		15,88 (mm)		9,35 (mm)		6,35 (mm)		3,80 (mm)	
<i>Vf</i> (%)	<i>R</i> (N·s/m³)	<i>Vf</i> (%)	<i>R</i> (N·s/m³)	<i>Vf</i> (%)	<i>R</i> (N·s/m³)	<i>Vf</i> (%)	<i>R</i> (N·s/m³)	<i>Vf</i> (%)	<i>R</i> (N·s/m³)
34,13	1,24·10 ¹⁰	34,13	7,19·10 ⁹	34,12	3,10·10 ⁹	34,14	1,42·10 ⁹	34,86	3,36·10 ⁸
40,63	2,81·10 ¹⁰	40,95	1,47·10 ¹⁰	40,44	6,01·10 ⁹	40,14	2,73·10 ⁹	41,20	6,74·10 ⁸
49,30	4,98·10 ¹⁰	50,05	2,82·10 ¹⁰	49,28	1,14·10 ¹⁰	49,70	4,43·10 ⁹	50,70	1,20·10 ⁹
56,34	6,42·10 ¹⁰	56,12	3,80·10 ¹⁰	56,86	2,65·10 ¹⁰	57,34	1,00·10 ¹⁰	57,04	2,27·10 ⁹
64,46	1,56·10 ¹¹	64,46	9,18·10 ¹⁰	63,18	6,23·10 ¹⁰	64,99	2,27·10 ¹⁰	63,38	4,44·10 ⁹
68,80	2,17·10 ¹¹	69,01	1,90·10 ¹¹	68,24	9,67·10 ¹⁰	68,81	3,99·10 ¹⁰	69,72	9,07·10 ⁹

A hipótese imposta pela Eq. 3.17 (ver secção 3.2), aqui reescrita para facilitar a discussão na forma:

$$R_{total} = \frac{\mu \cdot h}{K_{zz} \cdot A} = \frac{\mu \cdot h_1}{K_1 \cdot A} + \frac{\mu \cdot h_2}{K_2 \cdot A} = \sum_{i=1}^{i=2} \left(\frac{\mu \cdot h_i}{K_i \cdot A} \right) \quad (6.2)$$

requer uma relação linear entre a altura do reforço (h_i) e a resistência dele (R). Além disto, para que a Eq. 6.2 seja válida também para o caso homogêneo, ou seja, reforço 1 igual ao reforço 2, esta regressão linear precisa passar pela origem ($R = 0$ em $h = 0$).

Tabela 6.9. Resistência total para o reforço de kevlar

22,23 (mm)		15,88 (mm)		9,35 (mm)	
Vf (%)	R (N·s/m ³)	Vf (%)	R (N·s/m ³)	Vf (%)	R (N·s/m ³)
-----	-----	-----	-----	34,90	$7,61 \cdot 10^9$
34,91	$3,76 \cdot 10^{10}$	34,91	$2,31 \cdot 10^{10}$	38,78	$1,27 \cdot 10^{10}$
41,56	$5,14 \cdot 10^{10}$	39,57	$2,91 \cdot 10^{10}$	42,66	$1,75 \cdot 10^{10}$
49,88	$8,51 \cdot 10^{10}$	48,87	$5,44 \cdot 10^{10}$	46,54	$2,25 \cdot 10^{10}$
56,53	$1,31 \cdot 10^{11}$	55,86	$8,15 \cdot 10^{10}$	50,42	$3,05 \cdot 10^{10}$
63,18	$1,94 \cdot 10^{11}$	62,84	$1,12 \cdot 10^{11}$	54,29	$3,80 \cdot 10^{10}$
69,83	$4,64 \cdot 10^{11}$	69,82	$1,98 \cdot 10^{11}$	62,05	$5,78 \cdot 10^{10}$
-----	-----	-----	-----	69,81	$8,70 \cdot 10^{10}$

Para exemplificar o procedimento de cálculo das resistências individuais do híbrido será utilizado o experimento 24G14K. Nesse caso, a altura de kevlar é $h_k = 14,01$ mm e a altura de vidro é $h_g = 8,22$ mm, conforme Tab. 6.5. Com o conhecimento das alturas de cada reforço, a Eq. 5.4 é utilizada para o cálculo dos Vfs que resultaram em $vf_g = 35,10\%$ e $vf_k = 36,91\%$ para as camadas de vidro e kevlar, respectivamente.

A relação entre a resistência ao escoamento do fluido e a espessura do reforço fibroso, para todos os casos estudados, é mostrada na Fig. 6.15 para os ensaios com vidro-E. Conforme anteriormente mencionado, é necessária uma relação linear entre estas duas variáveis a qual pode ser obtida pela equação de uma reta que passa pela origem do sistema de coordenadas. No caso do experimento 24G14K, onde o Vf é 35,10%, as curvas de $Vf = 15\%$ e $Vf = 40\%$ mostradas na Fig. 6.15 foram interpoladas tal que:

$$Vf_{g-35} = 501794590,547662 \cdot h_g \quad (6.3)$$

$$Vf_{g-40} = 1092145253,81844 \cdot h_g \quad (6.4)$$

em que h_g é a altura de vidro-E (mm) e vf_{g-35} e vf_{g-40} são os volumes e fibra de 35% e 40%, respectivamente.

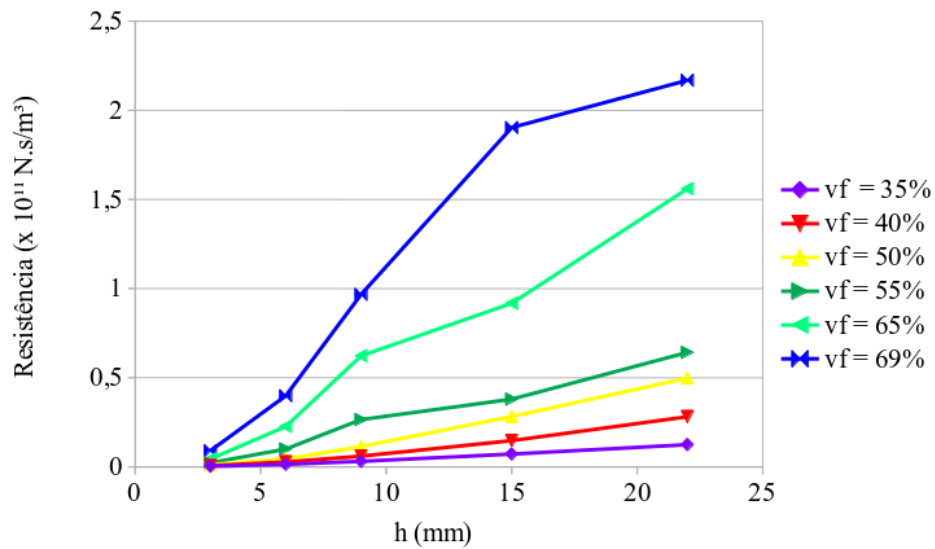


Figura 6.15. Gráfico resistência x altura para os ensaios de vidro-E.

Procedimento idêntico deve ser realizado para o kevlar. Dessa forma, a partir do gráfico da Fig. 6.16, são criadas as equações de regressão para o kevlar dadas por:

$$Vf_{k-35} = 1572160603,3507 \cdot h_k \quad (6.5)$$

$$Vf_{k-40} = 2129348069,97177 \cdot h_k \quad (6.6)$$

em que h_k é a altura de kevlar (mm) e vf_{k-35} e vf_{k-40} são os volumes de fibra de 35% e 40% para kevlar.

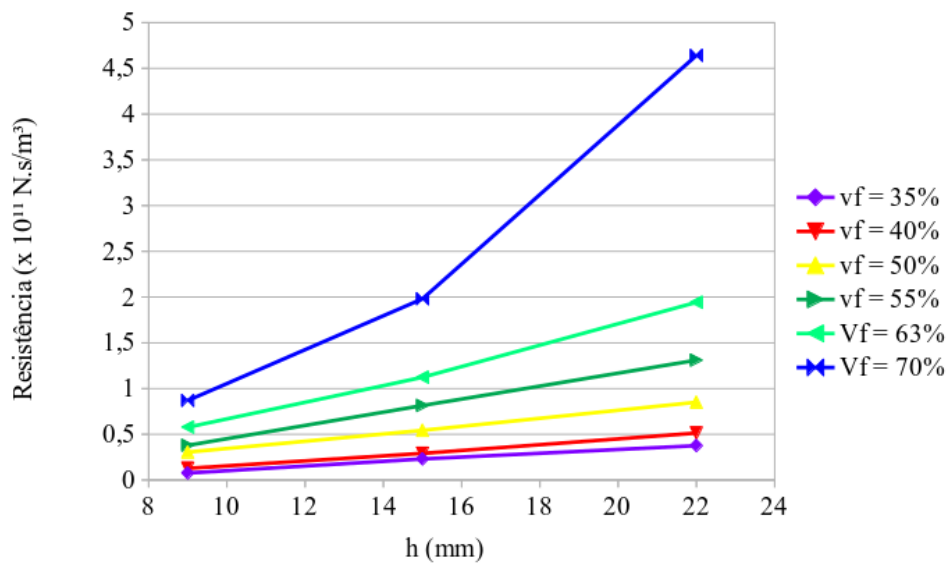


Figura 6.16. Gráfico resistência x altura para os ensaios de kevlar

Finalmente, com o auxílio das Eqs. (6.3-6.6) é possível calcular a resistência ao escoamento de cada camada do reforço para os V_f s de 35% e 40%. Esses resultados são compilados na Tab. 6.9.

Tabela 6.10. Resistências do caso 24G14K

Meio Poroso	V_f 35%	V_f 40%	h (mm)
Kevlar	$2,20 \cdot 10^{10}$ (N·s/m ³)	$2,98 \cdot 10^{10}$ (N·s/m ³)	14,01
Vidro-E	$4,12 \cdot 10^9$ (N·s/m ³)	$8,98 \cdot 10^9$ (N·s/m ³)	8,22

Os resultados apresentados na Tab. 6.10 são utilizados em uma nova regressão linear que passe pela origem do sistema de coordenadas, gerando assim duas novas equações. Essas equações relacionam o volume de fibras à resistência e são dadas por:

$$R_k = 695290481,509804 \cdot v_{f_k} \quad (6.7)$$

$$R_g = 178217225,895952 \cdot v_{f_g} \quad (6.8)$$

em que R_k é a resistência de kevlar (N·s/m³) e R_g a resistência de vidro-E (N·s/m³).

A resistência de cada camada é obtida a partir das Eqs. (6.7) e (6.8). Para o caso em análise, 24G14K, os valores calculados são $2,57 \times 10^{10}$ N s/m³ e $6,26 \times 10^9$ N s/m³, respectivamente.

O procedimento de determinação das permeabilidades descrito acima para o caso 24G14K, foi então repetido para todos os demais casos. Os resultados desse cálculo estão resumidos na Tab. 6.11.

Tabela 6.11. Resumo do cálculo das resistências para os experimentos híbridos

Caso	RT (N·s/m ³)	RK (N·s/m ³)	h_k (mm)	RG (N·s/m ³)	h_g (mm)	Resíduo (N·s/m ³)
24G14K	$2,13 \cdot 10^{10}$	$2,57 \cdot 10^{10}$	14,01	$6,26 \cdot 10^9$	8,22	$- 1,06 \cdot 10^{10}$
33G11K	$1,37 \cdot 10^{10}$	$2,02 \cdot 10^{10}$	11,02	$8,60 \cdot 10^9$	11,19	$- 1,50 \cdot 10^{10}$
42G8K	$1,55 \cdot 10^{10}$	$1,45 \cdot 10^{10}$	7,19	$1,09 \cdot 10^{10}$	14,94	$- 9,92 \cdot 10^9$
30G20K	$3,20 \cdot 10^{10}$	$3,67 \cdot 10^{10}$	14,16	$7,82 \cdot 10^9$	8,06	$- 1,25 \cdot 10^{10}$
45G15K	$3,26 \cdot 10^{10}$	$2,75 \cdot 10^{10}$	10,04	$1,17 \cdot 10^{10}$	12,18	$- 6,62 \cdot 10^9$
61G10K	$3,82 \cdot 10^{10}$	$1,83 \cdot 10^{10}$	8,42	$1,59 \cdot 10^{10}$	13,78	$3,93 \cdot 10^9$

Os resultados apresentados na Tab. 6.11, referem-se à resistência total (RT) que foi calculada a partir dos dados do ensaio híbrido, resistência do kevlar (RK) que é relativa às mantas de kevlar de cada experimento e resistência do vidro (RG) que é relativa às mantas de vidro. A resistência total é calculada a partir do experimento híbrido, enquanto que as resistências de kevlar e vidro-E foram calculadas de acordo com o procedimento proposto neste trabalho.

A coluna resíduo é a diferença entre a resistência total e a soma das resistências de cada camada ($RT = RK + RG$).

Observa-se na Tab. 6.3 que os valores de resíduo estão na mesma ordem de grandeza dos valores das resistências de vidro-E e kevlar, individualmente. Este é um resultado inesperado e também indesejado, o qual foi tratado com o auxílio da modelagem numérica conforme discutido no item 6.3.5).

No gráfico apresentado na Fig. 6.17 encontram-se as informações consolidadas para um V_f de aproximadamente 36% utilizando-se mantas de fibra de kevlar. Comparam-se as resistências das mantas de kevlar em experimentos híbridos com as resistências de ensaios homogêneos de kevlar para valores de alturas próximos às determinadas nos experimentos híbridos.

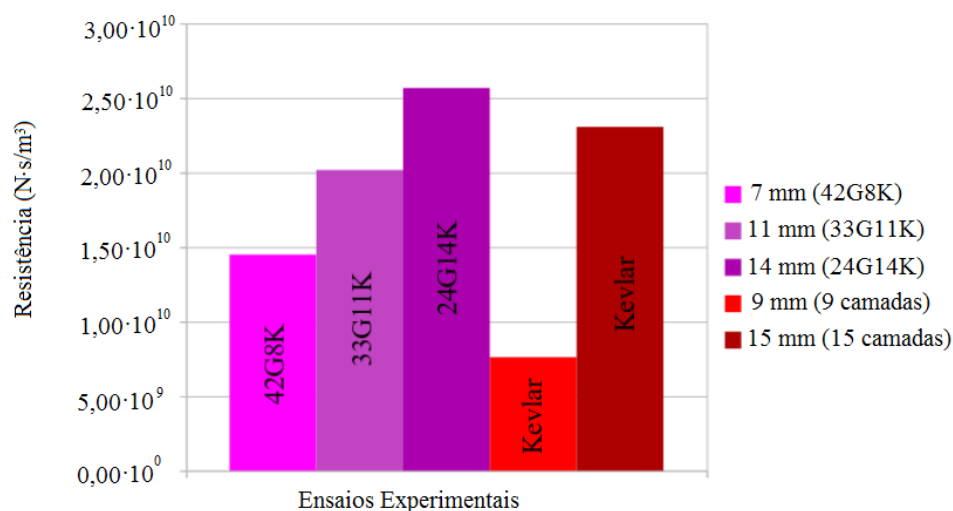


Figura 6.17. Resistência total dos híbridos com V_f de 36% x homogêneos – kevlar

Observa-se na Fig. 6.17 que os valores de resistências totais nos ensaios híbridos são maiores que as medidas em ensaios homogêneos para o mesmo volume de fibra e para alturas aproximadamente iguais. Especula-se que a interface entre os diferentes materiais tenha um efeito importante e dificulte a passagem do fluido, contudo um estudo mais aprofundado sobre este efeito da interface faz-se necessário para que conclusões concretas a este respeito sejam apresentadas.

Ressalta-se que a altura de 7 mm de kevlar foi obtida no ensaio 42G8K, a altura de 11 mm no ensaio 33G11K e a altura de 14 mm no ensaio 24G14K. Destaca-se que os valores de altura nessa comparação são valores aproximados.

A partir do gráfico da Fig. 6.17, nota-se que, em todas as comparações possíveis entre valores de ensaios híbridos e ensaios homogêneos, são observados valores maiores nos experimentos híbridos, por exemplo, a resistência total para 7 mm do ensaio 42G8K é maior que a resistência total para 9,35 mm no ensaio homogêneo. Fatores como a forma de empilhamento dos reforços fibrosos, obviamente, influenciam o escoamento. No entanto, nessa comparação, procura-se investigar o efeito do conjunto de mantas de um mesmo material e com alturas similares, no caso, o kevlar.

Para aprofundar a discussão investigou-se o que ocorreria mudando a fibra a ser analisada, se isso mudaria, ou não, a tendência. No entanto, na análise para o mesmo volume de fibras, pode-se notar comportamento análogo, ou seja, a resistência total da fibra de vidro-E é maior em experimentos híbridos do que em experimentos homogêneos. O gráfico da Fig. 6.18, ilustra essa discussão.

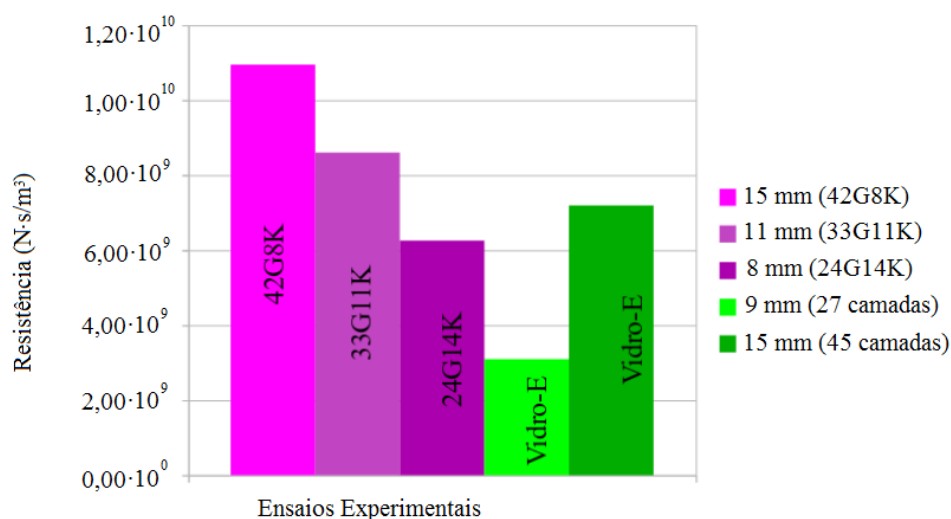


Figura 6.18. Resistência total dos híbridos com V_f de 36% x homogêneos – vidro-E

Nota-se, na Fig. 6.18 que assim como ocorreria com a fibra de kevlar, tem-se uma resistência total maior nos híbridos que nos homogêneos também para a fibra vidro-E, obviamente comparando-se alturas aproximadamente iguais. Há uma exceção na comparação entre o ensaio de vidro-E de 15,88 mm e o ensaio híbrido 24G14K, porém nesse caso o ensaio homogêneo tinha 15,88 mm e o 24G14K (híbrido) tinha 8 mm de vidro-E.

A seguir, na Fig. 6.17, apresenta-se o gráfico das resistências para os ensaios com a fibra de kevlar e um V_f de 50%.

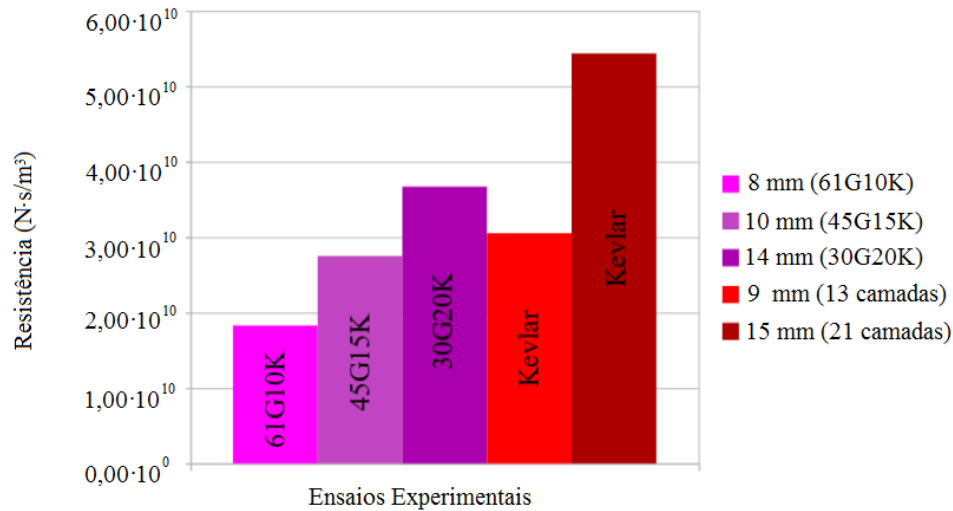


Figura 6.19. Resistência total dos híbridos com V_f de 50% x homogêneos – kevlar

O gráfico da Fig. 6.19 apresenta resultados homogêneos e híbridos para o volume de fibras de aproximadamente 50%. Nos ensaios homogêneos de 9,35 mm e 15,88 mm e nos ensaios híbridos 30G20K, 45G15K e 61G10K, com alturas de kevlar, respectivamente de, 14 mm, 10 mm e 8 mm. Na Fig. 6.18, visualiza-se o gráfico com a comparação das resistências com a fibra de vidro-E.

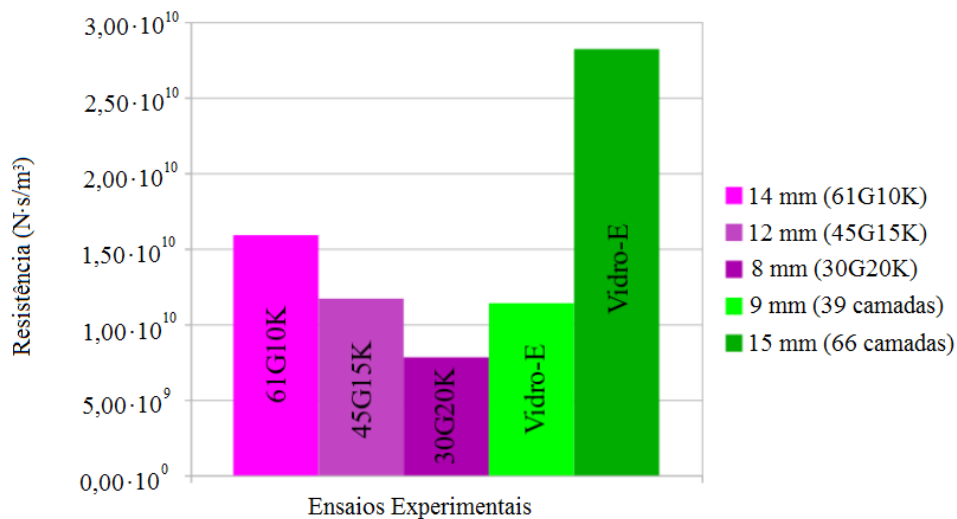


Figura 6.20. Resistência total dos híbridos com V_f de 50% x homogêneos – vidro-E

Percebe-se que há uma inversão quando o V_f aumenta de 36% para 50%, pois no caso do volume de fibras de aproximadamente 50%, tanto nos resultados de kevlar, quanto nos resultados com vidro-E as resistências dos ensaios homogêneos superam as resistências dos materiais em

ensaios híbridos para alturas aproximadamente iguais. Resultados como esses podem ajudar a compreender o porquê de se ter resíduos altos quando se calcula a resistência total e da necessidade de uma investigação mais profunda do ponto de vista numérico e que será apresentada na sequência deste trabalho.

6.3. Resultados Numéricos

Os resultados numéricos deste trabalho serão apresentados em quatro seções: a primeira refere-se ao estudo de convergência de malha, a segunda relativa à validação dos modelos numéricos e a terceira e quarta seções, referentes aos resultados numéricos axissimétricos e tridimensionais, respectivamente. Salienta-se que todos os resultados numéricos foram obtidos com softwares livres já mencionados, o Gmsh para o pré-processamento, etapa em que o modelo computacional é construído, discretizado e geração da malha. O OpenFOAM para o processamento e as simulações numéricas, e o VisIt para o pós-processamento, etapa em que os resultados obtidos são investigados por meio de uma visualização gráfica.

6.3.1. Estudo de solução independente de malha

Nesta seção serão apresentados os resultados do estudo de solução independente de malha, tanto do modelo axissimétrico, como do modelo tridimensional.

6.3.1.1. Modelo Axissimétrico

A discretização do domínio computacional e a geração da malha foram realizadas no software Gmsh. Esse estudo foi realizado com o caso axissimétrico e as condições de contorno estão de acordo com o que já fora mencionado no Capítulo 4 deste trabalho (Fig. 4.3 e Tab. 4.1). Na Tabela 6.12, podem ser observados os resultados para os diferentes refinamentos de malha testados.

Tabela 6.12. Estudo de solução independente de malha axissimétrica

Malha	ΔP (Pa)	Nº de elementos	Diferença (%)
1	2206,01	4087	-
2	2186,26	5494	0,90
3	2218,80	16514	1,49
4	2220,47	26183	0,08

A simulação foi realizada em regime permanente, ou seja, o molde já estava preenchido com o fluido. A velocidade foi considerada constante e prescrita de acordo com a vazão volumétrica apresentada de $1,93 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. Para o cálculo da Diferença foi considerada a Eq. 6.9:

$$\text{Diferença} = \left| \frac{\Delta P_{(k+1)} - \Delta P_k}{\Delta P_k} \right| \quad (6.9)$$

em que ΔP_k é a diferença de pressão (Pa) e k a malha.

A diferença de pressão (ΔP) foi obtida por meio da diferença entre a pressão na entrada e a pressão na saída. Considerou-se a malha independente quando a diferença entre elas foi menor que 0,30%, portanto a malha três foi escolhida e a comparação com os dados experimentais foi realizada com esse resultado. A malha independente contava com 16514 volumes, sendo 16229 hexaedros e 272 prismas.

6.3.1.2. Modelo Tridimensional

Assim como no caso axissimétrico, a geometria, condições de contorno e parâmetros de entrada da simulação foram descritos no Capítulo 4 deste trabalho. Este estudo foi realizado com o caso tridimensional e na Tab. 6.13, podem ser observados os dados referentes às simulações.

Tabela 6.13. Estudo de solução independente de malha tridimensional

Malha	ΔP (Pa)	Nº de elementos	Diferença (%)
1	2240,64	62410	-
2	2228,57	138673	- 1,24
3	2231,01	180266	0,80
4	2237,42	207668	0,29

Considerou-se a malha independente quando a diferença foi menor que 0,30%, portanto a malha três foi escolhida e a comparação com os dados experimentais foi realizada com esse resultado. A malha independente apresentou 180266 volumes, sendo 151340 prismas e 28980 hexaedros.

6.3.2. Validação dos Modelos Numéricos

Para este estudo, como já citado anteriormente, foram desenvolvidos dois modelos

numéricos: o axissimétrico e o tridimensional. Nesta seção, a validação dos dois modelos é apresentada. Essa validação ocorreu fazendo-se a comparação da solução numérica com dados experimentais provenientes de um ensaio sem meio poroso apresentados na Tab. 6.7.

Na definição dos parâmetros da simulação, a vazão é calculada experimentalmente e utilizada para prescrever a velocidade na entrada do molde.

A validação do modelo numérico desenvolvido ocorreu com a comparação entre resultados numéricos e os resultados experimentais apresentados na Tab. 6.7. A partir da prescrição da velocidade do escoamento do óleo, o software calculou o valor do ΔP que fora comparado com o medido experimentalmente. A metodologia análoga, em que se declara o ΔP e calcula-se numericamente a vazão volumétrica, também é eficaz e foi testada. No entanto, optou-se pela primeira alternativa para apresentação dos resultados. A comparação foi feita através do cálculo do erro entre as duas soluções dado por

$$E_{\text{exp}} = \left| \frac{\dot{V}_{\text{exp}} - \dot{V}_{\text{num}}}{\dot{V}_{\text{exp}}} \right| \times 100 \quad (6.10)$$

Os resultados obtidos podem ser observados na Tab. 6.14.

Tabela 6.14. Validação do modelo numérico axissimétrico e tridimensional

$\dot{V}$ (m³/s)	ΔP (Pa)			E_{exp}		D_{num}
	Numérico			$E = \left \frac{\dot{V}_{\text{exp}} - \dot{V}_{\text{num}}}{\dot{V}_{\text{exp}}} \right \times 100$		$D = \left \frac{\dot{V}_{3D} - \dot{V}_{\text{axi}}}{\dot{V}_{3D}} \right \times 100$
	Exp.	Axis	3D	Axis	3D	
$1,93 \cdot 10^{-6}$	2228	2218,80	2231,01	0,41	0,14	0,55
$4,02 \cdot 10^{-6}$	2382	2437,92	2448,73	2,35	2,8	0,44
$7,57 \cdot 10^{-6}$	2844	2821,62	2808,23	0,79	1,26	0,48
$9,35 \cdot 10^{-6}$	3017	3017,25	2996,62	0,01	0,68	0,69

Da análise da Tab. 6.14 pode-se concluir que ambos os modelos computacionais desenvolvidos são capazes de reproduzir os dados experimentais adequadamente. O maior erro encontrado foi de 2,8%.

Salienta-se que a escolha pela validação com a utilização do molde sem reforço fibroso se deu por terem os dados experimentais maior precisão, visto que incertezas devidas ao cálculo da permeabilidade não estão envolvidas no processo de validação da solução numérica. É importante destacar que, do ponto de vista numérico, a inclusão do meio poroso não acarreta em uma complexidade maior da solução. Na verdade, o meio poroso é modelado como um termo de resistência ao escoamento que é adicionado à equação da conservação da quantidade de movimento. Ele acaba por reduzir a velocidade do escoamento, facilitando assim a solução do problema.

A Tabela 6.14 traz também a comparação entre as duas soluções numéricas. Esta é realizada com a definição de uma diferença entre as soluções dada por

$$D_{num} = \left| \frac{\dot{V}_{3D} - \dot{V}_{axis}}{\dot{V}_{3D}} \right| \times 100 \quad (6.11)$$

Observa-se uma excelente concordância entre os resultado e a diferença máxima ficou abaixo de 1 %.

6.3.3. Comparação entre os modelos axissimétrico e tridimensional nas soluções com reforço fibroso

Para fins de comparação entre os modelos, foram utilizados os dados experimentais de Trindade et al. (2019), visto que a forma como foi determinada a permeabilidade não influencia nessa comparação. As diferenças encontradas entre os dois modelos numéricos foram calculadas por meio da Eq. 6.11, usando-se como referência os resultados numéricos do modelo tridimensional.

Os dados utilizados nas simulações foram todos retirados dos ensaios experimentais e o primeiro teste teve um volume de fibras de 34,91%; a permeabilidade considerada foi de $2,09 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, a viscosidade de $\mu = 0,0623 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ e porosidade de $\varepsilon = 0,6509$.

Os resultados da comparação dos dois modelos numéricos podem ser observados na Tab. 6.15.

Tabela 6.15. Comparação numérico axissimétrica x tridimensional – Kevlar $V_f = 34,91\%$

ΔP (Pa)	$\dot{V}$ Axis (m ³ /s)	$\dot{V}$ 3D (m ³ /s)	D_{num}
6811	$2,43 \cdot 10^{-7}$	$2,12 \cdot 10^{-7}$	14,62
9253	$3,29 \cdot 10^{-7}$	$3,01 \cdot 10^{-7}$	9,30
11646	$4,15 \cdot 10^{-7}$	$3,89 \cdot 10^{-7}$	6,68
14071	$5,01 \cdot 10^{-7}$	$4,77 \cdot 10^{-7}$	5,03
16489	$5,87 \cdot 10^{-7}$	$5,66 \cdot 10^{-7}$	3,71
18935	$6,74 \cdot 10^{-7}$	$6,55 \cdot 10^{-7}$	2,87

Observa-se que os resultados encontrados tiveram boa concordância, pois se obteve uma diferença média de 5,06%.

Convém destacar que, uma simulação com o modelo axissimétrico é realizada em menos de 10 min, enquanto que com o modelo tridimensional o tempo de processamento é de aproximadamente 8 h; ou seja 48 vezes maior que o tempo axissimétrico. Destaca-se ainda que, em ambos os casos, o processamento foi realizado na mesma máquina e foi utilizado um processamento paralelo com quatro núcleos.

Contrariamente ao observado para a solução com o molde em vazio (Tab. 6.14), onde para todas as vazões a diferença entre as soluções axissimétrica e 3D mantiveram-se todas na mesma ordem de grandeza ($< 1\%$), nos casos com o reforço fibroso observa-se que os erros diminuem com o aumento da vazão.

As simplificações do modelo axissimétrico, principalmente a substituição dos furos por anéis, torna-se mais importante para os casos onde a pressão de injeção é baixa, ou seja, onde a vazão de fluido é menor. No entanto os erros ainda são pequenos e devido a grande vantagem em termos de tempo de simulação, o modelo axissimétrico foi considerado adequado.

As demais comparações para a fibra de kevlar podem ser vistas no Apêndice C. Uma compilação das diferenças médias destes casos é mostrada na Tab. 6.16.

Tabela 6.16. Comparação numérico axissimétrica x tridimensional para diferentes V_f – Kevlar

$V_f(\%)$	D_{num}
34,91	7,04
41,56	4,95
49,88	0,67
56,53	0,00
63,18	6,99
69,83	6,47

Observa-se que as diferenças tendem a diminuir à medida que o volume de fibras aumenta, corroborando com a ideia de uma maior estabilidade quando as fibras estão mais compactadas. No entanto, para não limitar essa comparação a apenas um tipo de fibras, realizou-se também utilizando-se fibras de vidro-E.

Para o primeiro conjunto de ensaios com fibra de vidro-E, tem-se um V_f de 34,13%, permeabilidade de $6,35 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, viscosidade $\mu = 0,0626 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ e a porosidade $\varepsilon = 0,6587$. Os resultados podem ser observados na Tab. 6.17.

Os resultados apresentados na Tab. 6.17 indicam uma diferença média de 5,79% entre os modelos. Além disso, pode-se perceber o mesmo comportamento já observado para os ensaios com kevlar; a diferença aumenta com o aumento do ΔP .

Tabela 6.17. Comparação numérico axissimétrica x tridimensional – Vidro-E $V_f = 34,13\%$

$\Delta P \text{ (Pa)}$	$\dot{V}$ Axis (m^3/s)	$\dot{V}$ 3D (m^3/s)	D_{num}
5780	$6,14 \cdot 10^{-7}$	$5,19 \cdot 10^{-7}$	18,30
10541	$1,12 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	7,69
15301	$1,62 \cdot 10^{-6}$	$1,56 \cdot 10^{-6}$	3,85
20074	$2,13 \cdot 10^{-6}$	$2,08 \cdot 10^{-6}$	2,40
24928	$2,65 \cdot 10^{-6}$	$2,61 \cdot 10^{-6}$	1,53
29817	$3,17 \cdot 10^{-6}$	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,96

Assim como nos casos com kevlar, os resultados de todas as simulações com vidro-E estão

disponíveis no Apêndice C e um resumo de todos os casos é mostrado na Tab. 6.18.

Tabela 6.18. Compara numérico axissimétrica x tridimensional para diferente Vf_s – Vidro-E

$Vf(\%)$	D_{num}
34,13	5,79
40,63	2,91
49,30	3,26
64,46	1,00
68,80	1,04

As diferenças médias mantiveram-se todas abaixo de 10% e demonstraram o mesmo comportamento observado nos ensaios com kevlar; ou seja, com uma tendência de diminuição das diferenças à medida que o Vf aumentava. Sendo assim, a partir dessa seção se deu uma prioridade para as simulações axissimétricas, exceto um ou outro caso em que se queria investigar a fundo algum fenômeno o modelo 3D foi utilizado.

6.3.4. Simulação dos ensaios homogêneos

O modelo axissimétrico considerou apenas uma pequena “fatia” do molde, mais precisamente 10° de rotação em torno do eixo de simetria. Sabe-se que essa é uma simplificação considerável do problema, mas a estratégia de utilização desse modelo foi bastante útil para compreender e testar as melhores condições de contorno utilizadas nas simulações.

A seguir apresentam-se as simulações numéricas dos ensaios homogêneos de kevlar e vidro-E, as simulações dos experimentos híbridos e após uma proposta de cálculo da permeabilidade por meio de um método numérico iterativo.

Os primeiros resultados numéricos relativos aos ensaios homogêneos foram obtidos por meio da comparação com os dados experimentais nos ensaios com kevlar. Para esse estudo numérico, a simulação inicia com o molde completamente cheio de resina e a velocidade, calculada a partir dos dados de vazão obtidos experimentalmente, é prescrita na seção de entrada do molde. Dessa forma, é calculada a diferença de pressão e esses resultados são utilizados na comparação com os resultados experimentais. Nessa simulação o Vf foi de 49,72%, a permeabilidade de

$4,44 \cdot 10^{-12}$, a viscosidade de 0,0535 Pa·s e a porosidade de 0,5028. Os resultados podem ser observados na Tab. 6.19.

Tabela 6.19. Resultados dos ensaios homogêneos de kevlar - V_f de 50%

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	D_{num}
$1,22 \cdot 10^{-7}$	5570,09	3199,34	42,56
$2,78 \cdot 10^{-7}$	10377,62	4510,78	56,53
$5,86 \cdot 10^{-7}$	20083,63	7095,41	64,67
$8,80 \cdot 10^{-7}$	29793,74	9560,69	67,91
$1,16 \cdot 10^{-6}$	39458,87	11940,86	69,74
$1,44 \cdot 10^{-6}$	49177,69	14254,78	71,01
$1,69 \cdot 10^{-6}$	58934,81	16372,98	72,22
$1,96 \cdot 10^{-6}$	68494,13	18652,42	72,77

Pode-se observar que as diferenças observadas na Tab. 6.19 aumentam à medida que o ΔP aumenta, além dos valores se manterem altos em comparação com os dados experimentais. Só para fins de ilustração a diferença média foi de 64,68%, o que é considerado bastante elevada. Por este motivo, optou-se por investigar uma forma de calcular a permeabilidade de forma iterativa, visto que, o procedimento experimental foi desenvolvido, inicialmente, por Trindade et al. (2019) e depois foi dada a sequência neste trabalho, o que constitui em um procedimento novo e que, possivelmente, necessite ainda de alguns ajustes. Um exemplo de ajuste já sugerido neste trabalho é relativo ao cálculo da permeabilidade, considerando a área dos furos da placa perfurada em que efetivamente ocorre o escoamento, diferente do proposto no trabalho de Trindade et al. (2019), que sugeria o cálculo da permeabilidade considerando a área total da seção transversal do molde.

Na tentativa de se aprofundar no estudo de comparação entre os resultados numéricos e experimentais, a seguir apresenta-se uma metodologia para a determinação numérica, de forma iterativa, da permeabilidade do reforço fibroso. Um código em C foi desenvolvido com o Método de Newton-Raphson e uma função resíduo é dada por (Kincaid e Cheney, 2001).

$$f(K, \Delta P) = \Delta P_{exp}(K) - \Delta P_{num}(K) = 0 \quad (6.12)$$

em que ΔP é a diferença de pressão (Pa).

Para o caso específico da determinação da permeabilidade, baseando-se no Método de Newton-Raphson, descrito em Härter (2016), a Eq. (6.12) foi resolvida para determinar o K_{num} a partir da equação que segue:

$$K_{num}^{n+1} = K_{num}^n - \frac{f(K, \Delta P)}{f'(K, \Delta P)} \quad (6.13)$$

em que f' é a derivada da função e n é a iteração.

A Eq. (6.13) apresenta uma derivada que numericamente pode ser aproximada por:

$$f'(K, \Delta P) = \frac{\partial f(K, \Delta P)}{\partial K} = \frac{f(K + h_p, \Delta P) - f(K, \Delta P)}{h_p} \quad (6.14)$$

em que h_p é uma constante chamada de passo de integração e definida neste trabalho igual a $1 \cdot 10^{-18}$.

Para a solução da Eq. (6.12), a cada iteração o valor ΔP_{num} é obtido da solução do modelo computacional através do software OpenFOAM. O valor de K_{num} é corrigido através da Eq. 6.13 até que o valor de $f(K, \Delta P)$ se torne menor do que um resíduo previamente estabelecido. No caso deste trabalho, o valor utilizado para o resíduo foi 1×10^{-5} .

Do ponto de vista numérico, uma questão que surge é o efeito das permeabilidades no plano (K_{xx} e K_{yy}) no resultado final da simulação. Estes valores sequer são consideradas na análise experimental, mas o modelo numérico não pode ser executado sem a especificação destas variáveis. Desta forma, a fim de identificar se haveria diferença considerar o meio poroso como isotrópico ou ortotrópico, realizaram-se diversas simulações, para diferentes valores de K_{xx} e K_{yy} . A metodologia iterativa acima descrita foi utilizada na determinação da permeabilidade transversal (K_{zz}).

O resultado das soluções iterativas para determinação de K_{zz} é resumido na Tab. 6.20 para o caso kevlar com de $V_f = 50\%$. Para cada valor de ΔP medido experimentalmente, três valores de permeabilidade no plano foram testadas: $K_{xx} = K_{yy} = 2,50 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, $2,50 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ e $2,50 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. Fica claro nestes resultados que o valor da permeabilidade no plano tem influência muito pequena, desprezível para os objetivos do presente estudo.

Foi testado também o caso isotrópico onde $K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$ o qual é mostrado nas duas últimas colunas da Tab. 6.20. Neste, todo o domínio é considerado uma mesma permeabilidade K a qual é determinada de forma iterativa conforme equacionamento acima (Eqs. (6.12-6.14)). As

permeabilidades calculadas no caso isotrópico são 6% maiores do que as permeabilidades calculadas nos outros três casos e, ainda assim, é uma variação pequena.

Em virtude da pouca influência na solução, em função do valor da permeabilidade no plano, e também por uma questão de simplicidade e padronização do procedimento, a partir desse momento os resultados apresentados serão considerando o meio poroso como sendo isotrópico e o modelo utilizado é o axissimétrico. O valor da permeabilidade de cada caso calculado será dado pelo valor médio obtido das soluções iterativas a cada um dos ΔP , ou seja $K_{zz} = K_{ave}$ (Tab. 6.20).

Tabela 6.20. Resultados da determinação da permeabilidade com o processo iterativo

(kevlar com de $V_f = 50\%$)

	$K_{xx} = K_{yy}$ (ortotrópico)						$K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$ (isotrópico)	
	$2,50 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$		$2,50 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$		$2,50 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$			
ΔP_{exp} (Pa)	Δp_{num} (Pa)	$K_{zz,num}$ (m ²)	Δp_{num} (Pa)	$K_{zz,num}$ (m ²)	Δp_{num} (Pa)	$K_{zz,num}$ (m ²)	Δp_{num} (Pa)	$K_{zz,num}$ (m ²)
5570,09	5570,12	$1,24 \cdot 10^{-12}$	5569,73	$1,23 \cdot 10^{-12}$	5569,68	$1,23 \cdot 10^{-12}$	5572,40	$1,31 \cdot 10^{-12}$
10377,62	10378,09	$1,17 \cdot 10^{-12}$	10379,89	$1,16 \cdot 10^{-12}$	10379,84	$1,16 \cdot 10^{-12}$	10375,04	$1,24 \cdot 10^{-12}$
20083,63	20084,15	$1,13 \cdot 10^{-12}$	20083,71	$1,11 \cdot 10^{-12}$	20083,63	$1,11 \cdot 10^{-12}$	20081,92	$1,19 \cdot 10^{-12}$
29793,74	29801,13	$1,10 \cdot 10^{-12}$	29795,83	$1,08 \cdot 10^{-12}$	29795,59	$1,08 \cdot 10^{-12}$	29809,44	$1,16 \cdot 10^{-12}$
39458,87	39458,29	$1,08 \cdot 10^{-12}$	39458,80	$1,06 \cdot 10^{-12}$	39458,60	$1,06 \cdot 10^{-12}$	39430,96	$1,13 \cdot 10^{-12}$
49177,69	49177,66	$1,08 \cdot 10^{-12}$	49178,25	$1,04 \cdot 10^{-12}$	49177,30	$1,04 \cdot 10^{-12}$	49174,66	$1,11 \cdot 10^{-12}$
58934,81	58933,83	$1,03 \cdot 10^{-12}$	58933,70	$1,01 \cdot 10^{-12}$	58933,71	$1,01 \cdot 10^{-12}$	58932,04	$1,08 \cdot 10^{-12}$
68494,13	68493,72	$1,02 \cdot 10^{-12}$	68506,31	$1,01 \cdot 10^{-12}$	68499,67	$1,01 \cdot 10^{-12}$	68488,26	$1,07 \cdot 10^{-12}$
	$K_{ave} = 1,11 \cdot 10^{-12}$		$K_{ave} = 1,09 \cdot 10^{-12}$		$K_{ave} = 1,09 \cdot 10^{-12}$		$K_{ave} = 1,16 \cdot 10^{-12}$	

Os resultados apresentados na Tab. 6.20 indicam um $K_{num} = K_{ave}$ de $1,16 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ para o caso isotrópico, o que leva a diferença de 73,84% em relação à permeabilidade experimental. Dessa forma, opta-se por realizar nova simulação numérica com o valor da permeabilidade corrigida. As simulações apresentadas na Tab. 6.19 foram novamente simuladas e os resultados compilados na Tab. 6.21.

Tabela 6.21. Resultados dos ensaios homogêneos de kevlar – V_f de 50%
Permeabilidade corrigida $K_{num} = 1,16 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	D_{num}
$1,22 \cdot 10^{-7}$	5570,09	6079,55	9,15
$2,78 \cdot 10^{-7}$	10377,62	11068,34	6,66
$5,86 \cdot 10^{-7}$	20083,63	20900,40	4,07
$8,80 \cdot 10^{-7}$	29793,74	30278,30	1,63
$1,16 \cdot 10^{-6}$	39458,87	39332,34	0,32
$1,44 \cdot 10^{-6}$	49177,69	48134,22	2,12
$1,69 \cdot 10^{-6}$	58934,81	56191,49	4,65
$1,96 \cdot 10^{-6}$	68494,13	64861,99	5,30

Os resultados apresentados na Tab. 6.21 indicam que o valor de permeabilidade corrigida calculada pelo software OpenFOAM se mostrou adequado e que a média das diferenças entre os ΔP s numérico e experimental foi de 4,24%.

Na sequência do estudo foram realizadas as simulações referentes ao ensaio com fibra de kevlar e volume de fibras de 36,63% e dois ensaios com fibras de vidro-E. Os valores dos parâmetros de entrada de todas as simulações podem ser vistos na Tab. 6.22.

Tabela 6.22. Parâmetros de entrada das simulações homogêneas

Fibra	V_f (%)	$K_{inicial}$ (m ²)	μ (Pa·s)	ε
Kevlar	49,72	$4,44 \cdot 10^{-12}$	0,0535	0,5028
Kevlar	36,63	$1,12 \cdot 10^{-11}$	0,0525	0,6337
Vidro-E	49,74	$6,40 \cdot 10^{-12}$	0,0611	0,5026
Vidro-E	36,44	$1,16 \cdot 10^{-11}$	0,0610	0,6356

Os valores para todas as simulações realizadas são apresentados no Apêndice D. Um resumo das simulações para os dois tipos de fibras e os dois V_f 's estudados podem ser vistos na Tab. 6.23. Salienta-se que esses casos estão de acordo com os parâmetros apresentados na Tab. 6.22.

Tabela 6.23. Resumo dos resultados dos ensaios homogêneos

Material	V_f (%)	K_{exp} (m²)	K_{num} (m²)	D_{exp} (%)	D_{num} (%)
Kevlar	49,72	$4,44 \cdot 10^{-12}$	$1,16 \cdot 10^{-12}$	64,68	4,24
Kevlar	36,63	$1,12 \cdot 10^{-11}$	$3,78 \cdot 10^{-12}$	58,21	4,26
Vidro-E	49,74	$6,40 \cdot 10^{-12}$	$1,73 \cdot 10^{-12}$	63,75	7,54
Vidro-E	36,44	$1,16 \cdot 10^{-11}$	$5,73 \cdot 10^{-12}$	46,25	21,63

Na Tab. 6.23, a coluna K_{exp} apresenta a permeabilidade experimental (m²), a coluna K_{num} a permeabilidade calculada numericamente (m²), a coluna D_{exp} mostra a diferença entre os dados experimentais e a solução numérica utilizando a permeabilidade experimental e a coluna D_{um} indica a diferença entre os dados experimentais e a solução numérica obtida com a permeabilidade corrigida calculada iterativamente.

Observa-se na Tab. 6.23, que a diferença entre as permeabilidades experimental e numérica foram de 73,84% para o caso de kevlar e V_f de aproximadamente 50%, de 66,25% para o caso de kevlar e V_f de aproximadamente 36%, de 72,94% para o caso de vidro-E e volume de fibras de aproximadamente 50% e de 50,60% para o caso de vidro-E e aproximadamente 36% de volume de fibras.

Nota-se, nos resultados apresentados na Tab. 6.23, que os valores de diferenças entre os dados experimentais e os resultados numéricos diminuem quando se utiliza a técnica de recalculer a permeabilidade de forma iterativa. Nos casos com fibra de kevlar, independente do volume de fibras, as diferenças se mantiveram baixas, enquanto que nos casos com fibra de vidro-E as diferenças foram menores para um volume de fibras maior e se obteve diferenças maiores em volumes de fibra menor.

Talvez um dos aspectos que mereça mais atenção em estudos futuros seja relativo à completa impregnação das fibras. Como o vidro-E é um material mais permeável e com a baixa compactação das fibras, esses aspectos podem ter influenciado no escoamento de uma maneira que o modelo numérico não foi capaz de reproduzir.

Porém, apesar de mais altas, a diferença média foi de 21,63%, dentro do previsto no *benchmark* internacional (Vernet et al. 2014) o que dadas todas as simplificações realizadas e a dificuldade de solução dos problemas propostos nesse modelo, podem ser diferenças consideradas adequadas.

Outros aspectos das simulações numéricas merecem destaque e foram alvo de investigação

no desenvolvimento do modelo computacional. A seguir, apresenta-se uma comparação entre duas simulações, uma com os dados na Tab. 6.15, em que as diferenças entre os dados experimentais e os resultados numéricos do modelo axissimétrico foram menores que 10% e outra simulação, com os dados na Tab. 6.19, que as diferenças entre o numérico e o experimental foram maiores. Nessas duas simulações foram utilizados os ensaios com kevlar e volume de fibras de 34,91% e 49,88% e entre as variáveis destacadas para essa comparação cita-se o gradiente de pressão, linhas de corrente e campo de velocidades. Salienta-se que outros casos que se poderiam contrapor pequenas diferenças e grandes diferenças também foram testados, no entanto, não foram colocados neste trabalho pois, o comportamento é similar e ficaria muito repetitivo, já que o objetivo central é mostrar a similaridade no comportamento do escoamento.

Buscando-se compreender os motivos de haver uma diferença maior na comparação dos resultados numéricos com os dados experimentais, apresentam-se figuras com o campo de pressão das duas simulações de kevlar dos dados recalculados do trabalho de Trindade et al. (2019). Essa variável é muito importante nas simulações e apesar das vazões volumétricas numéricas apresentarem resultados com uma maior diferença no caso do V_f de 49,88%, o campo de pressão dessa simulação teve um comportamento muito similar ao do caso de V_f de 34,91% como se pode perceber na Fig. 6.21.

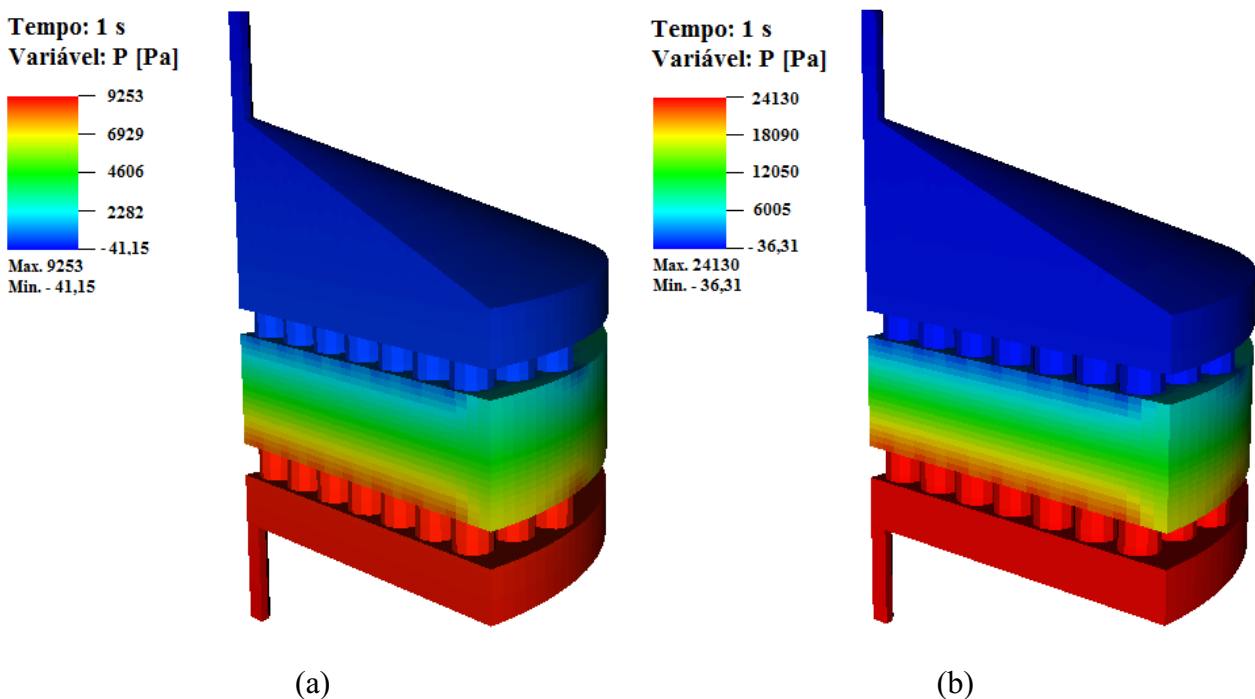


Figura 6.21. Comparação Gradiente de Pressão: a) $V_f = 34,91\%$, b) $V_f = 49,88\%$

Finalmente é feita uma comparação com as linhas de corrente das simulações, o que pode ser observado na Fig. 6.22. Nesta, fica claro a formação de caminhos preferências do fluido através dos tubos, ou seja, fortalecendo a hipótese de que a área correta a ser utilizada é a dos furos e não da secção transversal do molde.

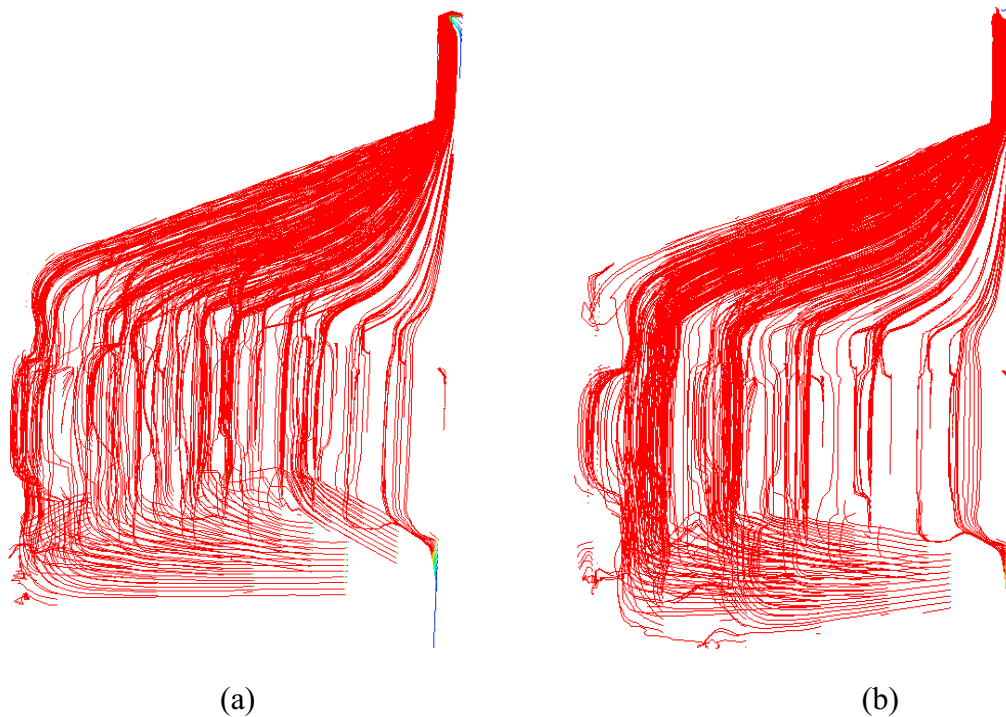


Figura 6.22. Comparação Linhas de Corrente: a) V_f 34,91%, b) V_f 49,88%

6.3.5. Simulação dos Ensaio Híbridos

Nesta seção, são apresentados os resultados numéricos dos ensaios híbridos. Salienta-se que, como se trata de um processo que envolve dois reforços fibrosos distintos, a permeabilidade do meio poroso foi determinada por meio do equacionamento analítico apresentado anteriormente. Recorda-se que na solução analítica desenvolvida, determinou-se a resistência total para os dois reforços fibrosos, kevlar e vidro-E, e a partir desse valor utilizando-se da Eq. (3.17), determinou-se a permeabilidade de cada meio poroso em cada um dos ensaios. No estudo numérico de casos híbridos, a geometria apresentada na Fig. 4.3 é utilizada com a diferença que o meio poroso é dividido entre os dois reforços fibrosos que foram utilizados neste trabalho, de forma que a altura de cada meio poroso foi descrita nas Tabs. 6.5 e 6.6. Sendo assim, uma representação do molde axissimétrico para problemas híbridos pode ser vista na Fig. 6.23.

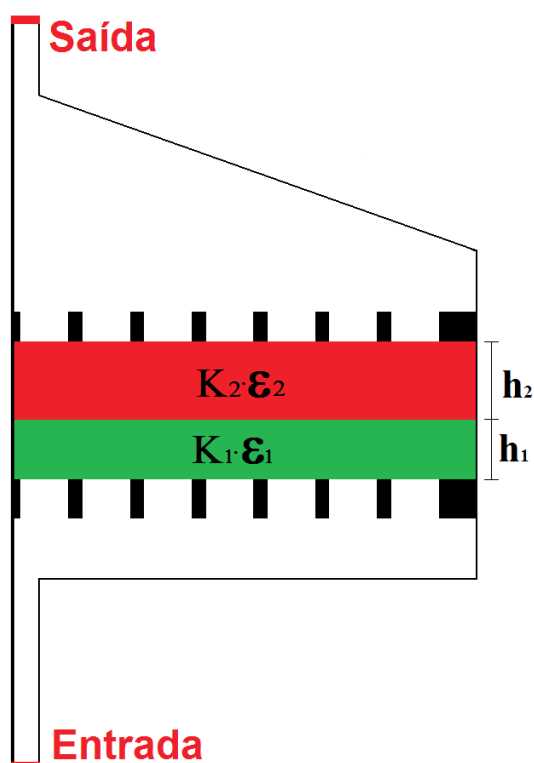


Figura 6.23. Domínio computacional axissimétrico utilizado em simulações de casos híbridos

Na Tab. 6.24 constam os resultados das permeabilidades e demais variáveis de entrada para as simulações.

Tabela 6.24. Dados de entrada para as simulações dos ensaios híbridos

Ensaio	$K_{kevlar} \text{ (m}^2\text{)}$	$h_1 \text{ (mm)}$	$K_{vidro-E} \text{ (m}^2\text{)}$	$h_2 \text{ (mm)}$	$\mu \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$	ϵ
24G14K	$9,97 \cdot 10^{-12}$	14,01	$4,14 \cdot 10^{-12}$	8,22	0,0595	0,6372
33G11K	$9,58 \cdot 10^{-12}$	11,02	$4,02 \cdot 10^{-12}$	11,19	0,0577	0,6384
42G8K	$1,04 \cdot 10^{-11}$	7,19	$3,84 \cdot 10^{-12}$	14,94	0,0600	0,6395
30G20K	$7,67 \cdot 10^{-12}$	14,16	$2,87 \cdot 10^{-12}$	8,06	0,0583	0,5050
45G15K	$7,63 \cdot 10^{-12}$	10,04	$2,68 \cdot 10^{-12}$	12,18	0,0576	0,5068
61G10K	$6,32 \cdot 10^{-12}$	8,42	$3,35 \cdot 10^{-12}$	13,78	0,0572	0,5033

Salienta-se que a geometria para os casos híbridos foi construída de acordo com as alturas de cada um dos meios porosos, determinados nos ensaios experimentais e expressos na Tab. 6.24

por h_1 para a altura de kevlar (mm) e h_2 para a altura de vidro-E (mm). Outro aspecto que merece ser destacado é que a discretização do domínio computacional foi análoga à desenvolvida nos demais casos já apresentados e a malha gerada idêntica à apresentada no estudo de solução independente de malha. A seguir, na Tab. 6.25 são apresentados os dados referentes à simulação do caso 33G11K.

Tabela 6.25. Resultados numéricos para o ensaio 33G11K

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$2,90 \cdot 10^{-7}$	4179,77	3581,25	14,32
$7,07 \cdot 10^{-7}$	8870,19	7250,06	18,26
$1,49 \cdot 10^{-6}$	18112,70	14183,44	21,69
$2,24 \cdot 10^{-6}$	27486,68	20772,16	24,43
$2,89 \cdot 10^{-6}$	36814,91	26595,25	27,76
$3,66 \cdot 10^{-6}$	46272,95	33416,02	27,78
$4,22 \cdot 10^{-6}$	56298,27	38557,10	31,51
$4,74 \cdot 10^{-6}$	66107,62	43261,60	34,56

Os resultados apresentados na Tab. 6.25 indicam uma diferença média de 25,04%, semelhante ao que se obteve quando se comparou os resultados numéricos com os dados de ensaios homogêneos, indicando uma consistência tanto nos ensaios híbridos, quanto na solução analítica obtida. Dessa forma, assim como fora feito para os ensaios homogêneos, recorre-se aos métodos numéricos para investigar um ajuste para a permeabilidade dos dois meios porosos.

Salienta-se que a metodologia de, a partir de um ensaio híbrido, determinar a permeabilidade de cada um dos reforços fibrosos individualmente, da forma como desenvolvida nesse trabalho constitui-se de uma técnica inovadora, que permite avançar no que tange à compreensão dos efeitos da forma como se empilha os tecidos, como influencia a compactação das mesmas, a proporcionalidade entre o número de camadas de cada um dos materiais, entre outros aspectos. No entanto, as diferenças da comparação entre a solução numérica e os dados experimentais se mostraram elevados o que levou à necessidade de se buscar um ajuste como fora feito nos casos homogêneos.

Porém, a metodologia iterativa de determinação da permeabilidade corrigida para os dois meios porosos, não foi possível ser aplicada nos casos híbridos. Optou-se então por utilizar-se da relação entre o ΔP medido experimentalmente e o ΔP calculado na simulação numérica, dados que estão disponíveis na Tab. 6.25. O gráfico com essa relação e a reta que passa pela origem que ajusta esses pontos pode ser visto na Fig. 6.24.

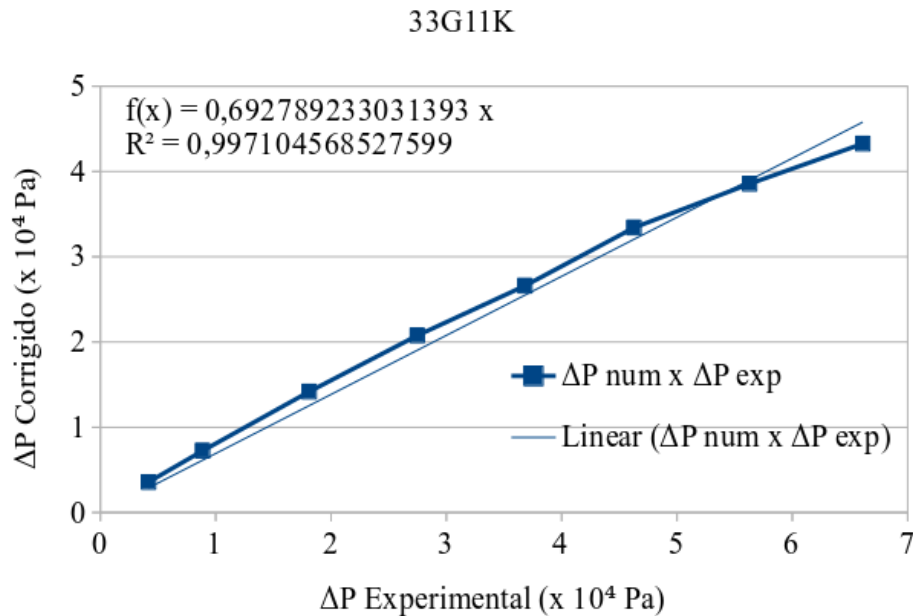


Figura 6.24. Relação ΔP Numérico x ΔP Experimental – 33G11K

A Eq. 6.15 obtida por meio da relação entre as diferenças de pressão numérica e experimental, com os dados do ensaio 33G11K, determina-se a permeabilidade corrigida ajustada para esse caso.

$$K_{cor} = 0,692789233031393 \cdot K_{exp} \quad (6.15)$$

em que o K_{cor} é a permeabilidade corrigida (m^2) e K_{exp} é a permeabilidade medida experimentalmente (m^2).

A partir da Eq. (6.15), recalculando a permeabilidade e mantendo todas as demais variáveis com os valores já mencionados, obteve-se a permeabilidade ajustada para o kevlar de $2,79 \cdot 10^{-12} m^2$ e a do vidro-E de $6,64 \cdot 10^{-12} m^2$. Na Tab. 6.26, constam os resultados obtidos com essa consideração.

Tabela 6.26. Resultados numéricos do ensaio 33G11K com a permeabilidade corrigida

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	E_{exp}
$2,90 \cdot 10^{-7}$	5169,84	4702,25	12,50
$7,07 \cdot 10^{-7}$	9833,48	9986,54	12,59
$1,49 \cdot 10^{-6}$	19115,24	19972,69	10,27
$2,24 \cdot 10^{-6}$	28244,07	29462,26	7,19
$2,89 \cdot 10^{-6}$	37850,90	37848,93	2,81
$3,66 \cdot 10^{-6}$	47294,87	47672,69	3,02
$4,22 \cdot 10^{-6}$	56860,57	55076,88	2,17
$4,74 \cdot 10^{-6}$	66841,80	61852,26	6,44

Os resultados apresentados na Tab. 6.26 indicam uma diferença média de 7,12%. Os valores de diferenças menores quando se aumenta o volume de fibras está em concordância com os demais resultados já apresentados. Evidenciando, mais uma vez, que a compressibilidade das fibras é fator importante, tanto do ponto de vista experimental, quanto na abordagem numérica.

Os resultados detalhados das simulações e da obtenção das equações de correção da permeabilidade podem ser observados no Apêndice D deste trabalho. A Eq. 6.16 (24G14K), Eq. 6.17 (42G8K), Eq. 6.18 (30G20K), Eq. 6.19 (45G15K) e Eq. 6.20 (61G10K) foram utilizadas para o ajuste da permeabilidade nos demais casos híbridos.

$$K_{cor} = 0,475984633533888 \cdot K_{exp} \quad (6.16)$$

$$K_{cor} = 0,550882668379491 \cdot K_{exp} \quad (6.17)$$

$$K_{cor} = 0,386053357742333 \cdot K_{exp} \quad (6.18)$$

$$K_{cor} = 0,310768627716588 \cdot K_{exp} \quad (6.19)$$

$$K_{cor} = 0,233562703033293 \cdot K_{exp} \quad (6.20)$$

Assim como nos resultados dos ensaios homogêneos, a fim de facilitar a discussão dos resultados observa-se na Tab. 6.27 um resumo dos casos híbridos e que estão de acordo com os parâmetros apresentados na Tab. 6.24.

Salienta-se que, na coluna D_{exp} da Tab. 6.27, é apresentada a diferença média entre o ΔP

experimental e o numérico sem o ajuste da permeabilidade e a coluna D_{cor} apresenta os valores médios da diferença considerando a correção no valor da permeabilidade.

Tabela 6.27. Resumo dos resultados numéricos para os ensaios híbridos

Caso	V_f (%)	K_{1_exp} (m²)	K_{1_num} (m²)	K_{2_exp} (m²)	K_{2_num} (m²)	D_{exp} (%)	D_{cor} (%)
24G14K	36,28	$9,97 \cdot 10^{-12}$	$4,75 \cdot 10^{-12}$	$4,14 \cdot 10^{-12}$	$1,97 \cdot 10^{-12}$	50,76	3,72
33G11K	36,16	$9,58 \cdot 10^{-12}$	$6,64 \cdot 10^{-12}$	$2,79 \cdot 10^{-12}$	$7,18 \cdot 10^{-12}$	25,04	7,12
42G8K	36,05	$1,04 \cdot 10^{-11}$	$5,75 \cdot 10^{-12}$	$3,84 \cdot 10^{-12}$	$2,12 \cdot 10^{-12}$	38,46	9,77
30G20K	49,50	$7,67 \cdot 10^{-12}$	$2,96 \cdot 10^{-12}$	$2,87 \cdot 10^{-12}$	$1,11 \cdot 10^{-12}$	55,88	7,01
45G15K	49,32	$7,63 \cdot 10^{-12}$	$2,37 \cdot 10^{-12}$	$2,68 \cdot 10^{-12}$	$8,34 \cdot 10^{-13}$	66,83	5,48
61G10K	49,67	$6,32 \cdot 10^{-12}$	$1,48 \cdot 10^{-12}$	$3,35 \cdot 10^{-12}$	$7,83 \cdot 10^{-13}$	74,81	9,60

A partir dos dados da Tab. 6.27, pode-se inferir que a técnica de ajuste da permeabilidade se mostrou eficiente nos casos estudados. Diferenças menores que, aproximadamente, 10% foram encontradas o que pode ser considerado satisfatório.

Outro aspecto que merece reflexão é a respeito das diferenças apresentadas em cada um dos ensaios conforme pode ser visto na Tab. 6.26 e no Apêndice D; observa-se que na primeira linha, referente ao primeiro ΔP de cada ensaio, teve-se a maior diferença entre os valores medidos experimentalmente e numericamente. Tal efeito já fora observado nos ensaios homogêneos e repete-se nos híbridos, corroborando com a ideia de que se tem uma dificuldade adicional na medição da vazão experimental em pressões mais baixas.

7. CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE

Neste trabalho, foi apresentada uma proposta experimental, numérica e analítica para problemas de moldagem líquida. Buscou-se compreender como funciona a resistência total do escoamento, analisando-se a relação entre a resistência do meio poroso, volume de fibras, formas de empilhamento dos tecidos e compressibilidade.

Inicialmente, foi realizado um conjunto de ensaios experimentais utilizando-se meios homogêneos e híbridos, com a utilização de dois volumes de fibra, 36% e 50% e dois tipos de fibras, kevlar e vidro-E. O Desvio-Padrão dos experimentos foram considerados satisfatórios, estando todos os valores uma ordem de grandeza menor que os valores obtidos por meio da média dos dados dos ensaios.

Com o objetivo de oferecer mais subsídios para o estudo numérico, foi realizado um experimento de compressão para medir a altura de cada meio poroso em ensaios híbridos e foi realizado, também, um ensaio sem a inclusão do meio poroso, para validar o modelo computacional. Salienta-se que a retirada do meio poroso ocorreu para simplificar o experimento, evitando a necessidade de se determinar variáveis adicionais, como a permeabilidade e porosidade do meio, aumentando as incertezas de medição.

Uma nova metodologia de determinação da permeabilidade foi desenvolvida. Nesse trabalho, evidenciou-se que a área que deve ser considerada para a determinação da permeabilidade transversal é a área em que ocorre o escoamento, nesse caso, a área dos furos da placa perfurada. Foram realizados ensaios com todos os furos e ensaios com alguns furos fechados. Chegou-se a valores próximos de permeabilidade, independente de quantos furos foram utilizados. Quando foi usada a área da seção transversal, os valores diferiam; quando se utiliza o ensaio com todos os furos a permeabilidade encontrada era diferente da determinada quando alguns destes furos eram fechados.

Essa nova metodologia, considerando a área dos furos, foi aplicada nos ensaios realizados durante a execução deste trabalho e também, em ensaios encontrados experimentos oriundos da literatura.

Para os resultados analíticos, um equacionamento, baseado na resistência ao escoamento, foi desenvolvido, considerando que o meio poroso é uma resistência ao escoamento. A partir do equacionamento proposto e de posse dos dados experimentais dos reforços híbridos, calculou-se a resistência total de cada meio poroso, a resistência total do ensaio e as permeabilidades de cada um dos meios porosos. Ressalta-se que essa metodologia é inovadora, visto que a partir de um único

experimento e da solução da Eq. 3.17, foi possível determinar a permeabilidade de cada um dos reforços fibrosos e a resistência oferecida por esses.

Finalmente, um modelo numérico foi desenvolvido. Esse modelo apresentou uma versão axissimétrica e uma versão tridimensional. No decorrer do trabalho, percebeu-se que o modelo axissimétrico encontrava resultados muito próximos do modelo 3D, e como o custo computacional chegava a ser 48 vezes menor, optou-se por utilizar apenas o modelo axissimétrico.

No estudo numérico, foi feita a validação por meio dos dados experimentais oriundos dos ensaios sem o meio poroso. Diferenças menores que 3% foram encontradas, considerando-se assim que os modelos numéricos eram satisfatórios. Um estudo de solução independente de malha também foi realizado e a discretização do domínio computacional se deu por meio de hexaedros e prismas.

Ainda no estudo numérico, nos resultados referentes aos meios homogêneos, percebeu-se que à medida que o volume de fibras aumentava, as diferenças entre os resultados numéricos e os dados experimentais também aumentavam. Dessa forma, desenvolveu-se um código em C para determinar um ajuste na permeabilidade de maneira iterativa. Utilizando-se os valores de permeabilidade determinados iterativamente, as diferenças médias entre os resultados numéricos e os dados experimentais foram menores que 10%, indicando a eficácia de fazer o ajuste numérico da permeabilidade. Reforça-se que, no caso do ajuste numérico da permeabilidade, todas as outras grandezas medidas experimentalmente, no caso pressão e vazão, são reproduzidas numericamente conforme ocorrera nos experimentos.

Convém salientar que, durante a execução do estudo numérico de experimentos homogêneos, constatou-se que a simplificação de considerar o meio poroso isotrópico era aceitável, pois se utilizou variações para considerar o meio ortotrópico, mas os valores foram, aproximadamente, iguais aos obtidos nas simulações isotrópicas.

Por fim, foram realizadas as simulações referentes aos ensaios híbridos, que assim como nos homogêneos, teve um aumento das diferenças entre numérico e experimental, à medida que o volume de fibras aumentava. Como no caso híbrido não se pode utilizar a técnica iterativa, optou-se por utilizar como fator de correção da permeabilidade o valor das diferenças médias e assim como nos casos homogêneos, esse ajuste foi capaz de determinar uma boa concordância entre os dados experimentais e os resultados numéricos.

De forma resumida, as principais contribuições para o estado da arte sobre a determinação da permeabilidade transversal de compósitos híbridos propostas neste trabalho são:

- Desenvolvimento de um modelo numérico axissimétrico que transformou os furos da placa

perfurada do molde em anéis circulares e a partir dessa simplificação pode-se resolver adequadamente os problemas de Moldagem Líquida deste trabalho com um custo computacional 48 vezes menor em comparação com o modelo tridimensional;

- Desenvolvimento de uma técnica numérica de ajuste do valor da permeabilidade transversal de forma iterativa nos experimentos homogêneos e numérica nos casos híbridos;
- Desenvolvimento de uma técnica experimental para medição da permeabilidade transversal que se utiliza da área em que ocorre efetivamente o escoamento, diferentemente do que se encontrou na literatura que indicava a utilização da área total da seção transversal. Salienta-se que desde 1998 no trabalho de Gauvin e Trochu, seguido por Wu, Li e Sheno (2006); Song e Youn (2007); Schmidt et al. (2009); Zhao et al. (2016); Huang et al. (2019); Ali, Umer e Khan (2019); a comunidade científica se detém em utilizar a área da seção transversal para a determinação da permeabilidade;
- Elaboração de um modelo analítico capaz de estimar os valores da permeabilidade transversal dos reforços fibrosos de experimentos híbridos a partir de um ensaio e uma simulação numérica. Essa contribuição constitui-se de uma prática inovadora, pois na literatura encontra-se apenas medidas de uma permeabilidade média do reforço fibroso híbrido e não se determinava as permeabilidades de cada um dos reforços fibrosos.

Finalmente se sabe que simplificações foram realizadas e até por essas dificuldades sugerem-se algumas propostas de continuidade:

- Instalação de outros transdutores de pressão ao redor do molde, para se ter uma curva de pressão com mais dados e, conseqüentemente, ter-se mais subsídios para o desenvolvimento do modelo numérico;
- Projetar um cortador de fibras que evite que pequenas distorções na fibra possam ocasionar diferenças entre os resultados numéricos e o experimental.

8. REFERÊNCIAS

- ALI, M. A.; UMER, R.; KHAN, K. A. **Equivalent Permeability of Adjacent Porous Regions.** Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). 18673915, 2019.
- ALI, M. A.; UMER, R.; KHAN, K. A.; CANTWELL, W. J. **In-plane virtual permeability characterization of 3D woven fabrics using a hybrid experimental and numerical approach.** Composites of Science and Technology. 173: 99-109, 2019.
- ALVES, A.L.S. **Processamento de Placas Compósitas pela Técnica de Moldagem por Infusão de Resina de Seemann.** Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- AMORIM Jr. W.F. **Processamento de Placa Espessa de Compósito Através de Moldagem por Transferência de Resina.** Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- BALLATA, W.O.; WALSH, S.M.; ADVANI, S. **Determination of the Transverse Permeability of a Fiber Preform.** Journal of Reinforced Plastics and Composites 18:1450, 1999.
- CAGLAR, B.; TEKIM, C.; KARASU, F.; MICHAUD, V. **Assessment of Capillary Phenomena in Liquid Composite Molding.** Composites: Part A, JCOMA 5344, 2019.
- CALADO, V. M. A.; ADVANI, S. G. **Effective Average Permeability of Multi-Layer Preforms in Resin Transfer Molding.** Composites Science and Technology. 56: 519-531, 1996.
- CHAE, H. S.; SONG, Y. S.; YOUN, J. R. **Transverse permeability measurement of a circular braided preform in liquid composite molding.** Rheology Journal Vol. 19: 17-25, 2007.
- CHEBIL, N.; LARGARDÈRE, M. D.; PARK, C. H. **Efficient numerical simulation method for**

three dimensional resin flow in laminated preform during liquid composite molding processes. Composites: Part A. 125: 105519, 2019.

CHEN, Z.; Ye, L.; HONGYUAN, L. **Effective permeabilities of multilayer fabric preforms in liquid composite moulding.** Compos Struct 66: 351-357, 2004.

CHILDS, H.; BRUGGER, E.; WHITLOCK, B.; et al. **VisIt: An End-User Tool For Visualizing and Analyzing Very Large Data.** High Performance Visualization–Enabling Extreme-Scale Scientific Insight. p. 357–372, 2012.

ESCHER, M.; SANTOS, D. B. **Projeto mecânico de um equipamento para medição da permeabilidade transversal de pré-formas fibrosas.** Trabalho de conclusão de curso Rio Grande: Universidade Federal do Rio Grande - FURG, 2016. Disponível em: <<http://argo.furg.br/?RG001420604>>

FOX, R.W.; MCDONALD, A.T.; PRITCHARD, P.J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro/RJ, 2004.

GAUVIN, R.; TROCHU, F. **Key Issues in Numerical Simulation for Liquid Composite Molding Processes.** Polymer Composites. 19: 233-240, 1998.

GEUZAIN, C.; REMACLE, J.-F. **Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities.** International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 79, n. 11, p. 1309–1331, 2009. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/nme.2579>>. Acesso em: 1/8/2014.

GODBOLE, M. G.; PURANDERE, R.; HARSHE, R.; HOOD, A.; GURURAJA, S.; JOSHI, M.; ADVANI, S. **Influence of filament distribution on transverse tow permeability: Model predictions and experimental validation.** Composites: Part A. 118: 150-161, 2019.

HÄRTER, F. V. **Estudo Numérico para a Determinação da Permeabilidade Transversal em Processo de Moldagem por Transferência de Resina (RTM).** Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional,

FURG, Rio Grande/RS, 2016.

HATTABI, M.; ECHAABI, J.; BENSALAH, O. **Numerical and experimental analysis of the resin transfer molding process.** Korea-Australia Rheology Journal, vol. 20, n. 1, pp. 7-14, 2008.

HIRT, C.W.; NICHOLS, B.D. **Volume of Fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries,** J. Comput. Phys. 39 (1981) 201±225, 1981.

HUANG, Z. M.; LEE, S. Y.; KIM, H. M.; YOUN, J. R.; SONG, Y. S. **Permeability analysis of non-crimp fabrics for resin transfer molding.** Polymers and Polymer Composites. 27: 1-11, 2019.

INCROPERA, F.P.; BERGMAN, T.L.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa,** 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro/RJ, 2008.

JINLIAN, H.; LIU Y.; XUEMING S.; **Study on void formation in multilayer woven fabrics, Composites.** Part A 35, 595-603, 2004.

KARAKI, M.; YOUNES, R.; TROCHU, F.; LAFON, P. **Progress in Experimental and Theoretical Evaluation Methods for Textile Permeability.** Journal of Composites Science. 3,73, 2019.

KINCAID, D. R.; CHENEY, E. W. **Numerical Analysis: Mathematics of Scientific Computing,** Brooks Cole, 3rded, 2001.

KIM, S. K.; DANIEL, I. M. **Determination of three-dimensional permeability of fiber preforms by the inverse parameter estimation technique.** Composites: Part A. 34: 421-429, 2003.

KONSTANTOPOULOS, S.; HUEBER, C.; ANTONIADIS, I.; SUMMERSCALES, J.; SCHLEDJEWSKI, R. **Liquid composite molding reproducibility in real-world production of fiber reinforced polymeric composites: a review of challenges and solutions.** Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science. 2055-0359, 2019.

KUPPUSAMY, R.R.P.; SHINDE, V.M.; NEOGI, S. **Measurement of Effective Permeability of**

Reinforcement Mats using Sensitivity Analysis. Polymer Composites. 1445-1454, 2012.

LEBEL, F.; RUIZ, E.; TROCHU, F. **Void Content Analysis and Processing Issues to Minimize Defects in Liquid Composite Molding.** Polymer Composite. P: 109-120, 2019.

LIU, X.L.; FALZON, P.J.; SWEETING, R.; PATON, R. **Effective Compressibility and Permeability of Multi-Layer Non-Crimp Fiberglass Reinforcements.** Journal of Reinforced Plastics and Composites; 23; 861, 2004.

LUOMA, J. A.; VOLLER, V. R. **An explicit scheme for tracking the filling front during polymer mold filling.** Applied Mathematical Modelling 24 , 575-590, 2000.

MAROCO, J. **Análise Estatística com o SPSS Statistics.** 7ª. Ed., Gráfica Manuel Barbosa & Filhos, Pêro Pinheiro, Portugal, 2018.

MALISKA, C. R.; VASCONCELLOS, J. F. V. de. **An unstructured finite volume procedure for simulating flows with moving fronts.** Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol.182, pp. 401-420, 1998.

MEHDIKHANI, M.; GORBATIKH, L.; VERPOEST, I.; LOMOV, S. V. **Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance.** Journal of Composite Materials. 53: 1579-1669, 2018.

MICHAUD, V. **A Review of Non-saturated Resin Flow in Liquid Composite Moulding processes.** Transp. Porous Med. 115: 581-601, 2016.

MINUSSI, R. B. **Rompimento de Barreiras – Análise Experimental e Numérica na Previsão de Velocidades de Propagação de Frentes de Material Hiperconcentrado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, São Paulo 2007.

OKONKWO, K.; SIMACEK, P.; ADVANI, S.G.; PARNAS, R.S. **Characterization of 3D fiber preform permeability tensor in radial flow using an inverse algorithm based on sensors and**

simulation. Composites: Part A 42: 1283-1292, 2011.

OLIVEIRA C. P. **Modelagem Numérica do Transporte de Resinas em um Meio Poroso Aplicado ao Processo de RTM.** Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2010.

PORTAL ACTION. **Teste de Fisher.** Disponível em: <<https://www.portalaction.com.br/anova/32-teste-de-fisher>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

RUDD, C. D.; LONG, A. C.; KENDALL, K. N.; MANGIN, C. **Liquid Moulding Technologies: Resin Transfer Moulding, Structural Reaction Injection Moulding and Related Processing Techniques.** Abington Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 1997.

RUIZ, E.; SAIN, M.; SOUKANE, S.; TROCHU, F.; BREARD, J. **Optimization of injection flow rate to minimize micro/macro-voids formation in resin transfer molded composites.** Composites Science and Technology 66, 475–486, 2006.

SAS, H. S.; WURTZEL, E. B.; SIMACEK, P.; ADVANI, S. G. **Effect of relative ply orientation on the through-thickness permeability of uni-directional fabrics.** Composites Science and Technology. 96: 116-121, 2014.

SAVINO, J. **Deslocamento de Fluidos em Poços Horizontais não Retilíneos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2009.

SCHELL, J.S,U.; SIEGRIST, M.; ERMANNI, P. **Experimental Determination of the Transversal and Longitudinal Fibre Bundle Permeability.** Applied Composite Materials 14: 117-128, 2007.

SCHMIDT, T. M.; GOSS, T.M.; AMICO, S.C.; LEKAKOU C. **Permeability of Hybrid Reinforcements and Mechanical Properties of their Composites Molded by Resin Transfer Molding,** Journal of Reinforced Plastics and Composites. 28: 2839-2850, 2009.

SHARMA, S. and SIGINER, D.A. **Permeability Measurement Methods in Porous Media: a review.** In Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition - IMECE. Boston, Massachusetts, USA. 2008.

SIMACEK, P.; ADVANI, S. G. **A numerical model to predict fiber tow saturation during liquid composite molding.** Composites Science and Technology. 63: 1725-1736, 2003.

SONG, Y. S.; YOUN, J. R. **Flow advancement through multi-layered preform with sandwich structure.** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 38(4): 1082-1088, 2007.

SOUZA, J. A. ; ISOLDI, L. A.; SANTOS, E. D.; OLIVEIRA, C. P.; AMICO, S. C. **A Numerical Methodology for 3D Permeabilities Determination in Polymeric Composites.** In: ENCIT 2012 - 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Rio de Janeiro – RJ, 2012.

SRINIVASAN, V.; SALAZAR, A. J.; SAITO, K. **Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology.** Applied Mathematical Modelling, p. 3710 – 3730, 2011.

The OpenFOAM Foundation, **OpenFOAM v5 User Guide.** [Online]. Disponível em: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide>.

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: ICAMM 2015 – International Conference on Advanced Materials and Manufacturing, Tirunelveli – TN Índia, 2015.

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.

VERNET, N.; RUIZ, E.; ADVANI, S.; ALMS, J. B.; AUBERT, M.; BARBURSKI, M.; BARARI, B.; BERAUD, J. M.; BERG, D. C.; CORREIA, N.; DANZI, M.; DELAVIÈRE, T.; DICKERT, M. DI FRATTA, C.; ENDRUWEIT, A.; ERMANNI, P.; FRANCUCCI, G.; GARCIA, J. A.; GEORGE, A.; HAHN, C.; KLUNKER, F.; LOMOV, S. V.; LONG, A.; LOUIS, B.; MALDONADO, J.;

MEIER, R.; MICHAUD, V.; PERRIN, H.; PILLAI, K.; RORIGUEZ, E. TROCHU, F.; VERHEYDEN, S. WIETGREFE, M.; XIONG, W.; ZAREMBA, S.; ZIEGMANN, G.

Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II.

Composites: Part A. 61: 172-184, 2014.

VISCONTI, I.C.; LANGELLA, A., DURANTE, M. **Analysis of Transversal Permeability for Different Types of Glass Fiber Reinforcement.** Applied Composite Materials 10: 119-127, 2003.

WEITZENBOCK, J. R.; SHENOI, R. A.; WILSON, P. A. **Measurement of three-dimensional permeability.** Composites: Part A. 29A: 159-169, 1998.

WELLER, H.; GREENSHIELDS, C.; ROUVRAY, C. **The OpenFOAM Foundation Ltd. OpenFOAM.** 2015, [Online]. Disponível em: <<https://openfoam.org/>>. Acesso em 20/7/2016.

WU, X.; LI, J.; SHENOI, R. A. **A New Method to Determine Fiber Transverse Permeability.** Journal of Composite Materials. 6: 747-756, 2007.

YALCINKAYA, M. A.; SOZER, E. M.; ALTAN, M. C. **Dynamic Pressure Control in VARTM: Rapid Fabrication of Laminates with High Fiber Volume Fraction and Improved Dimensional Uniformity.** Polymer Composites. 40: 2482-2494, 2019.

YASHIRO, S.; NAKASHIMA, D.; OYA, Y.; OKABE, T.; MATSUZAKI, R. **Particle simulation of dual-scale flow in resin transfer molding for process analysis.** Composites: Part A. 121: 283-288, 2019.

YUN, M.; SAS, H.; SIMACEK, P.; ADVANI, S.G. **Characterization of 3D fabric permeability with skew terms.** Composites: Part A 97: 51-59, 2017.

YUN, M.; SIMACEK, P.; BINETRUY, C.; ADVANI, S.G. **Random field generation of stochastically varying through the thickness permeability of a plain woven fabric.** Composite Science and Technology. p. 199-207, 2018.

ZHAO, C.; YANG, B.; WANG, S.; MA, C.; WANG, S.; BI, F. **Three-Dimensional Numerical**

Simulation of Meso-Scale-Void Formation during the Mold-Filling Process of LCM. Applied Composite Materials. Issue 4, 2019.

ZHAO, Z.; LIAO, W.C.; BHAGAVATULA, N.; LEE, L. J.; CASTRO, J. M. **Permeability Measurements and Flow Simulation for Polyaniline Carbon Nanofibers Modified Nanopaper on Glass Fiber Preform.** Polymer Composites. 2016.

ZHOU, F.; KUENTZER, N.; SIMACEK, P.; ADVANI, S. G.; WALSH, S. **Analytic characterization of the permeability of dual-scale fibrous porous media.** Composites Science and Technology. 66: 2795-2803, 2006.

Apêndice A – Resultados Experimentais

Tabela A1. Recompilação dos dados experimentais de Trindade et al. (2019) para a determinação da permeabilidade transversal – Kevlar

22,23 (mm)		15,88 (mm)		9,35 (mm)	
$Vf(\%)$	$K_{zz}(m^2)$	$Vf(\%)$	$K_{zz}(m^2)$	$Vf(\%)$	$K_{zz}(m^2)$
-----	-----	-----	-----	34,90	$9,57 \cdot 10^{-12}$
34,91	$4,70 \cdot 10^{-12}$	34,91	$5,08 \cdot 10^{-12}$	38,78	$5,71 \cdot 10^{-12}$
41,56	$3,41 \cdot 10^{-12}$	39,57	$4,20 \cdot 10^{-12}$	42,66	$4,18 \cdot 10^{-12}$
49,88	$1,99 \cdot 10^{-12}$	48,87	$2,29 \cdot 10^{-12}$	46,54	$3,25 \cdot 10^{-12}$
56,53	$1,35 \cdot 10^{-12}$	55,86	$1,53 \cdot 10^{-12}$	50,42	$2,38 \cdot 10^{-12}$
63,18	$8,52 \cdot 10^{-13}$	62,84	$1,10 \cdot 10^{-12}$	54,29	$1,92 \cdot 10^{-12}$
69,83	$3,84 \cdot 10^{-13}$	69,82	$6,37 \cdot 10^{-13}$	62,05	$1,26 \cdot 10^{-12}$
-----	-----	-----	-----	69,81	$8,38 \cdot 10^{-13}$

Tabela A2. Recompilação dos dados experimentais de Trindade et al. (2019) para a determinação da permeabilidade transversal – Vidro-E

22,23 (mm)		15,88 (mm)		9,35 (mm)		6,35 (mm)		3,80 (mm)	
$Vf(\%)$	$K_{zz}(m^2)$	$Vf(\%)$	$K_{zz}(m^2)$	$Vf(\%)$	$K_{zz}(m^2)$	$Vf(\%)$	$K_{zz}(m^2)$	$Vf(\%)$	$K_{zz}(m^2)$
34,13	$1,43 \cdot 10^{-11}$	34,13	$1,66 \cdot 10^{-11}$	34,12	$2,35 \cdot 10^{-11}$	34,14	$3,21 \cdot 10^{-11}$	34,86	$7,21 \cdot 10^{-11}$
40,63	$6,20 \cdot 10^{-12}$	40,95	$7,99 \cdot 10^{-12}$	40,44	$1,26 \cdot 10^{-11}$	40,14	$1,64 \cdot 10^{-11}$	41,20	$3,80 \cdot 10^{-11}$
49,30	$3,48 \cdot 10^{-12}$	50,05	$5,76 \cdot 10^{-12}$	49,28	$6,65 \cdot 10^{-12}$	49,70	$1,01 \cdot 10^{-11}$	50,70	$2,18 \cdot 10^{-11}$
56,34	$2,74 \cdot 10^{-12}$	56,12	$3,03 \cdot 10^{-12}$	56,86	$2,87 \cdot 10^{-12}$	57,34	$4,49 \cdot 10^{-12}$	57,04	$1,18 \cdot 10^{-11}$
64,46	$1,14 \cdot 10^{-12}$	64,46	$1,27 \cdot 10^{-12}$	63,18	$1,18 \cdot 10^{-12}$	64,99	$1,96 \cdot 10^{-12}$	63,38	$6,05 \cdot 10^{-12}$
68,80	$7,68 \cdot 10^{-13}$	69,01	$6,10 \cdot 10^{-13}$	68,24	$7,41 \cdot 10^{-13}$	68,81	$1,22 \cdot 10^{-12}$	69,72	$2,89 \cdot 10^{-12}$

Tabela A3. Dados experimentais para reforços híbridos: 15,88 mm – 36% V_f

Ensaio	K_{zz} (m ²)	Média K_{zz} (m ²)	Desvio-Padrão (m ²)
18G9K_1	$1,00 \cdot 10^{-11}$	$8,52 \cdot 10^{-12}$	$8,61 \cdot 10^{-13}$
18G9K_2	$8,76 \cdot 10^{-12}$		
18G9K_3	$8,48 \cdot 10^{-12}$		
18G9K_4	$7,72 \cdot 10^{-12}$		
18G9K_5	$7,64 \cdot 10^{-12}$		
24G7K_1	$1,18 \cdot 10^{-11}$	$1,01 \cdot 10^{-11}$	$9,39 \cdot 10^{-13}$
24G7K_2	$1,01 \cdot 10^{-11}$		
24G7K_3	$9,85 \cdot 10^{-12}$		
24G7K_4	$9,30 \cdot 10^{-12}$		
24G7K_5	$9,22 \cdot 10^{-12}$		
30G5K_1	$1,17 \cdot 10^{-11}$	$1,08 \cdot 10^{-11}$	$5,36 \cdot 10^{-13}$
30G5K_2	$1,12 \cdot 10^{-11}$		
30G5K_3	$1,06 \cdot 10^{-11}$		
30G5K_4	$1,05 \cdot 10^{-11}$		
30G5K_5	$1,02 \cdot 10^{-11}$		
3G1K ₁₄ _1	$9,47 \cdot 10^{-12}$	$8,54 \cdot 10^{-12}$	$5,51 \cdot 10^{-13}$
3G1K ₁₄ _2	$8,79 \cdot 10^{-12}$		
3G1K ₁₄ _3	$8,39 \cdot 10^{-12}$		
3G1K ₁₄ _4	$8,09 \cdot 10^{-12}$		
3G1K ₁₄ _5	$7,94 \cdot 10^{-12}$		

Tabela A4. Dados experimentais para reforços híbridos: 15,88 mm – 50% V_f

Ensaio	K_{zz} (m ²)	Média K_{zz} (m ²)	Desvio-Padrão (m ²)
24G12K_1	$8,95 \cdot 10^{-12}$	$8,11 \cdot 10^{-12}$	$4,64 \cdot 10^{-13}$
24G12K_2	$8,26 \cdot 10^{-12}$		
24G12K_3	$7,84 \cdot 10^{-12}$		
24G12K_4	$7,84 \cdot 10^{-12}$		
24G12K_5	$7,66 \cdot 10^{-12}$		
30G10K_1	$3,96 \cdot 10^{-12}$	$3,73 \cdot 10^{-12}$	$1,37 \cdot 10^{-13}$
30G10K_2	$3,82 \cdot 10^{-12}$		
30G10K_3	$3,68 \cdot 10^{-12}$		
30G10K_4	$3,63 \cdot 10^{-12}$		
30G10K_5	$3,59 \cdot 10^{-12}$		
39G7K_1	$5,79 \cdot 10^{-12}$	$5,39 \cdot 10^{-12}$	$3,63 \cdot 10^{-13}$
39G7K_2	$5,72 \cdot 10^{-12}$		
39G7K_3	$5,52 \cdot 10^{-12}$		
39G7K_4	$5,00 \cdot 10^{-12}$		
39G7K_5	$4,93 \cdot 10^{-12}$		
3G1K ₁₉ _1	$5,33 \cdot 10^{-12}$	$5,01 \cdot 10^{-12}$	$1,88 \cdot 10^{-13}$
3G1K ₁₉ _2	$5,09 \cdot 10^{-12}$		
3G1K ₁₉ _3	$4,97 \cdot 10^{-12}$		
3G1K ₁₉ _4	$4,87 \cdot 10^{-12}$		
3G1K ₁₉ _5	$4,79 \cdot 10^{-12}$		

Tabela A5. Dados experimentais para reforços híbridos: 22,23 mm – 36% V_f

Ensaio	$V_f(\%)$	Média $K_{zz}(\text{m}^2)$	Desvio-Padrão (m^2)
24G14K_1	$8,16 \cdot 10^{-12}$	$7,93 \cdot 10^{-12}$	$1,66 \cdot 10^{-13}$
24G14K_2	$7,79 \cdot 10^{-12}$		
24G14K_3	$7,83 \cdot 10^{-12}$		
33G11K_1	$1,15 \cdot 10^{-11}$	$1,19 \cdot 10^{-11}$	$2,36 \cdot 10^{-12}$
33G11K_2	$1,23 \cdot 10^{-11}$		
33G11K_3	$1,19 \cdot 10^{-11}$		
42G8K_1	$1,22 \cdot 10^{-11}$	$1,10 \cdot 10^{-11}$	$9,18 \cdot 10^{-13}$
42G8K_2	$1,07 \cdot 10^{-11}$		
42G8K_3	$1,00 \cdot 10^{-11}$		
3G1K ₂₁ _1	$8,90 \cdot 10^{-12}$	$8,57 \cdot 10^{-12}$	$2,46 \cdot 10^{-13}$
3G1K ₂₁ _2	$8,50 \cdot 10^{-12}$		
3G1K ₂₁ _3	$8,31 \cdot 10^{-12}$		

Tabela A6. Dados experimentais para reforços híbridos: 22,23 mm – 50% V_f

Ensaio	$K_{zz}(\text{m}^2)$	Média $K_{zz}(\text{m}^2)$	Desvio-Padrão (m^2)
30G20K_1	$4,74 \cdot 10^{-12}$	$5,15 \cdot 10^{-12}$	$4,84 \cdot 10^{-13}$
30G20K_2	$4,88 \cdot 10^{-12}$		
30G20K_3	$5,83 \cdot 10^{-12}$		
45G15K_1	$4,98 \cdot 10^{-12}$	$5,00 \cdot 10^{-12}$	$1,60 \cdot 10^{-13}$
45G15K_2	$4,82 \cdot 10^{-12}$		
45G15K_3	$5,21 \cdot 10^{-12}$		
61G10K_1	$5,00 \cdot 10^{-12}$	$4,25 \cdot 10^{-12}$	$5,28 \cdot 10^{-13}$
61G10K_2	$3,89 \cdot 10^{-12}$		
61G10K_3	$3,87 \cdot 10^{-12}$		
3G1K ₂₉ _1	$4,35 \cdot 10^{-12}$	$4,17 \cdot 10^{-12}$	$1,71 \cdot 10^{-13}$
3G1K ₂₉ _2	$4,22 \cdot 10^{-12}$		
3G1K ₂₉ _3	$3,94 \cdot 10^{-12}$		

Apêndice B – Comparação Axissimétrica x Tridimensional

- **Kevlar**

O segundo caso com Kevlar teve um V_f de 41,56%, permeabilidade de $1,51 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, viscosidade de 0,0615 Pa·s e porosidade de 0,5844; os resultados são apresentados na Tab. B1.

Tabela B1. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Kevlar V_f 41,56%

ΔP (Pa)	$\dot{V}$ Axis (m ³ /s)	$\dot{V}$ 3D (m ³ /s)	D_{num} (%)
9067	$2,64 \cdot 10^{-7}$	$2,41 \cdot 10^{-7}$	9,54
11564	$3,37 \cdot 10^{-7}$	$3,16 \cdot 10^{-7}$	6,65
13914	$4,06 \cdot 10^{-7}$	$3,86 \cdot 10^{-7}$	5,18
16347	$4,77 \cdot 10^{-7}$	$4,59 \cdot 10^{-7}$	3,92
18843	$5,49 \cdot 10^{-7}$	$5,34 \cdot 10^{-7}$	2,81
23739	$6,92 \cdot 10^{-7}$	$6,81 \cdot 10^{-7}$	1,62

Os resultados apresentados na Tab. B1 mostram que a diferença média entre os modelos axissimétrico e tridimensional foi de 4,95%, mais uma vez considerado adequado. Salienta-se ainda que, nesse caso, em todos os ΔP as diferenças foram menores que 10% mas, mais uma vez, na primeira linha o valor foi o de maior discrepância. Salienta-se que há uma grande variação nas escalas das grandezas envolvidas e observou-se que pequenas variações entre essas variáveis ocasionam mudanças significativas no escoamento.

O terceiro conjunto de resultados numéricos é relativo ao ensaio com V_f de 49,88%, K_{zz} de $8,82 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, viscosidade de 0,0595 Pa·s e porosidade de 0,5012, e os resultados podem ser observados na Tab. B2.

Tabela B2. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Kevlar V_f 49,88%

ΔP (Pa)	$\dot{V}$ Axis (m ³ /s)	$\dot{V}$ 3D (m ³ /s)	D _{num} (%)
24129	$4,94 \cdot 10^{-7}$	$4,86 \cdot 10^{-7}$	1,65
29066	$5,95 \cdot 10^{-7}$	$5,90 \cdot 10^{-7}$	0,85
33965	$6,95 \cdot 10^{-7}$	$6,93 \cdot 10^{-7}$	0,29
38942	$7,97 \cdot 10^{-7}$	$7,98 \cdot 10^{-7}$	0,13
43882	$8,98 \cdot 10^{-7}$	$9,02 \cdot 10^{-7}$	0,44
48817	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$1,01 \cdot 10^{-6}$	0,99

Observa-se nos resultados da Tab. B2, que a média das diferenças foi de apenas 0,67%, além disso, em todos os ΔP considerados, as diferenças foram menores que 10% entre os modelos indicando que o modelo axissimétrico, até esse caso, mostrou-se uma alternativa viável e confiável na solução dos problemas estudados. O quarto conjunto de ensaios com a utilização de fibra de kevlar é relativo ao ensaio com V_f de 56,53%, a permeabilidade de $5,98 \cdot 10^{-13}$, m², viscosidade de 0,0621 Pa·s e a porosidade de 0,4347, e os resultados podem ser observados na Tab. B3.

Tabela B3. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Kevlar V_f 56,53%

ΔP (Pa)	$\dot{V}$ Axis (m ³ /s)	$\dot{V}$ 3D (m ³ /s)	D _{num} (%)
29404	$4,51 \cdot 10^{-7}$	$4,47 \cdot 10^{-7}$	$8,95 \cdot 10^{-3}$
34344	$5,27 \cdot 10^{-7}$	$5,25 \cdot 10^{-7}$	$3,81 \cdot 10^{-3}$
39301	$6,03 \cdot 10^{-7}$	$6,06 \cdot 10^{-7}$	$4,95 \cdot 10^{-3}$
44274	$6,79 \cdot 10^{-7}$	$6,82 \cdot 10^{-7}$	$4,40 \cdot 10^{-3}$
49194	$7,55 \cdot 10^{-7}$	$7,59 \cdot 10^{-7}$	$5,27 \cdot 10^{-3}$
54167	$8,31 \cdot 10^{-7}$	$8,37 \cdot 10^{-7}$	$7,17 \cdot 10^{-3}$

Os resultados apresentados na Tab. B3 mostram uma tendência de diminuição das diferenças entre os dois modelos numéricos, a ponto de se observar os valores apenas na terceira casa decimal, sendo que a diferença média foi de 0,0057% e em todos os ΔP a diferença se manteve menor que 1%.

Fica evidente que, nesse caso, os modelos são equivalentes e que o modelo axissimétrico é

viável na solução de problemas de moldagem líquida como os que são objeto deste estudo.

No entanto, para ratificar essa conclusão um quinto conjunto de ensaios com a utilização de fibra de kevlar é utilizado. Nesse, o Vf foi de 63,18%, a permeabilidade de $3,78 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, a viscosidade de 0,0582 Pa·s e porosidade de 0,3682.

A média das diferenças entre os modelos, nesse caso, foi de 6,99%, corroborando com a ideia de que o modelo axissimétrico resolve adequadamente os problemas, se comparado com o modelo tridimensional, os resultados podem ser observados na Tab. B4.

Tabela B4. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Kevlar Vf 63,18%

ΔP (Pa)	$\dot{V}$ Axis (m^3/s)	$\dot{V}$ 3D (m^3/s)	D_{num} (%)
29391	$3,85 \cdot 10^{-7}$	$3,56 \cdot 10^{-7}$	8,15
34335	$4,49 \cdot 10^{-7}$	$4,18 \cdot 10^{-7}$	7,42
39267	$5,14 \cdot 10^{-7}$	$4,80 \cdot 10^{-7}$	7,08
44298	$5,80 \cdot 10^{-7}$	$5,43 \cdot 10^{-7}$	6,81
49284	$6,45 \cdot 10^{-7}$	$6,06 \cdot 10^{-7}$	6,44
59152	$7,74 \cdot 10^{-7}$	$7,30 \cdot 10^{-7}$	6,03

Os resultados apresentados na Tab. B4, apresentam resultados satisfatórios com diferenças abaixo de 10% em todos ΔP , apesar de maiores que os apresentados na Tab. B3, mas ainda sim adequados.

O último conjunto de ensaios com a utilização de fibra de kevlar é relativo ao ensaio com Vf de 69,83%, a permeabilidade de $1,71 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, a viscosidade de 0,0629 Pa·s e a porosidade de 0,3017, e os resultados podem ser observados na Tab. B5.

Tabela B5. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Kevlar Vf 69,83%

ΔP (Pa)	$\dot{V}$ Axis (m ³ /s)	$\dot{V}$ 3D (m ³ /s)	D _{num} (%)
29663	$1,98 \cdot 10^{-7}$	$1,83 \cdot 10^{-7}$	8,20
39572	$2,63 \cdot 10^{-7}$	$2,48 \cdot 10^{-7}$	6,05
49585	$3,30 \cdot 10^{-7}$	$3,10 \cdot 10^{-7}$	6,45
59557	$3,97 \cdot 10^{-7}$	$3,74 \cdot 10^{-7}$	6,15
69528	$4,63 \cdot 10^{-7}$	$4,36 \cdot 10^{-7}$	6,19
79525	$5,29 \cdot 10^{-7}$	$5,00 \cdot 10^{-7}$	5,80

Os resultados mostrados na Tab. B5, apresentam diferenças abaixo dos 10%.

- **Vidro-E**

A seguir, são apresentados os resultados referentes ao segundo ensaio com fibra de vidro-E, nesse o Vf foi de 40,63%, a permeabilidade de $2,75 \cdot 10^{-12}$ m², a viscosidade de 0,0613 Pa·s e a porosidade de 0,5937. Os resultados podem ser observados na Tab. B6.

Tabela B6. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Vidro-E Vf 40,63%

ΔP (Pa)	$\dot{V}$ Axis (m ³ /s)	$\dot{V}$ 3D (m ³ /s)	D _{num} (%)
10351	$5,41 \cdot 10^{-7}$	$5,01 \cdot 10^{-7}$	7,98
15215	$7,95 \cdot 10^{-7}$	$7,62 \cdot 10^{-7}$	4,33
20062	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	2,94
24943	$1,30 \cdot 10^{-6}$	$1,28 \cdot 10^{-6}$	1,56
29840	$1,56 \cdot 10^{-6}$	$1,55 \cdot 10^{-6}$	0,65
34738	$1,81 \cdot 10^{-6}$	$1,81 \cdot 10^{-6}$	0,00

Os resultados apresentados na Tab. B6 mostram uma diferença média de 2,91% entre os modelos numéricos e, assim como nos ensaios com kevlar, as diferenças diminuem à medida que o volume de fibras aumenta.

Em seguida, são apresentados os resultados referentes ao terceiro ensaio com fibra de vidro-E, nesse o Vf foi de 49,30%, a permeabilidade de $1,54 \cdot 10^{-12}$ m², a viscosidade de 0,0608 Pa·s e

porosidade de 0,5070. Os resultados podem ser observados na Tab. B7.

Tabela B7. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Vidro-E V_f 49,30%

ΔP (Pa)	$\dot{V}$ Axis (m ³ /s)	$\dot{V}$ 3D (m ³ /s)	D_{num} (%)
9640	$3,35 \cdot 10^{-7}$	$3,08 \cdot 10^{-7}$	8,77
14483	$5,03 \cdot 10^{-7}$	$4,80 \cdot 10^{-7}$	4,79
19426	$6,74 \cdot 10^{-7}$	$6,57 \cdot 10^{-7}$	2,59
24349	$8,45 \cdot 10^{-7}$	$8,32 \cdot 10^{-7}$	1,56
29248	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$1,01 \cdot 10^{-6}$	0,99
34218	$1,19 \cdot 10^{-6}$	$1,18 \cdot 10^{-6}$	0,85

Os resultados apresentados na Tab. B7 mostram que assim como nos demais casos, as diferenças, entre os modelos numéricos, mantêm-se abaixo de 10% em todos os ΔP e com uma média de diferenças de 3,26%. No entanto, para concluir, definitivamente, a respeito, mais dois conjuntos de dados são simulados. A seguir são apresentados os resultados referentes ao quinto ensaio com fibra de vidro-E, nesse o V_f foi de 64,46%, a permeabilidade de $5,04 \cdot 10^{-13}$ m², a viscosidade de 0,0623 Pa·s e a porosidade de 0,3554. Os resultados podem ser observados na Tab. B8.

Tabela B8. Comparação numérico axissimétrico x tridimensional – Vidro-E V_f 64,46%

ΔP (Pa)	$\dot{V}$ Axis (m ³ /s)	$\dot{V}$ 3D (m ³ /s)	D_{num} (%)
29458	$4,64 \cdot 10^{-7}$	$4,60 \cdot 10^{-7}$	0,87
39402	$6,20 \cdot 10^{-7}$	$6,21 \cdot 10^{-7}$	0,16
49356	$7,77 \cdot 10^{-7}$	$7,82 \cdot 10^{-7}$	0,64
59355	$9,35 \cdot 10^{-7}$	$9,44 \cdot 10^{-7}$	0,95
69352	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$1,11 \cdot 10^{-6}$	1,80
79253	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-6}$	1,57

Os resultados apresentados na Tab. B8, mostram uma excelente concordância entre os modelos, a diferença média foi de 1%, indicando que, nesse caso, os modelos são praticamente equivalentes.

Logo após são apresentados os resultados referentes ao último ensaio com fibra de vidro-E,

nesse o Vf foi de 68,80%, a permeabilidade de $3,41 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, a viscosidade de 0,0586 Pa·s e a porosidade de 0,3120. Os resultados podem ser observados na Tab. B9.

Tabela B9. Comparação numérico axissimétrico x experimental – Vidro-E Vf 68,80%

ΔP (Pa)	$\dot{V}$ Axis (m^3/s)	$\dot{V}$ 3D (m^3/s)	D_{num} (%)
29457	$3,80 \cdot 10^{-7}$	$3,77 \cdot 10^{-7}$	0,80
39426	$5,09 \cdot 10^{-7}$	$5,09 \cdot 10^{-7}$	0,00
49356	$6,37 \cdot 10^{-7}$	$6,41 \cdot 10^{-7}$	0,62
69262	$8,94 \cdot 10^{-7}$	$9,05 \cdot 10^{-7}$	1,22
79280	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	1,92
89249	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$1,17 \cdot 10^{-6}$	1,71

Os resultados da Tab. B9, indicam uma diferença menor que 2% em todos os ΔP e uma média de diferenças de 1,04% foi encontrada, ratificando que o modelo axissimétrico é adequado para reproduzir os experimentos e até recomendado, pois como já citado, tem um custo computacional menor o que proporciona uma redução de 48 vezes no tempo de processamento.

Apêndice C – Equações de Ajuste da Permeabilidade nos Ensaio Híbridos

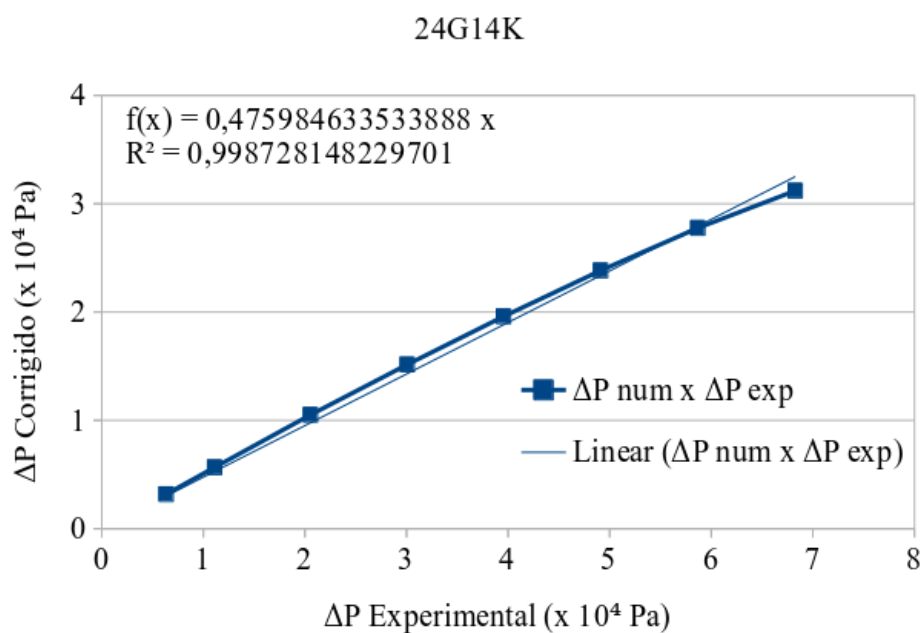


Figura C1. Relação ΔP Numérico x ΔP Experimental – 24G14K

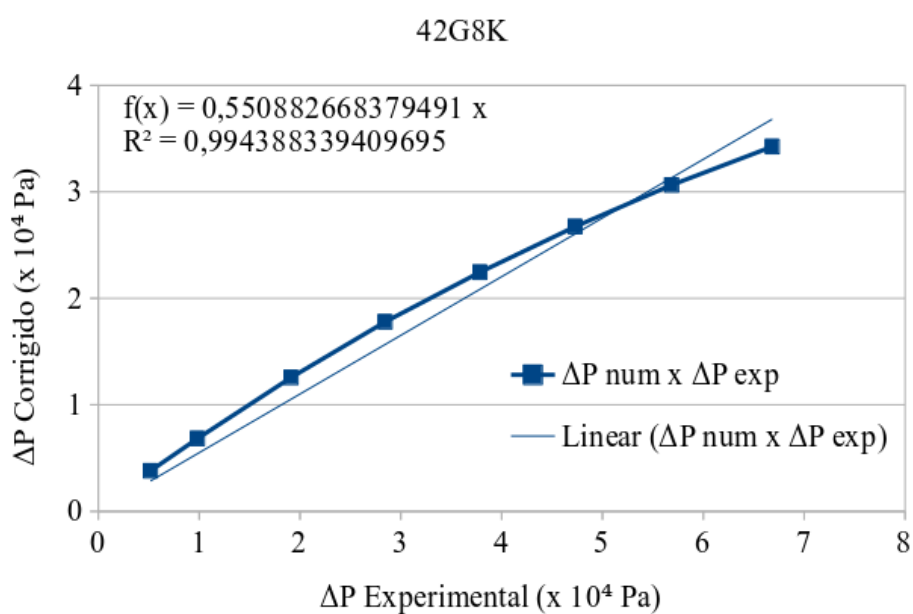


Figura C2. Relação ΔP Numérico x ΔP Experimental – 42G8K

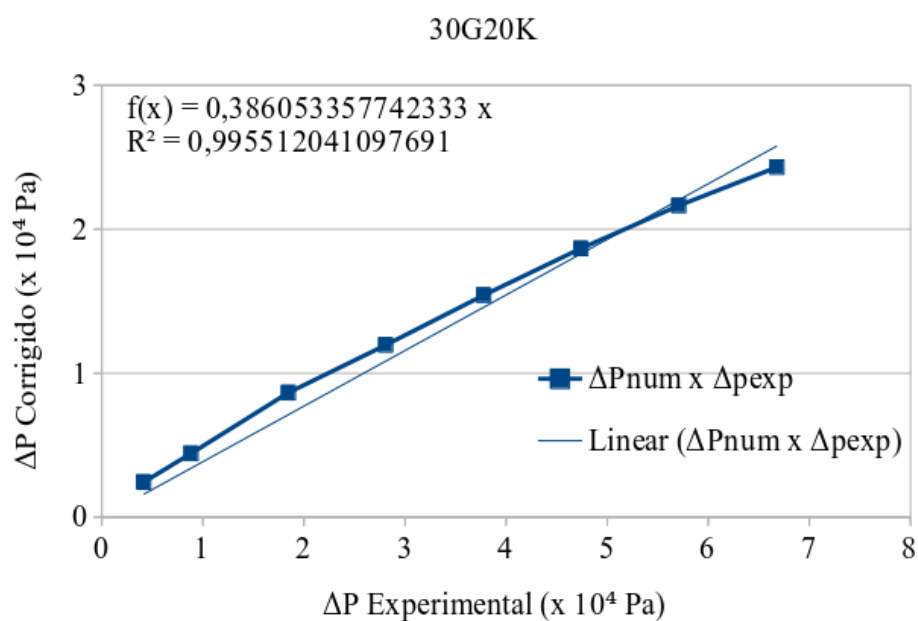


Figura C3. Relação ΔP Numérico x ΔP Experimental – 30G20K

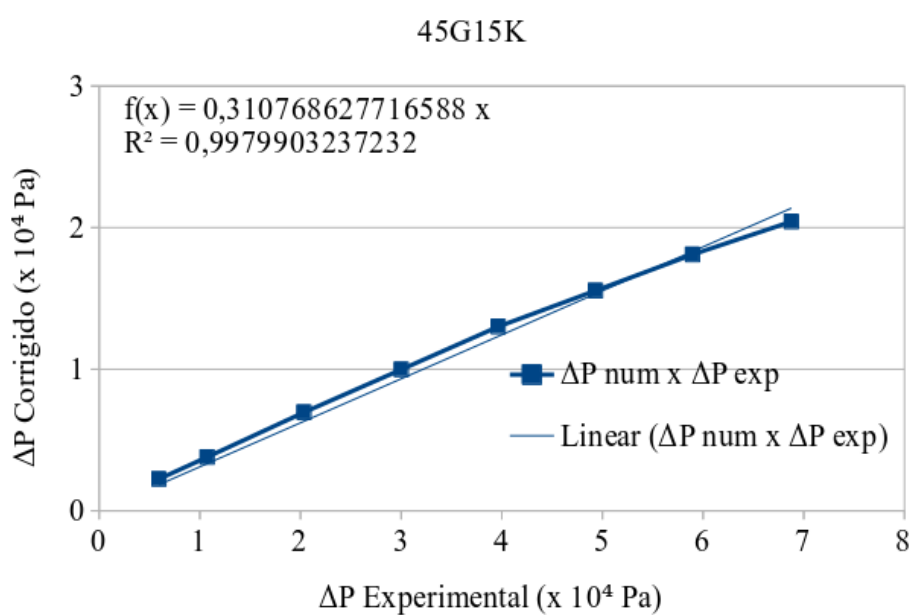


Figura C4. Relação ΔP Numérico x ΔP Experimental – 45G15K

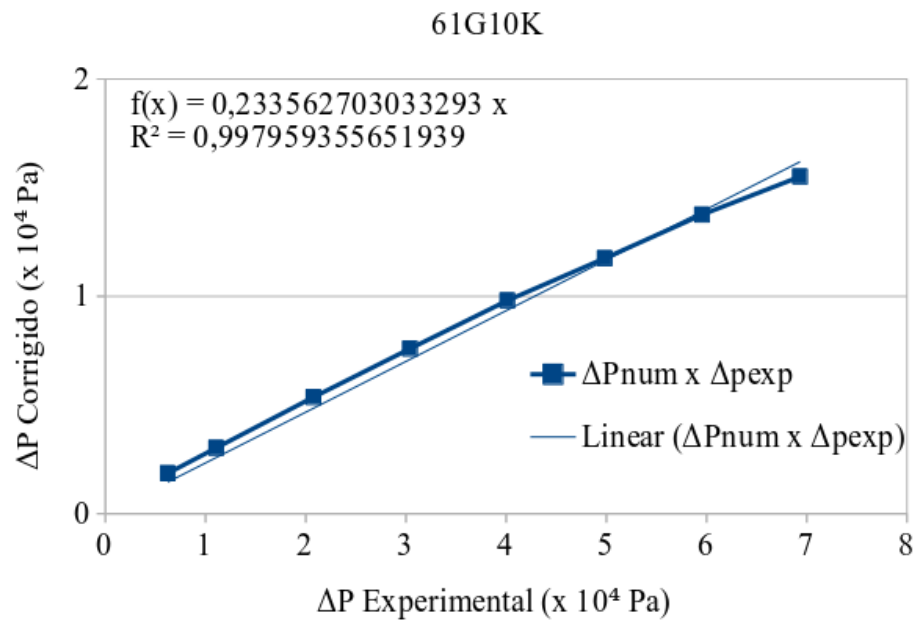


Figura C5. Relação ΔP Numérico x ΔP Experimental – 61G10K

Apêndice D – Resultados Numéricos

Tabela D1. Resultados dos ensaios homogêneos de kevlar - V_f de 36%

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$3,50 \cdot 10^{-7}$	6097,80	3630,42	40,46
$7,56 \cdot 10^{-7}$	10773,48	5320,46	50,62
$1,53 \cdot 10^{-6}$	20134,00	8551,10	57,53
$2,32 \cdot 10^{-6}$	29508,65	11834,92	59,89
$3,03 \cdot 10^{-6}$	38908,87	14793,41	61,98
$3,70 \cdot 10^{-6}$	48339,14	17586,68	63,62
$4,34 \cdot 10^{-6}$	58042,51	20228,10	65,15
$4,96 \cdot 10^{-6}$	67988,81	22824,55	66,43

Tabela D2. Resultados numéricos para o processo iterativo kevlar V_f de 36%

ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	K_{zz} Numérico (m ²)
6097,80	6099,10	$4,08 \cdot 10^{-12}$
10773,48	10773,40	$4,02 \cdot 10^{-12}$
20134,00	20133,98	$3,89 \cdot 10^{-12}$
29508,65	29508,49	$3,87 \cdot 10^{-12}$
38908,87	38909,80	$3,76 \cdot 10^{-12}$
48339,14	48344,65	$3,65 \cdot 10^{-12}$
58042,51	58064,89	$3,53 \cdot 10^{-12}$
67988,81	67987,08	$3,42 \cdot 10^{-12}$

Tabela D3. Resultados numéricos dos ensaios homogêneos de kevlar – V_f de 36%
Permeabilidade corrigida

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$3,50 \cdot 10^{-7}$	6097,80	6444,82	5,69
$7,56 \cdot 10^{-7}$	10773,48	11396,53	5,78
$1,53 \cdot 10^{-6}$	20134,00	20861,65	3,61
$2,32 \cdot 10^{-6}$	29508,65	30481,86	3,30
$3,03 \cdot 10^{-6}$	38908,87	39148,20	0,62
$3,70 \cdot 10^{-6}$	48339,14	47329,79	2,09
$4,34 \cdot 10^{-6}$	58042,51	55065,86	5,13
$4,96 \cdot 10^{-6}$	67988,81	62669,49	7,82

Tabela D4. Resultados numéricos dos ensaios homogêneos de vidro-E - V_f de 50%

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$1,81 \cdot 10^{-7}$	5358,17	3351,67	37,45
$3,60 \cdot 10^{-7}$	9955,98	4525,05	54,55
$7,18 \cdot 10^{-7}$	19238,13	6856,71	64,36
$1,08 \cdot 10^{-6}$	28642,03	9205,77	67,86
$1,43 \cdot 10^{-6}$	38073,42	11540,49	69,69
$1,79 \cdot 10^{-6}$	47867,04	13842,79	71,08
$2,14 \cdot 10^{-6}$	58150,78	16143,94	72,24
$2,48 \cdot 10^{-6}$	67607,82	18391,92	72,80

Tabela D5. Resultados numéricos do processo iterativo vidro-E V_f de 50%

ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	K_{zz} Numérico (m ²)
5358,17	5358,25	$2,33 \cdot 10^{-12}$
9955,98	9961,77	$1,89 \cdot 10^{-12}$
19238,13	19240,99	$1,71 \cdot 10^{-12}$
28642,03	28650,51	$1,65 \cdot 10^{-12}$
38073,42	38092,22	$1,62 \cdot 10^{-12}$
47867,04	47871,14	$1,58 \cdot 10^{-12}$
58150,78	58201,09	$1,55 \cdot 10^{-12}$
67607,82	67603,95	$1,53 \cdot 10^{-12}$

Tabela D6. Resultados numéricos dos ensaios homogêneos de vidro-E – V_f de 50%

Permeabilidade corrigida

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$1,81 \cdot 10^{-7}$	5358,17	6484,81	21,03
$3,60 \cdot 10^{-7}$	9955,98	10775,10	8,23
$7,18 \cdot 10^{-7}$	19238,13	19300,45	0,32
$1,08 \cdot 10^{-6}$	28642,03	27889,21	2,63
$1,43 \cdot 10^{-6}$	38073,42	36425,36	4,33
$1,79 \cdot 10^{-6}$	47867,04	44842,80	6,32
$2,14 \cdot 10^{-6}$	58150,78	53255,83	8,42
$2,48 \cdot 10^{-6}$	67607,82	61474,25	9,07

Tabela D7. Resultados numéricos dos ensaios homogêneos de vidro-E - V_f de 36%

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$5,81 \cdot 10^{-7}$	5251,73	4829,27	8,04
$1,07 \cdot 10^{-6}$	9840,78	7079,15	28,06
$1,90 \cdot 10^{-6}$	19110,25	10875,55	43,09
$2,59 \cdot 10^{-6}$	28492,04	14029,98	50,76
$3,24 \cdot 10^{-6}$	37924,58	16999,94	55,17
$3,81 \cdot 10^{-6}$	48101,45	19613,29	59,23
$4,37 \cdot 10^{-6}$	57811,37	22184,06	61,63
$4,81 \cdot 10^{-6}$	67259,27	24198,34	64,02

Tabela D8. Resultados numéricos do processo iterativo vidro-E V_f de 36%

ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	K_{zz} Numérico (m ²)
5251,73	5252,32	$1,03 \cdot 10^{-11}$
9840,78	9842,23	$7,49 \cdot 10^{-12}$
19110,25	19113,44	$5,94 \cdot 10^{-12}$
28492,04	28492,36	$5,17 \cdot 10^{-12}$
37924,58	37926,37	$4,74 \cdot 10^{-12}$
48101,45	48099,90	$4,32 \cdot 10^{-12}$
57811,37	57811,36	$4,08 \cdot 10^{-12}$
67259,27	67274,40	$3,83 \cdot 10^{-12}$

Tabela D9. Resultados numéricos dos ensaios homogêneos de vidro-E – V_f de 36%
Permeabilidade corrigida

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$5,81 \cdot 10^{-7}$	5251,73	7502,55	42,86
$1,07 \cdot 10^{-6}$	9840,78	12015,94	22,10
$1,90 \cdot 10^{-6}$	19110,25	19631,41	2,73
$2,59 \cdot 10^{-6}$	28492,04	25958,82	8,89
$3,24 \cdot 10^{-6}$	37924,58	31915,91	15,84
$3,81 \cdot 10^{-6}$	48101,45	37157,39	22,75
$4,37 \cdot 10^{-6}$	57811,37	42313,25	26,81
$4,81 \cdot 10^{-6}$	67259,27	46352,81	31,08

Tabela D10. Resultados numéricos para o ensaio 24G14K

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$2,23 \cdot 10^{-7}$	6341,40	3187,82	49,73
$4,79 \cdot 10^{-7}$	11111,62	5666,56	49,00
$9,79 \cdot 10^{-7}$	20545,60	10513,45	48,83
$1,46 \cdot 10^{-6}$	30070,02	15153,48	49,61
$1,91 \cdot 10^{-6}$	39554,48	19593,73	50,46
$2,35 \cdot 10^{-6}$	49112,35	23833,29	51,47
$2,75 \cdot 10^{-6}$	58680,02	27759,26	52,69
$3,10 \cdot 10^{-6}$	68270,69	31202,33	54,30

Tabela D11. Resultados numéricos do ensaio 24G14K com a permeabilidade corrigida

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$2,23 \cdot 10^{-7}$	6341,40	5544,38	12,57
$4,79 \cdot 10^{-7}$	11111,62	10735,03	3,38
$9,79 \cdot 10^{-7}$	20545,60	20887,49	1,66
$1,46 \cdot 10^{-6}$	30070,02	30606,70	1,78
$1,91 \cdot 10^{-6}$	39554,48	39905,87	0,89
$2,35 \cdot 10^{-6}$	49112,35	48785,25	0,67
$2,75 \cdot 10^{-6}$	58680,02	57007,40	2,85
$3,10 \cdot 10^{-6}$	68270,69	64218,33	5,94

Tabela D12. Resultados numéricos do ensaio 42G8K

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$3,55 \cdot 10^{-7}$	5169,84	3802,19	26,45
$7,43 \cdot 10^{-7}$	9833,48	6834,35	30,50
$1,48 \cdot 10^{-6}$	19115,24	12565,91	34,26
$2,14 \cdot 10^{-6}$	28244,07	17791,52	37,45
$2,73 \cdot 10^{-6}$	37850,90	22451,18	40,69
$3,27 \cdot 10^{-6}$	47294,87	26734,99	43,47
$3,76 \cdot 10^{-6}$	56860,57	30644,55	46,11
$4,21 \cdot 10^{-6}$	66841,80	34244,21	48,77

Tabela D13. Resultados numéricos do ensaio 42G8K com a permeabilidade corrigida

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$3,55 \cdot 10^{-7}$	5169,84	6055,11	17,12
$7,43 \cdot 10^{-7}$	9833,48	11556,66	17,52
$1,48 \cdot 10^{-6}$	19115,24	21954,53	14,85
$2,14 \cdot 10^{-6}$	28244,07	31435,39	10,52
$2,73 \cdot 10^{-6}$	37850,90	39888,70	5,38
$3,27 \cdot 10^{-6}$	47294,87	47660,42	0,77
$3,76 \cdot 10^{-6}$	56860,57	54752,68	3,71
$4,21 \cdot 10^{-6}$	66841,80	61282,93	8,32

Tabela D14. Resultados numéricos do ensaio 30G20K

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$1,32 \cdot 10^{-7}$	4141,72	2438,06	41,13
$3,18 \cdot 10^{-7}$	8832,09	4432,00	49,82
$7,14 \cdot 10^{-7}$	18462,85	8652,51	53,14
$1,02 \cdot 10^{-6}$	28092,06	11959,00	57,43
$1,35 \cdot 10^{-6}$	37781,42	15419,93	59,19
$1,65 \cdot 10^{-6}$	47393,76	18667,19	60,61
$1,93 \cdot 10^{-6}$	57086,99	21643,05	62,09
$2,18 \cdot 10^{-6}$	66790,65	24310,64	63,60

Tabela D15. Resultados numéricos do ensaio 30G20K com a permeabilidade corrigida

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$1,32 \cdot 10^{-7}$	4141,72	4658,73	12,48
$3,18 \cdot 10^{-7}$	8832,09	9810,35	11,08
$7,14 \cdot 10^{-7}$	18462,85	20713,91	12,19
$1,02 \cdot 10^{-6}$	28092,06	29255,17	4,14
$1,35 \cdot 10^{-6}$	37781,42	38199,93	1,11
$1,65 \cdot 10^{-6}$	47393,76	46586,95	1,70
$1,93 \cdot 10^{-6}$	57086,99	54272,87	4,93
$2,18 \cdot 10^{-6}$	66790,65	61164,50	8,42

Tabela D16. Resultados numéricos do ensaio 45G15K

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$1,27 \cdot 10^{-7}$	5935,12	2244,44	62,18
$2,91 \cdot 10^{-7}$	10737,53	3799,37	64,62
$6,23 \cdot 10^{-7}$	20357,14	6958,84	65,82
$9,41 \cdot 10^{-7}$	30023,48	9980,25	66,76
$1,26 \cdot 10^{-6}$	39647,99	13006,48	67,20
$1,52 \cdot 10^{-6}$	49320,47	15551,70	68,47
$1,79 \cdot 10^{-6}$	58947,84	18100,97	69,29
$2,03 \cdot 10^{-6}$	68775,54	20426,71	70,30

Tabela D17. Resultados numéricos do ensaio 45G15K com a permeabilidade corrigida

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$1,27 \cdot 10^{-7}$	5935,12	4919,78	17,11
$2,91 \cdot 10^{-7}$	10737,53	9918,46	7,63
$6,23 \cdot 10^{-7}$	20357,14	20067,62	1,42
$9,41 \cdot 10^{-7}$	30023,48	29277,20	0,82
$1,26 \cdot 10^{-6}$	39647,99	39496,46	0,38
$1,52 \cdot 10^{-6}$	49320,47	47678,01	3,33
$1,79 \cdot 10^{-6}$	58947,84	55867,30	5,23
$2,03 \cdot 10^{-6}$	68775,54	63341,38	7,90

Tabela D18. Resultados numéricos do ensaio 61G10K

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$9,99 \cdot 10^{-8}$	6232,78	1858,99	70,17
$2,41 \cdot 10^{-7}$	11064,43	3028,02	72,63
$5,24 \cdot 10^{-7}$	20768,76	5363,76	74,17
$7,94 \cdot 10^{-7}$	30414,83	7596,13	75,02
$1,06 \cdot 10^{-6}$	40130,26	9811,73	75,55
$1,30 \cdot 10^{-6}$	49843,95	11751,82	76,42
$1,54 \cdot 10^{-6}$	59541,85	13758,70	76,89
$1,75 \cdot 10^{-6}$	69334,67	15511,29	77,63

Tabela D19. Resultados numéricos do ensaio 61G10K com a permeabilidade corrigida

$\dot{V}$ (m ³ /s)	ΔP Experimental (Pa)	ΔP Numérico (Pa)	Diferença (%)
$9,99 \cdot 10^{-8}$	6232,78	4557,43	26,88
$2,41 \cdot 10^{-7}$	11064,43	9555,35	13,64
$5,24 \cdot 10^{-7}$	20768,76	19539,02	5,92
$7,94 \cdot 10^{-7}$	30414,83	29090,79	4,35
$1,06 \cdot 10^{-6}$	40130,26	38562,55	3,91
$1,30 \cdot 10^{-6}$	49843,95	46861,23	5,98
$1,54 \cdot 10^{-6}$	59541,85	55438,08	6,89
$1,75 \cdot 10^{-6}$	69334,67	62926,38	9,24

Apêndice E – Tutorial

Nesse apêndice, apresenta-se um breve resumo de como se iniciar um caso no OpenFOAM, desde a importação da malha até a obtenção da solução. Inicialmente é necessário importar a malha gerada pelo Gmsh e já salva em formato *msh*. Para tanto deve-se digitar no terminal o comando: *gmshToFoam grid/nome_arquivo.msh*.

O próximo passo é editar o arquivo */constant/polyMesh/boundary*. Nesse arquivo deve ser indicada a condição de contorno *wedge* para o caso axissimétrico ou *symmetry* para o caso tridimensional, conforme pode ser visto na Fig. E1:

```

4
(
  simWall
  {
    type          symmetry;
    physicalType  symmetry;
    nFaces        2652;
    startFace     325291;
  }
  outlet
  {
    type          patch;
    physicalType  patch;
    nFaces        7;
    startFace     327943;
  }
  inlet
  {
    type          patch;
    physicalType  patch;
    nFaces        7;
    startFace     327950;
  }
  defaultFaces
  {
    type          patch;
    nFaces        14824;
    startFace     327957;
  }
)

```

Figura E1. Condições de contorno arquivo *boundary*

Ainda dentro da pasta *constant* o usuário deve editar o arquivo *transportProperties*. Nesse arquivo são colocados os dados referentes aos fluidos, no caso dos problemas estudados: ar e resina. As propriedades do ar não precisam ser alteradas, no entanto a do óleo sim, pois a viscosidade dele depende da temperatura ambiente e o valor da viscosidade cinemática, constante *nu* que aparece no arquivo, é resultado do quociente entre viscosidade dinâmica e a massa específica. Na Fig. E2 pode-se observar um exemplo em que a viscosidade do óleo era de 0,0622809 [Pa.s] e a massa específica de 891 [kg/m³]:

```

phases (resin air);

resin
{
    transportModel    Newtonian;
    nu                nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 6.99e-05;
    rho                rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 891.;
}

air
{
    transportModel    Newtonian;
    nu                nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1.48e-05;
    rho                rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1.23;
}

sigma                sigma [ 1 0 -2 0 0 0 0 ] 0.07;

```

Figura E2. Condições de contorno arquivo transportProperties

Na sequência, para configurar corretamente o caso a ser simulado deve-se ficar atento às condições de contorno dos arquivos *alpha.resin*, *p_rgh* e *U* da pasta 0. Para esse estudo utilizou-se as condições descritas a seguir. No arquivo *p_rgh* é inserida as condições de contorno relativas à pressão que será utilizada. As condições devem estar como descrito na Fig. E3a, para o caso da pressão de injeção ser constante ou conforme Fig E3b. É possível considerar a variação real da pressão lida no transdutor de pressão na entrada do molde. Neste caso é considerado o efeito de variação de pressão no início do escoamento, por esse motivo o arquivo *pressureTable*, com um tabela de pressão em função do tempo, deve ser inserido no diretório raiz do caso a ser simulado e as condições de contorno devem estar de acordo com o que segue na Fig. E3b:

```

dimensions          [1 -1 -2 0 0 0 0];
internalField        uniform 0;
boundaryField
{
    inlet
    {
        type          totalPressure;
        p0             uniform 4330;
    }
    outlet
    {
        type          totalPressure;
        p0             uniform 0;
    }
    simWall
    {
        type          symmetry;
    }
    defaultFaces
    {
        type          zeroGradient;
    }
}

```

(a)

```

inlet
{
    type          uniformFixedValue;
    uniformValue
    {
        type          tableFile;
        file           "../pressureTable";
    }
}
outlet
{
    type          totalPressure;
    p0            uniform 0;
    U             uniform 0;
    phi           none;
    rho           none;
    psi           none;
    gamma         1;
    value         uniform 0;
}
wall
{
    type          fixedFluxPressure;
}
wedge0
{
    type          wedge;
}
wedge1
{
    type          wedge;
}

```

(b)

Figura E3. Condições de contorno arquivo *p_rgh*: a) Pressão constante, b) Variação de Pressão

Destaca-se que, na Fig. E3(a), o caso estudado era tridimensional por isso a condição *symmetry*, enquanto que o da Fig. E3(b) era axissimétrico, por isso a condição *wedge*.

Finalmente no arquivo *U* as condições de contorno podem ser vistas na Fig. E4:

```

dimensions      [0 1 -1 0 0 0];
internalField    uniform (0 0 0);
boundaryField
{
    defaultFaces
    {
        type      noSlip;
    }
    simWall
    {
        type      symmetry;
    }
    outlet
    {
        type      zeroGradient;
    }
    inlet
    {
        type      pressureInletVelocity;
        value      uniform (0 0 0);
    }
}

```

Figura E4. Condições de contorno arquivo *U*

Para o arquivo *alpha.resin* pode-se observar as condições de contorno na Fig. E5:

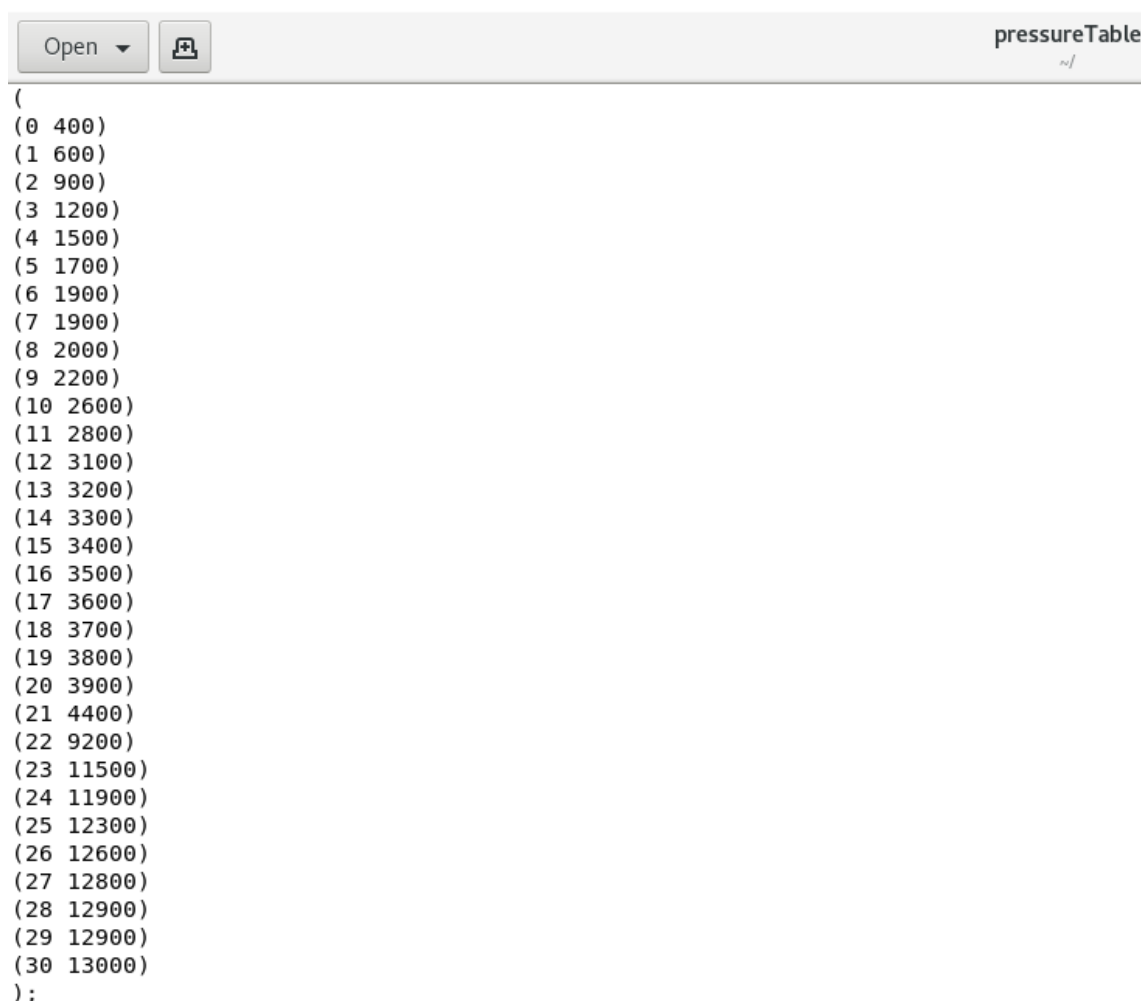
```

dimensions      [0 0 0 0 0 0];
internalField    uniform 0;
boundaryField
{
    defaultFaces
    {
        type      zeroGradient;
    }
    simWall
    {
        type      symmetry;
    }
    outlet
    {
        type      zeroGradient;
    }
    inlet
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform 1;
    }
}

```

Figura E5. Condições de contorno arquivo *alpha.resin*

Um exemplo do arquivo *pressureTable.txt* pode ser visto na Fig. E6.



```
{
(0 400)
(1 600)
(2 900)
(3 1200)
(4 1500)
(5 1700)
(6 1900)
(7 1900)
(8 2000)
(9 2200)
(10 2600)
(11 2800)
(12 3100)
(13 3200)
(14 3300)
(15 3400)
(16 3500)
(17 3600)
(18 3700)
(19 3800)
(20 3900)
(21 4400)
(22 9200)
(23 11500)
(24 11900)
(25 12300)
(26 12600)
(27 12800)
(28 12900)
(29 12900)
(30 13000)
};
```

Figura E6. Exemplo do arquivo *pressureTable.txt*

Após configurar todas as condições iniciais da pasta *0*, deve-se configurar os arquivos da pasta *system*, iniciando pelo arquivo *controlDict*. Esse arquivo é o responsável pelo monitoramento da simulação e nele o usuário deve estar atento ao tempo do passo de integração, o tempo que deseja que os dados sejam salvos e o formato que deseja trabalhar. No estudo apresentado, sugere-se que o formato seja *binary* e o *writePrecision* igual a 12.

No arquivo *fvOptions* duas informações são cruciais, a primeira refere-se a declaração da porosidade do reforço fibroso e a segunda refere-se ao campo relativo ao item *DarcyForchheimerCoeffs*. Nesse campo deve-se preencher com o valor obtido pelo quociente entre a porosidade e a permeabilidade e um exemplo pode ser observado na Fig. E7:

```

porosity
{
    type            explicitPorositySource;
    active          yes;
    explicitPorositySourceCoeffs
    {
        type        DarcyForchheimer;
        porosity 0.65;
        printCoeffs yes;
        muName mu;
        selectionMode cellZone;
        cellZone Internal;
        DarcyForchheimerCoeffs
        {
            d d [0 -2 0 0 0 0] (1.17e9 3.11e11 1.17e9);
            f f [0 -1 0 0 0 0] (0 0 0);
            porosity 0.65;
            coordinateSystem
            {
                type cartesian;
                origin (0 0 0);
                coordinateRotation
                {
                    type axesRotation;
                    e1 (1 0 0);
                    e2 (0 1 0);
                }
            }
        }
    }
}

```

Figura E7. Condições do arquivo *fvOptions*

Nota-se que, no campo que se preenche o valor relativo ao quociente entre a porosidade e a permeabilidade, há três componentes, cada uma delas relativa a um dos eixos coordenados (x,y,z).

A definição das funções de interpolação também merecem um destaque especial. No arquivo *fvSchemes*, para os problemas estudados, no item *divSchemes* que é o esquema de discretização do termo divergente foram utilizadas algumas variações do método de Gauss para cada um dos termos, conforme pode ser visto na Fig. E8:

```

divSchemes
{
    //default Gauss upwind;
    div(rhoPhi,U) Gauss linearUpwind grad(U);
    div(phi,alpha) Gauss vanLeer;
    div(phiRb,alpha) Gauss interfaceCompression;
    div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U))))) Gauss linear;
}

```

Figura E8. Esquema de interpolação do termo divergente

O item *ddtSchemes*, para problemas de moldagem líquida, deve ser programado com o método de Euler, podendo ser utilizado tanto o método de primeira ordem, como o de segunda ordem. Já o item *gradSchemes* é destinado ao esquema de discretização dos gradientes e existem, segundo os manuais, três opções: Gauss, leastSquare e fourth. Nesse estudo foi utilizado o método de Gauss que é de segunda ordem. Para esse método duas opções de interpolação são possíveis: *linear* (utilizada nesta pesquisa) e *upwind*.

A discretização do Laplaciano, no item *laplacianSchemes*, foi realizada através de Gauss linear e no item *interpolationSchemes* utilizou-se a opção *default linear*. Já no item

snGradSchemes, que é utilizado para discretizar os gradientes normais da superfície, existem opções básicas, que são: *corrected* que faz a correção explícita de não-ortogonalidade da malha, *uncorrected* que não faz a correção e *limited* que realiza a correção não-ortogonal a partir de um valor definido como parâmetro. Nesse estudo utilizou-se a opção *corrected*.

Finalmente no item *fluxRequired* são definidas as variáveis que são acopladas com o cálculo do escoamento, sendo elas: *p_rgh*, *pcorr* e *alpha.resin*. De uma forma simplificada, pode-se dizer que o arquivo *fvSchemes* é responsável por toda a informação a respeito das funções de interpolação.

Outro arquivo muito importante dentro da pasta *system* é o *fvSolution*. Nele se escolhe os métodos para resolver o sistema de equações lineares que descrevem o problema, bem como as suas tolerâncias, que podem ser definidas nesse arquivo. Nos problemas estudados foi utilizado o método PIMPLE, como citado anteriormente, esse algoritmo é uma combinação do SIMPLE e do PISO. Com ele se resolve o problema de acoplamento pressão-velocidade.

Finalmente, o arquivo *setFields* é utilizado para se definir variáveis iniciais em uma determinada região do domínio computacional. No presente estudo, nas simulações saturadas, onde elas já iniciam com o molde completamente cheio de resina, é necessário especificar o valor 1 (um) para a variável *alpha.resin* em todas as células (volumes) do domínio computacional. Desta forma, e exemplificado na Fig. E9, informam-se as dimensões de um volume, maior do que todo o domínio computacional, no qual para todas as células encontradas dentro deste volume será especificado o valor 1 à variável *alpha.resin*.

```
defaultFieldValues
(
    volScalarFieldValue alpha.resin 0
    // volVectorFieldValue U (0 0 0)
);

regions
(
    boxToCell
    {
        box (0 0 -0.04) (0.2 0.2 0.1203);
        fieldValues
        (
            volScalarFieldValue alpha.resin 1
        );
    }
);
```

Figura E9. Configuração arquivo *setFields*

Após toda a configuração dos arquivos citados anteriormente, o usuário pode dar início à simulação, basta digitar no terminal o comando *interFoam* e a simulação irá iniciar com a utilização de apenas um processador. No entanto, é possível escolher o processamento paralelo, com a utilização de dois ou mais processadores e as instruções desse procedimento são encontradas facilmente nos tutoriais do OpenFOAM.