

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

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE INFUSÃO DE RESINA EM LAMINADOS
ESPessos UTILIZANDO MALHA DE FLUXO

por

Carla Machado Bulsing Dutra

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Modelagem Computacional

Rio Grande, março, 2019.

CARLA MACHADO BULSING DUTRA

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE INFUSÃO DE RESINA EM LAMINADOS
ESPessos UTILIZANDO MALHA DE FLUXO

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Avila Souza

Coorientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico

Rio Grande, março, 2019.

Carla Machado Bulsing Dutra

“Avaliação numérica do processo de infusão de resina em laminados espessos utilizando malha de fluxo ”

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

Aprovada em

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jeferson Avila Souza
Orientador – FURG



Prof. Dr. Sandro Campos Amico
Coorientador – UFRGS



Prof. Dr. Lierco André Isoldi
FURG



Prof. Dr. Ivoni Carlos Acunha Jr.
IFRS



Prof. Dr. Luiz Claudio Pardini
IAE

Rio Grande - RS
2019

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus pelas bênçãos recebidas, pela força nos momentos mais difíceis e por permitir vencer e concluir mais essa fase na minha vida.

Aos meus familiares, por todo esforço, suporte, confiança e dedicação durante todo esse tempo de estudo. Meu eterno agradecimento, sem vocês esta conquista não seria possível!

Agradeço meu orientador, Prof. Jeferson, pela confiança e apoio para o desenvolvimento deste trabalho. Pela compreensão, amizade e por todo o conhecimento compartilhado.

Ao meu coorientador, Prof. Sandro, por todo o apoio e pela troca de conhecimento durante a pesquisa.

Gostaria de agradecer aos membros da banca, Profs. Ivoni, Liércio e Luiz, pelas contribuições e sugestões alusivas ao trabalho.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande (FURG), ao Programa de Pós- Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Laboratório de Materiais Poliméricos (LaPol), pela oportunidade, contribuição e pela estrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa. Também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Aos colegas de laboratório, especialmente, ao Cristiano e a Gerusa, que foram pessoas muito especiais e estiveram comigo durante todo o período do mestrado.

RESUMO

O presente trabalho é dedicado a estudar numericamente problemas envolvendo o processo de Infusão de Resina Líquida (LRI) em compósitos espessos nos quais um tecido de alta permeabilidade (malha de fluxo) é adicionado na superfície superior da pré-forma para facilitar o escoamento da resina dentro do molde. Nesta técnica, utiliza-se de fibras (naturais ou sintéticas) para a aquisição de compósitos poliméricos que podem ser aplicados em diversos ramos das indústrias e da engenharia. Nesse sentido, há um grande interesse em aprimorar esta técnica para obter um produto final com propriedades físicas e mecânicas que atendam às exigências do mercado atual, além de possibilitar que os custos de fabricação sejam minimizados. Esse estudo tem por objetivo analisar o escoamento da resina dentro do molde e avaliar o comprimento da geometria, a partir do comprimento da malha de fluxo, da relação entre as permeabilidades K_{xx}/K_{zz} e da espessura do laminado. Dessa forma, foram investigadas cinco relações de K_{xx}/K_{zz} , sendo elas, 0,1, 1, 10, 100 e 1000. Já as espessuras do meio poroso analisadas foram de 0,012 m, 0,0094 m, 0,0069 m, 0,0043 m e 0,0027 m. Para avaliar o comprimento da geometria, o escoamento da resina foi monitorado em dois pontos: próximo as superfícies superior e inferior do molde, e considerou-se que a linha de frente de escoamento estava paralela à saída do molde quando a diferença entre as posições sobre as linhas de monitoramento fosse menor ou igual a 0,00151 m. As simulações numéricas foram realizadas no software livre OpenFOAM e a criação da geometria (2D) e da malha no software GMSH. A formulação de volumes finitos do OpenFOAM foi utilizada para a discretização das equações de transporte que descrevem o escoamento de resina dentro do molde e o tratamento da interface entre os dois fluidos (resina/ar) é resolvido pelo Método *Volume of Fluid* (VOF). Os resultados e a metodologia proposta para a avaliação da geometria demonstraram-se satisfatórias e foi possível obter a posição $x(t)$ na qual formou-se a linha de frente de escoamento paralela à saída do molde em quase todos os casos simulados. Uma análise entre a posição $x(t)$ e o comprimento da malha de fluxo também foi realizada. Por meio dos resultados apresentados, pode-se encontrar uma maneira de generalizar o estudo, e assim, obter o comprimento ideal da malha de fluxo para qualquer comprimento de molde, possibilitando que a linha de frente de escoamento da resina esteja vertical antes do final da pré-forma. Os resultados obtidos proporcionarão facilitar o processo de moldagem experimental por essa técnica, visto que é possível prever o comprimento ideal da malha de fluxo para que a resina preencha o molde em um menor tempo possível.

Palavras-chaves: LRI; malha de fluxo; simulação numérica; dados experimentais; OpenFOAM.

ABSTRACT

The present work is dedicated to numerically studying problems involving the Liquid Resin Infusion (LRI) process in thick composites in which a high permeability (flux mesh) fabric is added to the upper surface of the preform to facilitate resin flow inside the mold. This technique uses fibers (natural or synthetic) for the acquisition of polymer composites that can be applied in various branches of industry and engineering. In this sense, there is a great interest in improving this technique to obtain a final product with physical and mechanical properties that meet the demands of the current market, in addition to allowing manufacturing costs to be minimized. This study aims to analyze the flow of the resin inside the mold and to evaluate the length of the geometry, from the length of the flux mesh, of the relationship between the permeabilities K_{xx}/K_{zz} and the thickness of the laminate. In this way, five K_{xx}/K_{zz} ratios were investigated, being 0.1, 1, 10, 100 and 1000. The thicknesses of the porous material analyzed were 0.012 m, 0.0094 m, 0.0069 m, 0.0043 m and 0.0027 m. To evaluate the length of the geometry, resin flow was monitored at two points: near the top and bottom surface of the mold, and was considered that front line was parallel to the mold outlet when the difference between positions on the monitoring lines lower or equal to 0.00151 m. Numerical simulations were performed in OpenFOAM free software and the creation of geometry (2D) and mesh in GMSH. The finite volume formulation of OpenFOAM was used for the discretization of the transport equations describing the resin flow inside the mold and the treatment of the interface between the two fluids (resin/air) is solved by the Volume of Fluid (VOF) method. The results and proposed methodology for evaluate the length of the geometry proved to be satisfactory and it was possible to obtain the position $x(t)$ in which the flow front line parallel to the mold outlet was formed in almost all simulated cases. An analysis between the position $x(t)$ and the length of the flow mesh was also performed. Through the presented results, one can find a way to generalize the study, and thus, to obtain the ideal length of the flow mesh for any length of mold, allowing that the front line of flow of the resin is vertical before the end of the preform. The results obtained will facilitate the experimental molding process by this technique since it is possible to predict the ideal length of the flow mesh so that the resin fills the mold in a shortest possible time.

Keywords: LRI; flow mesh; numerical simulation; experimental data; OpenFOAM.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Motivação	18
1.2. Objetivos	18
1.2.1. Objetivos Específicos	18
1.3. Descrição dos capítulos	19
2. REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1. Materiais Compósitos	20
2.2. Alguns processos de fabricação de compósitos	22
2.2.1. Moldagem por Transferência de Resina – RTM	23
2.2.2. RTM Light	23
2.2.3. Infusão de Resina Líquida – LRI	24
3. MODELAGEM NUMÉRICA DO PROCESSO LRI	33
3.1. VOF (<i>Volume of Fluid</i>)	33
3.2. Método dos Volumes Finitos (MVF)	35
4. SOLUÇÃO NUMÉRICA	37
4.1. Modelagem Computacional no OpenFOAM	38
4.2. Domínio Computacional	40
5. RESULTADOS	43
5.1. Teste de convergência de solução independente de malha	43
5.2. Validação do modelo numérico e investigação do valor da permeabilidade transversal (K_{zz})	45
5.3. Análise do escoamento da resina para diferentes valores de K_{xx} e K_{zz}	50
5.4. Avaliação da geometria	54
5.4.1. Relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 0,1	56
5.4.2. Relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 1	59
5.4.3. Relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 10	61

5.4.4.	Relação de K_{xy}/K_{zz} igual a 100	63
5.4.5.	Relação de K_{xy}/K_{zz} igual a 1000	66
5.5.	Generalização da malha de fluxo	68
5.5.1.	Relação de K_{xy}/K_{zz} igual a 0,1	69
5.5.2.	Relação de K_{xy}/K_{zz} igual a 1	69
5.5.3.	Relação de K_{xy}/K_{zz} igual a 10	70
5.5.4.	Relação de K_{xy}/K_{zz} igual a 100	70
5.5.5.	Relação de K_{xy}/K_{zz} igual a 1000	71
5.5.6.	Generalização do comprimento de L_p para qualquer L_m	71
6.	CONCLUSÕES	75
7.	TRABALHOS FUTUROS	77
	Referências	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tecidos de fibras; a) Manta de fibra de vidro (OLIVEIRA, 2010). b) Manta de fibra de polipropileno (OLIVEIRA, 2010). c) Tecido de aramida (Kevlar® S745 GR) (NUNES, 2018).....	22
Figura 2.2 – Esquema do processo de RTM.....	23
Figura 2.3 – Esquema do processo de RTM Light (adaptado de GARAY et al., 2011).....	24
Figura 2.4 – Esquema da técnica LRI (adaptado de BROUWER et al., 2003).....	25
Figura 2.5 – Exemplo da produção de um casco de barco por infusão; a) Processo de infusão. b) Desmoldagem da peça (adaptado de BROUWER et al., 2003).	25
Figura 2.6 – <i>Layup</i> e avanço da frente de fluxo da moldagem retilínea por LRI (NUNES, 2018)...	26
Figura 2.7 – Escoamento da resina sem e com malha de fluxo (adaptado de RACHMADINI et al., 2010); a) Escoamento longitudinal. b) Escoamento da resina através da malha de fluxo (escoamento transversal). c) Linha de frente de escoamento da resina com malha de fluxo.	27
Figura 3.1 – Esquema da discretização por volumes finitos.	35
Figura 4.1 – Esquema das etapas do processo de simulação.....	38
Figura 4.2 – Estrutura do software OpenFOAM.	39
Figura 4.3 – Visualização do progresso da simulação numérica no OpenFOAM.....	40
Figura 4.4 – Domínio computacional e condições de contorno; a) vista lateral de um molde contendo malha de fluxo. b) Visualização superior do molde em um escoamento retilíneo com a linha de frente de escoamento paralela à saída do molde.....	41
Figura 5.1 – Curvas do escoamento da resina para às cinco malhas utilizadas no teste de solução independente de malha.	45
Figura 5.2 – Geometria e malha construídas no GMSH.	45
Figura 5.3 – Geometria e dimensões do molde contendo 4 camadas.	46
Figura 5.4 – Validação numérica em um caso de 4 camadas de aramida.	46
Figura 5.5 – Gráfico do escoamento da resina para diferentes relações K_{xx}/K_{zz}	47
Figura 5.6 – Curvas do escoamento da resina com o K_{xx} de 4 camadas no experimento de 23 camadas.	49
Figura 5.7 – Posição da resina em função do tempo das linhas l_1 (linha contínua) e l_2 (linha	

tracejada); a) no caso 1. b) no caso 2.	52
Figura 5.8 – Curvas do escoamento da resina nas linhas l_1 e l_2 ; a) no caso 3. b) no caso 4.....	52
Figura 5.9 – Curvas do escoamento da resina nas linhas l_1 e l_2 no caso 5.	53
Figura 5.10 – Escoamento da resina dentro do molde no caso 1; a) no tempo de 3 s. b) no tempo de 29 s.	53
Figura 5.11 – Escoamento da resina dentro do molde no caso 3; a) no tempo de 1 s. b) no tempo de 4,4 s.	54
Figura 5.12 – Gráfico do escoamento da resina com o meio poroso de 0,0027 m de espessura.	57
Figura 5.13 – Escoamento da resina dentro do molde com L_p de 0,15 m de comprimento; a) no tempo de 1 s. b) no tempo de 25 s.....	57
Figura 5.14 – Gráfico do escoamento da resina com o meio porosos de 0,0043 m de espessura.	58
Figura 5.15 – Curvas do escoamento da resina com a espessura de 0,0043 m; a) L_p de 0,15 m de comprimento. b) L_p de 0,12 m de comprimento.	58
Figura 5.16 – Escoamento da resina dentro do molde com o meio poroso contendo; a) espessura de 0,0069 m. b) espessura de 0,0094 m. c) espessura de 0,012 m.	59
Figura 5.17 – Curvas do escoamento da resina para os distintos comprimentos de malha de fluxo e espessura do laminado de: a) 0,0027 m. b) 0,0043 m. c) 0,0069 m. d) 0,0094 m. e) 0,012 m.	60
Figura 5.18 – Escoamento da resina dentro do molde com uma espessura de 0,012 m e um L_p de 0,15 m de comprimento. a) no $t = 0,6$ s. b) no $t = 2,6$ s.	61
Figura 5.19 – Gráficos da posição da resina em função do tempo adimensional para os laminados com espessuras de: a) 0,0027 m. b) 0,0043 m. c) 0,0069 m. d) 0,0094 m. e) 0,012 m.	62
Figura 5.20 – Escoamento da resina dentro do molde com espessura de 0,0069 m e um L_p de 0,06 m de extensão. a) no $t = 1$ s. b) no $t = 7$ s.....	63
Figura 5.21 – Escoamento da resina dentro do molde com espessura de 0,012 m e um L_p de 0,03 m de extensão; a) no $t = 1$ s. b) no $t = 26$ s.....	63
Figura 5.22 – Escoamento da resina para os diferentes comprimentos de L_p ; a) laminado com espessura de 0,0027 m. b) laminado com espessura de 0,0043 m.	64
Figura 5.23 – Infusão da resina em um molde de 0,0027 m de espessura e um L_p de 0,15 m de comprimento. a) no $t = 5$ s. b) no $t = 150$ s.	64
Figura 5.24 – Gráfico da posição em função do tempo adimensional para as pré-formas com	

espessuras de: a) 0,0069 m. b) 0,0094 m. c) 0,012 m.	65
Figura 5.25 – Escoamento da resina com o meio poroso de 0,0069 m de espessura e um L_p de 0,03 m de comprimento. a) no $t = 4$ s. b) no $t = 120$ s.	66
Figura 5.26 – Escoamento da resina para os distintos comprimentos de L_p	66
Figura 5.27 – Infusão da resina através da pré-forma porosa com espessura de 0,0027 m; a) L_p igual a 0,12 m de extensão. b) L_p com o comprimento de 0,15 m de comprimento.	67
Figura 5.28 – Curvas do escoamento da resina dentro do molde para o meio poroso com espessura de: a) 0,0043 m. b) 0,0069 m.	67
Figura 5.29 – Gráfico do escoamento da resina dentro do molde para um laminado com espessura de: a) 0,0094 m. b) 0,012 m.	68
Figura 5.30 – Ilustração do tamanho da variável ΔL	68
Figura 5.31 – Gráficos da posição da resina em função do tempo adimensional dentro do molde; a) caso 1. b) caso 2.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Funções de interpolações utilizadas nas simulações.....	39
Tabela 2 – Posição das linhas de monitoramento.	42
Tabela 3 – Valores das propriedades utilizadas nas simulações do teste de convergência de solução independência de malha.	43
Tabela 5 – Valores das propriedades experimentais.....	45
Tabela 6 – Comparação entre os tempos finais de infiltração numérico e experimental.....	47
Tabela 7 – Valores das permeabilidades transversais para as diferentes relações K_{xx}/K_{zz}	48
Tabela 8 – Cálculo do resíduo para as diferentes relações K_{xx}/K_{zz}	50
Tabela 9 – Valores das propriedades utilizadas nas simulações.....	51
Tabela 10 – Posição da linha de frente da resina para diferentes valores de K_{xx} e K_{zz}	51
Tabela 11 – Possibilidades de valores de K_{xx} e K_{zz}	55
Tabela 12 – Valores de K_{xx} e K_{zz} utilizados nas simulações.	56
Tabela 13 – Resultados da diferença entre o comprimento da malha de fluxo e a posição $x(t)$	69
Tabela 14 – Cálculo da diferença entre o comprimento da malha de fluxo e a posição $x(t)$ para a relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 1.	70
Tabela 15 – Resultados da diferença entre o comprimento de L_p e a posição $x(t)$	70
Tabela 16 – Resultados da diferença entre o comprimento de L_p e a posição $x(t)$ para a relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 100.....	71
Tabela 17 – Cálculo da diferença entre o comprimento da malha de fluxo e a posição $x(t)$ para as diferentes espessuras da pré-forma.	71
Tabela 18 – Casos simulados pra evidenciar a aplicabilidade da Eq. (5.5).	73
Tabela 19 – Posição em que a linha de frente de escoamento formou-se paralela à saída do molde.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CV/FEM	Volume de controle/elemento finito
FE/CV	<i>Finite Element/Control Volume Method</i>
LCM	<i>Liquid Composite Molding</i>
LRI	<i>Liquid Resin Infusion</i>
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
RIFT	<i>Resin Injection Under Flexible Tooling</i>
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>
SCRIMP	<i>Seemann Composites Resin Infusion Molding Process</i>
VARTM	<i>Vaccum-assisted Resin Transfer Molding</i>
VBRTM	<i>Vacuum bag Resin Transfer Molding</i>
VI	<i>Vacuum Infusion</i>
VOF	<i>Volume of Fluid</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

C_o	Número de <i>Courant Number</i>
f	Fração volumétrica
$\vec{F}$	Termo fonte ou forças externas [N/m ³]
$\vec{g}$	Aceleração da gravidade [m/s ²]
h	Espessura do meio poroso [m]
h_p	Espessura da malha de fluxo [m]
$\bar{\bar{K}}$	Tensor de permeabilidades [m ²]
l_1 e l_2	Linhas de monitoramento da resina
L_m	Comprimento do molde
L_p	Comprimento da malha de fluxo
n	Direção de normal à superfície
P	Pressão [Pa]
t	Tempo [s]
u/v	Velocidade na direção x e y
$\vec{V}$	Velocidade de escoamento da resina [m/s]
V_f	Volume de fibra
$x(t)$	Posição da resina [m]
∇	Gradiente

Símbolos gregos

Δ_L	Diferença entre $x(t)$ e L_p [m]
ε	Porosidade do reforço fibroso
μ	Viscosidade do fluido [Pa s]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
$\bar{\bar{\tau}}$	Tensor de tensões [Pa]
τ	Tempo adimensional

Subscritos

<i>exp</i>	Experimental
<i>num</i>	Numérico
<i>xx</i>	Direção <i>x</i>
<i>yy</i>	Direção <i>y</i>
<i>zz</i>	Direção <i>z</i>
<i>x</i>	Eixo <i>x</i>
<i>y</i>	Eixo <i>y</i>
<i>z</i>	Eixo <i>z</i>

1. INTRODUÇÃO

O interesse das indústrias em aperfeiçoar as técnicas e as metodologias atuais alusivas aos processos de Moldagem Líquida de Compósitos (*Liquid Composite Molding – LCM*) propicia que pesquisas científicas sejam aprimoradas e expandidas com o intento de que as propriedades físicas e mecânicas dos materiais atendam às exigências do mercado atual. Dessa maneira, a utilização de materiais compósitos está em ampla expansão, procurando-se assim, produtos mais resistentes, leves, com um melhor desempenho e com custos de fabricação mais atraentes.

Os materiais compósitos de matriz polimérica, constituídos de fibras vegetais ou sintéticas estão sendo empregados na área da engenharia desde à primeira década do século XX, sendo utilizados mais acentuadamente pela indústria do setor militar apenas a partir da década de 40. Logo em seguida, também começaram a ser utilizados em diversos segmentos da indústria de bens de consumo, como os aeronáuticos, automotivos, náuticos, estruturas marítimas, tubulações, componentes eletrônicos e ainda equipamentos militares e esportivos (GUTIÉRREZ et al., 2014).

Ao longo dos anos, diversas técnicas pertencentes à família LCM foram desenvolvidas com a finalidade de produzir compósitos poliméricos, onde, nessas metodologias, os reforços fibrosos secos são compactados em um molde antes de serem impregnados com uma matriz líquida. Esses processos utilizam moldes fechados e variam de acordo com a rigidez, do completamente rígido ao totalmente flexível (TIMMS et al., 2012). Dentre os processos LCM pode-se destacar a Moldagem por Transferência de Resina (*Resin Transfer Molding – RTM*), o RTM Light e a Infusão de Resina Líquida (*Liquid Resin Infusion – LRI*). Estas técnicas possuem uma variedade de aplicações que vão desde grandes peças com pequenos volumes de produção até a produção de grande volume e componentes menores, além de se apresentarem vantajosos sobre os processos de fabricação com moldes abertos, incluindo melhor qualidade nas propriedades das peças e menor exposição às emissões de solventes (WALBRAN et al., 2015).

No processo LRI, simplificada, um tecido pré-formado é depositado entre um molde rígido e uma bolsa de vácuo. Então, um vácuo é gerado dentro do molde compactando a pré-forma e possibilitando que a resina infunda o meio fibroso (LOUDAD et al., 2017). Um tecido altamente permeável (malha de fluxo) e removível pode ser colocado sobre a pré-forma para reduzir o tempo de enchimento do molde (CORREIA et al., 2005).

Para que esta técnica torne-se robusta, aumentando a confiabilidade da metodologia e, conseqüentemente, as peças atinjam o nível de comercialização, pesquisas mais direcionadas em relação às propriedades do processo tornam-se imprescindíveis para que problemas e possíveis falhas nos projetos possam ser contornados. Nesse sentido, de acordo com Loudad et al. (2017), o

entendimento do processo de moldagem ainda necessita ser aperfeiçoado, pois a flexibilidade da bolsa de vácuo faz com que a espessura da peça se modifique dependendo da pressão da resina. A variação da espessura da peça, consequentemente no volume de fibra, resulta em mudanças na permeabilidade da pré-forma. Outro aspecto que necessita ser aprimorado e entendido está relacionado ao preenchimento do molde, que é uma das fases mais críticas para determinar o sucesso geral do processo de moldagem. Nesta etapa, a resina flui através da pré-forma sob vácuo e reações na resina podem ocorrer, aumentando a viscosidade desta (gelificação). O aumento da viscosidade pode resultar em um preenchimento incompleto do molde, por isso, entender como ocorre o escoamento da resina e o tempo de preenchimento é essencial para aprimorar o processo de moldagem (SUN et al., 1998). Chen et al. (2004) também destacam que o preenchimento completo do molde e o adequado molhamento da pré-forma fibrosa tem um impacto crítico na eficiência do processo e na qualidade final do produto. Por essa razão, para que a moldagem do compósito seja bem sucedida e se obtenha previsão do preenchimento da pré-forma no processo de injeção, torna-se necessário que parâmetros como a viscosidade da resina, pressão de injeção, temperatura da resina e do molde, grau de cura, permeabilidade do meio, bem como localização dos pontos de injeção e orifícios de ventilação sejam supervisionados (SHIN et al., 2006).

Para minimizar as incertezas do processo, utilizar a abordagem numérica/experimental pode ser uma maneira de aperfeiçoar o conhecimento sobre as técnicas de infusão de resina (WANG et al., 2011), corroborando com Chen et al. (2004), quando salientam que a simulação numérica é uma ferramenta importante para entender o escoamento da resina utilizando esse processo.

Nesse sentido, o presente trabalho é dedicado a analisar numericamente o escoamento da resina em compósitos espessos moldados pelo processo LRI, bem como avaliar o comprimento da geometria a partir do comprimento da malha de fluxo. A malha de fluxo é um tecido altamente permeável e seu uso, de acordo com Loudad et al. (2017), acelera a impregnação da pré-forma adicionando um preenchimento através da espessura, também chamada de escoamento transversal. Assim, quando a malha de fluxo possui o mesmo comprimento do molde, pode ocorrer que a resina que escoar através da malha de fluxo chegue à saída (*outlet*) do meio fibroso primeiro que a resina que escoar na parte inferior do molde, propiciando que não haja a absoluta impregnação das fibras. Portanto, torna-se necessário que se obtenha a projeção do comprimento da malha de fluxo para que a resina chegue ao final do molde de forma vertical, ou seja, paralela à saída do molde. Para o desenvolvimento do trabalho, utilizou-se os softwares livres GMSH e o OpenFOAM para a criação da geometria e simulação numérica, respectivamente. Destaca-se que todas as simulações numéricas deste estudo foram realizadas no Laboratório de Simulação Numérica (LabSin) da FURG.

1.1. Motivação

As técnicas numéricas são uma possibilidade de avançar os estudos relacionados ao processo LRI, pois esta metodologia, quando empregada nos projetos de pesquisas, pode propiciar uma diminuição nos altos custos financeiros e ao tempo dedicado aos estudos experimentais. Além disso, na maioria das vezes, essas mesmas técnicas proporcionam resultados significativamente semelhantes aos obtidos experimentalmente, aumentando sua confiabilidade. Assim, uma motivação deste estudo é a possibilidade deste trabalho contribuir com as pesquisas relacionadas ao processo de LRI e que os resultados obtidos sejam capazes de reproduzir o escoamento da resina da forma mais fiel possível. Além disso, espera-se que os resultados apresentados para obtenção do comprimento da malha de fluxo, auxiliem nas etapas experimentais no processo de moldagem por essa técnica e promova a abertura de novas investigações envolvendo este tema.

1.2. Objetivos

Este estudo tem por objetivo analisar numericamente o escoamento da resina dentro do molde em problemas envolvendo o processo LRI e obter uma maneira de prever o comprimento ideal da malha de fluxo para qualquer que seja o comprimento do molde.

1.2.1. Objetivos Específicos

O estudo desenvolvido tem como objetivos específicos:

- ✓ descrever o escoamento da resina dentro do molde em um modelo 2D;
- ✓ validar o modelo numérico proposto por meio da comparação do tempo final de injeção dos resultados obtidos nas simulações numéricas com os dados experimentais do escoamento da resina dentro do molde;
- ✓ estimar a relação K_{xx}/K_{zz} de um experimento de 23 camadas;
- ✓ avaliar a posição $x(t)$ em que forma-se a linha de frente de escoamento paralela à saída do molde com diferentes valores de permeabilidade planar (K_{xx}) e permeabilidade transversal (K_{zz}), mantendo a mesma relação K_{xx}/K_{zz} ;
- ✓ determinar o comprimento do molde a partir da variação do comprimento da malha de fluxo, das diferentes relações de K_{xx}/K_{zz} e espessuras do laminado;
- ✓ generalizar os resultados obtidos para que se obtenha a projeção do comprimento ideal da malha de fluxo para qualquer comprimento de molde.

1.3. Descrição dos capítulos

O Capítulo 1 deste trabalho apresenta uma introdução aos compósitos poliméricos, bem como ao conjunto de processos de LCM. Mais especificamente, se direciona ao processo de LRI que é o tema deste estudo, expondo a proposta de desenvolvimento e motivação desta pesquisa. Neste capítulo, também são apresentados o objetivo geral, os objetivos específicos e define-se a estrutura do presente trabalho.

No Capítulo 2 é realizada uma revisão da literatura em que trata-se com mais detalhes os aspectos relacionados aos materiais compósitos, assim como exemplifica-se e descreve-se alguns processos de LCM. Também direciona-se a discussão ao processo de LRI em que descreve-se as etapas do processo, bem como aborda-se aspectos relacionados aos parâmetros do processo de moldagem encontrados na literatura. Por fim, apresenta-se uma revisão da literatura sobre pesquisas convenientes para a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento deste estudo.

Posteriormente, no Capítulo 3 é discutida a modelagem matemática do problema para que fosse possível descrever os escoamentos da resina dentro do molde no processo de LRI. Neste capítulo, são apresentadas as equações utilizadas para a modelagem numérica do problema multifásico proposto, bem como os métodos de solução e discretização das equações.

No Capítulo 4, é abordada a modelagem computacional no software OpenFOAM, assim como define-se as condições de contorno do domínio computacional referente ao problema de LRI.

No Capítulo 5, apresenta-se e discute-se todos os resultados obtidos com as simulações realizadas com o OpenFOAM. É apresentado o resultado do teste de solução independência de malha e mostrada a geometria construída no software GMSH. Também, mostra-se os resultados da avaliação do comprimento da geometria a partir do comprimento da malha de fluxo para diferentes relações de K_{xx}/K_{zz} e distintas espessuras do compósito. Além disso, encontra-se uma generalização dos resultados obtidos nesta etapa do trabalho.

Já no Capítulo 6, expõem-se as conclusões referentes aos resultados obtidos nas simulações numéricas além de, definir algumas sugestões de continuidade de pesquisas relacionadas a este tema.

Por fim, apresenta-se os referenciais utilizados para o embasamento necessário para o desenvolvimento deste estudo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Diante do desenvolvimento tecnológico e social, as indústrias estão cada vez mais interessadas em aperfeiçoar os processos de produção de materiais compósitos, bem como de aquisição e de descarte dos materiais utilizados para que se possa minimizar os impactos ambientais. Dessa forma, a escolha de métodos modernos de fabricação de compósitos é, como em todas as decisões de engenharia, orientada pelo custo, qualidade do produto, saúde e segurança (WILLIAMS, 1996).

Os processos de LCM são um conjunto de técnicas para a produção de materiais compósitos que utilizam de reforços fibrosos e resina para a obtenção de um compósito polimérico. Esses processos vêm se destacando pela sua eficácia em produzir peças de todos os tipos e tamanhos e também por razões ambientais, uma vez que se comparado com outros processos para produção de compósitos poliméricos, produzem muito menos resíduos. Essa família de processos forma um modelo eficiente na produção de estruturas de alto desempenho de formas simples ou complexas, proporcionando vantagens sobre outras operações de processamento de compostos como autoclave e moldagem por compressão (PHELAN, 1997).

Na sequência, são abordados aspectos relacionados aos materiais compósitos e uma breve descrição de alguns processos de fabricação desses materiais, enfatizando a técnica de LRI.

2.1. Materiais Compósitos

O interesse em utilizar os materiais compósitos está relacionado à duas razões, sendo elas a desempenho e a economia. O desempenho está ligado à busca por aperfeiçoamento no desempenho de componentes estruturais característicos como, por exemplo, elevada resistência e rigidez específicas, baixo coeficiente de expansão térmica, bom comportamento em fadiga, resistência à temperaturas extremas, à corrosão e ao desgaste. Em relação aos custos de fabricação, a utilização de materiais compósitos em algumas peças pode ser menor quando comparado aos materiais metálicos, devido à sua melhor flexibilidade de concepção e fabrico, integração de componentes, custos mais baixos de ciclo de vida do produto (AMORIM JR., 2007). Outro potencial dos materiais compósitos é salientado por Pierce et al. (2017), quando comentam que os compósitos podem oferecer benefícios significativos em termos de redução de peso, pois seus componentes podem ser fabricados com maior complexidade e integração do que com estruturas metálicas tradicionais.

Um compósito é um material multifásico, geralmente constituído de pelo menos duas fases em que suas constituintes devem ser quimicamente distintas e separadas por uma interface que os

une. Uma das fases dos materiais compósitos é chamada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase, normalmente denominada de fase dispersa. As propriedades finais do compósito estão diretamente relacionadas às propriedades das fases constituintes (CALLISTER, 2002). Portanto, o desempenho do material compósito será superior se comparado à performance dos seus constituintes quando atuando independentemente. O material compósito possuirá características que dependem mutuamente das fibras, do material de reforço e da matriz, porém cada propriedade é influenciada de maneira diferente, como, por exemplo, a resistência à tração está mais relacionada à fibra de reforço, enquanto a capacidade de absorção de energia em um impacto depende mais da matriz (GUTIÉRREZ et al., 2014).

Como exemplo de compósitos, pode-se citar as ligas metálicas, as cerâmicas, os polímeros multifásicos, entre outros (CALLISTER, 2002). A utilização em grande escala de compósitos em pesquisas recentes de aprimoramento de aviões de combate militares, aviões de transporte civil, helicópteros, satélites, veículos de lançamento e mísseis em todo o mundo é um exemplo da aplicação em potencial desses materiais (NAYAK, 2014).

Os materiais compósitos são classificados de acordo com o tipo de reforço, podendo ser dividido em fibras sintéticas como vidro, aramida e carbono ou fibras naturais como, por exemplo, fibra de coco ou sisal, sendo que os plásticos reforçados com fibras de vidro, até o momento, são os mais utilizados (CUNHA et al., 2010). De acordo com Franco (2008), os materiais compósitos mais comuns são os compósitos de matriz polimérica, que são constituídos por um polímero (resina como matriz) reforçado com fibras, tais como vidro, carbono e aramida. Quando os reforços são combinados com os sistemas de resina, propriedades como, alta resistência e rigidez, facilidade de moldar peças complexas, alta resistência ao ambiente combinada com baixas densidades torna o compósito resultante com qualidades superiores aos metais para inúmeras aplicações. As propriedades dos materiais compósitos são determinadas por: propriedades da fibra, da resina, razão de fibra para resina no compósito e geometria, bem como orientação das fibras no material.

Segundo Amorim Jr. (2007), uma variedade de fibras pode ser usada no processo de moldagem, tais como: fibras de vidro, de carbono, aramida e até em compósitos híbridos que utilizem mais de um tipo de fibra para aplicações específicas. Na Fig. 2.1 é possível observar o tecido de fibra de vidro, de polipropileno e de aramida.

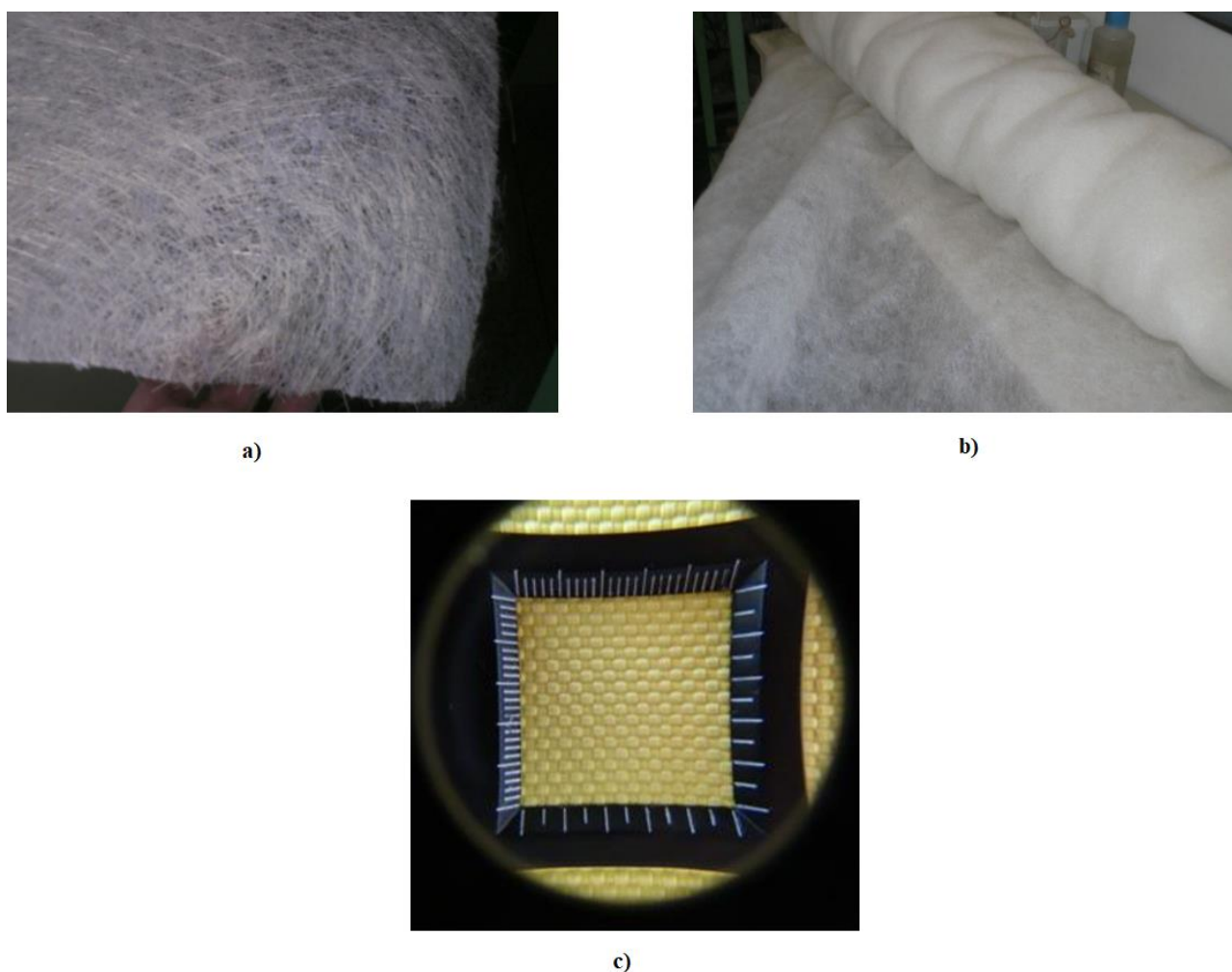


Figura 2.1 – Tecidos de fibras; a) Manta de fibra de vidro (OLIVEIRA, 2010). b) Manta de fibra de polipropileno (OLIVEIRA, 2010). c) Tecido de aramida (Kevlar® S745 GR) (NUNES, 2018).

Pode-se inferir que a utilização de materiais compósitos abrange uma gama de setores industriais e estão se tornando populares e de grande interesse da sociedade contemporânea. No entanto, questões relacionadas à configuração do processo de fabricação têm sido um limite para algumas aplicações industriais e soluções inovadoras ainda estão em desenvolvimento (CARLONE et al., 2018). Outro aspecto está relacionado ao interesse em diminuir os custos de fabricação e os ciclos de tempo, o que está levando a uma transição das técnicas tradicionais de fabricação de autoclave para os métodos de moldagem líquida de compósitos (PIERCE et al., 2017).

2.2. Alguns processos de fabricação de compósitos

As técnicas tradicionais de produção de compósitos, como *lay-up* manual, enrolamento e pultrusão, são adequadas apenas para tipos específicos de pré-formas, tamanhos de peças e complexidade estrutural. Portanto, é altamente recomendável a utilização da moldagem líquida de compósito (LCM), que é uma avançada tecnologia de fabricação de compósitos (YANG et al.,

2014). Como exemplo de processos LCM, na continuidade do texto é descrito as técnicas de RTM, RTM Light e LRI.

2.2.1. Moldagem por Transferência de Resina – RTM

Esta técnica foi desenvolvida por volta de 1940 com pouco sucesso, sendo apenas por volta de 1960 a 1970 que começou a ser impulsionada pela indústria de computadores, funil para fertilizantes e, posteriormente, a ampliação do processo de RTM foi incentivada pela indústria automotiva, aeroespacial, esportiva e biomédica (AMORIM JR., 2007). Este processo pode ser dividido basicamente em três etapas sendo elas, o pré-processamento, processamento e pós-processamento, como é esquematizado e apresentado na Fig. 2.2.

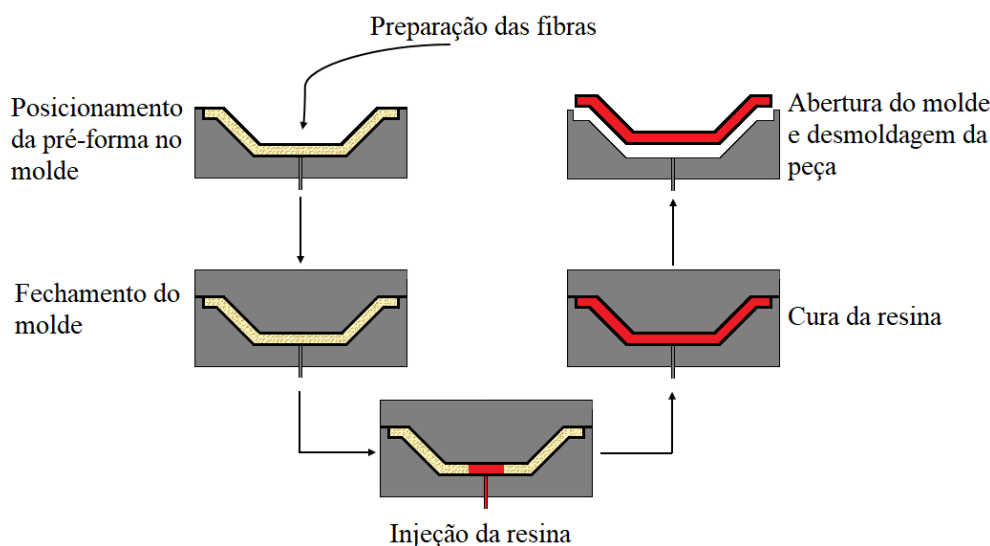


Figura 2.2 – Esquema do processo de RTM.

Na etapa do pré-processamento, o reforço fibroso é cortado no formato da peça e posicionado dentro do molde. O molde é então fechado e a pré-forma é comprimida. No estágio de processamento ou de injeção é onde a resina preenche o molde e o reforço fibroso é impregnado. O molde deve possuir pelo menos uma entrada para a injeção da resina e uma saída para permitir que durante a etapa de impregnação, o ar existente dentro do molde possa ser evacuado (AMORIM JR., 2007). Por fim, no estágio de pós-processamento, ocorre a cura da resina e realiza-se o processo de desmoldagem, onde o composto pode passar por um sistema de polimento e produtos químicos para que atinja o nível de comercialização e obtenha o máximo de suas propriedades mecânicas.

2.2.2. RTM Light

O RTM Light difere do RTM, pois uma metade do molde rígido é substituída por um

componente mais leve e menos rígido, muitas vezes fabricado a partir de um composto de fibra de vidro isotrópico (TIMMS et al., 2012). De acordo com Garay et al. (2011), o molde pode ser feito de um compósito ou plástico e se caracteriza por normalmente ser transparente, propiciando que a resina seja monitorada dentro do molde.

O RTM Light é um processo que utiliza baixas pressões em seu sistema de injeção (GARAY et al., 2011). A compressão das fibras é normalmente fornecida pela aplicação de vácuo a uma região periférica da cavidade do molde, e o escoamento da resina é acionado por um vácuo da cavidade, um sistema de injeção externa ou uma combinação dos dois (TIMMS et al., 2012). Na Fig. 2.3 pode-se observar o esquema do processo de moldagem utilizando o RTM Light.

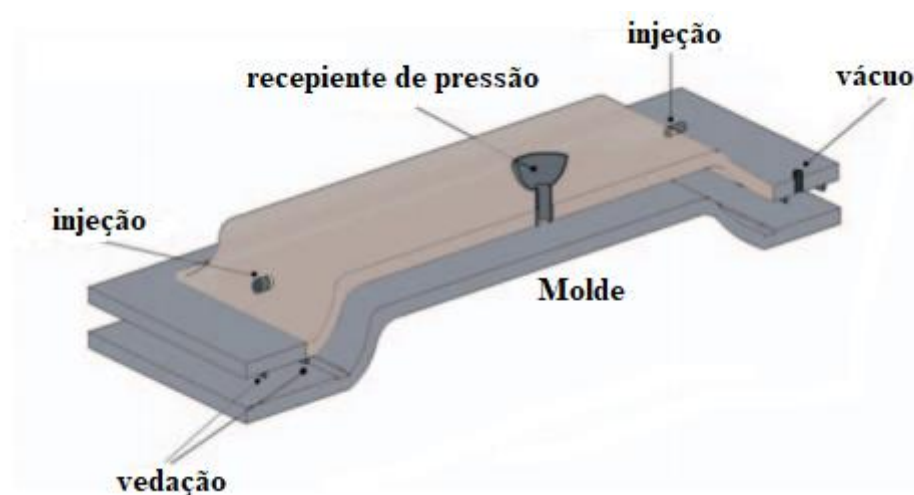


Figura 2.3 – Esquema do processo de RTM Light (adaptado de GARAY et al., 2011).

2.2.3. Infusão de Resina Líquida – LRI

Este trabalho é dedicado a estudar a técnica Infusão de Resina Líquida (LRI), que também é conhecido como Moldagem por Transferência de Resina Assistida a Vácuo (*Vaccum-assisted Resin Transfer Molding – VARTM*), Infusão a vácuo (*Vacuum Infusion – VI*) Moldagem por Transferência de Resina para Saco de Vácuo (*Vacuum bag Resin Transfer Molding – VBRTM*), Injeção de Resina sob Ferramentas Flexíveis (*Resin Injection Under Flexible Tooling – RIFT*) e Processos de Moldagem por Resina Composta Seemann (*Seemann Composites Resin Infusion Molding Process – SCRIMP™*) (LOUDAD et al., 2017). Essa metodologia de processamento é adequada para a infiltração de componentes muito grandes como, por exemplo, pás de turbinas eólicas, cascos e conveses navais, entre outras (VILÀ et al., 2016).

Na Fig. 2.4 é possível observar as configurações do processo de moldagem por LRI, o qual consiste em depositar uma pré-forma seca sobre o molde rígido e uma malha de fluxo cobrindo toda a superfície do reforço para auxiliar na distribuição do escoamento da resina e no tempo de

preenchimento. A malha de fluxo é um tecido removível e para facilitar a sua remoção após a cura da resina, uma camada de *peel ply* é empregada entre ela e o laminado. A camada de *peel ply* é comumente aplicada sobre toda a superfície da pré-forma, de modo que, quando retirada da superfície, o compósito possua um bom aspecto. A entrada e a saída de resina são posicionadas no molde por meio de canais de distribuição de resina (tubos espirais) (NUNES, 2018).

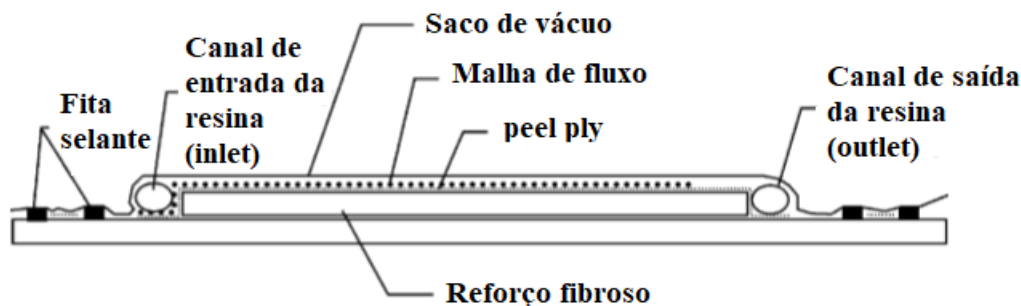


Figura 2.4 – Esquema da técnica LRI (adaptado de BROUWER et al., 2003).

Na Fig. 2.5 é apresentado um exemplo da fabricação de um casco de barco por essa técnica, sendo que na Fig. 2.5 a) está ocorrendo a infusão da resina no casco e a Fig. 2.5 b) mostra o casco sendo desmoldado, após a cura da resina.



a)



b)

Figura 2.5 – Exemplo da produção de um casco de barco por infusão; a) Processo de infusão. b) Desmoldagem da peça (adaptado de BROUWER et al., 2003).

Na Fig. 2.6, é possível observar a montagem e a direção em que a resina escoar em um molde retilíneo, bem como, o posicionamento das canaletas de entrada e saída de resina.

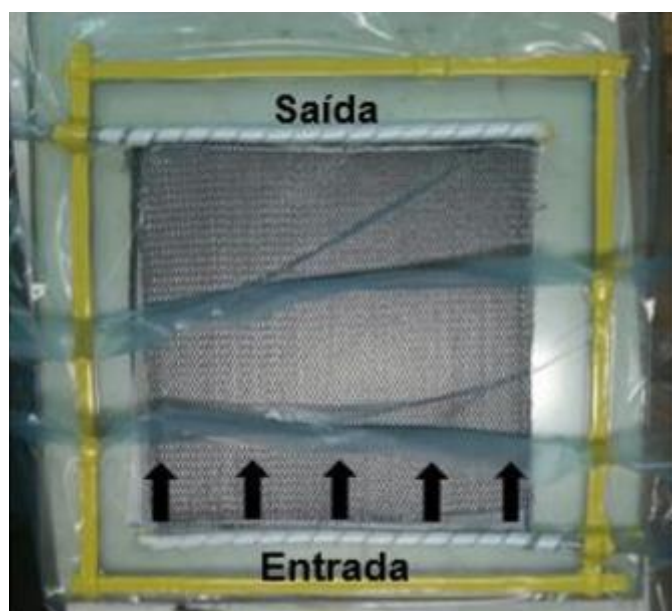


Figura 2.6 – *Layup* e avanço da frente de fluxo da moldagem retilínea por LRI (NUNES, 2018).

A moldagem de compósitos utilizando o processo de LRI permite o aperfeiçoamento final da qualidade da peça, uma vez que a infusão da resina e sua cura são dissociadas. Porém, a espessura e a fração volumétrica da peça podem não ser bem controladas, primeiro por causa do uso do saco de vácuo em vez de um molde rígido e também à grande variação de volume da pré-forma quando o vácuo e a pressão são aplicados (WANG et al., 2010).

De acordo com Vilà et al. (2016), a técnica possui um longo tempo de infiltração devido à força motriz limitada (pressão a vácuo) como uma desvantagem em peças muito grandes. Para superar essa limitação, uma malha com alta permeabilidade em comparação à pré-forma de fibra pode ser colocada no topo do empilhamento dos tecidos de fibra e, então, a infiltração ocorre simultaneamente no plano pré-moldado e através da espessura. Yenilmez et al. (2009) também salientam que a malha de fluxo é adicionada durante as etapas do processo de moldagem, pois ela auxilia a resina a se propagar através do meio fibroso, uma vez, que o gradiente de pressão da resina é relativamente baixo.

A maior permeabilidade da malha de fluxo favorece o escoamento através da pré-forma e reduz o tempo de preenchimento. No entanto, devido às diferenças significativas no valor da permeabilidade da malha de fluxo e do meio fibroso, seu uso induz fluxo de espessura na pré-forma, formando uma linha de frente de escoamento tridimensional que avança primeiro através da malha e fica retraída no reforço (CORREIA et al., 2005). Por isso, o *layout* da malha de fluxo continua sobre toda a superfície da peça funciona bem apenas para geometrias que são muito simples (SAS et al., 2015).

De acordo com Rachmadini et al. (2010), as técnicas mais comuns do VARTM utilizam

fluxos longitudinais e transversais, como mostra a Fig. 2.7. Na Fig. 2.7 a), a resina escoa longitudinalmente entre as camadas de fibras pré-formadas. Este tipo de VARTM é normalmente empregado para fabricação de peças pequenas onde o comprimento da injeção é curto. Já no escoamento transversal (Fig. 2.7 b), a resina é distribuída através da malha de fluxo, colocada no topo das camadas da pré-forma. Devido à sua elevada permeabilidade, a resina escoará primeiro longitudinalmente através da malha de fluxo e depois impregnará as pré-formas por meio de um escoamento transversal através da espessura das camadas da pré-forma. A linha de frente de escoamento através da espessura da pré-forma é mostrada na (Fig. 2.7 c). Uma parte muito grande de moldagens por esse processo pode ser feita pelo VARTM de fluxo transversal.

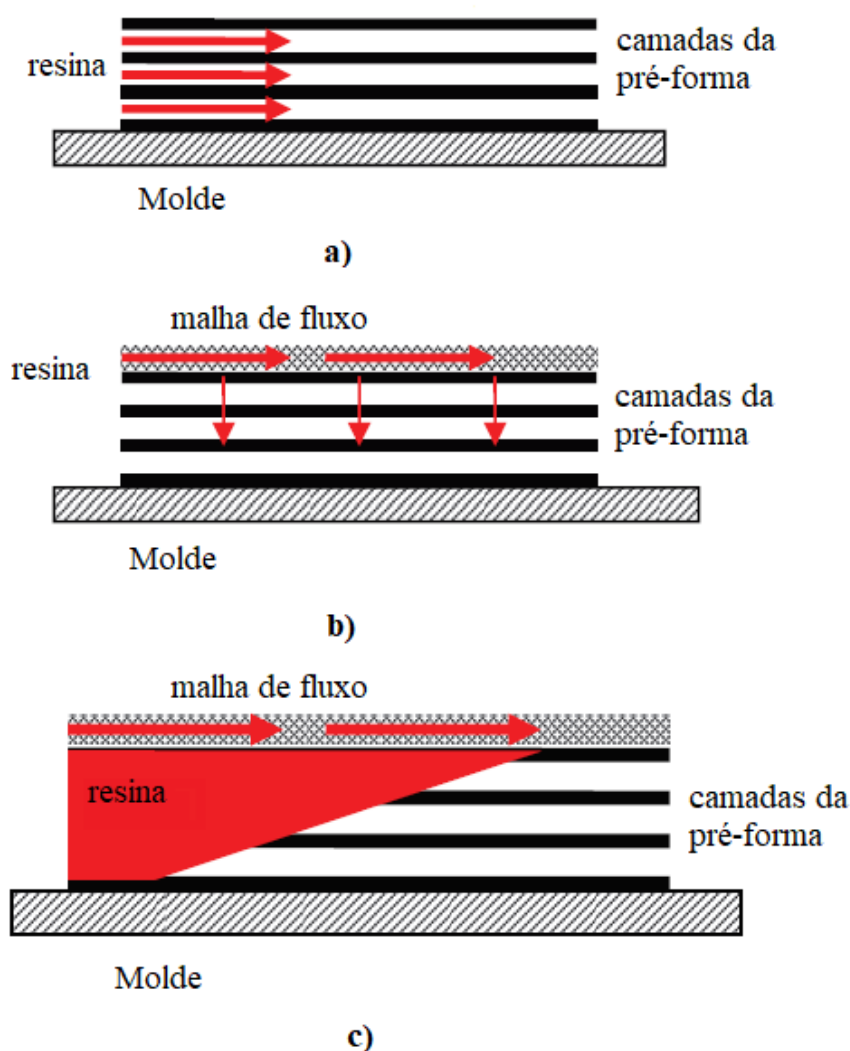


Figura 2.7 – Escoamento da resina sem e com malha de fluxo (adaptado de RACHMADINI et al., 2010); a) Escoamento longitudinal. b) Escoamento da resina através da malha de fluxo (escoamento transversal). c) Linha de frente de escoamento da resina com malha de fluxo.

Para assegurar um nível adequado de qualidades mecânica utilizando essa metodologia é necessário que se tenha um cuidado para que vazios na matriz do compósito sejam evitados. Assim, os locais de entrada e de saída da resina devem ser cuidadosamente selecionados para que o molde possa ser completamente preenchido. A temperatura do molde e a da resina devem ser monitoradas para evitar a gelificação desta durante o processo de infusão, evitando a produção de peças defeituosas (CHEN et al., 2004). Outro fator desafiador é o tamanho da peça a ser fabricada, pois embora o ensacamento a vácuo faça uso da pressão atmosférica e permita que o molde possua tamanho grande, há como contrapartida a questão da resina, que dependendo da sua viscosidade e tempo de cura pode restringir esse tamanho (BROUWER et al., 2003).

Essa técnica demonstra-se vantajosa, como pode ser evidenciado nas qualidades supracitadas, e seu aperfeiçoamento torna-se fonte de interesse em diversos meios industriais. Nesse sentido, os estudos atualmente estão sendo dedicados a aprimorar essa metodologia por meio de pesquisas mais direcionadas aos parâmetros pertencentes ao processo que podem ser responsáveis pelo inadequado preenchimento do molde, fazendo com que a peça final não atinja todas as características desejadas, tendo muitas vezes que ser descartada. Isso pode ser evidenciado quando Ma et al. (2017) comentam em seus estudos que a otimização dos parâmetros geométricos e do processo para atingir a molhagem completa da pré-forma, o baixo tempo de ciclo e as tolerâncias geométricas desejadas é uma tarefa geralmente cara e demorada. Com isso, nas últimas décadas, houve um progresso significativo na simulação de todo o processo VARTM para auxiliar a reduzir os custos de desenvolvimento.

A simulação numérica do escoamento através da pré-forma é de grande importância para o projeto do processo de moldagem por LRI. A modelagem e a previsão do escoamento da resina durante o processo de impregnação das fibras fornecem informações sobre a física do processo e destaca possíveis problemas antes da produção das peças. Além disso, a previsão do escoamento da resina permite a otimização das variáveis de projeto que podem afetar as etapas do processo como, por exemplo, tempo de preenchimento, grau de vácuo, locais de passagem da resina e locais de ventilação, entre outros (CHEN et al., 2004). Portanto, é necessário modelar o processo para reduzir os efeitos e resíduos indesejados (pontos secos), para que possibilite o aperfeiçoamento da qualidade da peça ou encurtar o tempo de ciclo no processo de moldagem (YALCINKAYA; SOZER, 2014).

A modelagem do processo de infusão tem sido amplamente estudada na literatura, na qual diversos métodos numéricos e analíticos foram desenvolvidos com este propósito (LOUDAD et al., 2017). Isso também é evidenciado por Hoagland; George (2017), quando comentam que a simulação do escoamento da resina para moldagem líquida de compósitos é frequentemente

realizada para auxiliar na otimização do processo. Nesse sentido, diversas pesquisas com o intuito de aprimorar a técnica vêm sendo desenvolvidas. Um exemplo é o estudo realizado por Sun et al. (1998) que teve como objetivo compreender os mecanismos de escoamento de resina e apresentar modelos que podem ser usados para prever o tempo de preenchimento do molde e o padrão de escoamento. Na modelagem numérica, os autores utilizaram um método tridimensional de volume de controle/elemento finito (CV/FEM) para resolver as equações governantes do problema. No estudo, foram calculados experimentalmente os valores de permeabilidade da pré-forma e da malha de fluxo utilizando uma solução analítica.

Hsiao et al. (2000) apresentam uma solução analítica para o escoamento da resina no processo VARTM: o processo é modelado por um modelo de duas camadas, compreendendo uma camada referente à malha de fluxo e a outra, à pré-forma. O modelo prevê a forma e o desenvolvimento da linha de frente de escoamento, dadas as propriedades do material, os parâmetros geométricos, a pressão de entrada e a viscosidade. Os resultados foram comparados com soluções numéricas em escala real e uma análise de erro foi realizada. As soluções obtidas podem ser usadas para dimensionamento, projeto e otimização do processo VARTM.

Posteriormente, Brouwer et al. (2003) realizaram um estudo com o intuito de aperfeiçoar a confiabilidade e previsibilidade da técnica VARTM, de modo a minimizar os custos de produção e tornar as falhas no processo de moldagem o menor possível. Inicialmente, descrevem os métodos utilizados para que os compósitos não possuam vazios e, posteriormente, apresentam uma estratégia de injeção utilizando o software RTM-Worx para simular numericamente o escoamento da resina em um casco de barco.

Correia et al. (2005) se dedicaram principalmente à formulação analítica das equações governantes para o escoamento de fluidos incompressíveis através da compactação de meios porosos e a aplicação de materiais compósitos em Infusão a Vácuo (VI). A formulação analítica é apresentada juntamente com uma solução numérica. O modelo proposto também é utilizado para quantificar o efeito dos parâmetros de processo, como a pressão na entrada e na saída, arquitetura, entre outros.

Já Wang et al. (2011) desenvolveram um modelo numérico isotérmico, realizando uma comparação entre as simulações numéricas e dados experimentais da infusão em uma placa utilizando o processo LRI. A partir dos resultados numéricos, o tempo de preenchimento, a massa de resina e a espessura da pré-forma puderam ser determinados. Os autores salientaram que uma questão importante da pesquisa é destacar as mudanças nos parâmetros do processo, como a temperatura da pré-forma e da resina, variações na espessura e da fração volumétrica da fibra.

Em relação aos métodos numéricos de solução, Oliveira et al. (2011) apresentam um estudo

em que são mostrados resultados obtidos através do método VOF (*Volume of Fluid*) e o FE/CV (*Finite Element/Control Volume Method*) nos softwares comerciais FLUENT® e PAM-RTM®, respectivamente. Os resultados obtidos numericamente foram comparados com dados experimentais e obtiveram uma boa concordância. Os métodos utilizados para resolver os problemas de RTM foram eficientes e é destacada no texto a importância dos resultados obtidos com o FLUENT, pois este é um software genérico de CFD que demonstra a eficácia do método VOF.

Semelhante ao que foi realizado por Oliveira et al. (2011), outro trabalho utilizando softwares é o proposto por Grössing et al. (2015), que realiza uma comparação entre o OpenFOAM, com a formulação VOF e o PAM-RTM® através de soluções numéricas obtidas por ambos os programas e dados experimentais para prever o escoamento da resina em problemas de RTM. Os autores destacam que os dois softwares apresentam diferentes vantagens e desvantagens, e que ambos os programas apresentam resultados muito similares para soluções em meios porosos. Porém, se houver locais em que tenha pouco ou nenhum meio poroso, o PAM-RTM® requer que a porosidade seja estabelecida com o valor igual a 1 e que seja identificado o valor de permeabilidade, enquanto no OpenFOAM é possível calcular o fluxo da resina com ou sem meio poroso.

Sas et al. (2015) realizaram um estudo em que consideraram casos com geometrias complexas que eram propícios para o efeito do *racetracking* ao longo das bordas do molde e, portanto, a colocação da malha de fluxo sobre toda a superfície superior poderia produzir peças com vazios. Assim, os autores criaram uma metodologia usando uma ferramenta preditiva para projetar uma maneira ideal de malha de fluxo que considera a variabilidade do escoamento ao longo das bordas do molde. Essa abordagem iterativa converge rapidamente para fornecer a disposição da malha de fluxo em diversas seletivas da superfície da pré-forma que garantem o preenchimento completo desta, apesar da variabilidade. Os autores criaram um algoritmo de busca em árvore através da discretização do domínio em regiões finitas e o modelo foi validado a partir de um complexo experimento.

Hurtado et al. (2015) apresentaram uma análise do escoamento da resina através de um laminado de camadas de fibras de vidro com diferentes orientações. O modelo numérico desenvolvido permite realizar as simulações considerando cada camada como um meio poroso separado, levando em consideração a sequência de empilhamento. O estudo também analisa a influência dos valores de permeabilidade da malha de fluxo e do laminado de fibra de vidro no escoamento da resina.

Loudad et al. (2017) realizaram um estudo que leva em consideração o acoplamento hidromecânico e a coexistência de fluxos planares e transversais, assim a modelagem numérica

proposta permite a simulação do processo de infusão no caso de pré-formas multicamadas com diferentes materiais e orientações, incluindo a malha de fluxo. O modelo proposto foi validado experimentalmente com base em várias infusões.

Ma et al. (2017) utilizaram em seus estudos um modelo numérico validado experimentalmente para simular os processos de infusão e cura de resina não isotérmica em um laminado relativamente grande e espesso, fabricado pela técnica de moldagem por transferência de resina a vácuo. O perfil da linha de frente de escoamento criada pela diferença entre as permeabilidades da malha de fluxo e do restante da pré-forma, bem como a transferência de calor no sistema pré-aquecido foram capturados. Uma boa concordância é observada entre os experimentos e os tempos de preenchimentos preditos, perfil de temperatura e perfil de escoamento no estágio de infusão.

Akin e Erdal (2017) apresentaram uma simulação da produção integral de um feixe de três compartimentos por infusão de resina a vácuo. Para validar o modelo numérico, foram realizados testes experimentais para a caracterização dos materiais e da resina como, por exemplo, teste de permeabilidade e porosidade. Neste estudo também investigou-se o efeito da sequência de empilhamentos e o nível de vácuo, bem como as medidas da viscosidade da resina, a influência da temperatura e da cura na viscosidade da resina foram examinadas. O modelo de infusão foi validado utilizando o software RTMWorx.

Carlone et al. (2018) propuseram discutir e apresentar uma abordagem múltipla para simulação de pré-impregnados em um sistema de monitoramento de escoamento dielétrico em processos LCM. O modelo foi utilizado para simular um teste de infusão unidirecional, com a intenção de comparar os resultados numéricos com os experimentais de medidas de pressão. Além disso, desenvolveram um sistema de monitoramento para o rastreamento do escoamento saturado e insaturado. Os resultados numéricos e experimentais apresentaram uma boa concordância.

Pode-se observar que a maioria dos estudos envolvendo o processo LRI estão direcionados a analisar parâmetros do processo como, por exemplo, evitar os vazios dentro do molde e prever como ocorre o escoamento da resina durante o processo de moldagem por meio do desenvolvimento de modelos numéricos e analíticos, entre outros. Porém, poucos estudos estão direcionados a investigar a influência da malha de fluxo durante o processo de moldagem e o comprimento do tecido de alta permeabilidade para que, durante o processo de infusão, a linha de frente de escoamento esteja paralela à saída do molde, fazendo com que toda a pré-forma seja impregnada pelo fluido.

Muitos dos estudos envolvendo o processo LRI, quando utilizam a malha de fluxo em alguma superfície da pré-forma nos experimentos, não definem o comprimento da malha ou

geralmente preenchem toda a superfície do molde com o tecido de alta permeabilidade. Assim, este trabalho dedicou-se a investigar a influência do comprimento da malha de fluxo em moldes espessos no processo de LRI.

3. MODELAGEM NUMÉRICA DO PROCESSO LRI

Para analisar como ocorre a infusão da resina e as condições necessárias para que o escoamento ocorra de forma eficiente no processo de LRI, geralmente assume-se na formulação da modelagem numérica do problema que o escoamento ocorre em um meio poroso. Dessa maneira, o modelo matemático utilizado para prever o avanço da resina dentro do molde é fundamentado na Lei de Darcy, expressa pela Eq. (3.1) (DARCY, 1856). Esta equação demonstra que a velocidade do escoamento dentro do molde é diretamente proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade do fluido.

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

onde, $\vec{V}$ [m/s] é a velocidade de escoamento da resina, μ [Pa s] é a viscosidade do fluido, P [Pa] é a pressão, $\bar{\bar{K}}$ [m²] é o tensor de permeabilidades do meio poroso.

Neste estudo, para solucionar os problemas de LRI será utilizado o método do Volume de Fluido (*Volume of Fluid* – VOF) proposto por Hirt; Nichols (1981) que modela problemas de escoamentos multifásicos de fluidos imiscíveis.

3.1. VOF (*Volume of Fluid*)

Essa técnica é aplicada para resolver problemas de escoamentos que contenham duas ou mais fases de fluidos imiscíveis, ou seja, o volume de uma fase não é ocupado pela outra. Este método vem sendo aplicado em diversas situações com sucesso e, de acordo com Maliska; Vasconcellos (2000), a ideia básica do VOF é resolver uma nova equação diferencial parcial para o volume de fluido na célula computacional.

O problema de LRI é bifásico, contendo resina e ar, onde a representação de cada fase na célula é dada a partir do conceito de fração volumétrica f . Portanto, quando o valor de f for igual a 1 (um), significa que a célula está totalmente preenchida de resina e quando for igual a 0 (zero) possui apenas ar. Por outro lado, se f estiver entre 0 (zero) e 1 (um), as duas fases coexistem na mesma célula (HIRT; NICHOLS, 1981).

Para solucionar os problemas de LRI utilizando o método VOF é necessário que as equações de transporte sejam discretizadas e aproximadas pelo método dos volumes finitos. As equações aqui mencionadas são a da conservação da massa, fração volumétrica e quantidade de movimento, expressas respectivamente pelas Eqs. (3.2), (3.3) e (3.4). Inúmeras pesquisas utilizando esta

metodologia foram desenvolvidas e entres eles, pode-se destacar os trabalhos realizados por Isoldi et al. (2012), Oliveira et al. (2013) e Garay et al. (2015).

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

onde, ρ [kg/m³] é a massa específica e $\vec{V}$ [m/s] é o vetor velocidade.

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

onde, f é a fração volumétrica da resina. Essa equação permite calcular f em cada célula do domínio computacional.

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

em que, $\vec{g}$ [m/s²] é a aceleração da gravidade, $\vec{F}$ [N/m³] o termo fonte ou forças externas, $\bar{\bar{\tau}}$ [Pa] o tensor de tensões. Na Eq. (3.4), o termo $\vec{F}$ é utilizado em problemas de meios porosos para incluir um termo de força resistiva na equação do movimento que é na realidade a Lei de Darcy. Desta forma, da Eq. (3.1) é possível escrever:

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

Para solucionar os problemas de LRI que possuem canais abertos, ou seja, sem meio poroso, o termo $\vec{F}$ da Eq. (3.4) é considerado nulo.

Por fim, como a metodologia VOF resolve as Eqs. (3.2) e (3.4) para a mistura (neste caso resina + ar), é necessário ponderar as propriedades físicas do fluido (SRINIVASAN et al., 2011). Desta forma tem-se que:

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

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

3.2. Método dos Volumes Finitos (MVF)

Esse é o método numérico empregado no software OpenFOAM e é responsável por discretizar as equações diferenciais de transporte para resolver o problema de LRI proposto neste estudo. Nesse sentido, realiza-se uma discussão simplificada sobre o MVF no decorrer do texto.

O MVF é utilizado fortemente em pacotes comerciais por ser uma metodologia robusta, devido às propriedades conservativas em todos os volumes elementares, fator importante nos problemas de escoamento de fluido. Esse método aproxima as equações, realizando um balanço de conservação da propriedade para cada volume elementar e, assim, obtendo a correspondente equação aproximada (MALISKA, 2004).

Para a aplicação do MVF, simplificadamente, discretiza-se o domínio computacional com malhas estruturadas ou não estruturadas, dividindo-se o domínio em um número x de volumes de controles discretos. Esses volumes de controles podem ser na forma de quadriláteros ou triângulos em problemas 2D, ou ainda na forma de tetraedros e hexaedros em problemas 3D, normalmente. Assim, dispõe-se de um número de pontos nodais no domínio computacional e as fronteiras (faces) de cada volume de controle são posicionadas no meio do caminho entre os nós, ou seja, cada nó é cercado por uma célula/volume de controle (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007), como pode ser observado na Fig. 3.1.

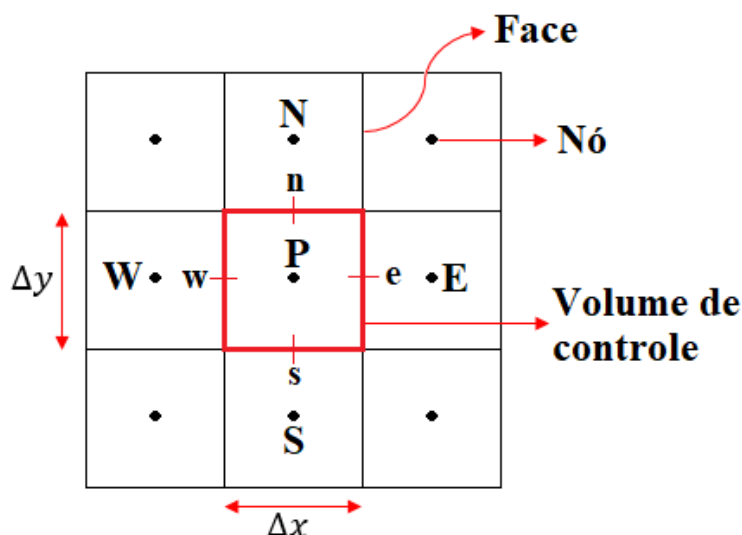


Figura 3.1 – Esquema da discretização por volumes finitos.

Na Fig. 3.1, um ponto nodal geral na geometria 2D, localizado no centro do volume é identificado pela letra P e seus vizinhos que são representados pelos nós E (Leste), W (Oeste), N (Norte) e S (Sul). Pode-se observar também que as faces leste, oeste, norte e sul do volume de controle central são respectivamente representadas pelas letras e, w, n e s. As distâncias do nó P-E e

P-W é Δx , bem como a distância das faces w-e. Já as distâncias entre do nó P-N, P-S e das faces n-s é Δy . Este método realiza a integração das equações governantes do problema físico sobre um volume de controle para produzir uma equação discretizada em seu ponto nodal P que são calculadas no centro da célula de controle, de acordo com as condições de contorno do problema (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Portanto, realiza-se a discretização de todos os volumes de controle e obtêm-se as equações algébricas aproximadas para cada elemento da malha. As equações aproximadas por volumes finitos podem ser obtidas realizando o balanço da propriedade em questão do volume elementar ou integrando sobre o volume elementar, no espaço e no tempo, as equações na forma conservativa (MALISKA, 2004).

4. SOLUÇÃO NUMÉRICA

Atualmente, os métodos numéricos estão sendo aplicados aos mais variados problemas de engenharia e física, por mérito do elevado grau de desenvolvimento dos computadores, da alta velocidade de processamento e de expressiva capacidade de armazenamento. Em consequência dessa disponibilidade computacional, o desenvolvimento de algoritmos e de softwares tem recebido a atenção dos analistas numéricos e de engenheiros, aumentando o número de pesquisadores e de usuários da metodologia (MALISKA, 2004).

A Dinâmica de Fluido Computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) é uma área que estuda métodos computacionais para simulação de fenômenos que envolvem fluidos em movimento com ou sem trocas de calor (FORTUNA, 2000). Os softwares de CFD são exemplos de tendências promissoras para a solução de problemas, abordando escoamentos de fluidos, transferência de calor, entre outros fenômenos associados. Dentre as vantagens de se utilizar os softwares CFD pode-se destacar a redução substancial de tempo e custo em novos projetos, capacidade em estudar, bem como pesquisar sistemas onde as análises experimentais são complexas ou impraticáveis, além de dispor de um nível praticamente ilimitado de detalhamento dos resultados (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Assim, os pacotes de CFD incluem cada vez mais interfaces sofisticadas e interativas para que os usuários possam inserir os parâmetros referentes ao problema a ser resolvido e analisar os resultados obtidos. De acordo com Versteeg; Malalasekera (2007), a solução numérica pode ser dividida em três etapas: o pré-processamento, processamento e pós-processamento.

O pré-processamento é uma etapa em que o usuário define a geometria, domínio computacional, realiza-se a geração da malha, seleciona-se os fenômenos físicos e químicos que serão modelados, além de aplicar as condições de contorno adequadas. O processamento é a fase onde se decide o método que será utilizado para resolver o conjunto de equações diferenciais como, por exemplo, Método dos Volumes Finitos (MVF), Método das Diferenças Finitas (MDF) e Método dos Elementos Finitos (MEF), além de ser a etapa onde soluciona-se o problema. Por fim, a etapa do pós-processamento é onde os resultados obtidos são apresentados, como plotar os vetores velocidade, campo de pressão, além do processamento dos dados obtidos através de gráficos. Na Fig. 4.1 é possível observar esquematicamente as etapas da simulação numérica. Destaca-se que as condições de contorno do problema proposto nesta dissertação estão apresentadas detalhadamente no decorrer do texto.

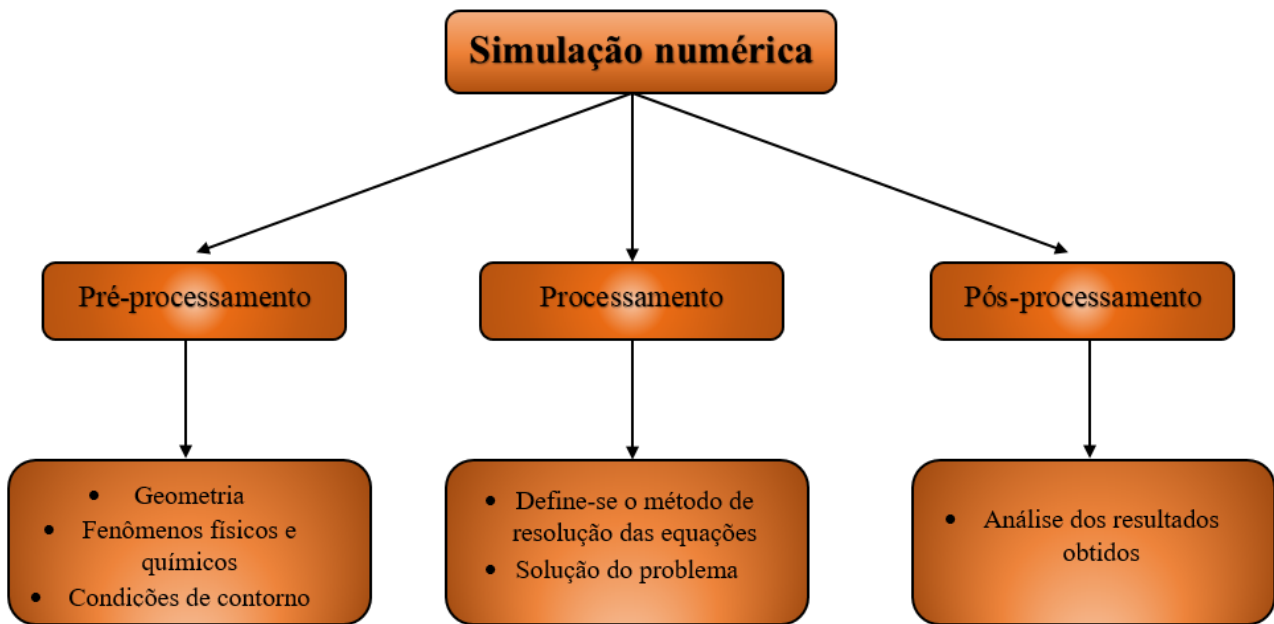


Figura 4.1 – Esquema das etapas do processo de simulação.

4.1. Modelagem Computacional no OpenFOAM

O OpenFOAM é um software de CFD, livre, em código aberto em linguagem C++. O programa não possui interface gráfica e trata-se de uma biblioteca de rotinas computacionais pré-compiladas como, por exemplo, as bibliotecas de modelos físicos são fornecidas como código fonte para que os usuários possam adicionar seus próprios modelos, sendo assim um extenso recurso para simular problemas de mecânica dos fluidos e diversos problemas de engenharia. Portanto, o OpenFOAM é constituído de um grande conjunto de aplicativos pré-compilados e o usuário tem a liberdade de criar seus próprios aplicativos ou modificar os já existentes (OpenFOAM User Guide, 2017).

Para resolver o problema de LRI proposto neste trabalho, criou-se um diretório denominado de *infusão*, adicionando três diretórios principais do software OpenFOAM, sendo eles: o *0*, o *constant* e o *system*, como pode ser visualizado na Fig. 4.2. Além disso, criou-se o diretório *grid* especialmente para instituir o domínio computacional discretizado que deve estar no formato *.msh* e, após, importar para o OpenFOAM. Convém salientar que a malha no OpenFOAM (*default*) fica no diretório *constant/polymesh*.

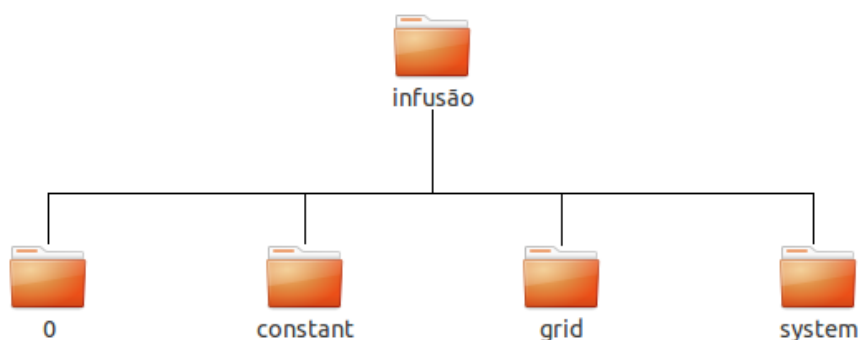


Figura 4.2 – Estrutura do software OpenFOAM.

Para a realização das simulações é necessário definir nos diretórios mostrados na Fig. 4.2 informações como permeabilidade do meio fibroso, porosidade, viscosidade dos fluidos, pressão de injeção, massa específica e condições de contorno do problema.

O diretório *0* é onde realiza-se a definição das condições de contorno do problema proposto. No diretório *constant*, são armazenadas as informações completas da malha, além das propriedades físicas do problema. No diretório *system* estão todos os arquivos de configuração de simulação como, por exemplo, tempo inicial e final, parâmetros de armazenamento de dados, informações para discretização das equações que modelam o problema em estudo, além da definição do *solver* a ser utilizado.

Para obter uma estabilidade nas soluções das equações utilizadas para solucionar o problema de LRI, foram utilizadas as funções de interpolações expressas na Tab. 1:

Tabela 1 – Funções de interpolações utilizadas nas simulações.

Termo	Função
Discretização	
Temporal	Euler
Divergente	Gauss linear Upwind
Gradiente	Gauss linear
Laplaciano	Gauss linear corrected

O algoritmo para resolver o problema de acoplamento de pressão-velocidade foi o PIMPLE, este que é uma combinação dos algoritmos SIMPLE e PISO.

Já para controle do avanço no tempo, foi utilizado o *Courant Number* (COURANT et al., 1928), expresso por:

$$C_o = \frac{v\Delta t}{\Delta x} \quad (4.1)$$

onde v é a velocidade, Δx é o comprimento característico do volume e Δt é o passo de tempo. A Eq. (4.1), controla Δt para que a solução se mantenha estável, sem ultrapassar o C_o máximo definido na simulação, que neste caso foi de 0,5. Vale destacar, que um Δt máximo e um Δt mínimo também são definidos e foram estipulados com o valor de 1×10^{-3} s e 1×10^{-6} s, respectivamente.

Para solucionar o problema e dar início à simulação é necessário escolher um solver, que neste caso foi o *interFoam*. Este solver é específico para resolver problemas de escoamento multifásico de dois fluidos imiscíveis, utilizando o método do VOF (OpenFOAM User Guide, 2017).

Assim, quando o solver *interFoam* é executado, pode-se acompanhar o andamento da simulação na janela de visualização como mostra a Fig. 4.3.

```
carla@carla-Inspiron-3443: ~/Infusao
PIMPLE: iteration 1
smoothSolver: Solving for alpha.resin, Initial residual = 0.132064, Final residual = 3.80763e-16, No Iterations 2
Phase-1 volume fraction = -5.27833e-08 Min(alpha.resin) = -0.00213993 Max(alpha.resin) = 1
MULES: Correcting alpha.resin
MULES: Correcting alpha.resin
Phase-1 volume fraction = -5.27833e-08 Min(alpha.resin) = -0.00213993 Max(alpha.resin) = 1
DICPCG: Solving for p_rgh, Initial residual = 0.881426, Final residual = 0.0396941, No Iterations 5
time step continuity errors : sum local = 4.3098e-07, global = 5.79767e-08, cumulative = -0.285701
DICPCG: Solving for p_rgh, Initial residual = 0.172304, Final residual = 0.00814325, No Iterations 119
time step continuity errors : sum local = 2.534e-08, global = 2.68455e-10, cumulative = -0.285701
DICPCG: Solving for p_rgh, Initial residual = 0.0455768, Final residual = 9.20415e-08, No Iterations 305
time step continuity errors : sum local = 3.29374e-13, global = 8.87458e-16, cumulative = -0.285701
ExecutionTime = 1.06 s ClockTime = 2 s

Courant Number mean: 1.82406e-06 max: 0.000629055
Interface Courant Number mean: 0 max: 0
deltaT = 2.56958e-07
Time = 0.1000009222
```

Figura 4.3 – Visualização do progresso da simulação numérica no OpenFOAM.

Na Fig. 4.3 é possível que o usuário monitore a convergência da solução das equações, os resíduos iniciais e finais, o tempo e o ΔT , bem como o número de iteração e a fração volumétrica do molde que foi preenchida pela resina em dado momento.

4.2. Domínio Computacional

O estudo numérico deste trabalho é dedicado aos problemas de LRI em moldes retilíneos constituídos de compósitos espessos em um modelo 2D.

A geometria do problema e as condições de contorno estão de acordo com a Fig. 4.4 a), onde, P é a pressão, u e v são as velocidades, f é a fração volumétrica e n a direção normal à superfície. Para o escoamento, são especificadas as condições de não deslizamento ($u = v = 0$) nas

paredes, pressão prescrita ($P = P_0$) na secção de entrada (*inlet* na Fig. 4.4 a)) e pressão prescrita nula na saída (*outlet* na Fig. 4.4 a)). Para a fração volumétrica da resina, é especificado $f = 1$ na secção de entrada e derivada nula ($df/dn = 0$) nas demais condições de contorno. Na Fig. 4.4 a) e b) é possível observar a linha de frente de escoamento da resina dentro do molde, onde a cor cinza escuro, representa o escoamento através da espessura e a cor cinza claro, quando o escoamento está próximo de formar a linha de frente paralela à saída do molde.

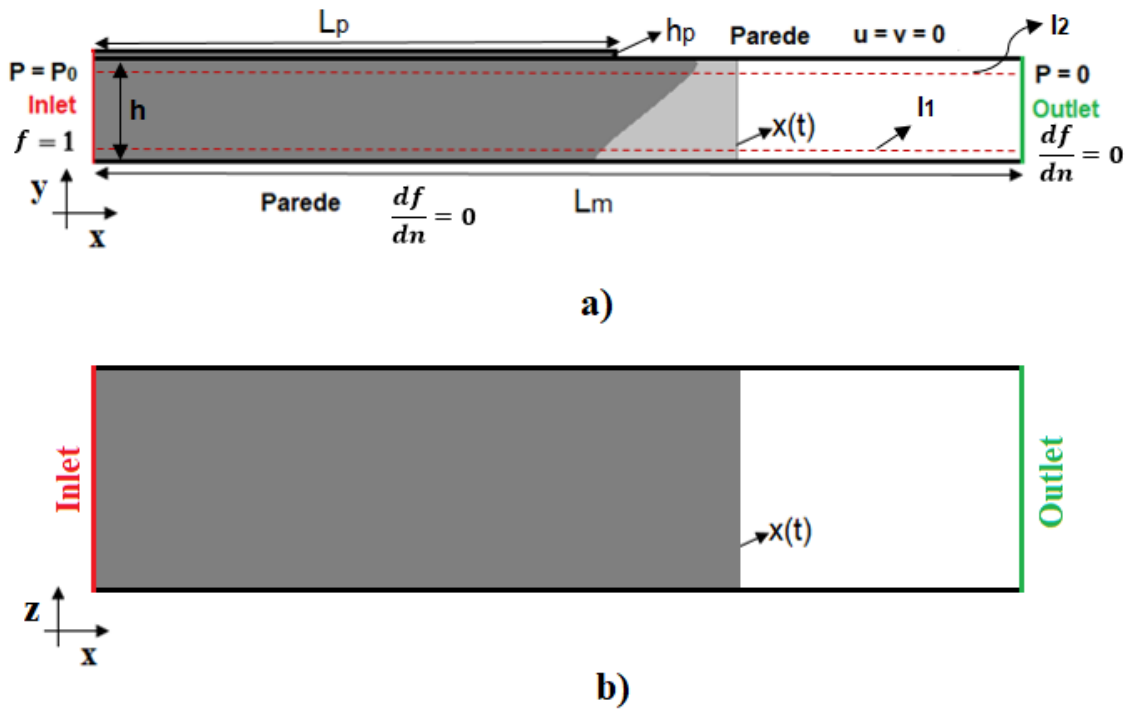


Figura 4.4 – Domínio computacional e condições de contorno; a) vista lateral de um molde contendo malha de fluxo. b) Visualização superior do molde em um escoamento retilíneo com a linha de frente de escoamento paralela à saída do molde.

O comprimento do molde foi considerado grande o suficiente para que a linha de frente de escoamento estivesse vertical antes da saída do molde e corresponde a variável L_m na (Fig. 4.4 a)). A espessura do meio poroso é expressa na (Fig. 4.4 a)) pela variável h e foi definida nas simulações com o valor de 0,012 m, 0,0094 m, 0,0069 m, 0,0043 m e 0,0027 m. A malha de fluxo (L_p na Fig. 4.4 a)) é considerada nas simulações numéricas como um canal aberto, pois possui uma porosidade muito elevada. As dimensões da malha de fluxo estão destacadas na imagem, cuja espessura $h_p = 0,0014$ m e o comprimento de L_p , sendo um valor variável nas simulações.

Como o escoamento da resina preenche as fibras mais rapidamente através da malha de fluxo, ou seja, mais rápido na parte superior do molde do que na parte inferior, colocou-se duas linhas de monitoramento (l_1 e l_2 , na Fig. 4.4 a)) para acompanhar a posição da resina nos dois locais. Considerou-se que a linha de frente de escoamento estava com a linha de frente paralela à saída do

domínio poroso quando encontrou-se uma diferença entre a posição da resina sobre a linha superior em relação à linha inferior $\leq 0,00151$ m, valor disponibilizado pelo LaPol. As posições das linhas de monitoramento paralelas ao eixo x para as diferentes espessuras do meio poroso, podem ser analisadas na Tab. 2.

Tabela 2 – Posição das linhas de monitoramento.		
Espessura do meio poroso [m]	Coordenada em y Linha 1 (l_1) [m]	Coordenada em y Linha 2 (l_2) [m]
0,0120	0,0040	0,0115
0,0094	0,0025	0,0091
0,0069	0,0023	0,0066
0,0043	0,0014	0,0041
0,0027	0,0009	0,0025

A posição $x(t)$ expressa na Fig. 4.4 a) e b), obtida por meio das linhas de monitoramento (l_1 e l_2) é a posição da resina quando forma-se a linha de frente do escoamento paralela à saída do molde e indica o comprimento ideal do molde para que a resina preencha o reforço fibroso por completo em um menor tempo possível.

5. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados numéricos obtidos com o software OpenFOAM para os problemas de LRI propostos neste trabalho. Inicialmente, realiza-se o teste de convergência de solução independente, a validação do modelo numérico e procura-se estimar o valor da permeabilidade transversal (K_{zz}) de um experimento moldado pela técnica LRI contendo uma pré-forma de 23 camadas. Destaca-se que os resultados experimentais apresentados nesta dissertação, bem como as espessuras do compósito foram disponibilizados pelo Laboratório de Materiais Poliméricos – LaPol da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e correspondem a experimentos que utilizam no processo de moldagem, o tecido de aramida (Kevlar). Nesta etapa também analisa-se o escoamento da resina dentro do molde, onde varia-se os valores da permeabilidade planar (K_{xx}) e a transversal (K_{zz}) mantendo constante a proporção K_{xx}/K_{zz} . Por fim, avalia-se o comprimento da geometria a partir do comprimento da malha de fluxo e procura-se generalizar o estudo para que se obtenha o comprimento da malha de fluxo pra qualquer que seja o comprimento do molde desejado.

5.1. Teste de convergência de solução independente de malha

Para identificar a malha ideal para solucionar o problema de LRI proposto, realizou-se um teste de convergência de solução independência de malha no modelo em que a espessura do meio poroso obtém o valor igual a 0,012 m e uma malha de fluxo de 0,14 m de comprimento. As propriedades utilizadas nas simulações para obter a solução independente podem ser observadas na Tab. 3 e foram disponibilizadas pelo LaPol.

Tabela 3 – Valores das propriedades utilizadas nas simulações do teste de convergência de solução independência de malha.

$K_{xx} = K_{yy} \text{ [m}^2\text{]}$	$K_{zz} \text{ [m}^2\text{]}$	$\mu \text{ [Pa s]}$	$\varepsilon \text{ [}\times 10^{-2}\text{]}$	$P_0 \text{ [}\times 10^5 \text{ Pa]}$
$2,5 \times 10^{-11}$	$3,78 \times 10^{-13}$	0,3	40	1

Para o estudo de convergência de solução independente de malha realizado, utilizou-se o tempo final de preenchimento do molde como parâmetro de comparação e considerou-se que a malha ideal seria obtida quando a diferença entre o tempo final de infiltração, entre dois refinamentos sucessivos, fosse inferior a 0,5%. Na Tab. 4 pode-se observar que foram necessários apenas quatro casos para identificar a malha ideal.

A diferença relativa entre as soluções obtidas no teste de solução independente de malha é calculada pela equação:

$$Diferença = 100 \left(\frac{T_f^{i+1} - T_f^i}{T_f^{i+1}} \right) \quad (5.1)$$

onde T_f é o tempo final de injeção e i o caso.

Tabela 4 – Teste de convergência de solução independente de malha.

Malha	Nº de volumes	Tempo final [s]	Diferença
1	4641	871	-
2	10707	924	5,74%
3	14661	937	1,39%
4	17262	943	0,64%
5	21696	947	0,42%

A malha que se obteve a partir de $Diferença < 0,5\%$ foi a malha 5 (Tab. 4), assim, a malha utilizada nas simulações em que a espessura do meio poroso é 0,012 m contém 17262 volumes e é constituída de elementos quadrangulares. Desta maneira, com o teste de convergência de solução independente de malha obteve-se o comprimento ideal do elemento da malha e, assim, o número de volumes modificou-se de acordo com o domínio computacional, ou seja, quando variou-se a espessura do compósito em 0,0094 m, 0,0069 m, 0,0043 m e 0,0027 m. Destaca-se que para os domínios computacionais com espessuras de 0,0043 m e 0,0027 m foi necessário refinar a malha, ou seja, diminuir o tamanho do elemento no local onde há meio poroso por questões de convergência das soluções numéricas.

Na Fig. 5.1, pode-se observar as curvas da posição da resina em função do tempo referente às cinco malhas simuladas no teste de solução independente de malha. A geometria utilizada nas simulações corresponde a um modelo 2D e foi construída no software GMSH, bem como a geração da malha (Fig. 5.2). Convém destacar que refinou-se a malha na direção y , apenas no canal aberto (malha de fluxo), pois possui uma espessura pequena, necessitando que haja um maior número de volumes nessa direção para acompanhar o escoamento da resina.

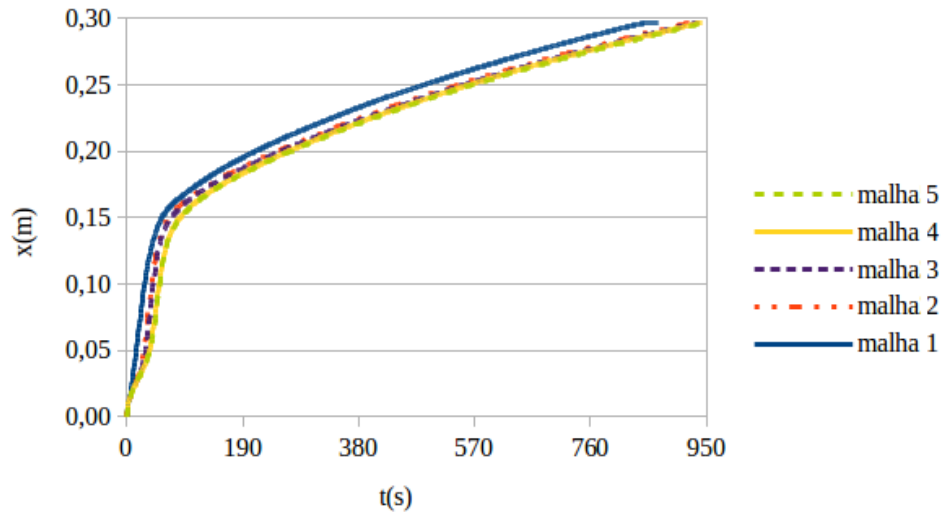


Figura 5.1 – Curvas do escoamento da resina para às cinco malhas utilizadas no teste de solução independente de malha.

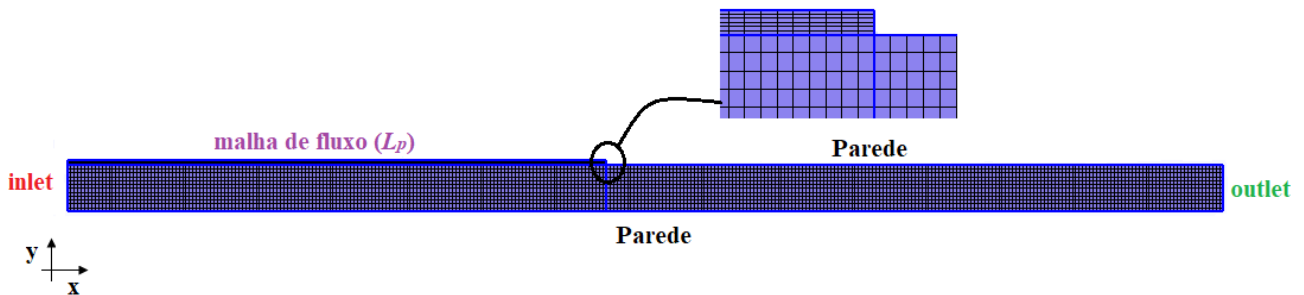


Figura 5.2 – Geometria e malha construídas no GMSH.

5.2. Validação do modelo numérico e investigação do valor da permeabilidade transversal (K_{zz})

Para validar o modelo numérico proposto neste estudo, comparou-se os resultados numéricos obtidos nas simulações com os dados experimentais fornecidos pelo LaPol. Um dos experimentos realizado pelo LaPol possui 4 camadas de aramida (Kevlar), ou seja, o meio fibroso contém uma espessura de 0,0023 m. As demais propriedades extraídas no experimento como, por exemplo, fração volumétrica da pré-forma, permeabilidade planar ($K_{xx} = K_{yy}$), viscosidade da resina, porosidade e pressão de injeção podem ser visualizadas na Tab. 5.

Tabela 5 – Valores das propriedades experimentais.

V_f [%]	$K_{xx} = K_{zz}$ [m ²]	μ [Pa s]	ε [$\times 10^{-2}$]	P_0 [$\times 10^5$ Pa]
60	$9,13 \times 10^{-11}$	0,3	40	1

O molde utilizado no experimento contém 0,3 m de comprimento e uma malha de fluxo com aproximadamente 0,01 m de comprimento foi disposta na superfície superior da pré-forma, como pode ser observado na Fig. 5.3. A posição da resina dentro do molde em função do tempo referente aos dados experimentais e aos resultados numéricos pode ser observada na Fig. 5.4.

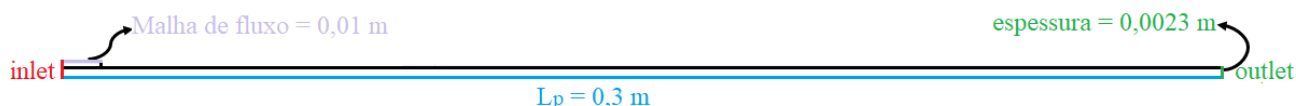


Figura 5.3 – Geometria e dimensões do molde contendo 4 camadas.

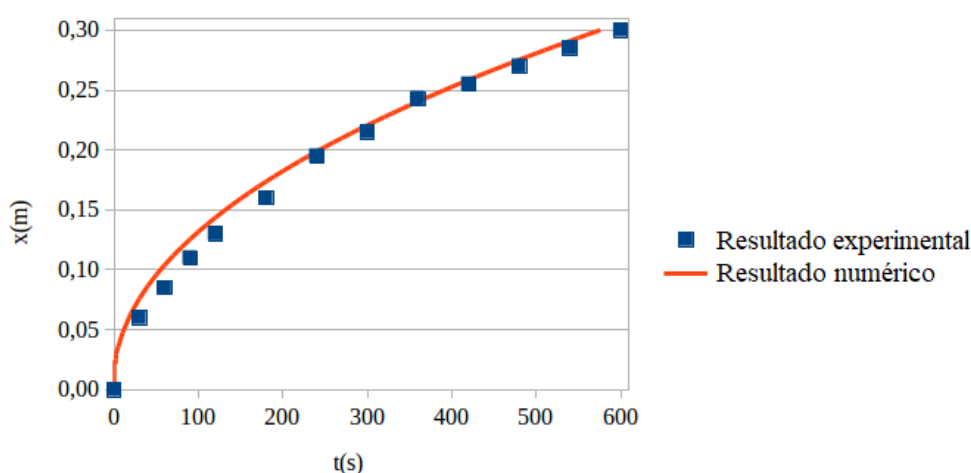


Figura 5.4 – Validação numérica em um caso de 4 camadas de aramida.

Pode-se observar na Fig. 5.4 que a curva do resultado numérico é muito próxima aos dados experimentais, havendo um percentual de 4,02% de diferença entre os tempos final de infiltração numérico e experimental. Dessa forma, com esse resultado pode-se inferir que o modelo numérico proposto foi validado para realizar as simulações numéricas referentes aos problemas de LRI propostos nesta dissertação.

Após validar o modelo numérico, uma análise da relação K_{xx}/K_{zz} em um modelo de 23 camadas foi realizada para estimar o valor da permeabilidade transversal (K_{zz}). Nesse sentido, um experimento de 23 camadas de aramida e com a espessura do meio poroso de 0,012 m também foi realizado pelo LaPol. O molde desse experimento obteve um comprimento de 0,24 m e, na superfície superior da pré-forma, uma malha de fluxo de aproximadamente $0,035 \pm 0,005$ m de comprimento. Os valores das propriedades obtidas nesse experimento estão de acordo com a Tab. 5, exceto o valor da permeabilidade planar, que, neste caso, foi medida com o valor de $5,48 \times 10^{-11} \text{ m}^2$.

Como nas placas mais espessas a influência da permeabilidade transversal torna-se mais significativa do que nas placas finas e nos ensaios experimentais realizados pelo LaPol foi calculado

apenas o valor da permeabilidade K_{xx} , procurou-se obter a relação K_{xx}/K_{zz} em que as soluções numéricas fossem o mais próximo possível dos resultados experimentais, a partir da busca exaustiva pela relação K_{xx}/K_{zz} . Dessa forma, foram realizadas cinco simulações com a relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 10, 25, 50, 75 e 100. Vale destacar que nas simulações numéricas utilizou-se uma malha de fluxo de 0,0375 m de comprimento e, como fator de comparação para identificar o K_{xx}/K_{zz} correto, inicialmente, utilizou-se o tempo final de infiltração do molde experimental.

Na Fig. 5.5 é possível observar o resultado da posição da resina em função do tempo referente ao resultado experimental, bem como as curvas das soluções numéricas para todas as relações de K_{xx}/K_{zz} simuladas.

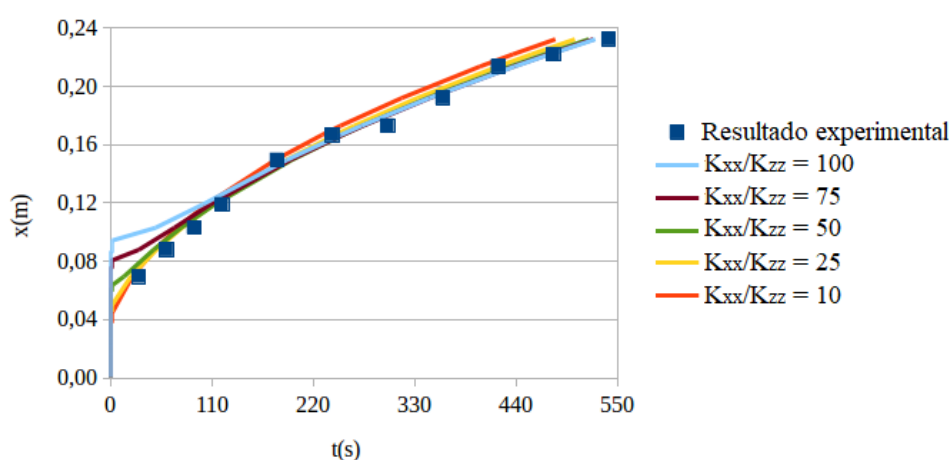


Figura 5.5 – Gráfico do escoamento da resina para diferentes relações K_{xx}/K_{zz} .

Na Tab. 6 pode-se observar a diferença entre o tempo final de infiltração dos resultados numéricos em comparação ao tempo final de preenchimento experimental.

Tabela 6 – Comparação entre os tempos finais de infiltração numérico e experimental.

Relação	Diferença
$K_{xx}/K_{zz} = 10$	9,53%
$K_{xx}/K_{zz} = 25$	6,83%
$K_{xx}/K_{zz} = 50$	4,01%
$K_{xx}/K_{zz} = 75$	3,09%
$K_{xx}/K_{zz} = 100$	1,64%

Pode-se analisar nos resultados expressos na Tab. 6 que a menor diferença entre os tempos finais de infiltração foi para a relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 100, na qual obteve-se uma diferença de 1,64%. Porém, se observarmos o início das curvas nas relações de K_{xx}/K_{zz} igual a 75 e 100 no

gráfico da Fig. 5.5, percebe-se que existe uma diferença significativa em relação à posição da resina em função do tempo aos dados experimentais, podendo ter ocorrido pela resistência do escoamento da resina tem de escoar na direção z . Outro fator que chama atenção se apresentou quando realizou-se a análise do valor de K_{zz} , pois, de acordo com o laboratório LaPol, o valor da permeabilidade transversal deveria ser aproximadamente de $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ para esse volume de fibra (V_f de 60%). Porém, se for observada a Tab. 7, em que estão expressos os valores de K_{zz} para cada relação de K_{xx}/K_{zz} , o valor da permeabilidade transversal nas relações de K_{xx}/K_{zz} igual a 75 e 100 estão na ordem de 10^{-13} , contrariando o esperado.

Assim, supõe-se que comparar apenas o tempo final de infiltração pode não ser a melhor opção para analisar e encontrar a relação K_{xx}/K_{zz} que expressa o valor da permeabilidade transversal para o caso de 23 camadas, pois o menor percentual de diferença entre o tempo final de infiltração foi para a relação igual a 100, porém as relações que estão mais perto do valor de K_{zz} referenciado pelo LaPol são as relações de K_{xx}/K_{zz} igual a 10, 25 e 50.

Tabela 7 – Valores das permeabilidades transversais para as diferentes relações K_{xx}/K_{zz} .

Relação	$K_{xx} [\text{m}^2]$	$K_{zz} [\text{m}^2]$
$K_{xx}/K_{zz} = 10$	$5,48 \times 10^{-11}$	$5,48 \times 10^{-12}$
$K_{xx}/K_{zz} = 25$	$5,48 \times 10^{-11}$	$2,19 \times 10^{-12}$
$K_{xx}/K_{zz} = 50$	$5,48 \times 10^{-11}$	$1,10 \times 10^{-12}$
$K_{xx}/K_{zz} = 75$	$5,48 \times 10^{-11}$	$7,30 \times 10^{-13}$
$K_{xx}/K_{zz} = 100$	$5,48 \times 10^{-11}$	$5,48 \times 10^{-13}$

Como alternativa para reproduzir o valor de K_{zz} a partir da relação K_{xx}/K_{zz} , pressupõe-se que o valor de K_{xx} calculado no experimento de quatro camadas (Tab. 5) pode ser o K_{xx} mais correto para ser utilizado nas simulações numéricas do caso 23 camadas, pois todas as propriedades referentes ao experimento são análogas, exceto a espessura do compósito e o comprimento da malha de fluxo que no experimento de quatro camadas foi utilizado um valor menor.

De acordo com esta hipótese e esperando aperfeiçoar os resultados, novas simulações foram realizadas utilizando o valor de K_{xx} do experimento de 4 camadas (Tab. 5) nas simulações de 23 camadas. Nesse sentido, foram simuladas as relações de K_{xx}/K_{zz} igual a 10, 25 e 50 com o cenário proposto. As curvas dos resultados numéricos obtidos podem ser observadas na Fig. 5.6.

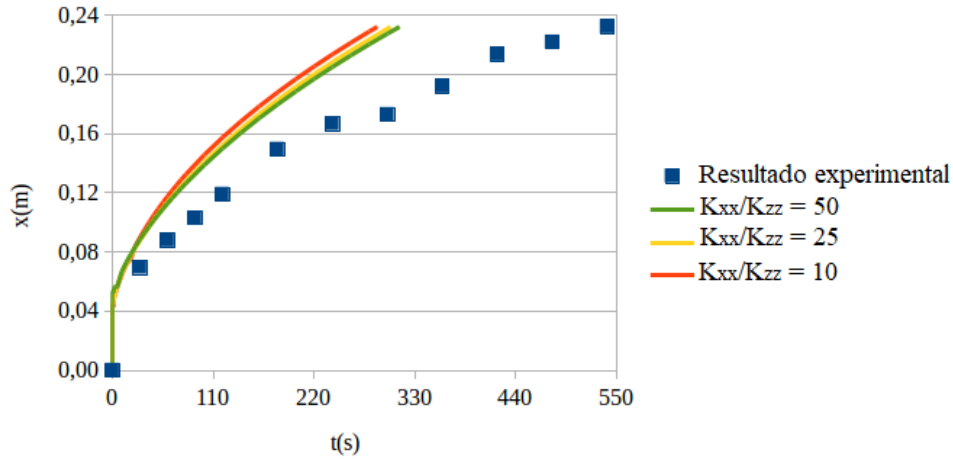


Figura 5.6 – Curvas do escoamento da resina com o K_{xx} de 4 camadas no experimento de 23 camadas.

Pode-se observar na Fig. 5.6 que os resultados numéricos para o caso de 23 camadas utilizando o K_{xx} de quatro camadas não demonstraram-se satisfatórios, pois as curvas dos resultados obtidos com as simulações são muito distintas dos dados experimentais. Esses resultados demonstram que o valor de K_{xx} extraído em um experimento em molde fino (0,0023 m), não corresponde ao K_{xx} de um experimento muito espesso (0,012 m), mesmo que o restante das propriedades seja mantido análogo.

Nesse sentido, decidiu-se analisar as curvas dos resultados expressos na Fig. 5.5 como um todo e não apenas o tempo final de infiltração. Dessa forma, calculou-se um resíduo utilizando a Eq. (5.2) (KINCAID; CHENEY, 2001):

$$Res\acute{d}uo = \sqrt{\sum (t_{num} - t_{exp})^2} \quad (5.2)$$

onde t_{num} é o tempo numérico em cada ponto e t_{exp} é o tempo experimental em cada posição da resina dentro do molde.

Para encontrar a curva correta, calculou-se o resíduo utilizando todos os pontos das curvas. Dessa forma, na Tab. 8, pode-se observar os valores dos resíduos calculados pra todas as relações de K_{xx}/K_{zz} simuladas.

Tabela 8 – Cálculo do resíduo para as diferentes relações K_{xx}/K_{zz} .

Relação	Cálculo do resíduo
$K_{xx}/K_{zz} = 10$	106,11
$K_{xx}/K_{zz} = 25$	67,61
$K_{xx}/K_{zz} = 50$	52,45
$K_{xx}/K_{zz} = 75$	65,14
$K_{xx}/K_{zz} = 100$	91,63

Na Tab. 8, pode-se analisar que a relação K_{xx}/K_{zz} que obteve o menor valor foi a relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 50. A curva da posição em função do tempo da relação K_{xx}/K_{zz} igual a 50 apresentada na Fig. 5.5 é muito próximo dos dados experimentais fornecida pelo laboratório, e o valor de K_{zz} nesta relação ($1,096 \times 10^{-12} \text{ m}^2$), expresso na Tab. 7, se aproxima do valor esperado, que é de $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ para o V_f simulado.

Logo, a comparação das curvas como um todo foi a forma mais adequada para identificar a relação de K_{xx}/K_{zz} , que transcrevia a curva das posições em função do tempo mais semelhante dos dados experimentais, bem como para definir o valor da permeabilidade transversal numérica mais próxima do K_{zz} real. Destaca-se que a investigação do valor da permeabilidade transversal foi realizada apenas para um molde de 23 camadas (espessura de 0,012 m), ou seja, não foram testadas espessuras de pré-formas mais finas, pois um molde mais espesso como o de 23 camadas pode ser um caso restritivo. Ou seja, pode haver uma espessura de pré-forma intermediária àquelas espessuras investigadas nessa seção (0,0023 m e 0,012 m), em que o K_{xx} de um experimento de compósito fino pode ser utilizado nas simulações ou até mesmo identificável como a permeabilidade planar mais adequada a ser utilizada.

5.3. Análise do escoamento da resina para diferentes valores de K_{xx} e K_{zz}

Para analisar o escoamento da resina dentro do molde e avaliar o comprimento da geometria do problema, ou seja, obter o comprimento ideal do molde para cada valor de L_p e relação K_{xx}/K_{zz} , inicialmente, investiga-se se a linha de frente do escoamento da resina forma-se na mesma posição $x(t)$ quando varia-se os valores das permeabilidades planares ($K_{xx} = K_{yy}$) e a transversal (K_{zz}), mantendo-se constante a proporção K_{xx}/K_{zz} .

Nesse sentido, foram realizadas cinco simulações, cujas propriedades utilizadas estão expressas na Tab. 9 e convém destacar que todas as informações, exceto os valores de permeabilidades, foram disponibilizadas pelo Lapol. A geometria utilizada nessas simulações

possui um comprimento de 0,3 m, a malha de fluxo contém 0,22 m de comprimento e o meio poroso uma espessura de 0,012 m.

Tabela 9 – Valores das propriedades utilizadas nas simulações.

Simulação	$K_{xx} = K_{yy}$ [m²]	K_{zz} [m²]	K_{xx}/K_{zz}	μ [Pa s]	ε [$\times 10^{-2}$]	P_0 [$\times 10^5$ Pa]
Caso 1	1×10^{-10}	1×10^{-11}	10	0,3	40	1
Caso 2	1×10^{-12}	1×10^{-13}	10	0,3	40	1
Caso 3	3×10^{-9}	3×10^{-10}	10	0,3	40	1
Caso 4	3×10^{-10}	3×10^{-11}	10	0,3	40	1
Caso 5	3×10^{-11}	3×10^{-12}	10	0,3	40	1

Para identificar a posição $x(t)$ em que forma-se a linha de frente de escoamento vertical, estabeleceu-se na simulação duas linhas (l_1 e l_2) de monitoramento paralelas ao eixo x e que passam pelas coordenadas no eixo y em 0,004 m e 0,0115 m, respectivamente. Considerou-se que a linha de frente de escoamento estava com a linha de frente de escoamento vertical antes da saída do domínio poroso quando obteve-se uma diferença entre a posição da resina sobre a linha superior em relação a linha inferior menor ou igual de 0,00151 m, valor este, disponibilizado pelo LaPol.

Na Tab. 10, é possível analisar a posição $x(t)$ em que formou-se a linha de frente de escoamento nos cinco casos simulados. Também, apresenta-se as diferenças das posições $x(t)$ das linhas l_1 e l_2 das simulações nos casos 2, 3, 4 e 5 em relação ao caso 1, bem como o tempo físico total de preenchimento do molde.

Tabela 10 – Posição da linha de frente da resina para diferentes valores de K_{xx} e K_{zz} .

Simulações	t [s] de	$x(t)$ [m]		Diferença	
	preenchimento	Linha 1 (l_1)	Linha 2 (l_2)	Linhas 1 (l_1)	Linhas 2 (l_2)
Caso 1	55	0,2669403	0,2684452	-	-
Caso 2	5320	0,2659146	0,2674183	0,38%	0,38%
Caso 3	4,6	0,2667169	0,268224	0,08%	0,08%
Caso 4	21	0,2670909	0,2686006	-0,06%	-0,06%
Caso 5	176	0,2731734	0,2746833	-2,34%	-2,32%

Observa-se na Tab. 10 que as posições $x(t)$ obtidas nas simulações numéricas foram muito próximas, evidenciando que é possível utilizar no processo de avaliação da geometria apenas valores de permeabilidades mais elevadas, onde o tempo de injeção e também o tempo de simulação são menores, desde que a relação K_{xx}/K_{zz} seja mantida. Isso também pode ser analisado na Fig. 5.7,

5.8 e 5.9, onde pode-se visualizar as curvas das posições da resina em função do tempo para todos os casos.

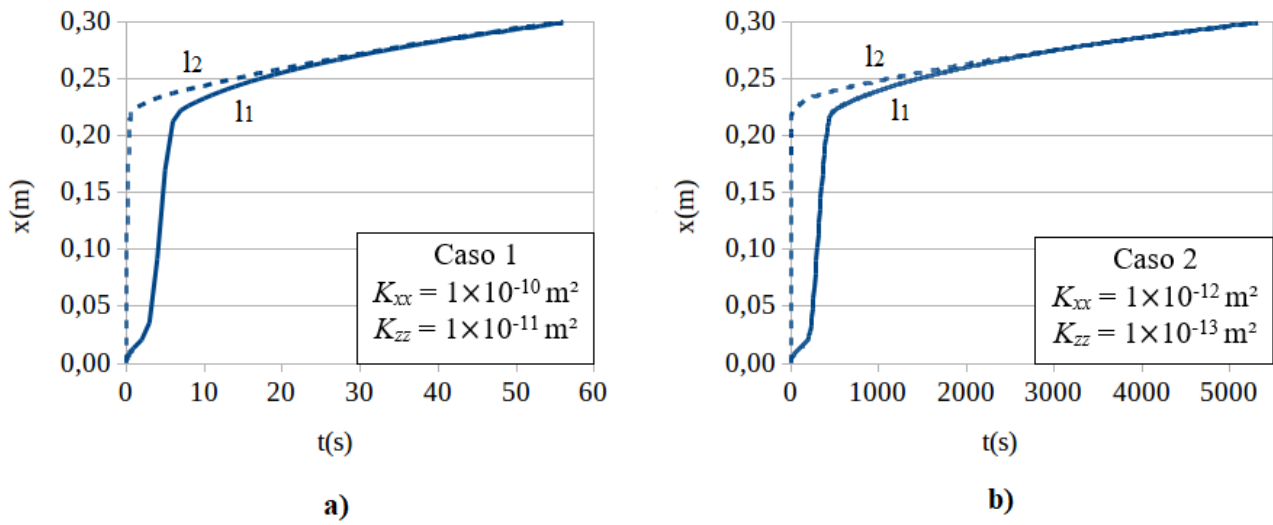


Figura 5.7 – Posição da resina em função do tempo das linhas l_1 (linha contínua) e l_2 (linha tracejada); a) no caso 1. b) no caso 2.

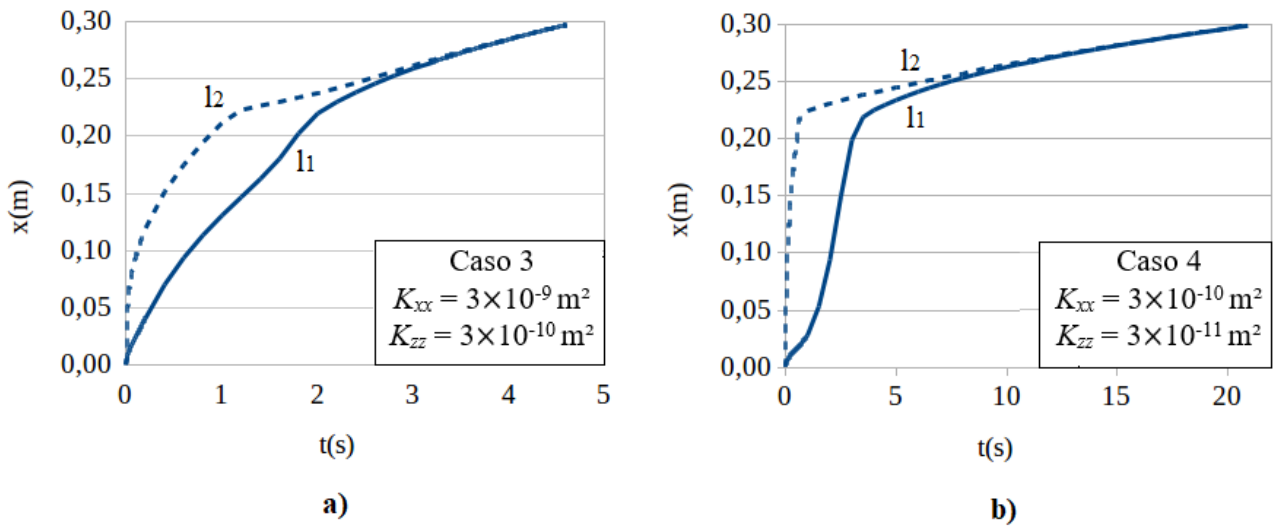


Figura 5.8 – Curvas do escoamento da resina nas linhas l_1 e l_2 ; a) no caso 3. b) no caso 4.

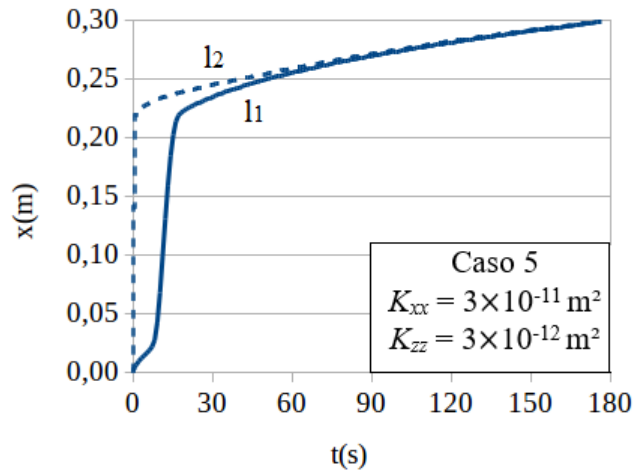


Figura 5.9 – Curvas do escoamento da resina nas linhas l_1 e l_2 no caso 5.

Também pode-se observar na Tab. 10 que o caso em que obteve-se o maior tempo de preenchimento físico do molde foi o caso 2 que necessitou de 5320 s para impregnar todo o meio poroso. Além disso, a simulação do caso 3 obteve um tempo de preenchimento do molde e computacional muito menor do que os outros casos expressos na Tab. 10, corroborando ainda mais para a vantagem de utilizar os valores de permeabilidades maiores nas simulações.

Vale destacar que as curvas do escoamento da resina (posição em função do tempo) não necessariamente são análogas como pode-se observar nos gráficos das Figs. 5.7, 5.8 e 5.9 devido à diferença nos valores das permeabilidades. Porém, a fonte de interesse nesse estudo é exatamente a posição $x(t)$ em que forma-se a linha de frente de escoamento vertical para que realize-se a avaliação do comprimento da geometria na próxima etapa do trabalho.

Nas Figs. 5.10 e 5.11 é possível visualizar o escoamento da resina dentro do molde na simulação do caso 1 e 3, onde a cor vermelha representa a resina e a azul, o ar.

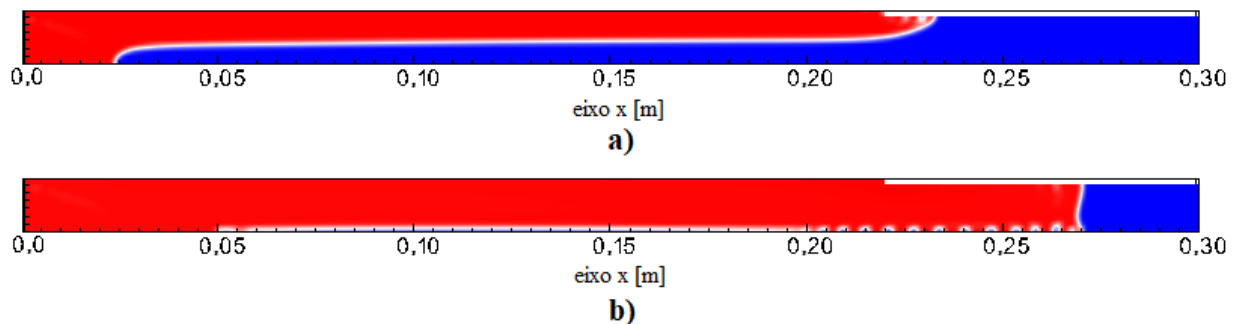


Figura 5.10 – Escoamento da resina dentro do molde no caso 1; a) no tempo de 3 s. b) no tempo de 29 s.

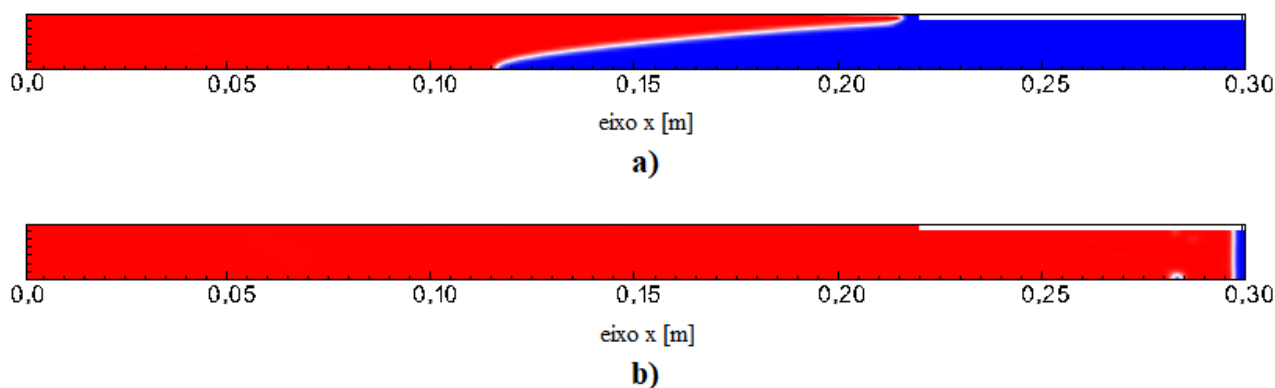


Figura 5.11 – Escoamento da resina dentro do molde no caso 3; a) no tempo de 1 s. b) no tempo de 4,4 s.

Nas Figs. 5.10 e 5.11 fica claro como a resina escoar mais rápido no local em que possui malha de fluxo, pois de acordo com Nunes (2018), a malha acelera o escoamento da resina através e ao longo do laminado durante o processo de infusão, pois a resina sempre flui no caminho de menor resistência. O perfil da resina nas Figs. 5.10 e 5.11 também está de acordo com as observações de Sun et al. (1998) em seus estudos, onde destacam que é possível notar que existe uma distância clara de atraso entre as frentes de escoamento superior e inferior, porque existe uma diferença entre a permeabilidade da pré-forma fibrosa e a malha de fluxo.

Também pode-se observar na Fig. 5.10, a presença de diversas bolhas de ar aprisionadas na parte inferior do molde e na Fig. 5.11, pode-se notar apenas uma bolha de ar que tende a se dissipar de acordo com que a resina escoar através da pré-forma. Destaca-se que as bolhas de ar supracitadas nos casos simulados, não dificultaram o cálculo da posição da resina sobre as linhas l_1 e l_2 .

5.4. Avaliação da geometria

Para que o preenchimento da pré-forma possa ser o mais uniforme possível, torna-se necessário obter o comprimento ideal da malha de fluxo (L_p), ou seja, que a malha de fluxo não seja pequena ao ponto da resina entrar em estágio de gelificação antes de preencher todos os tecidos de fibras, nem grande demais que proporcione o desperdício da resina caso ela chegue na saída do molde primeiro pela superfície superior sem estar com a linha de frente vertical. Nessa última, os resultados poderiam ser a elevação do tempo de preenchimento total da pré-forma, uma vez que a resina continuará escoando até que as fibras da parte inferior do molde sejam impregnadas e o aumento nos custos do processo de moldagem.

Este estágio da pesquisa está direcionado em determinar a posição $x(t)$ em que a linha de frente de escoamento torna-se vertical e, assim, esteja paralela à saída do molde. A posição $x(t)$ adquirida nas simulações numéricas na sequência deste estudo indicará o comprimento ideal do

molde (L_m) que pode possibilitar que não ocorram os transtornos supracitados durante o processo de moldagem. Nesse sentido, para realizar a avaliação da geometria e obter o comprimento ideal da malha de fluxo, estabeleceu-se como limitação que os valores da permeabilidade planar (K_{xx}) e a permeabilidade transversal (K_{zz}) tivessem como valores: $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ e $1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, esta que é parâmetro de entrada nas simulações. Também definiu-se que a relação de K_{xx}/K_{zz} tivesse como valores: 0,1, 1, 10, 100 e 1000. Assim, na Tab. 11 estão expressas todas as possibilidades de casos de K_{xx} e K_{zz} entre esses parâmetros.

Tabela 11 – Possibilidades de valores de K_{xx} e K_{zz} .

$K_{xx} [\text{m}^2]$	$K_{zz} [\text{m}^2]$	K_{xx}/K_{zz}
1×10^{-10}	1×10^{-10}	1
1×10^{-10}	1×10^{-11}	10
1×10^{-10}	1×10^{-12}	100
1×10^{-10}	1×10^{-13}	1000
1×10^{-11}	1×10^{-10}	0,1
1×10^{-11}	1×10^{-11}	1
1×10^{-11}	1×10^{-12}	10
1×10^{-11}	1×10^{-13}	100
1×10^{-12}	1×10^{-11}	0,1
1×10^{-12}	1×10^{-12}	1
1×10^{-12}	1×10^{-13}	10
1×10^{-13}	1×10^{-12}	0,1
1×10^{-13}	1×10^{-13}	1

Como pode ser observado na Tab. 11, existem 13 possibilidades de valores para K_{xx} e K_{zz} para as restrições estabelecidas nesta etapa do estudo. Assim como anteriormente (seção 5.3), mostrou-se que a linha de frente de escoamento forma-se na mesma posição $x(t)$, desde que mantenha-se análoga às relações K_{xx}/K_{zz} , foram simulados as relações igual a 0,1, 1, 10, 100 e 1000, onde os casos possuem os valores de permeabilidades K_{xx} e K_{zz} mais elevados (Tab. 11) para que o tempo computacional dedicado às simulações possa ser minimizado. Além dos valores de permeabilidades da Tab. 11, também são necessários outros valores de entrada na simulação como, por exemplo, pressão de injeção, viscosidade da resina e porosidade do meio fibroso. Essas informações estão de acordo com a Tab. 5.

Nesta etapa do estudo, realizou-se um total de 125 simulações, em que investigou-se as cinco relações K_{xx}/K_{zz} destacadas na Tab. 12, variando-se o comprimento da malha de fluxo (L_p) em 0,03 m, 0,06 m, 0,09 m, 0,12 m e 0,15 m. Também alterou-se a espessura do meio poroso em 0,012 m, 0,0094 m, 0,0069 m, 0,0043 m e 0,0027 m.

Tabela 12 – Valores de K_{xx} e K_{zz} utilizados nas simulações.

$K_{xx} [\text{m}^2]$	$K_{zz} [\text{m}^2]$	K_{xx}/K_{zz}
1×10^{-11}	1×10^{-10}	0,1
1×10^{-10}	1×10^{-10}	1
1×10^{-10}	1×10^{-11}	10
1×10^{-10}	1×10^{-12}	100
1×10^{-10}	1×10^{-13}	1000

Na sequência do texto, serão apresentados os gráficos da posição da resina dentro do molde em função do tempo para todas as relações K_{xx}/K_{zz} investigadas. Como o interesse deste estudo está direcionado na posição $x(t)$ em que forma-se a linha de frente de escoamento paralela à saída do molde e não no tempo de preenchimento da pré-forma, adimensionalizou-se o tempo pela Eq. (5.3).

$$\tau = \left(\frac{t}{x(t)^2 \cdot \mu / P \cdot K_{xx}} \right) \cdot 1000 \quad (5.3)$$

onde, τ é o tempo adimensional e o $x(t)$ é a posição que se forma a linha de frente de escoamento no maior comprimento de L_p no caso simulado

5.4.1. Relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 0,1

A primeira relação K_{xx}/K_{zz} simulada foi a de 0,1 com uma pré-forma contendo uma espessura de 0,0027 m. Na Fig. 5.12 é possível visualizar as curvas da posição da resina em função do tempo adimensional para cada comprimento de L_p simulado. A posição $x(\tau)$ em que forma-se a linha de frente de escoamento paralela à saída do molde indica o comprimento ideal da peça para que a resina possa preencher toda a pré-forma sem desperdiçar resina e em um menor tempo possível.

Por exemplo, para o L_p de 0,03 m de comprimento, de acordo com os resultados numéricos, a linha de frente de escoamento forma-se na posição em relação ao eixo x de 0,03022966 m, ou seja, o comprimento ideal do molde seria de 0,03022966 m.

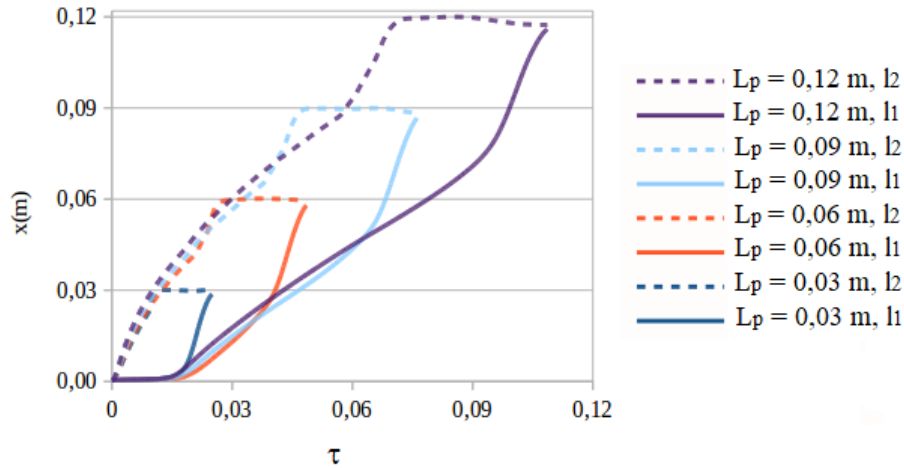


Figura 5.12 – Gráfico do escoamento da resina com o meio poroso de 0,0027 m de espessura.

Também é possível observar no gráfico da Fig. 5.12 que a posição $x(\tau)$, ou seja, o comprimento do molde torna-se maior de acordo com que se aumenta o comprimento da malha de fluxo, como esperado. Porém, para a malha de fluxo de 0,15 m de comprimento, houve dificuldade para obter o $x(\tau)$, pois apareceram regiões com vazios (Fig. 5.13) que podem ter propiciado que as posições $x(\tau)$ nas linhas de monitoramento l_1 e l_2 não fossem devidamente calculadas.

Nesse caso, observa-se que a região vazia na parte inferior do molde que pode ser visualizada na Fig. 5.13 a), desapareceu ao longo do tempo, porém, ainda assim, regiões com vazios podem ser vistas na Fig. 5.13 b).

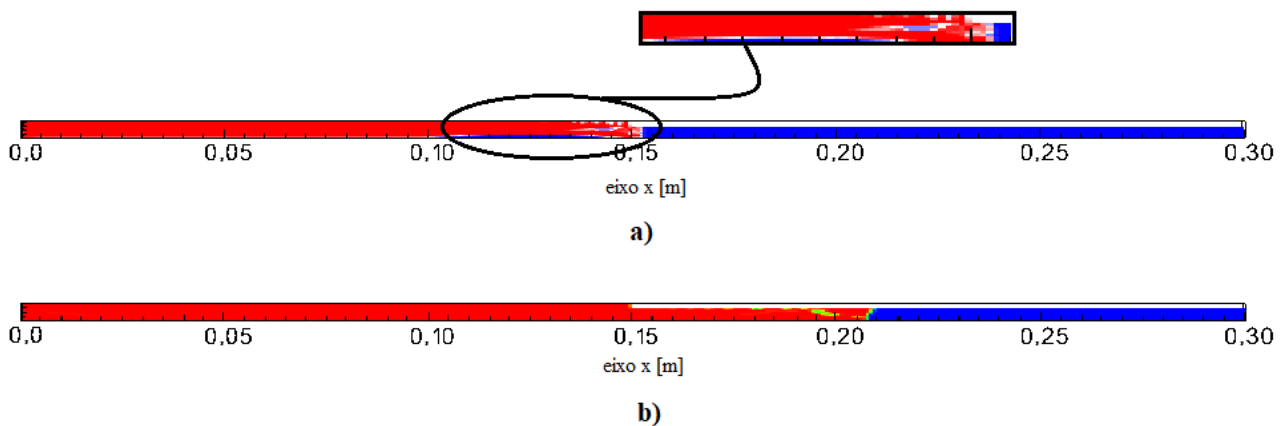


Figura 5.13 – Escoamento da resina dentro do molde com L_p de 0,15 m de comprimento; a) no tempo de 1 s. b) no tempo de 25 s.

Na Fig. 5.14 estão expressas as curvas dos resultados das simulações para a espessura do meio poroso de 0,0043 m.

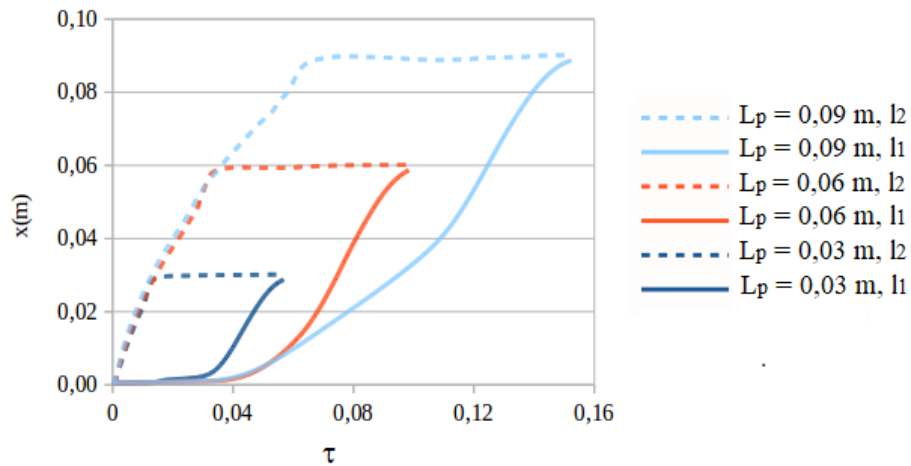


Figura 5.14 – Gráfico do escoamento da resina com o meio poroso de 0,0043 m de espessura.

Nesse caso, também houve problema para calcular a posição da resina nas linhas l_1 e l_2 , porém, para as malhas de fluxo com o comprimento de 0,12 m e 0,15 m. A dificuldade para os resultados convergirem para o valor da posição $x(\tau)$ real se deve também pela presença de regiões sem resina (vazios) que ficam aprisionados no laminado e não se dissipam de acordo com o escoamento da resina através do meio poroso, como pode ser observado na Fig. 5.15.

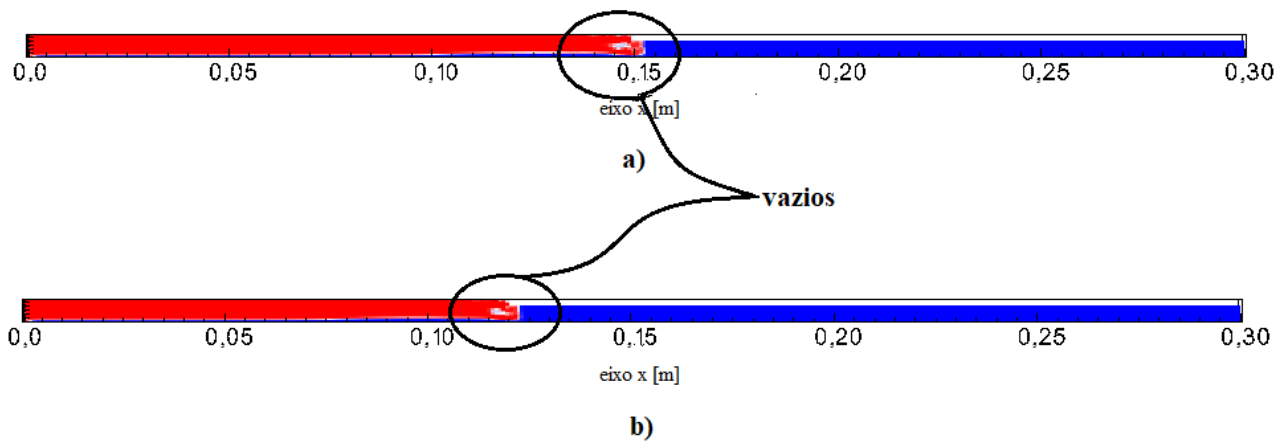


Figura 5.15 – Curvas do escoamento da resina com a espessura de 0,0043 m; a) L_p de 0,15 m de comprimento. b) L_p de 0,12 m de comprimento.

Ainda com a relação K_{xx}/K_{zz} , simulou-se os casos com a espessura do meio poroso de 0,0069 m, 0,0094 m e 0,012 m. Os gráficos do escoamento da resina dentro molde para os casos mencionados e variando-se o comprimento de L_p estão expressos nas Fig. 5.16.

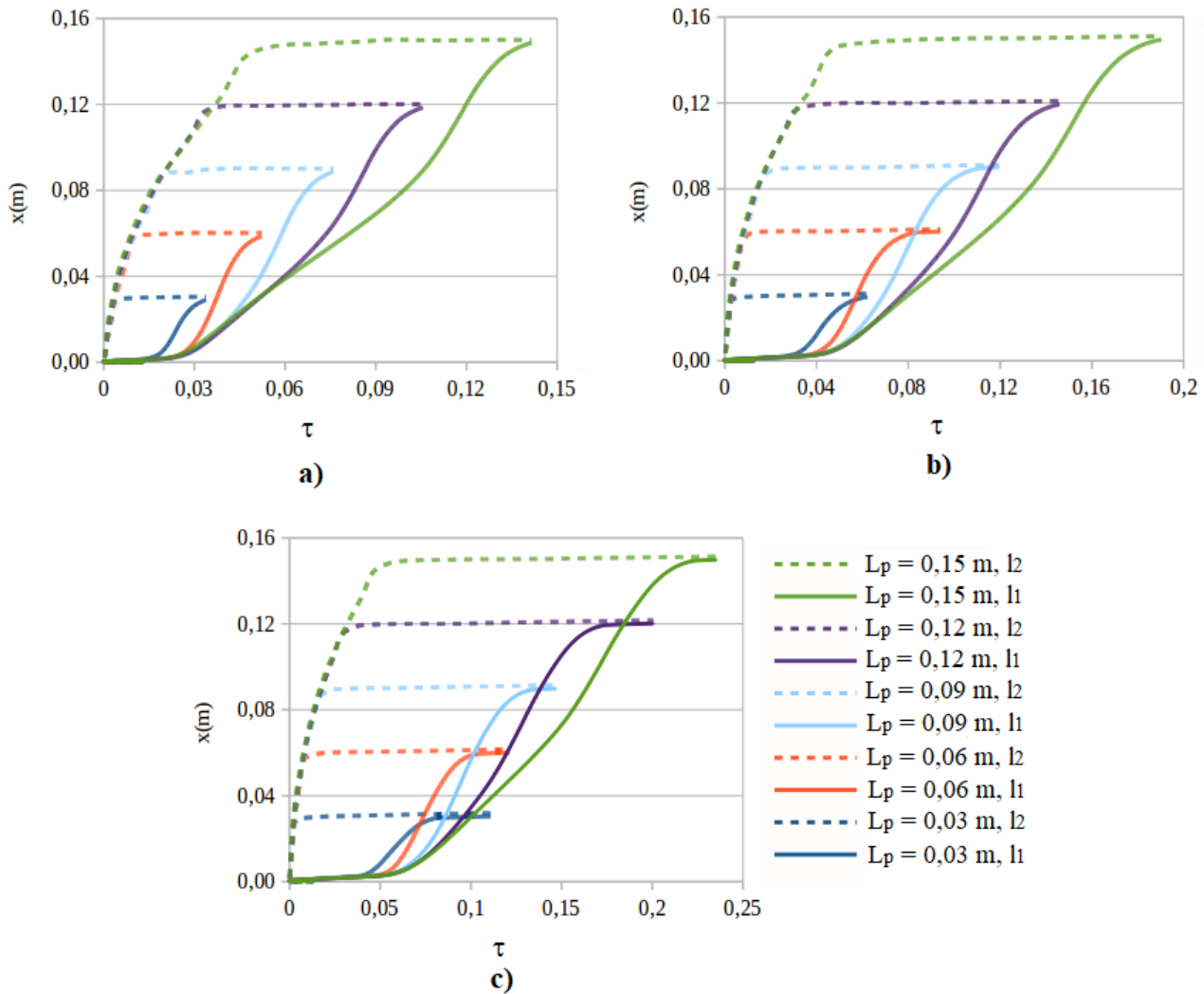


Figura 5.16 – Escoamento da resina dentro do molde com o meio poroso contendo; a) espessura de 0,0069 m. b) espessura de 0,0094 m. c) espessura de 0,012 m.

Pode-se notar nas Fig. 5.16 que como nesses casos foi aumentada a espessura dos compósitos, as simulações numéricas convergiram para um $x(\tau)$ em todos os comprimentos de L_p . Também observou-se que para a relação K_{xx}/K_{zz} igual a 0,1, existem limitações nas espessuras de 0,0027 m e 0,0043 m, nas quais não foi possível obter a posição $x(\tau)$ em que formou-se a linha de frente de escoamento para os L_p de 0,12 m e 0,15 m de comprimento. Essas limitações também podem estar relacionadas ao fator de que a permeabilidade transversal é maior que a permeabilidade planar.

5.4.2. Relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 1

Simulações para a relação K_{xx}/K_{zz} igual a 1 também foram realizadas com o intuito de obter o comprimento ideal do molde para cada comprimento de malha de fluxo. Assim, variou-se, como no caso anterior, a espessura do meio poroso e o comprimento da malha de fluxo. Na Fig. 5.17

podem ser visualizados os gráficos do escoamento da resina em função do tempo adimensional para os diferentes comprimentos de L_p e espessuras do meio poroso.

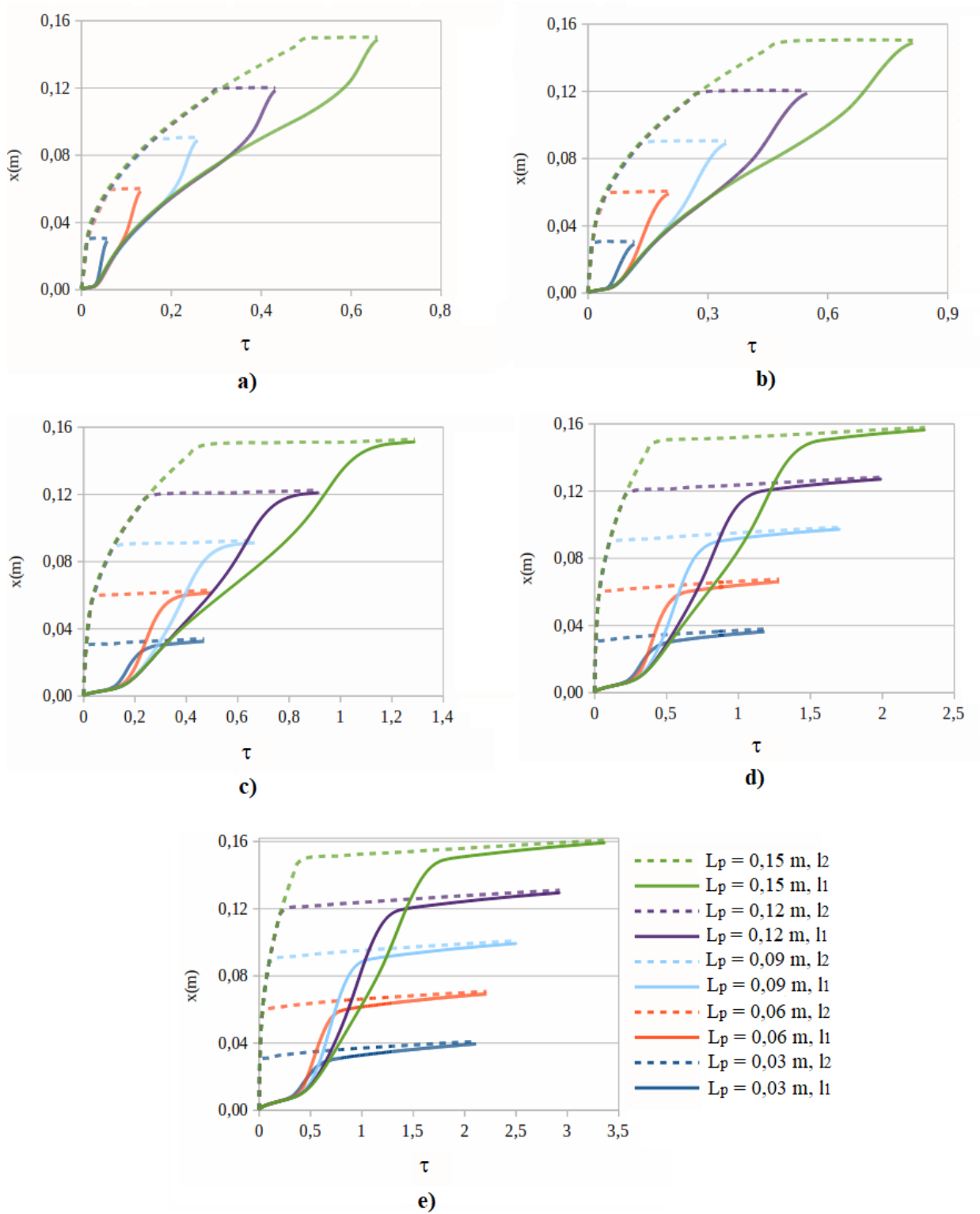


Figura 5.17 – Curvas do escoamento da resina para os distintos comprimentos de malha de fluxo e espessura do laminado de: a) 0,0027 m. b) 0,0043 m. c) 0,0069 m. d) 0,0094 m. e) 0,012 m.

Para a relação K_{xx}/K_{zz} igual a 1, as permeabilidades planares e a transversal são análogas, portanto a resina escoar com mais facilidade na direção x se comparada à relação de 0,1. Assim, observa-se nos gráficos da Fig. 5.17 que foi possível encontrar a posição $x(t)$ em todos os casos investigados. Para essa relação de permeabilidades não apareceram regiões vazias na pré-forma, apenas alguns vazios na parte inferior do molde, porém não foram suficientes para dificultar o cálculo da posição da resina. Isso pode ser observado na Fig. 5.18, em que apresenta-se os resultados do escoamento da resina dentro do molde para um laminado com 0,012 m de espessura e um L_p de 0,15 m de extensão.

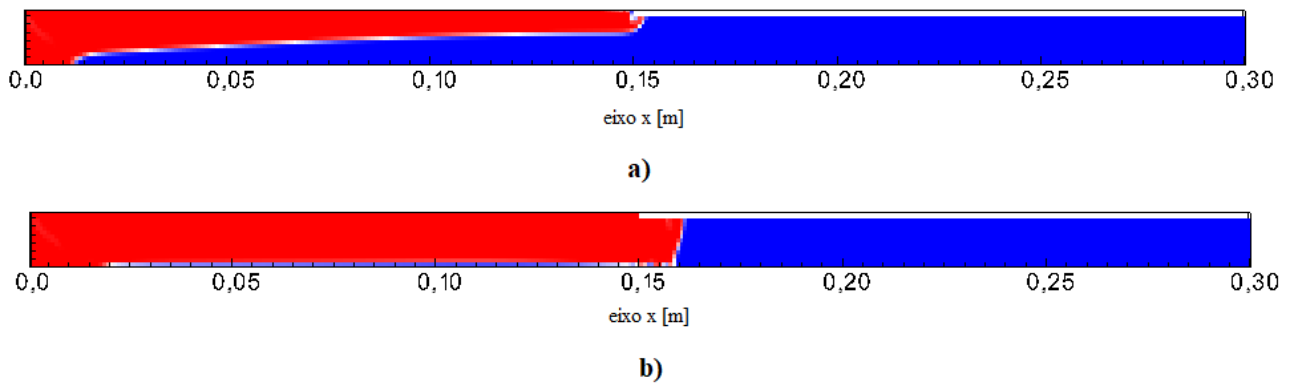


Figura 5.18 – Escoamento da resina dentro do molde com uma espessura de 0,012 m e um L_p de 0,15 m de comprimento. a) no $t = 0,6$ s. b) no $t = 2,6$ s.

Nunes (2018) nos seus estudos, apresentou diversos ensaios experimentais moldados pela técnica LRI, em que em alguns casos também utilizou-se malha de fluxo na parte superior do molde. Como resultado, determinados experimentos apresentaram vazios na superfície da parede inferior do molde. Dessa forma, os resultados numéricos que apresentam vazios na parede inferior da geometria demonstraram estar de acordo como os dados experimentais, visto que esse efeito também é visualizado em determinados ensaios moldados por LRI.

5.4.3. Relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 10

Para a relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 10, em que a permeabilidade planar é uma ordem de grandeza maior que a permeabilidade transversal, estão expressas no gráfico da Fig. 5.19 as curvas referentes aos resultados das simulações em que variou-se as espessuras do meio poroso analisadas neste estudo e os comprimentos de L_p . Assim, é possível obter o comprimento ideal do molde para que a resina preencha a pré-forma da melhor forma possível e em um menor tempo.

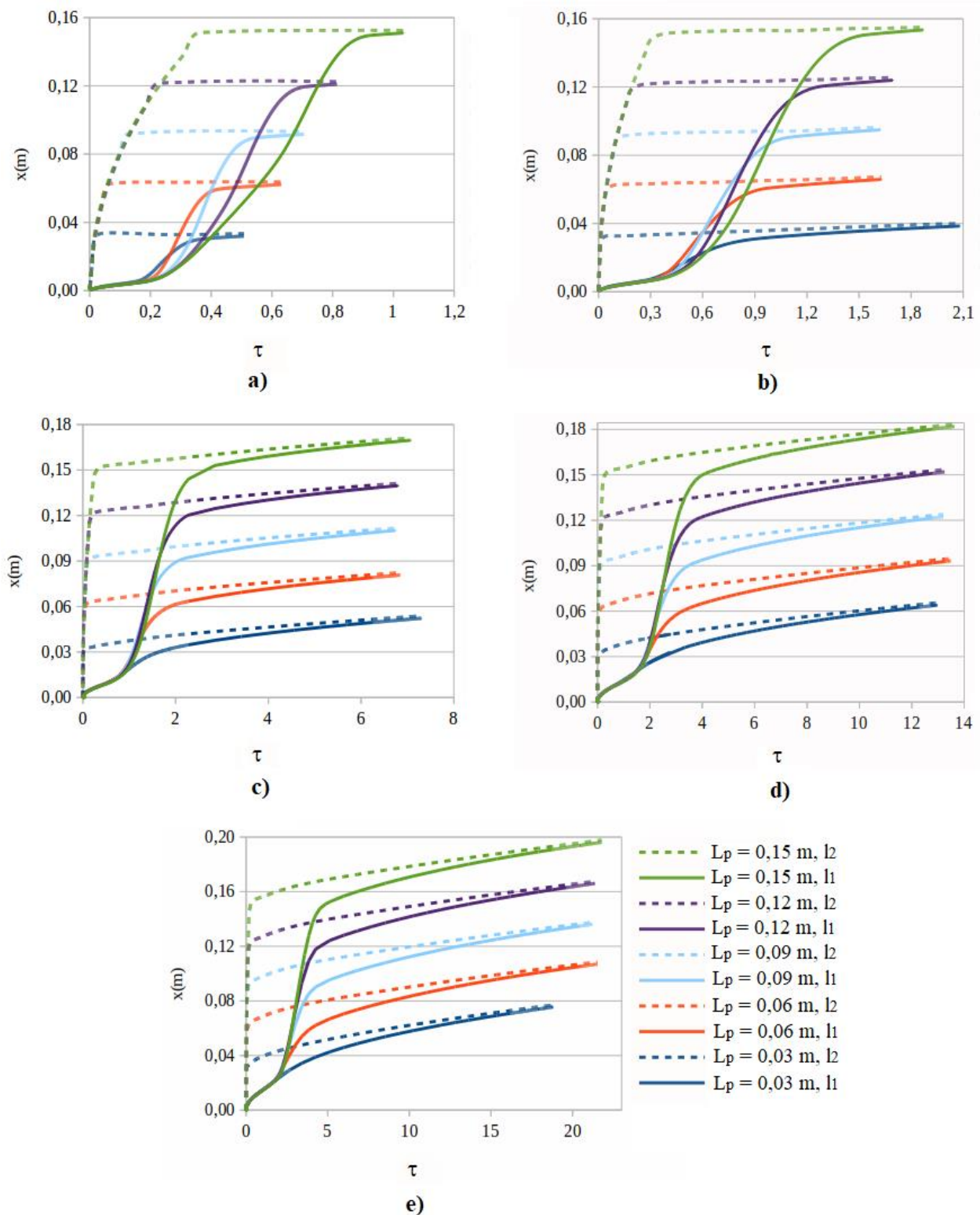


Figura 5.19 – Gráficos da posição da resina em função do tempo adimensional para os laminados com espessuras de: a) 0,0027 m. b) 0,0043 m. c) 0,0069 m. d) 0,0094 m. e) 0,012 m.

Para a relação de K_{xy}/K_{zz} igual a 10 foi possível realizar todas as simulações sem problemas de convergência, e assim pode-se obter todas as posições $x(\tau)$ para os diferentes comprimentos de L_p . É possível observar, que nessa relação de K_{xy}/K_{zz} , a resina escoa de forma mais homogênea,

proporcionando poucos ou nenhum vazio no preenchimento do molde. Isso pode ser visualizado na Fig. 5.20 na qual é apresentado o escoamento da resina dentro do molde com um meio poroso de 0,0069 m de espessura e um L_p de 0,06 m de comprimento.

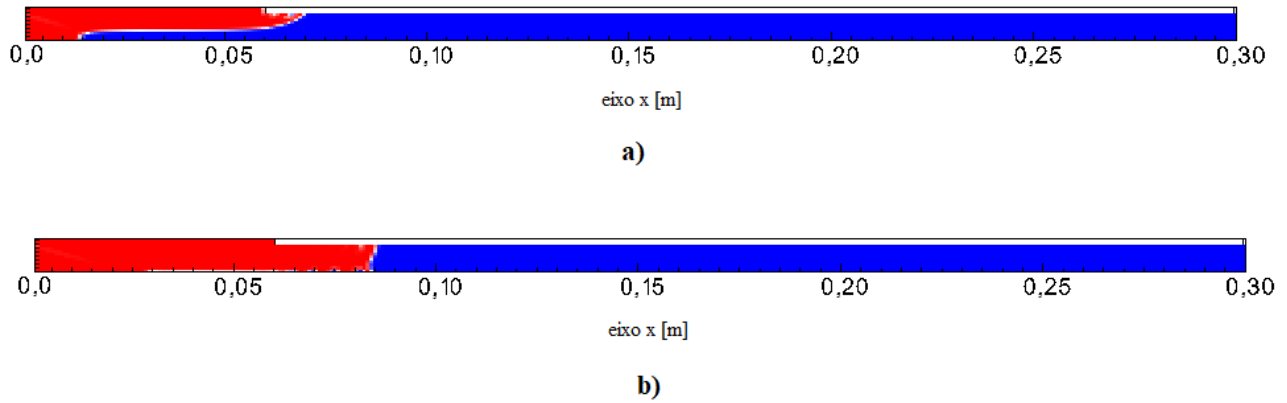


Figura 5.20 – Escoamento da resina dentro do molde com espessura de 0,0069 m e um L_p de 0,06 m de extensão. a) no $t = 1$ s. b) no $t = 7$ s.

Na Fig. 5.21 em que o meio poroso possui 0,012 m de espessura, também é possível observar que para essa relação de K_{xx}/K_{zz} a resina escoou de forma mais uniforme pela pré-forma, se comparada às outras relações K_{xx}/K_{zz} apresentadas, proporcionando a inexistência de manchas secas (vazios) durante o processo de infusão.

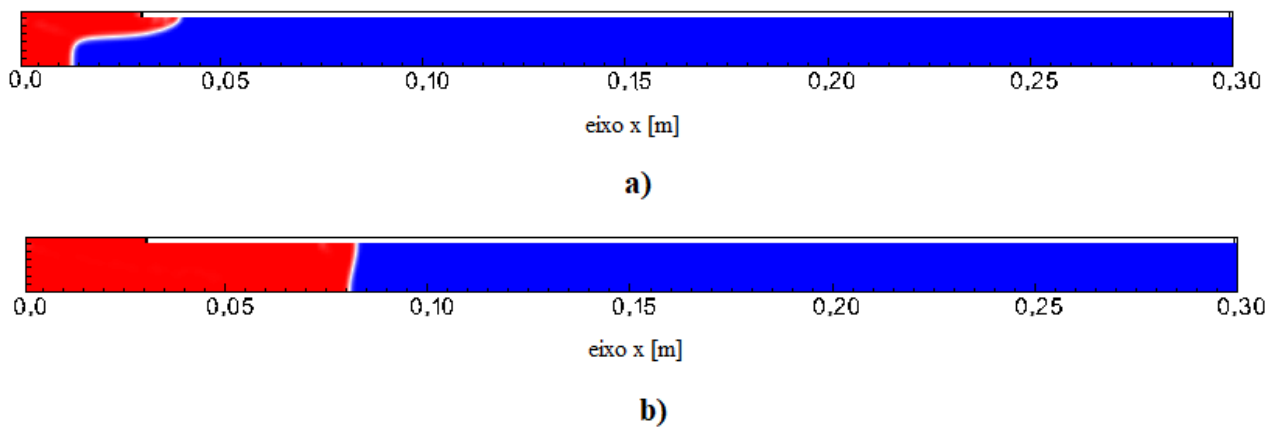


Figura 5.21 – Escoamento da resina dentro do molde com espessura de 0,012 m e um L_p de 0,03 m de extensão; a) no $t = 1$ s. b) no $t = 26$ s.

5.4.4. Relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 100

Analogamente ao caso de K_{xx}/K_{zz} igual a 10, o caso da relação de 100 obteve resultados que demonstram que a resina escoou de forma uniforme dentro do molde. Apesar de apresentarem-se

especialmente em espessuras mais finas (Fig. 5.22 a)), alguns vazios dentro do molde que se dissipam de acordo com o preenchimento da resina nas fibras.

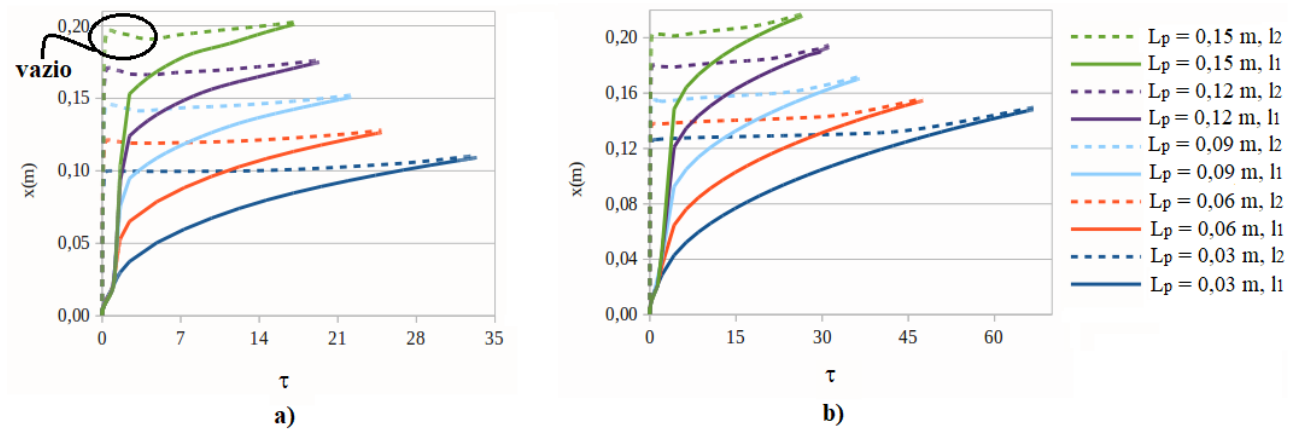


Figura 5.22 – Escoamento da resina para os diferentes comprimentos de L_p ; a) laminado com espessura de 0,0027 m. b) laminado com espessura de 0,0043 m.

A Fig. 5.23 apresenta o escoamento da resina dentro do molde com o meio poroso de 0,0027 m de espessura e o L_p de 0,15 m de comprimento. Pode-se observar que existe uma mancha seca (vazio) perto da superfície superior do molde que se dissipa conforme a resina preenche a pré-forma e, assim, não dificultando o cálculo da posição da resina como em outros casos já comentados.

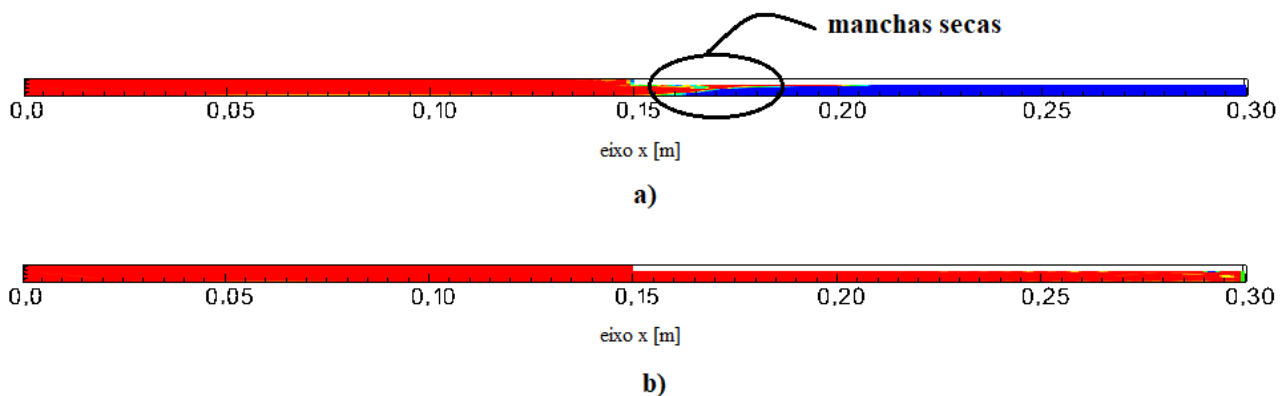


Figura 5.23 – Infusão da resina em um molde de 0,0027 m de espessura e um L_p de 0,15 m de comprimento. a) no $t = 5 \text{ s}$. b) no $t = 150 \text{ s}$.

Os gráficos que mostram as curvas da posição em função do tempo adimensional para as espessuras da pré-forma de 0,0069 m, 0,0094 m e 0,012 m podem ser observadas na Fig. 5.24.

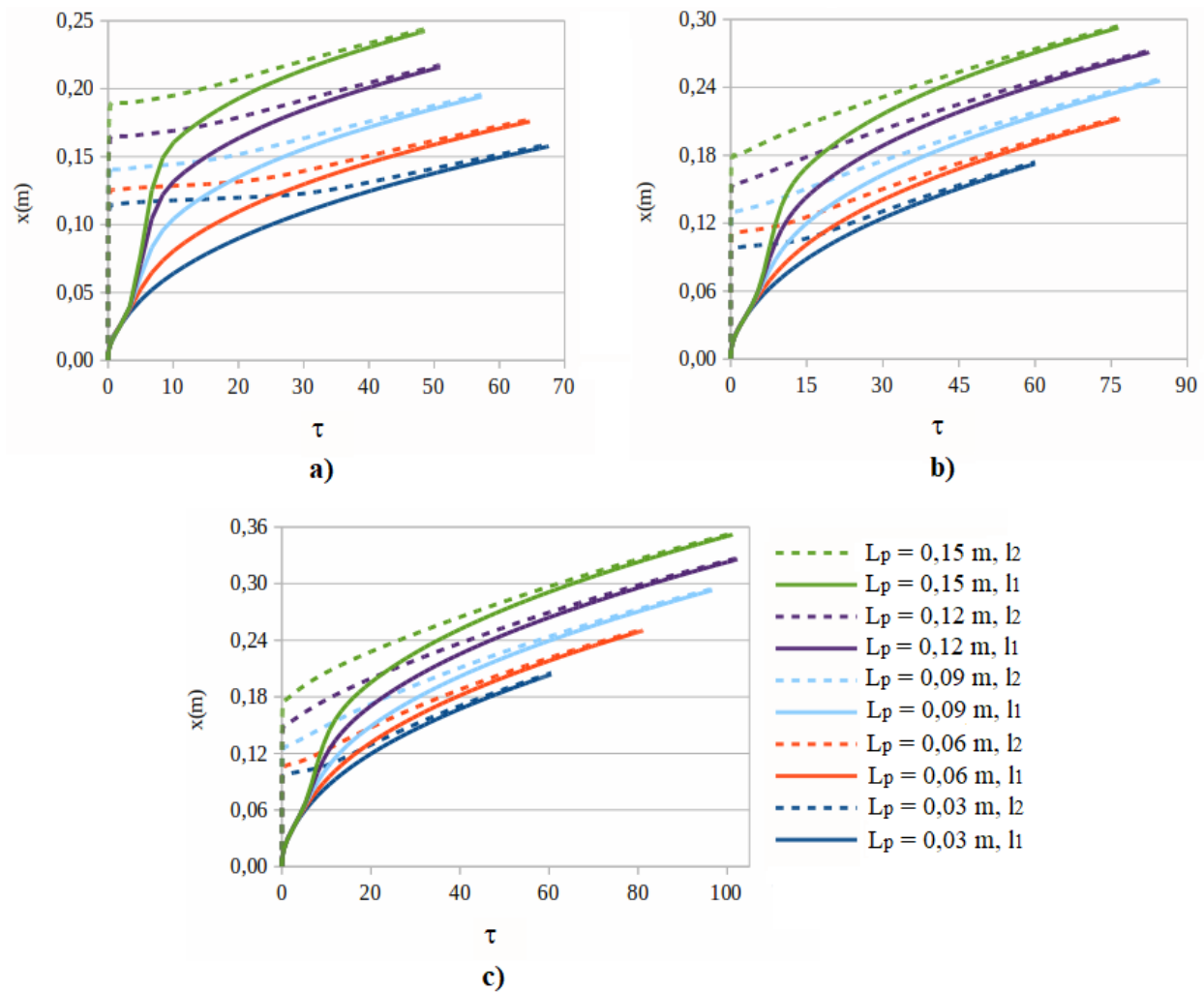


Figura 5.24 – Gráfico da posição em função do tempo adimensional para as pré-formas com espessuras de: a) 0,0069 m. b) 0,0094 m. c) 0,012 m.

Nessa relação K_{xx}/K_{zz} também pode-se observar nos resultados numéricos obtidos que na superfície inferior do molde não houve presença de vazios e as manchas secas que apareceram durante o percurso do processo de infusão tenderam a desaparecer conforme o passar do tempo, não dificultando os cálculos de $x(\tau)$.

Na Fig. 5.25 pode-se visualizar o escoamento da resina dentro do molde contendo uma pré-forma com 0,0069 m de espessura e uma malha de fluxo de 0,03 m de comprimento.

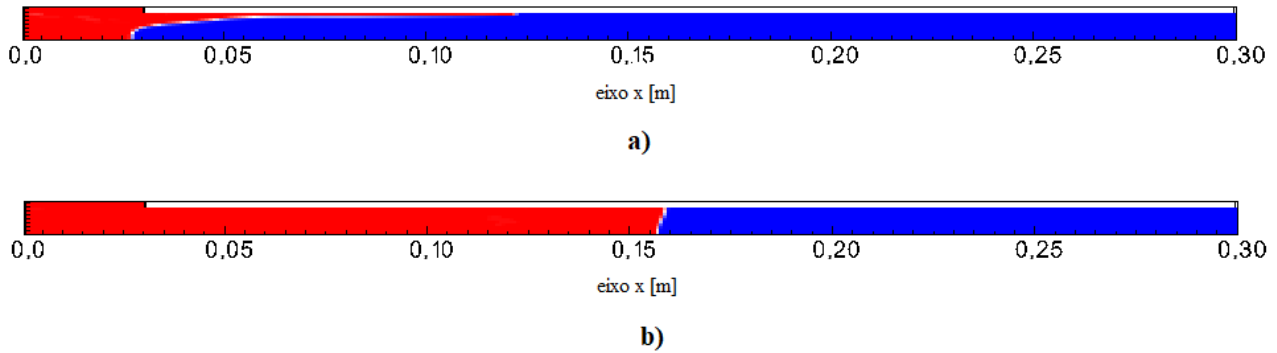


Figura 5.25 – Escoamento da resina com o meio poroso de 0,0069 m de espessura e um L_p de 0,03 m de comprimento. a) no $t = 4$ s. b) no $t = 120$ s.

5.4.5. Relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 1000

A última relação investigada neste estudo foi a de K_{xx}/K_{zz} igual a 1000, ou seja, a permeabilidade transversal sendo três ordens de grandeza menor que a permeabilidade planar.

Inicialmente, apresenta-se os resultados do caso em que o meio poroso constitui-se de uma espessura de 0,0027 m. Na Fig. 5.26 pode-se observar que foi possível monitorar o escoamento da resina nas linhas l_1 e l_2 , bem como obter a posição $x(\tau)$ em que a resina encontra-se paralela à saída do molde apenas nas malhas de fluxo com o comprimento de 0,03 m, 0,06 m e 0,09 m.

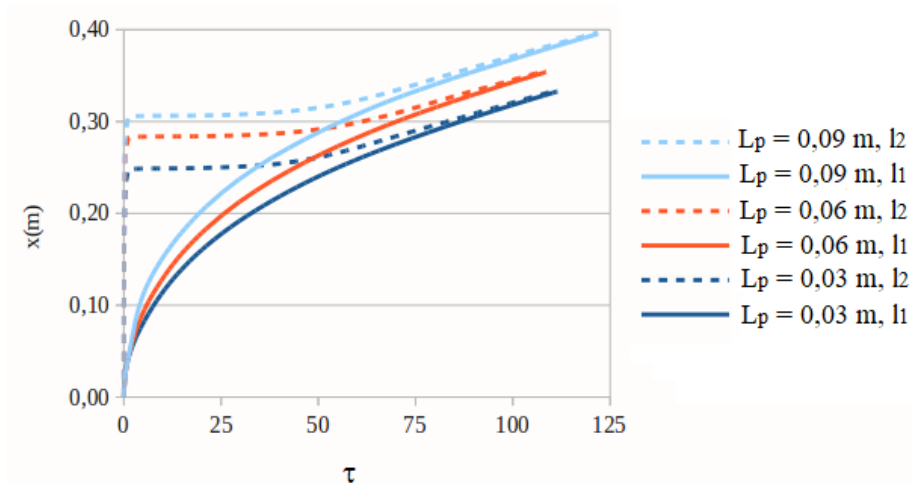


Figura 5.26 – Escoamento da resina para os distintos comprimentos de L_p .

Nesse caso, além do fator da espessura da peça ser fina também existe o fator da dificuldade da resina escoar na direção z em função da permeabilidade transversal ser muito menor que a permeabilidade em x . Assim, quando aumentou-se o comprimento de L_p para 0,12 m e 0,15 m, como pode-se observar na Fig. 5.27, propiciaram que regiões vazias aparecessem e tornou-se

impossível monitorar o escoamento da resina sobre as linhas l_1 e l_2 nessa região. Portanto, o $x(\tau)$ não pode ser definido para esses parâmetros.

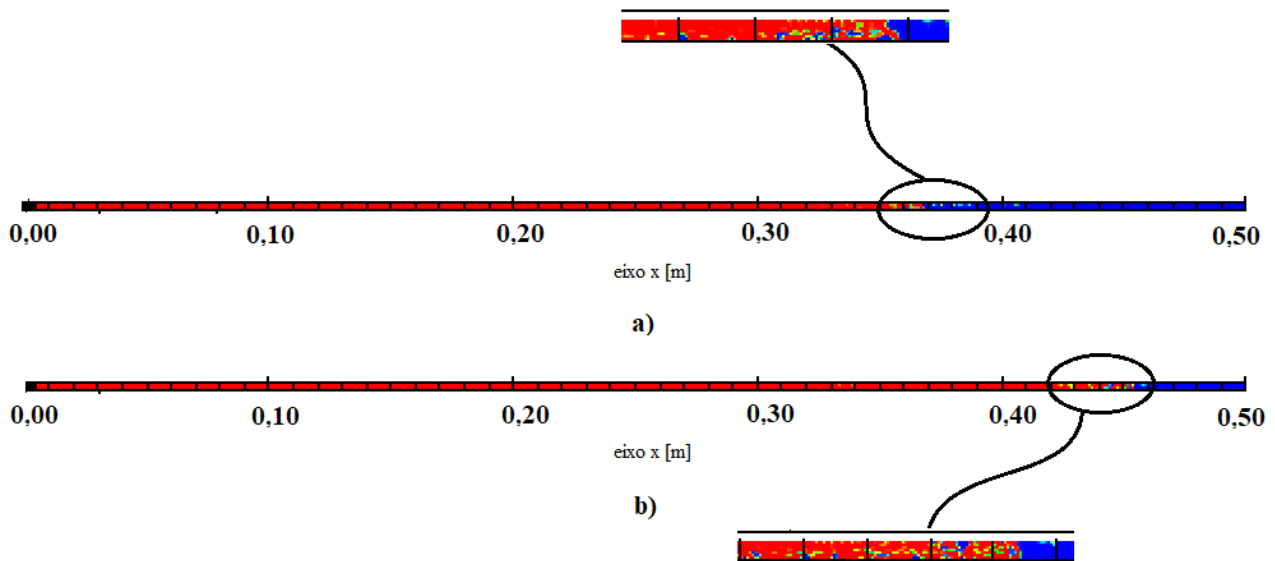


Figura 5.27 – Infusão da resina através da pré-forma porosa com espessura de 0,0027 m; a) L_p igual a 0,12 m de extensão. b) L_p com o comprimento de 0,15 m de comprimento.

Embora para o laminado com espessura de 0,0027 m não seja possível definir o $x(\tau)$ para todos os comprimentos de L_p investigados neste trabalho, no restante das espessuras do meio poroso foi possível encontrar o comprimento ideal do molde para todos os comprimentos de malha de fluxo, como mostram as Figs. 5.28 e 5.29.

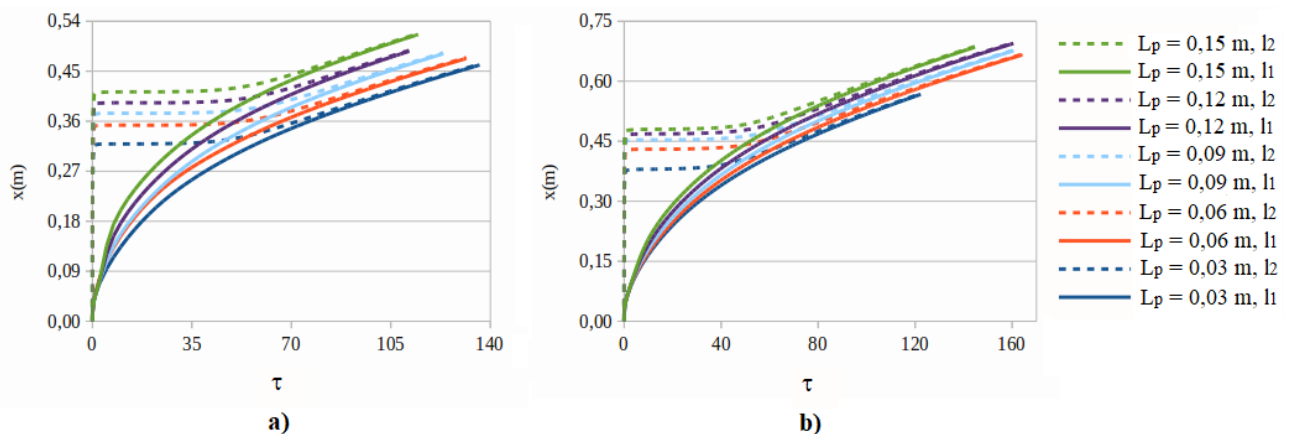


Figura 5.28 – Curvas do escoamento da resina dentro do molde para o meio poroso com espessura de: a) 0,0043 m. b) 0,0069 m.

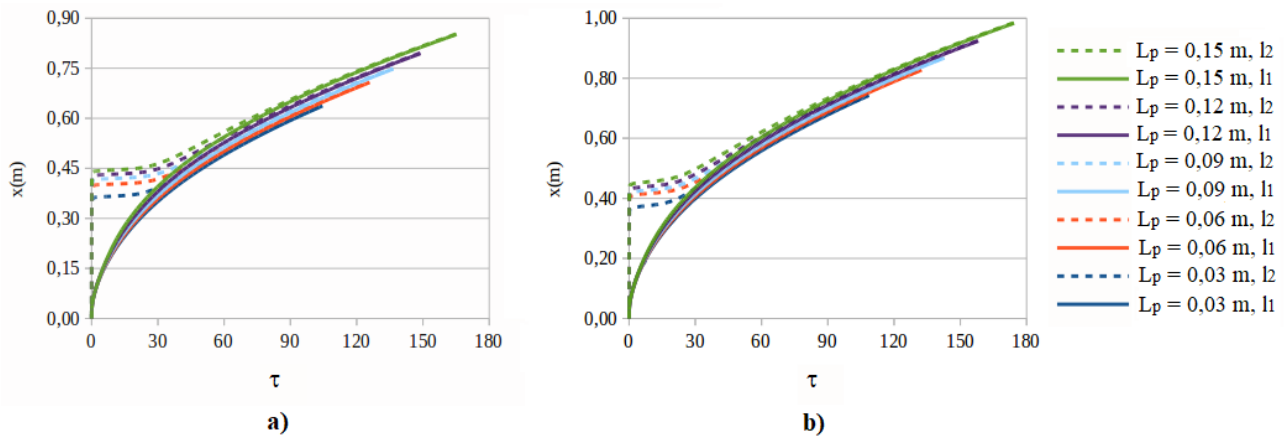


Figura 5.29 – Gráfico do escoamento da resina dentro do molde para um laminado com espessura de: a) 0,0094 m. b) 0,012 m.

5.5. Generalização da malha de fluxo

Na etapa anterior deste estudo, apresentou-se a avaliação do comprimento da geometria a partir do comprimento da malha de fluxo, ou seja, nos gráficos pode-se observar o comprimento ideal do molde para cada comprimento de L_p e relação K_{xx}/K_{zz} que a resina estivesse na saída do molde com a linha de frente vertical. Porém, pretende-se também encontrar uma maneira de generalizar o estudo para que se possa obter o comprimento ideal da malha de fluxo para qualquer que seja o comprimento do molde.

Dessa maneira, investigou-se a diferença entre a posição $x(\tau)$ em que se forma a linha de frente de escoamento com o comprimento da malha de fluxo pela Eq. (5.4) para todas as relações K_{xx}/K_{zz} analisadas neste trabalho:

$$\Delta_L = x(\tau) - L_p \quad (5.4)$$

onde, Δ_L [m] é a diferença entre a posição $x(\tau)$ em que forma-se a linha de frente de escoamento paralela à saída e o comprimento de L_p , como pode ser observado na Fig. 5.30. O valor de Δ_L expressa o quanto o molde tem que ser maior que a malha de fluxo para que a resina esteja perpendicular antes da saída do domínio poroso.

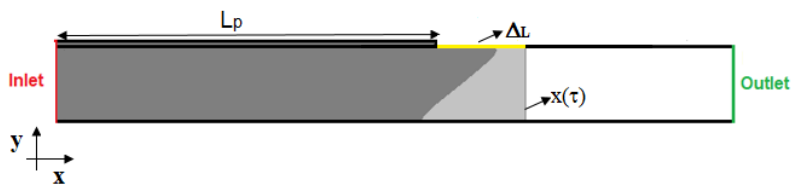


Figura 5.30 – Ilustração do tamanho da variável Δ_L .

5.5.1. Relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 0,1

Inicialmente, investiga-se a relação da posição em que forma-se a linha de frente de escoamento paralela à saída do molde com o comprimento do tecido de alta permeabilidade para a relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 0,1. Na Tab. 13 apresenta-se os resultados da diferença (Δ_L) para esta relação referente a todas as espessuras do meio poroso investigadas e comprimentos de L_p .

Tabela 13 – Resultados da diferença entre o comprimento da malha de fluxo e a posição $x(t)$.

Altura h [m]	$L_p = 0,03$ [m]	$L_p = 0,06$ [m]	$L_p = 0,09$ [m]	$L_p = 0,12$ [m]	$L_p = 0,15$ [m]
0,0027	0,000230	-0,000597	-0,001823	-0,002624	-
0,0043	0,000180	0,000142	0,000116	-	-
0,0069	0,000464	0,000250	0,000118	0,000096	0,000132
0,0094	0,001232	0,001333	0,001206	0,000933	0,001021
0,0120	0,001956	0,001567	0,001404	0,001687	0,001344

Pode-se observar na Tab. 13 que quando calculou-se Δ_L na espessura da pré-forma de 0,0027 m, no L_p de 0,06 m, 0,09 m e 0,12 m, o valor de Δ_L foi negativo, pois nesses casos a linha de frente de escoamento formou-se linear antes de alcançar o comprimento final da malha de fluxo. Para o L_p de 0,15 m, o Δ_L não foi definido, pois como comentado anteriormente, não foi possível obter $x(\tau)$ por haver vazios durante o processo de infusão que prejudicaram o cálculo do mesmo.

Para as espessuras do laminado de 0,0069 m, 0,0094 m e 0,012 m, o valor de Δ_L oscilou conforme aumentou-se o comprimento da malha de fluxo, porém para a espessura de 0,0043 m, o valor de Δ_L diminuiu à medida que aumentou-se o comprimento de L_p .

5.5.2. Relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 1

Na sequência, realizou-se a mesma análise para a relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 1, como pode ser visualizado na Tab. 14.

Tabela 14 – Cálculo da diferença entre o comprimento da malha de fluxo e a posição $x(t)$ para a relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 1.

Altura h [m]	$L_p = 0,03$ [m]	$L_p = 0,06$ [m]	$L_p = 0,09$ [m]	$L_p = 0,12$ [m]	$L_p = 0,15$ [m]
0,0027	0,000508	0,000177	0,000524	0,000115	0,000325
0,0043	0,000782	0,000610	0,000512	0,000395	0,000373
0,0069	0,004113	0,003068	0,002751	0,002537	0,002820
0,0094	0,007875	0,007622	0,008451	0,008228	0,007863
0,0120	0,011035	0,010748	0,010810	0,010975	0,010760

Nesta relação, K_{xx}/K_{zz} , pode-se observar que os valores de Δ_L oscilam à medida que aumenta o comprimento da malha de fluxo nas espessuras da pré-forma de 0,0027 m, 0,0069 m, 0,0094 m e 0,012 m. Apenas na espessura de 0,0043 m que os valores de Δ_L diminuem de acordo com que aumenta o comprimento de L_p .

5.5.3. Relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 10

Como realizado nos casos anteriores, nesta seção apresenta-se os resultados para a relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 10. Na Tab. 15 estão expressos os valores de Δ_L para as diferentes espessuras da pré-forma e comprimentos de malha de fluxo.

Tabela 15 – Resultados da diferença entre o comprimento de L_p e a posição $x(t)$.

Altura h [m]	$L_p = 0,03$ [m]	$L_p = 0,06$ [m]	$L_p = 0,09$ [m]	$L_p = 0,12$ [m]	$L_p = 0,15$ [m]
0,0027	0,003472	0,003712	0,003098	0,002475	0,002432
0,0043	0,010006	0,007327	0,006366	0,005465	0,004957
0,0069	0,023780	0,022272	0,021633	0,021168	0,021116
0,0094	0,035740	0,035094	0,034326	0,034013	0,034108
0,0120	0,046992	0,048498	0,047589	0,047520	0,047708

Neste caso, os valores de Δ_L diminuem nas espessuras do laminado de 0,0043 m e 0,0069 m. No restante das espessuras do meio poroso, os valores de Δ_L variam.

5.5.4. Relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 100

Para a relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 100, os valores de Δ_L para as diferentes espessuras do meio poroso e comprimentos de malha de fluxo podem ser observado na Tab. 16.

Tabela 16 – Resultados da diferença entre o comprimento de L_p e a posição $x(t)$ para a relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 100.

Altura h [m]	$L_p = 0,03$ [m]	$L_p = 0,06$ [m]	$L_p = 0,09$ [m]	$L_p = 0,12$ [m]	$L_p = 0,15$ [m]
0,0027	0,080656	0,067942	0,062233	0,056457	0,052558
0,0043	0,119727	0,096131	0,082061	0,074642	0,067373
0,0069	0,129087	0,117373	0,105660	0,097354	0,093919
0,0094	0,143938	0,153499	0,157264	0,152388	0,144048
0,0120	0,175223	0,191792	0,204506	0,207261	0,203454

Nesta relação, os valores de Δ_L variam nas espessuras da pré-forma de 0,0094 m e 0,012 m. Nas demais espessuras do meio poroso, a diferença entre o $x(t)$ e o comprimento de L_p diminuem à medida que aumenta o comprimento da malha de fluxo.

5.5.5. Relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 1000

Por fim, na Tab. 17 pode-se observar os valores de Δ_L para a relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 1000.

Tabela 17 – Cálculo da diferença entre o comprimento da malha de fluxo e a posição $x(t)$ para as diferentes espessuras da pré-forma.

Altura h [m]	$L_p = 0,03$ [m]	$L_p = 0,06$ [m]	$L_p = 0,09$ [m]	$L_p = 0,12$ [m]	$L_p = 0,15$ [m]
0,0027	0,304209	0,295369	0,306835	-	-
0,0043	0,432651	0,414469	0,393032	0,367383	0,367593
0,0069	0,538782	0,606083	0,587605	0,575922	0,536611
0,0094	0,608726	0,648787	0,659210	0,675582	0,703008
0,0120	0,714470	0,769214	0,779478	0,805615	0,835608

Neste caso, pode-se analisar que o valor de Δ_L oscila nas espessuras do meio poroso de 0,0027 m, 0,0043 m e 0,0069 m. Já nas espessuras de 0,0094 m e 0,012 m, os valores de Δ_L aumentam conforme aumenta o comprimento de L_p .

5.5.6. Generalização do comprimento de L_p para qualquer L_m

Após calcular o valor de Δ_L para todas as relações de K_{xx}/K_{zz} , procurou-se analisar os resultados obtidos e encontrar uma maneira de generalizar o estudo. Dessa maneira, é possível obter o comprimento ideal de L_p para qualquer que seja o comprimento de L_m , por meio da Eq. (5.5).

$$L_p = L_m - \Delta_L \quad (5.5)$$

onde, Δ_L [m] é o valor mais alto expresso nas Tabs. 13, 14, 15, 16 e 17 em cada espessura do meio poroso e relação K_{xx}/K_{zz} analisada, ou seja, é o valor mais restritivo. A variável L_m é o comprimento do molde desejável e o L_p é o comprimento da malha de fluxo que propiciará que a linha de frente de escoamento esteja vertical ao final da pré-forma e que impregnará o laminado em um menor tempo.

Se o comprimento de L_p for nulo, ou seja, não utiliza-se o tecido de alta permeabilidade sobre a pré-forma durante o processo de moldagem, possibilitando que o molde obtenha qualquer comprimento, tendo como uma limitação o tempo de gel da resina. Nesse sentido, a não utilização da malha de fluxo no processo de moldagem influenciará em um tempo maior de preenchimento da pré-forma, e a resina possuirá um escoamento longitudinal entre as camadas de fibras pré-formadas como mostra a (Fig. 2.7 a)), ou seja, a linha de frente de escoamento estará paralela em relação à saída do molde.

Como Δ_L é um valor restritivo, para que a malha de fluxo seja utilizada durante o processamento pela técnica LRI e minimize o tempo de infusão, o comprimento do molde necessita ser superior ao valor máximo obtido para Δ_L em cada espessura nas diferentes relações de K_{xx}/K_{zz} . Por exemplo, para a relação K_{xx}/K_{zz} igual a 1000 e espessura do laminado de 0,012 m, o comprimento do molde tem que ser superior ao valor de Δ_L obtido nessa situação, isto é, maior que 0,835608 m (Tab. 17). Se o comprimento de L_m for menor ou igual ao valor restritivo de Δ_L , pela Eq. (5.5) depara-se com a limitação de não poder utilizar-se o tecido de alta permeabilidade no processo de moldagem, pois por menor que seja o comprimento da malha de fluxo nesse caso, a resina chegará à saída do molde inicialmente pela superfície superior da pré-forma. Nesse sentido, essa situação pode propiciar que haja um desperdício de resina para que a pré-forma seja completamente impregnada, uma vez que o escoamento na parte inferior do molde encontra-se atrasado, se comparado ao fluido da superfície superior que estará escoando pela saída do molde.

Também vale destacar que a Eq. (5.5) indica o comprimento ideal de L_p para que a pré-forma seja preenchida em um menor tempo possível. Porém, se necessário que o comprimento de L_p seja menor que o indicado pela Eq. (5.5), o laminado também será completamente impregnado pelo fluido, ou seja, a linha de frente de escoamento estará paralela à saída do molde, porém o tempo final de infiltração será maior.

Para analisar e evidenciar a aplicabilidade da Eq. (5.5) para a projeção do comprimento ideal da malha de fluxo utilizando o processo de LRI, realizou-se duas simulações (Tab. 18). Na Tab. 18 pode-se observar os dois cenários propostos para análise no qual, no caso 1, considerou-se a relação de K_{xx}/K_{zz} igual a 1, a espessura do meio poroso com 0,0094 m e, assim, nessas condições e de acordo com a Tab. 14, o Δ_L é igual a 0,008451 m. Supondo que pretende-se construir um molde

com o comprimento de 0,25 m, o comprimento ideal de L_p pela Eq. (5.5) é aproximadamente 0,2415 m. Na Tab. 18 também pode ser observado as condições propostas para os caso 2.

Tabela 18 – Casos simulados pra evidenciar a aplicabilidade da Eq. (5.5).

Simulação	K_{xx}/K_{zz}	Espessura do meio poroso [m]	Δ_L [m]	L_m [m]	L_p [m]
caso 1	1	0,0094	0,008451	0,25	0,2415
caso 2	10	0,0120	0,048498	0,30	0,2515

Nas Figs. 5.31 pode-se observar as curvas que representam o escoamento da resina sobre as linhas de monitoramento l_1 e l_2 para o caso 1 e caso 2, respectivamente. Pode-se analisar que a linha de frente de escoamento tornou-se vertical antes do final do molde como pode-se analisar na Tab. 19, na qual, apresenta a posição em que formou-se a linha de frente de escoamento paralela à saída do molde.

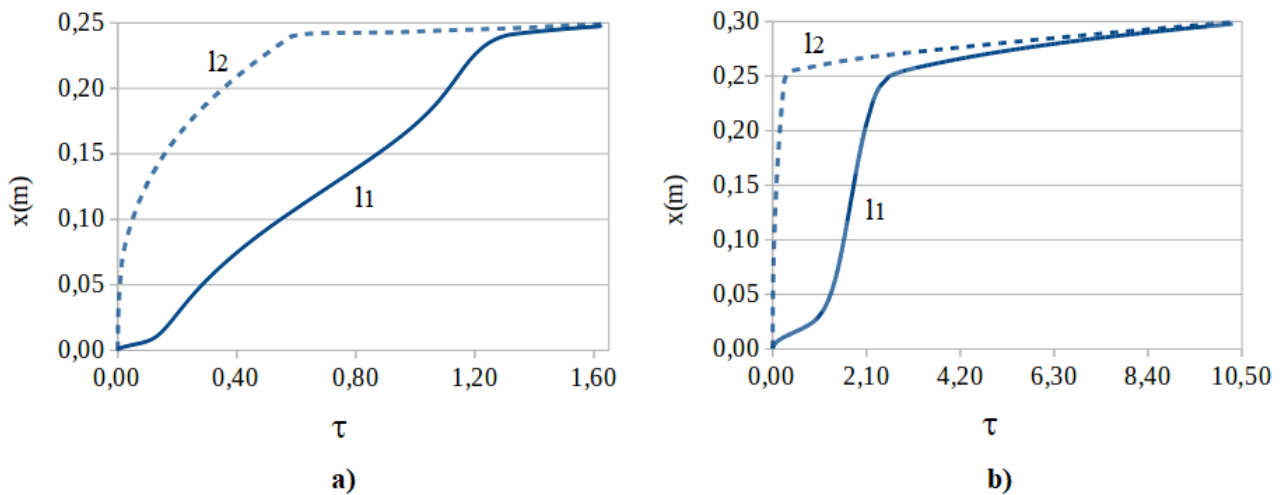


Figura 5.31 – Gráficos da posição da resina em função do tempo adimensional dentro do molde; a) caso 1. b) caso 2.

Tabela 19 – Posição em que a linha de frente de escoamento formou-se paralela à saída do molde.

Simulação	$x(t)$ [m] linha 1 (l_1)	$x(t)$ [m] linha 2 (l_2)	L_m [m]
caso 1	0,247495	0,249001	0,25
caso 2	0,297777	0,299286	0,30

De acordo com os resultados apresentados para os casos 1 e 2, é possível evidenciar que a Eq. (5.5) demonstra o comprimento ideal de L_p para que o escoamento da resina esteja paralela à saída do molde antes de preencher totalmente o laminado.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se um estudo numérico dedicado a estudar os problemas que envolvem o processo de LRI. Assim, expôs-se um estudo numérico sobre a injeção de resina em compósitos espessos nos quais uma malha de fluxo é utilizada para facilitar a injeção de resina. O modelo matemático utilizado para descrever o escoamento da resina dentro do molde foi baseado na lei de Darcy e a discretização das equações de conservação da massa, da fração volumétrica e da quantidade de movimento são realizadas pelo método dos Volumes Finitos. O tratamento da interface entre os dois fluidos (resina/ar) é resolvido pelo Método *Volume of Fluid* (VOF). As simulações numéricas propostas neste estudo foram realizadas no software livre OpenFOAM e a geometria 2D, construída no software, também livre, GMSH.

Para avaliar o comprimento da geometria a partir do comprimento da malha de fluxo, inicialmente validou-se o modelo numérico proposto e procurou-se estimar o valor da permeabilidade transversal a partir da relação K_{xx}/K_{zz} . Nos resultados apresentados, pode-se observar que para analisar e encontrar o valor de K_{zz} foi necessário analisar as curvas do escoamento da resina em função do tempo como um todo através da equação de um resíduo. Dessa forma, pode-se prever a relação K_{xx}/K_{zz} que proporcionava o valor da permeabilidade transversal que se espera, de acordo com experimentos realizados pelo LaPol. Também observou-se que o valor da permeabilidade planar (K_{xx}) extraída experimentalmente em compósitos de 4 camadas não condiz com a de um compósito de 23 camadas, mesmo mantendo análogas propriedades como volume de fibra, viscosidade da resina, porosidade e pressão de injeção.

Antes de avaliar o comprimento da geometria, também foi analisado se a linha de frente de escoamento forma-se na mesma posição $x(t)$ se varia-se os valores de K_{xx} e K_{zz} mantendo-se análogas as proporções K_{xx}/K_{zz} . Como essas proposições apresentaram-se verídicas, foi possível simular nas etapas posteriores apenas valores de permeabilidades mais altos desde que a relação K_{xx}/K_{zz} fosse mantida, proporcionando a possibilidade de minimizar o tempo computacional dedicado nas simulações numéricas.

Nesse sentido, realizou-se a avaliação do comprimento total do molde a partir do comprimento da malha de fluxo de maneira que o escoamento ao final do reforço fibroso fosse vertical e ao menor tempo de injeção possível. Assim, realizou-se nesta etapa um total de 125 simulações em que a posição da linha de frente de escoamento foi rastreada em dois pontos do molde (próximo às paredes inferior e superior), conforme Fig. 4.3 e apresentou-se todos os resultados em forma de gráficos. Diante dos resultados apresentados, pôde-se identificar o comprimento ideal do molde para os distintos comprimentos de malha de fluxo, espessura de

compósitos e relações de K_{xx}/K_{zz} investigadas neste trabalho para que o escoamento da resina estivesse vertical ao final dos tecidos de fibras pré-formados. Nas relações K_{xx}/K_{zz} igual a 0,1 e 1000, obtiveram-se determinados comprimentos de L_p onde não foi possível encontrar a posição $x(\tau)$, especialmente, na espessura do meio poroso de 0,0027 m e em apenas um caso com o meio poroso possuindo uma espessura de 0,0043 m. Esses resultados podem não ter sido alcançados pela presença de manchas secas aprisionadas na pré-forma, que dificultaram o cálculo da posição da resina sobre as linhas l_1 e l_2 . Outro fator que pode ter influenciado na dificuldade de calcular a posição $x(\tau)$ nessas espessuras pode estar relacionado com os valores de permeabilidade, pois na relação K_{xx}/K_{zz} igual a 0,1, a permeabilidade transversal é maior que a permeabilidade planar, e na relação K_{xx}/K_{zz} igual a 1000, a permeabilidade transversal é três ordens de grandeza menor que o K_{xx} , assim, havendo mais dificuldade de escoar através do eixo z .

Na sequência, investigou-se a relação entre a $x(\tau)$ e o comprimento da malha de fluxo. Dessa forma, analisou-se a diferença (Δ_L) entre a posição $x(\tau)$ em que forma-se a linha de frente de escoamento da resina e o comprimento da malha de fluxo para cada relação de K_{xx}/K_{zz} e espessura do meio fibroso. Optou-se, assim, por considerar o valor mais alto para a constante Δ_L , ou seja, o valor mais restritivo para cada espessura do compósito e relação de K_{xx}/K_{zz} . Por fim, os resultados mostraram que é possível generalizar o estudo por meio da Eq. (5.5) e obter o comprimento ideal da malha de fluxo (L_p) para qualquer que seja o comprimento do molde (L_m). Também foram apresentados os limites e restrições para o comprimento do molde e do tecido de alta permeabilidade diante de Δ_L .

Pode-se inferir que os resultados obtidos nessa dissertação, podem auxiliar o processo de moldagem por essa técnica, uma vez, que nas etapas experimentais, será possível identificar e dispor sobre a pré-forma, o comprimento da malha de fluxo para garantir que a linha de frente do escoamento da resina esteja vertical antes de preencher totalmente o laminado.

7. TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de pesquisas futuras, pode-se destacar:

- Analisar novas razões de permeabilidades com maior magnitude para identificar até que ponto as diferenças das permeabilidades K_{xx} e K_{zz} podem ser aumentadas sem afetar o posicionamento em que forma-se a linha de frente de escoamento;
- Investigar outras relações de K_{xx}/K_{zz} no intermédio das relações simuladas neste trabalho;
- Criar uma geometria multicamadas e simular o escoamento da resina para a obtenção da posição $x(t)$ contendo diferentes tecidos de fibras.

Referências

- AKIN, M.; ERDAL, M. Simulation of co-cured multi-cell composite box beam manufacturing via VARTM. **JOTCSA**, v. 5, p. 93-102, 2017.
- 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. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- BROUWER, W. D.; HERPET, E. C. F. C.; LABORDUS, M. (2003). Vacuum injection moulding for large structural applications. **Composites: Part A**, v. 34, 551-558, 2003.
- CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5ed, Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 2002.
- CARLONE, P.; RUBINO, F.; PARADISO, V.; TUCCI, F. Multi-scale modeling and online monitoring of resin flow through dual-scale textiles in liquid composite molding processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, p. 2215-2230, 2018.
- CHEN, R.; DONG, C.; LIANG, Z.; ZHANG, C.; WANG, B. Flow modeling and simulation for vacuum assisted resin transfer molding process with the equivalent permeability method. **Polymer Composites**, v. 25, n. 2, p. 146-164, 2004.
- CORREIA, N. C.; ROBITAILLE, F.; LONG, A. C.; RUDD, C. D.; ŠIMÁČEK, P.; ADVANI, S. G. Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. Analytical formulation. **Composites: Part A**, v. 36, p. 1645-1656, 2005.
- COURANT, R.; FRIEDRICHS, K.; LEWY, H. Über die partiellen differenzengleichungen der mathematischen physic. **Mathematische Annalen**, v. 100, n. 1, p. 32-74, 1928.
- CUNHA, R. A. D.; SANTOS, J. K. D.; FELIPE, R. C. T.; FELIPE, R. N. B. Agentes externos influenciam o comportamento mecânico dos compósitos poliméricos – estudo de casos. **Holos**, v.5, p. 16 – 22, 2010.
- DARCY, H. Les fontaines publiques de la ville. **Librairie des Corps Impériaux des Ponts et Chaussées et des Mines**, 1856.
- FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações**. Editora da Universidade de São Paulo, 2000.
- FRANCO, R. A. V. S. **Produção de componentes em materiais compósitos por infusão de resina**. Dissertação de Mestrado para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Arquitectura Naval, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

- GARAY, A. C.; HECK, V.; ZATTERA, A. J.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C. Influence of calcium carbonate on RTM and RTM lighth processing and properties of molded composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 30, n. 14, p. 1213-1221, 2011.
- GARAY, A. C.; FRANZ, M.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C. Numerical analysis of a sandwich composite using OPEN FOAM software. **Journal of Materials Science and Engineering with Advanced Technology**, v. 11, n. 2, p. 49-67, 2015.
- GUTIÉRREZ, J. C. H; RUBIO, J. C. C.; FARIA, P. E.; DAVIM, J. P. Usinabilidade de Materiais Compósitos Poliméricos para Aplicações Automotivas. **Polímeros**, vol. 24, n. 6, p. 711-719, 2014.
- GRÖSSING, H.; STADLMJER, N.; FAUSTER, E; FLEISCHMANN, M.; SCHLEDJEWSKI, R. Flow front advancement during composites processing: Predictions from numerical filling simulation tools in comparison with real-world experiments. **Polymer Composites**, p. 1-12, 2015.
- HSIAO, K-T.; MATHUR, R.; ADVANI, S. G.; GILLESPIE JR., J. W.; FINK, B. K. A closed form solution for flow during the vacuum assisted resin transfer molding process. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 122, p. 463-475, 2000.
- HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, n. 1, p. 201–225, 1981.
- HOAGLAND, D.; GEORGE, A. Continuous permeability measurement during unidirectional vacuum infusion processing. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 36, n. 22, p. 1618-1628, 2017.
- HURTADO, F. J.; KAISER, A. S.; VIEDMA, A.; DÍAZ, S. Numerical study of the vacuum infusion process for laminated composites with diferente fiber orientations. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 34 , n. 3, p. 196-212, 2015.
- ISOLDI, L. A.; OLIVEIRA, C. P.; ROCHA, L. A. O.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C. Three-Dimensional Numerical Modeling of RTM and LRTM Processes. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 34, p. 105-111, 2012.
- KINCAID, D. R.; CHENEY, E. W. **Numerical Analysis: Mathematics of Scientific Computing**, 3rd ed. Brooks Cole, 2001.
- LOUDAD, R.; SAOUAB, A.; BEAUCHENE, P.; AGOGUE, R.; DESJOYEUX, B. Numerical modeling of vacuum-assisted resin transfer molding using multilayer approach. **Journal of Composite Materials**, v. 51, n. 24, p. 3441-3452, 2017.
- MA, L.; ATHREYA, S. R.; MEHTA, R.; BARPANDA, D.; SHAFI, A. Numerical modeling and experimental validation of nonisothermal resin infusion and cure processes in large composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 36, n. 10, p. 780-794, 2017.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, Rio de Janeiro, 2004.

MALISKA, C. R.; VASCONCELLOS, J. F. V. Na unstructured finite volume procedure for simulating flows with moving fronts. **Computer methods in applied mechanics na engineering**, vol. 182, p. 401-420, 2000.

NAIAK, N. V. Composite Materials in Aerospace Applications. **International Journal of Scientific and Research Publications**, v.4, n. 9, p. 1-10, 2014.

NUNES, S. G. **Processamento por infusão a vácuo de compósitos espessos aramida/epóxi e análise do desempenho sob impacto**. Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

OLIVEIRA, C. P. **Modelagem numérica do transporte de resinas em um meio poroso aplicado ao processo de RTM**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2010.

OLIVEIRA, C. P.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C.; ISOLDI, L. A.; SILVA, R. D. S. Comparação dos Métodos VOF e FE/CV Aplicados à Solução de Problemas de RTM. **Vetor**, Rio Grande, v. 21, n. 2, p. 22-33, 2011.

OLIVEIRA, C. P.; SOUZA, J. A.; ISOLDI, L. A.; AMICO, S. C. Algebraic rectilinear model for multilayer resin transfer molding injection. **Journal of reinforced plastics and composites**, v. 32, n. 1, p. 3-15, 2013.

PHELAN, F. R. Simulation of the injection process in resin transfer molding. **Polymer Composites**, v. 18, n. 4, p. 460-476, 1997.

PIERCE, R. S.; FALZON, B. G.; THOMPSON, M. C. A multi-physics process model for simulating the manufacture of resin-infused composite aerostructures. **Composites Science and Technology**, v. 149, p. 269-279, 2017.

RACHMADINI, Y.; TAN, V. B. C.; TAY, T. E. Enhancement of mechanical properties of composites through incorporation of CNT in VARTM – A review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 29, n. 18, p. 2782-2807, 2010.

SAS, H. S.; ŠIMÁČEK, P.; ADVANI, S. G. A methodology to reduce variability during vacuum infusion with optimized design of distribution media. **Composites: Part A**, v. 78, p. 223-233, 2015.

SHIN, K. S.; SONG, Y. S.; YOUN, J. R. Radial flow advancement in multi-layered preform for resin transfer molding. **Korea-Australia Rheology Journal**, vol. 18, n. 4, p. 217-224, 2006.

- SRINIVASAN, V.; SALAZAR, A. J.; SAITO, K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. **Applied Mathematical Modeling**, v. 35, n. 8, 3710-3720, 2011.
- SUN, X.; LI, S.; LEE, J. Mold filling analysis in vacuum-assisted resin transfer molding. Part I: SCRIMP based on a high-permeable medium. **Polymer Composites**, v. 19, n. 6, p. 807-817, 1998.
- TIMMS, J.; BICKERTON, S.; KELLY, P. A. Laminate thickness and resin pressure evolution during axisymmetric liquid composite moulding with flexible tooling. **Composite: Part A**, v. 43, p. 621-630, 2012.
- USER GUIDE OPENFOAM VERSION 5.0. **OpenFOAM - The OpenFOAM Foundation**, 2017. Disponível em: < <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf> >. Acesso em: 30 de março de 2018.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2nd ed. Harlow, England; New York: Pearson Education Ltd, 2007.
- VILÀ, J.; GONZÁLEZ, C.; LLORCA, J. Fabric compaction and infiltration during vacuum-assisted resin infusion with and without distribution medium. **Journal of Composite Materials**, v. 51, n. 5, p. 687-703, 2016.
- WALBRAN, W. A.; BICKERTON, S.; KELLY, P. A. Simulation and Experimental Validation of Mould Tooling Forces in RTM and CRTM for Nonplanar Components. **Polymer Composites**, p. 591-603, 2015.
- WANG, P.; DRAPIER, S.; MOLIMARD, J.; VAUTRIN, A.; MINNI, J. C. Numerical and experimental analyses of resin infusion manufacturing processes of composite materials. **Journal of Composite Materials**, v. 46, n. 13, p. 1617-1631, 2011.
- WANG, P.; DRAPIER, S.; MOLIMARD, J.; VAUTRIN, A.; MINNI, J. C. Characterization of Liquid Resin Infusion (LRI) filling by fringe pattern projection and in situ thermocouples. **Composites: Part A**, v. 41, p. 36-44, 2010.
- WILLIAMS, C.; SUMMERSCALEST, J.; GROVE, S. Resin infusion under flexible tooling (RIFT): a review. **Composites: Part A**, v. 27 A, p. 517-524, 1996.
- YALCINKAYA, M. A.; SOZER, E. M. Effect of part thickness variation on the mold filling time in vacuum infusion process. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 33, n. 23, p. 2136-2150, 2014.
- YANG, B.; JIN, T.; LI, J.; BI, F. Simulation prediction of the preform deformation and resin flow in vacuum infusion process. **Polymer Composites**, p. 1968-1979, 2014.

YENILMEZ, B.; SENAN, M.; SOZER, E. M. Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process. **Composites Science and Technology**, v. 69, p. 1710-1719, 2009.