

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,

Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

**ANÁLISE COMPARATIVA DO ESCOAMENTO DE
FLUIDO EM EXPERIMENTOS RTM UTILIZANDO
APLICATIVOS COMERCIAIS**

Felipe Ferreira Luz

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2011

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,

Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

**ANÁLISE COMPARATIVA DO ESCOAMENTO DE
FLUIDO EM EXPERIMENTOS RTM UTILIZANDO
APLICATIVOS COMERCIAIS**

Felipe Ferreira Luz

Engenheiro de Materiais

Trabalho realizado no Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) do Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2011

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

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

Co-Orientador: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima (UFCG)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jeferson Avila Souza
FURG/Escola de Engenharia

Prof. Dr. Jose Viriato Coelho Vargas
UFPR/Centro Politécnico

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
FURG/ Escola de Engenharia

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

*Para meus pais, Marcelo e Oneides
Meus irmãos, Franco e Fabricio
Minha tia Odete e Minha avó Lilia
=)*

*"Um homem precisa viajar para lugares
que não conhece para quebrar essa arrogância
que nos faz ver o mundo como o imaginamos,
e não simplesmente como ele é
ou pode ser"*
Amyr Klink

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Marcelo A. Paranhos Luz e Oneides C. Ferreira Luz, pelo suporte e amor incondicionais dados para que eu pudesse chegar à conclusão, não somente deste trabalho, mas também a mais uma importante etapa na minha. Aos meus irmãos, e melhores amigos, Fabricio e Franco, que me apoiaram, motivaram e me deram toda ajuda necessária em todas minhas outras tarefas. À minha Tia Odete M. de Melo Ferreira e minha avó Lilia de Melo Ferreira, que são minhas outras duas mães, e que com um enorme carinho sempre me ajudaram e acreditaram em mim, mesmo quando nem eu mais acreditava. À minha namorada Maiza, que mesmo distante se faz sempre presente, me fazendo muito feliz.

Ao Prof. Dr. Sandro Campos Amico pelos ensinamentos, conversas, disponibilidade, comprometimento na busca dos melhores resultados e inspiração com suas frases de efeito.

Ao Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima que mais que um professor, foi um grande amigo em Campina Grande, me recebeu e acolheu de braços abertos, sempre disponível para o que fosse preciso.

Aos amigos do Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) e do Laboratório de Materiais Compósitos e Nanocompósitos (LACOMP) da Escola de engenharia da UFRGS, em especial aos colegas da sala 121, Álvaro Moraes, André Catto, André Garay, Clarissa Angrizani, Cristiane Becker, Felipe Oliveira, Humberto Baiano, Jonathan Ramos, Maurício Ferreira e Laís Vasconcelos, pela amizade e colaboração de todos, tornando possível a realização deste trabalho. Aos amigos e alunos de graduação da iniciação científica que juntamente comigo fizeram parte desse trabalho, ao Giulio Toso (sabe muito esse guri) ao Rodrigo Barcella e ao Lucas Paese. Em especial ao Prof. Jeferson Avila Souza da FURG pelo auxílio na aprendizagem do *software* PAM-RTM e pelas contribuições no trabalho.

Aos amigos que fiz no nordeste, sobretudo em Campina Grande/PB, e principalmente aos colegas do Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos da UFCG, que sempre proporcionaram dias agradáveis em um ambiente rico em

conhecimento e alegria, em especial aos grandes amigos Enivaldo dos Santos, Acto Lima e Iran Rodrigues, que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos e colegas, pelas alegrias e motivação para chegar tão longe, mas sempre sonhando ir além.

Ao PROCAD/CAPES pelo apoio financeiro e por ter proporcionado a experiência de um mestrado sanduiche.

Por fim, agradeço a todos que estiveram comigo durante este período e que ainda continuarão, agora, me auxiliando na busca de novos e desafiadores objetivos.

TRABALHOS PUBLICADOS

F. F. Luz, S. C. Amico, A. L. Cunha, E. S. Barbosa, A. G. B Lima. *Applying Computational Analysis in Studies of Resin Transfer Moulding*. In 7th International Conference on Diffusion In Solids and Liquids DSL, 2011, Portugal.

F. F. Luz, S. C. Amico, I. R. de Oliveira, S. M. S. Ribeiro, A. G. B. de Lima. *Estudo do Comportamento de Fluxo de Fluido em Moldagem por Transferência de Resina*. No 11^o Congresso Brasileiro de Polímeros CBPOL, 2011, Campos do Jordão – SP.

F. F. Luz, S. C. Amico, A L Cunha, E S Barbosa, A G B Lima. *Applying Computational Analysis in Studies of Resin Transfer Moulding*. Defect and Diffusion Forum, v. 326, p. 158-163, 2012.

F. F. Luz, S. C. Amico, J. A. Souza, E. S. Barbosa, A. G. B. Lima. *Resin Transfer Molding Process: Fundamentals, Numerical Computation and Experiments*. In.: Numerical Analysis of Heat and Mass Transfer in Porous Media. Springer, 1ed., p. 121-151, 2012.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Proposta de classificação hierárquica de materiais compósitos [Levy Neto e Pardini, 2006].	5
Figura 2 - Processos da família LCM comparados esquematicamente [Lawrence, 2006].	6
Figura 3 - Representação esquemática de um meio poroso [Vafai, 2005].	10
Figura 4 – Representação microscópica de um meio poroso sendo considerado como um meio contínuo [Tafreshi et al., 2009].	12
Figura 5 – Determinação da permeabilidade através de escoamento radial [Lundström et al., 1999].	14
Figura 6 - Visão macroscópica e microscópica do campo de velocidade e temperatura no meio poroso [Vafai, 2005].	15
Figura 7 - Taxa de reação da resina em função da variação da temperatura da resina [Antonucci et al., 2002].	18
Figura 8 – Comportamento típico da temperatura da resina ao longo do tempo em um processo de moldagem por RTM [Suresh et al., 2005].	19
Figura 9 - Representação dos elementos de uma malha bidimensional [Marques, 2005].	24
Figura 10 - Representação de uma malha não estruturada [Maliska, 2004].	25
Figura 11 - Representação de uma malha estruturada bidimensional [Maliska, 2004].	25
Figura 12 - Representação de uma malha estruturada com blocos [Batchelor, 1967].	26
Figura 13 - Sistema RTM do LACOMP/UFRGS: (a) Vaso de pressão, (b) Molde superior em vidro reforçado, (c) Molde inferior em aço, (d) Controlador de pressão (Druck), (e) Transdutor de pressão, (f) Sistema de aquisição de dados e (g) Câmera.	29
Figura 14 – Ilustração do posicionamento do reforço fibroso no sistema RTM UFRGS/LACOMP.	29
Figura 17 – Equipamento Fluke TIR32 Thermal Imager utilizado para aferir a temperatura do molde.	32
Figura 18 – Gráfico do comportamento da pressão para o experimento P09V40T23.	32
Figura 19 - Evolução do escoamento do fluido na injeção radial RTM para 1 s (a), 90 s (b) e 560 s (c).	33
Figura 20 – Utilização do software Corel Draw para a determinação do r_{ff} .	33
Figura 21 – Variação do termo ξ vs. tempo para o cálculo de κ no experimento P05V40T23 e ajuste linear dos pontos.	34
Figura 22 – Geometria e posicionamento dos obstáculos geométricos do caso especial P09V40T23-OB.	35
Figura 23 – Preparação experimental para a realização do caso especial P09V40T23-OB, rasgos nos tecidos (a) e preenchimento com a plasticina (b).	35
Figura 24 – Geometria 3D da cavidade interna do molde RTM em uma vista no plano.	36
Figura 25 – Malha E17K (a) com a utilização de blocos em sua estrutura (b), detalhe da sua região do canal de entrada do fluido (c) e em um diferente ângulo (d).	37
Figura 26 – Malha NE em uma vista no plano XY (a) e em outro plano (b), e detalhe do canal de entrada do fluido (c) e em outro ângulo (d).	38
Figura 27 – Conversão para elementos triangulares da malha 2D.	38
Figura 28 – Malha 2D utilizada nas simulações computacionais do PAM-RTM.	39
Figura 29 – Ilustração da curva de ajuste de pressão do experimento P05V40T23 gerado no Wolfram Mathematica.	41
Figura 30 – Sistema de variáveis aplicado o modelo ANSYS CFX do caso P05V40T23.	42
Figura 31 – Interface do pré-processamento do ANSYS CFX carregada com as variáveis do caso P05V40T23.	43
Figura 32 – Interface do ANSYS CFX Post.	43
Figura 33 – Layout do software PAM-RTM com detalhe no menu-guia lateral.	44
Figura 34 – Preenchimento dos campos das propriedades do caso P09V40T23 no PAM-RTM. Propriedades da Resina (a), Propriedades do Reforço (b), Parâmetros do Processo (c) e Parâmetros Numéricos (d).	45
Figura 35 – Divisão da malha 2D em duas zonas. wall em azul e enchimento em verde.	46
Figura 36 – Criação dos grupos Inlet e Outlet.	46
Figura 37 – Preenchimento com os valores de P_{inj} do caso P05V40T23 no PAM-RTM (a) e o gráfico gerado (b).	47
Figura 38 – Interface do PAM-RTM carregada com os resultados do caso P05V40T23.	47
Figura 39 - Gráfico da variação da viscosidade com a temperatura do óleo de soja.	48
Figura 40 – Variação da Taxa de Cisalhamento com a Tensão Cisalhante para o óleo de soja a 20 °C (a) e 70 °C (b).	49
Figura 41 - Imagens térmicas do molde: Molde a 40 °C (a) e Molde a 60 °C (b).	50
Figura 42 – Gráficos dos ajustes de pressão do ANSYS CFX gerados no Wolfram Mathematica para todos os casos simulados.	54

<i>Figura 43 - Evolução da frente de fluxo do fluido no caso P09V40T23 em 60 s (a), 150 s (b) e 360 s (c), e para o caso experimental, simulado no ANSYS CFX e no PAM-RTM.</i>	56
<i>Figura 44 - Comparativo entre o r_{ff} experimental e o r_{ff} simulado pelo ANSYS CFX e pelo PAM-RTM no instante t_{border} experimental para os casos P07V40T23 (a), P09V40T23 (b) e P10V40T23 (c).</i>	58
<i>Figura 45 – Relação entre os desvios percentuais do t_{border} gerados pelo ANSYS CFX e pelo PAM-RTM.</i>	60
<i>Figura 46 – Campo de Pressão Total do caso P09V40T23 no t_{border} simulado no ANSYS CFX (a) e no PAM-RTM (b).</i>	61
<i>Figura 47 – Gráfico da variação da pressão com a distância do canal de injeção para diversos tempos.</i>	61
<i>Figura 48 - Campo de Pressão Total gerado com o ANSYS CFX em um plano transversal para o caso P09V40T23 (a) e o detalhamento do canal de injeção (b).</i>	62
<i>Figura 49 - Campo de velocidade do fluido no caso P09V40T23 no t_{border} (a) com zoom no canal de injeção (b) para as simulações no ANSYS CFX e no PAM-RTM.</i>	63
<i>Figura 50 – Vetores Velocidade no caso P09V40T23 gerados pelo ANSYS CFX no t_{border} (a), detalhe no canal de injeção (b) e detalhe em um dos canais de saída (c).</i>	64
<i>Figura 51 - Comparativo da fração volumétrica no instante t_{border} para os casos P09V40T23 (experimental) com o P09cteV40T23 (numérico).</i>	65
<i>Figura 52 – Comparativo visual do comportamento do fluido ao longo do tempo no caso P09V40T23-OB.</i>	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades térmicas dos materiais.....	12
Tabela 2 - Parâmetros dos experimentos realizados.....	31
Tabela 3 – Diferentes tipos de malhas 3D geradas para o ANSYS CFX.....	37
Tabela 4 – Condições de contorno.....	41
Tabela 5 – Tempo de estabilização da pressão para os diversos experimentos.....	51
Tabela 6 - Permeabilidade e tempo de preenchimento para os diversos experimentos.....	53
Tabela 7 – Análise de convergência das simulações com o ANSYS CFX.....	54
Tabela 8 – Constantes utilizadas na Equação (17) e coeficiente de determinação.....	55
Tabela 9 – Tempos de processamento para cada caso.....	57
Tabela 10 – Comparativo entre os tborder experimental, simulado pelo ANSYS CFX e simulado pelo PAM-RTM e seus respectivos desvios em relação ao tborder experimental.....	60
Tabela 11 – Comparação entre os tempos de preenchimento do caso P09V40T23-OB para o ANSYS CFX e o PAM-RTM.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A, B, C, D, E	Constantes da Equação (17)
$\langle C_f \rangle^f$	Termo de conversão da reação química
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CRTM	Moldagem por Transferência de Resina por Compressão
f_a	Fração volumétrica do ar
FAN	<i>Flow Analysis Network</i>
f_f	Fração volumétrica do fluido
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
k_D	Tensor dispersão térmica [W/mK]
k_e	Tensor condutividade térmica [W/mK]
LCM	Moldagem Líquida de Compósitos
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
P_{atm}	Pressão atmosférica [atm]
P_e	Pressão estável [bar]
P_f	Pressão modificada do fluido [bar]
P_i	Pressão inicial [bar]
P_{inj}	Pressão de injeção [bar]
R	Resistência do escoamento no meio fibroso
R_C	Taxa de reação química
r_{ff}	Raio da frente de fluxo [m]
r_{inj}	Raio do canal de injeção [m]
RTM	Moldagem por transferência de resina
S	Tensor permeabilidade em outra notação
S_{ar}	Saturação do ar

S_{flu}	Saturação do fluido
\dot{S}_i	Termo fonte de calor do volume elementar
t_{border}	Tempo de infiltração radial máxima [s]
t_e	Tempo requerido para atingir a pressão estável [s]
t_{ff}	Tempo requerido para a frente de fluxo do fluido alcançar uma determinada posição [s]
t_{fill}	Tempo requerido para o fluido encher completamente o molde [s]
$\langle T \rangle$	Temperatura do volume elementar [K]
T_i	Temperatura inicial [K]
$\langle T_f \rangle^f$	Temperatura média do fluido [K]
u_f	Velocidade da fase fluida [m/s]
\vec{u}	Vetor velocidade de frente de fluxo [m/s]
VARTM	Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo
V_f	Fração volumétrica de fibras
V_p	Volume de poros
V_t	Volume total
x_{ff}	Posição particular dentro do molde alcançada pelo fluido
Z	Altura em relação ao ponto de referência [m]

Símbolos Gregos

β	Coeficiente de fluxo inercial
∇P	Gradiente de pressão [bar]
κ	Tensor permeabilidade [m ²]
μ	Viscosidade dinâmica [cP]
ξ	Termo da Equação (7)
ρ	Massa específica [g/cm ³]
ϕ	Porosidade

RESUMO

Este trabalho visa estudar o fluxo de um fluido em um meio poroso (fibroso) durante o processo de Moldagem por Transferência de Resina (RTM) utilizando e comparando dois softwares comerciais: o ANSYS CFX, software de simulação numérica CFD não-dedicado a RTM, e o PAM-RTM, software de simulação numérica dedicado a esta aplicação. Foram utilizados dados experimentais, empregando uma pré-forma de tecido (0/90) de fibra de vidro e que foi impregnada por um óleo vegetal em injeção radial de RTM. Diversos experimentos foram realizados variando-se a pressão de injeção e o teor volumétrico de fibras a fim de observar o efeito no comportamento do fluxo. Com estes dados, alimentou-se o ANSYS CFX e o PAM-RTM utilizando equações dos meios porosos conhecidas, e foram feitas análises numéricas de todos os casos experimentais. Resultados de permeabilidade, viscosidade do fluido, tempo de preenchimento do molde, campo de pressão, variação da fração volumétrica das fases presentes e vetor velocidade de fluxo são apresentados e analisados. Concluiu-se que há uma sólida relação entre o experimental e o simulado (erros inferiores a 10%), o software PAM-RTM possui menor erro do que o ANSYS CFX quando comparados aos resultados experimentais, mas este último apresenta maior versatilidade de análises.

Palavras-chave: *RTM, permeabilidade, simulação numérica, meios fibrosos, PAM-RTM, ANSYS CFX.*

ABSTRACT

This work aims to study the flow of fluid through a porous (fibrous) media that occurs during Resin Transfer Molding (RTM) of composite materials and to compare it with the numerical results obtained with two commercial simulation software, ANSYS CFX, a general-use CFD package, and PAM-RTM, which is dedicated to RTM modeling. Experimental data were produced using a glass-fiber cloth (0/90) perform, which was impregnated with a vegetable oil in an RTM radial infiltration. Several experiments were performed varying injection pressure and fiber volume content in order to observe their effect on the flow behavior. These data were input into ANSYS CFX and PAM-RTM using known porous media equations and they were used to model all experiments. Results of permeability, fluid viscosity, mold filling time, pressure field, variation of volume fraction of the phases and the flow velocity vector are presented and analyzed. An excellent correlation between experimental and simulated results was found (errors less than 10%), and PAM-RTM yielded smaller error than ANSYS CFX, but the latter allows greater flexibility.

Keywords: RTM, permeability, numerical simulation, fibrous media, PAM-RTM, ANSYS CFX.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VI
TRABALHOS PUBLICADOS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVOS GERAIS	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA	4
3.2 PROCESSOS DE MOLDAGEM LÍQUIDA DE COMPÓSITOS (LCM)	6
3.2.1 MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA (RTM).....	7
3.3 ESCOAMENTO EM MEIOS FIBROSOS NO PROCESSO RTM	9
3.3.1 MEIOS POROSOS/FIBROSOS	9
3.3.2 LEI DE DARCY	11
3.3.3 PERMEABILIDADE	13
3.4 FENÔMENOS DE TRANSPORTE NO PROCESSO RTM.....	15
3.4.1 MODELO DE ESCOAMENTO EM MEIOS FIBROSO UTILIZADO PELO ANSYS CFX	19
3.4.2 MODELO DE ESCOAMENTO EM MEIOS FIBROSO UTILIZADO PELO PAM-RTM	20
3.5 ANÁLISE NUMÉRICA	21
3.5.1 MÉTODOS DE DISCRETIZAÇÃO	23
4 MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 MATERIAIS	28
4.2 MÉTODOS	28

4.2.1 EXPERIMENTO RTM E MEDIÇÃO DE κ	28
4.2.2 ANÁLISE COMPUTACIONAL	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
5.1 AVALIAÇÕES PRELIMINARES DOS EXPERIMENTOS RTM	48
5.1.1 VISCOSIDADE DO FLUIDO.....	48
5.1.2 PRESSÃO DE INJEÇÃO.....	49
5.1.3 TEMPERATURA DO MOLDE	50
5.2 PERMEABILIDADE E TEMPO DE INFILTRAÇÃO RADIAL MÁXIMA.....	51
5.3 AVALIAÇÕES PRELIMINARES DA ANÁLISE COMPUTACIONAL	52
5.3.1 MALHAS 2D E 3D E TIMESTEP	52
5.3.2 AJUSTE DA CURVA DE PRESSÃO DO ANSYS CFX	53
5.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS (ANSYS CFX E PAM-RTM).....	55
5.4.1 TEMPO DE PROCESSAMENTO.....	55
5.4.2 FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS FASES.....	56
5.4.3 CAMPO DE PRESSÃO.....	60
5.4.4 CAMPO DE VELOCIDADE.....	62
5.4.5 VISUALIZAÇÃO DOS VETORES VELOCIDADE	63
5.5 CASO ESPECIAL I: FRAÇÃO VOLUMÉTRICA A P_{CTE}.....	65
5.5 CASO ESPECIAL II: RTM COM OBSTÁCULOS GEOMÉTRICOS	66
6 CONCLUSÕES	70
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXOS.....	82

1 INTRODUÇÃO

Materiais compósitos são definidos basicamente como uma combinação de dois ou mais materiais em escala macroscópica para formar um material útil, frequentemente exibindo propriedades que nenhum dos componentes exibe independentemente [Woodhead, 1994]. Compósitos poliméricos são constituídos de duas fases diferentes, a fase dispersa, também chamada de reforço (na forma de fibras ou particulados), e a fase matriz (polímero termoplástico ou termorrígido). As propriedades variam dependendo das combinações dos dois componentes, do tipo de matriz, do tipo e forma do reforço, e do método de processamento aplicado, entre outros.

Há uma grande variedade de métodos de processamento disponíveis para a produção de compósitos de matriz polimérica, como por exemplo, os processos da família da Moldagem Líquida (LCM), nos quais uma resina líquida termorrígida é injetada em um molde fechado onde uma preforma fibrosa seca foi colocada e a resina impregna o reforço [Rudd, 1997]. Desta família de processos destaca-se a Moldagem por Transferência de Resina (RTM) que é aplicada em diversos setores da indústria e apresenta muitas vantagens, tais como a versatilidade para a produção eficiente de compósitos com formas complexas e diversas, permitindo a obtenção de materiais de alto desempenho estrutural para volumes de produção intermediários. Por esse método, é possível incorporar um alto teor de reforço e obter um baixo teor de vazios no compósito juntamente com um baixo custo de produção [Pezzin et al., 2010].

Para melhor compreender os parâmetros de processo do RTM, faz-se necessário o entendimento da mecânica dos fluidos envolvida no processo, mais precisamente sobre o escoamento de fluidos em meios porosos/fibrosos. O estudo dos meios fibrosos, definidos como meios sólidos que contêm espaços vazios em seu interior, tem despertado interesse em diversos campos da ciência e da engenharia [Jaganathan, 2007], com aplicações em mecânica dos solos, hidrologia, engenharia petrolífera, purificação de água, filtragem industrial, geração de energia, refrigeração, engenharia têxtil e diversas outras áreas. Em

virtude da grande complexidade dos meios porosos reais, é necessário o uso de modelos matemáticos igualmente complexos para a resolução de problemas. As equações de conservação usualmente aceitas para o estudo do escoamento multifásico (ar/resina) em um meio fibroso são as equações de Navier-Stokes e a Lei de Darcy.

Os códigos de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) resolvem as equações de conservação através da discretização do domínio de interesse em escalas muito pequenas, possibilitando a utilização de malhas com elevado número de nós. Assim, é possível obter soluções com alto nível de detalhamento, difíceis de serem alcançadas em situações experimentais, que, além de terem um custo consideravelmente mais elevado, demandam mais tempo e não são capazes de abranger todas as possibilidades e variáveis de um caso/problema. Atualmente diversos softwares comerciais de análise computacional são empregados para o estudo de escoamento em RTM, alguns são exclusivamente dedicados para o estudo deste processo, outros são softwares gerais (não-dedicados) de CFD adaptados.

A motivação do presente estudo é desenvolver uma simulação computacional capaz de representar fielmente o comportamento do fluido escoando no reforço fibroso durante o processo RTM empregando e comparando um software dedicado com um software não-dedicado de análise computacional. A primeira parte deste trabalho visa caracterizar o fluido e o meio fibroso, determinando permeabilidade e porosidade para diversos casos experimentais. Na segunda parte, foca-se no desenvolvimento de uma simulação computacional, utilizando o software genérico de CFD ANSYS CFX e o software PAM-RTM, para reproduzir o processo físico estudado. Por fim, comparam-se os resultados numéricos dos dois softwares com os resultados experimentais a fim de se investigar as características de cada um.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Realizar um estudo científico na área de moldagem por transferência de resina de materiais compósitos, aplicando e comparando a simulação computacional em dois softwares, um dedicado e outro não-dedicado, com foco na otimização do processo através da compreensão do fenômeno do escoamento do fluido em meios porosos/fibrosos baseado em resultados experimentais.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar experimentalmente as propriedades e parâmetros envolvidos em um sistema de moldagem por transferência de resina real a fim de se obter dados reais para alimentar softwares de análise computacional.
- Desenvolver uma metodologia para corretamente adaptar um software comercial genérico do estudo de CFD (ANSYS CFX) para a resolução de um problema específico de escoamento do fluido através do reforço fibroso no interior do molde do RTM e comparar com a análise computacional realizada utilizando o software comercial dedicado PAM-RTM.
- Simular casos especiais em ambos os softwares para avaliar o comportamento do escoamento do fluido em situações onde não seja possível prever analiticamente este comportamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 *Materiais Compósitos de Matriz Polimérica*

Materiais compósitos podem ser definidos como um sistema constituído de dois ou mais materiais com distintas composições, estruturas e/ou propriedades e que estão separados por uma interface [Levy Neto e Pardini, 2006]. Callister [2006] considera um compósito como sendo qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes de tal maneira que uma melhor combinação de propriedades é obtida. Uma definição mais sucinta de Padilha [1997] diz que os materiais compósitos são materiais projetados de modo a conjugar características desejáveis de dois ou mais materiais. Assim como Gay *et al.* [2003] que se refere a materiais compósitos como materiais que possuem fibras resistentes – contínuas ou não contínuas – envolvido em uma matriz de material menos resistente. A matriz serve para distribuir as fibras e transmitir a carga às fibras. Em termos gerais, as vantagens desta classe de materiais incluem redução de peso, flexibilidade no design, redução de custo de fabricação e resistência à corrosão [Sapuan *et al.*, 1998].

De acordo com o princípio de ação combinada, melhores combinações de propriedades podem ser obtidas pela criteriosa combinação de dois ou mais materiais distintos. Para que um material híbrido possa ser considerado um compósito, deve satisfazer pelo menos 4 critérios, que são:

- Ser constituído por 2 ou mais materiais, intrinsecamente imiscíveis;
- As propriedades do compósito devem ser notadamente distintas daquelas dos constituintes;
- Os constituintes têm que estar presentes em proporções razoáveis;
- Os diferentes materiais devem estar separados por uma interface.

Apresenta-se na Figura 1, uma proposta de classificação de compósitos dada por [Levy Neto e Pardini, 2006]. Tecnologicamente, os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa encontra-se na forma de uma fibra. Resistência e/ou rigidez alta são as características frequentemente desejadas, sendo expressas em termos de resistência específica e módulo específico, ou seja, resistência/massa específica e módulo/massa específica.

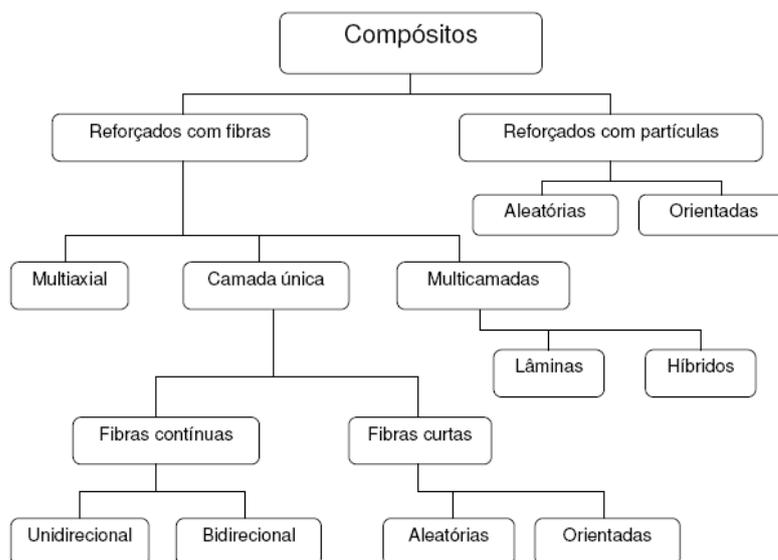


Figura 1 – Proposta de classificação hierárquica de materiais compósitos [Levy Neto e Pardini, 2006].

A maioria dos compósitos são desenvolvidos visando a melhoria de propriedades mecânicas, como rigidez, resistência e tenacidade, sendo às vezes explorada a combinação com outras propriedades, como resistência às condições ambientais e a alta temperatura. Sendo assim, a análise dos compósitos normalmente é concentrada nas propriedades mecânicas. Para a seleção da resina a ser utilizada o custo razoável, durabilidade, adesão, propriedades de manipulação e facilidade de cura são considerações importantes [Asaad, 2011]. Além disso, a interface fibra/resina é conhecida por ter grande influência sobre o desempenho mecânico dos compósitos, especialmente com relação à resistência e à tenacidade à fratura [Gamstedt, 2011]. As propriedades finais de um material compósito dependem de diversos fatores, incluindo o tamanho e orientação das fibras, teor de fibras e o processo de fabricação pelo qual foi produzido.

3.2 Processos de Moldagem Líquida de Compósitos (LCM)

A família de Moldagem Líquida de Compósitos (LCM) compreende um conjunto de técnicas de fabricação de materiais compósitos onde uma resina líquida termorrígida é injetada em um molde fechado contendo uma pré-forma fibrosa seca, impregnando o reforço.

As técnicas de moldagem LCM mais conhecidas são a Moldagem por Transferência de Resina (RTM) e a Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo (VARTM) [Lawrence, 2006]. Porém existem diversos outros processos de fabricação de materiais compósitos pertencentes a esta família como, por exemplo, o RTM Light e a Moldagem por Transferência de Resina por Compressão (CRTM). A Figura 2 compara esquematicamente estes processos.

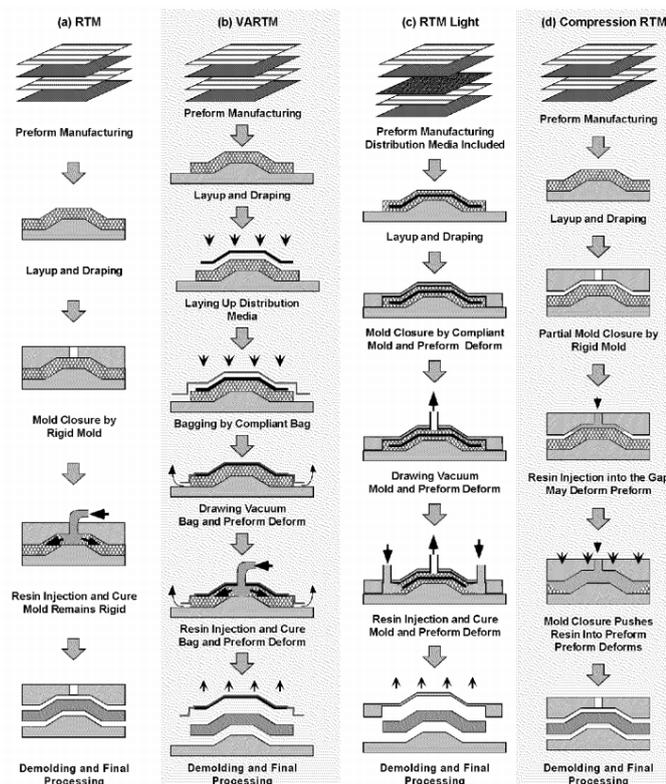


Figura 2 - Processos da família LCM comparados esquematicamente [Lawrence, 2006].

3.2.1 Moldagem por Transferência de Resina (RTM)

Dos diversos processos de fabricação de materiais compósitos avançados, o RTM vem ganhando destaque no setor industrial [Morren *et al.*, 2009]. Este processo foi desenvolvido nos anos 40, porém não obteve muito sucesso. Somente na década de 70 este processo se popularizou devido ao aumento na demanda de teclados de computadores. Hoje, o RTM é considerado/utilizado por muitos setores da indústria de compósitos [Potter, 1999], sendo amplamente empregado na indústria automobilística, aeroespacial [Kruckenberg *et al.*, 1998], civil e de materiais esportivos.

O processamento por RTM consiste no posicionamento da pré-forma (reforço fibroso no formato da peça) dentro do molde. Esta pré-forma seca constitui um meio poroso/fibroso, através do qual ocorrerá o escoamento do fluido. O molde é então fechado, e em seguida a resina é injetada para o interior da cavidade do molde até o reforço fibroso ser totalmente impregnado. Terminado o processo de cura da resina, o molde é aberto e a peça é retirada do molde. Esta peça ainda pode requerer operações de acabamento e/ou passar por um processo de pós-cura. O molde de RTM deve possuir pelo menos uma entrada, para injeção da resina, e uma saída, para permitir, durante a injeção da resina, a saída do ar existente no interior do molde. Em peças maiores é comum, porém, a presença de várias entradas e saídas [Júnior, 2007].

As pré-formas são constituídas basicamente por fibras e servem como esqueleto da peça a ser processada, podem ser formadas por diferentes tipos de fibras e diferentes arquiteturas, sendo geralmente utilizados reforços multicamadas tais como mantas, tecidos e tecidos *non-crimp* (NCF) [Nordlund *et al.*, 2007].

As principais vantagens do RTM incluem: possibilidade de fabricação de produtos de formato complexo, grandes dimensões e com excelente controle de propriedades a um custo baixo [Haider, 2007], uso de diversas arquiteturas de tecidos e mantas, elevado volume de fibras (V_f), uso de diversos tipos de resina, baixa pressão de injeção (até 10 bar), boa tolerância dimensional, baixo custo

relativo de equipamentos, ciclos de tempo de produção curtos, automação do processo e a baixa emissão de solventes.

As moldagens por RTM são usadas com sucesso em aplicações de grande volume, porém a necessidade de ferramental de elevado custo e a dificuldade de controlar a orientação das fibras limitam sua aplicação em situações não-estruturais [Garay, 2010]. O RTM foi identificado com o potencial de minimizar/eliminar dificuldades de fabricação envolvidas no processamento de peças com médio e alto V_f , sendo uma rota de processamento de custo aceitável [Rudd, 1997].

O V_f e a arquitetura da pré-forma fibrosa influenciam as propriedades mecânicas de compósitos manufacturados por moldagem líquida. Em muitos casos, as propriedades mecânicas podem ser melhoradas com o aumento da fração volumétrica de fibras. Frações volumétricas de fibras mais altas, entretanto, requerem maiores pressões de injeção, o que pode afetar negativamente as propriedades do componente moldado final [He *et al.*, 2006].

A pressão de injeção está compreendida entre 1 e 10 bar, pois valores maiores podem ocasionar o arraste de fibras (*fiber wash*), a deflexão do molde/contramolde e a formação de vazios no compósito. A resina deve ter uma viscosidade baixa (geralmente 1 cP) para uma boa impregnação do reforço e para que o tempo de injeção não seja elevado. Para uma boa moldagem é necessário que o ar residual do meio fibroso seja totalmente eliminado e a resina preencha todos os espaços vazios do reforço. Caso contrário, defeitos nos componentes moldados podem ocorrer, por exemplo, devido à impregnação parcial do reforço ou à formação de micro-vazios durante o estágio de infiltração [Leclerc, 2008]. Alguns estudos abordam técnicas de diminuição de vazios nos compósitos através do estudo de diferentes formas de reforços [Leclerc *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2005] e parâmetros de injeção, mais precisamente a pressão do fluido impregnante e a orientação da frente de fluxo [Gourichon *et al.*, 2008].

Porém, o RTM ainda é sub-utilizado comparado ao seu potencial, e uma das principais barreiras é a reprodutibilidade das propriedades finais e o acabamento das peças [Li *et al.*, 2005], além do entendimento do processo de escoamento da resina pela pré-forma. Por exemplo, se os canais de entrada e

saída não estiverem devidamente posicionados no molde, seções da pré-forma podem permanecer secas após o término do processo de injeção da resina.

É muito difícil se determinar intuitivamente o padrão do comportamento do escoamento da resina. Por isso tem-se a necessidade de se realizar uma análise numérica do processo de preenchimento do molde [Lawrence, 2006], contemplando o desenvolvimento de um modelo matemático e a simulação computacional deste modelo [Chohra *et al.*, 2006]. Uma adequada caracterização da permeabilidade da pré-forma é determinante para uma simulação computacional do fluxo e para o processo de fabricação real, evitando assim, a fabricação de peças defeituosas [Hoes *et al.*, 2002].

3.3 Escoamento em Meios Fibrosos no Processo RTM

3.3.1 Meios Porosos/Fibrosos

Um meio poroso é um meio sólido que contém poros (*i.e.* espaços vazios), podendo haver, em geral, vários caminhos de conexão [Filho, 2004]. Assim, são exemplos de meios porosos: rochas porosas, agregados fibrosos como tecidos e filtros, e partículas catalíticas contendo micro-poros [Barros, 2008].

Em uma moldagem por RTM, como a resina flui através de um entrelaçamento de fibras (independente delas serem uma pré-forma, tecido ou manta), o sistema pode ser considerado com um meio poroso fibroso ou simplesmente, um meio fibroso [Vafai, 2005]. Este meio é uma porção de espaço ocupada por matéria heterogênea e multifásica, onde pelo menos uma das fases não é sólida, podendo ser líquida ou gasosa. A parte sólida é denominada de matriz sólida e o espaço que não faz parte da matriz, espaço vazio. A área de contato entre a fase sólida e a fluida do meio é geralmente considerável e os poros são normalmente estreitos se comparados às dimensões do sólido. Uma representação esquemática de um meio poroso é dada na Figura 3.

Os meios fibrosos podem ter poros interconectados ou não. No caso de poros interconectados, a parte sólida do meio poroso representa a fase dispersa, como é o caso do reforço fibroso do RTM. Outra classificação se baseia na distribuição espacial dos poros, ou dos grãos ou fibras, que podem estar distribuídos seguindo um determinado ordenamento ou de maneira aleatória, esta última abrangendo a grande maioria dos meios porosos reais.

Meios fibrosos podem ser encontrados em uma variedade de campos de aplicação, incluindo células a combustível, tecidos funcionais, filtragens, isolamento térmico, ciências médicas, fenômenos de transporte biológicos [Shou, 2011], construção civil, aeronáutica e mesmo na vida diária [Zhu, 2011].

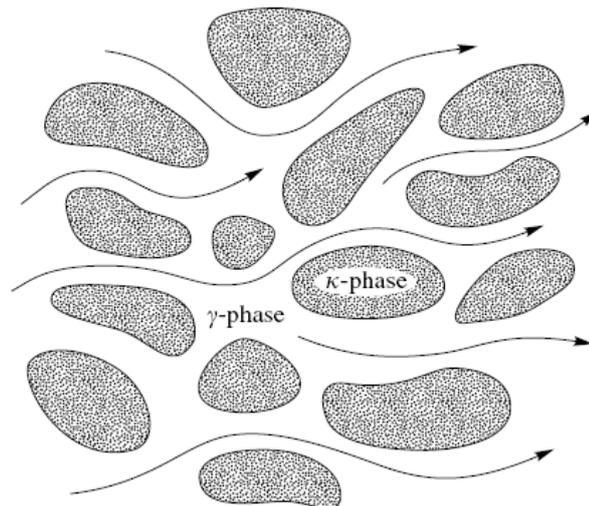


Figura 3 - Representação esquemática de um meio poroso [Vafai, 2005].

Como já observado, o meio fibroso possui descontinuidades, que são chamadas de vazios ou poros. Porosidade (ϕ), a medida de espaço vazio em um meio poroso, é a razão do volume de poros (V_p) pelo volume total (V_t) (Equação (1)).

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

Assim, no sistema RTM, quando se subtrai o V_f do V_t da peça, tem-se o volume dos espaços vazios do reforço fibroso, que indica a porosidade do

sistema. Este parâmetro indica a quantidade máxima de resina que a peça final poderá ter.

3.3.2 Lei de Darcy

Modelos de fluxo em RTM são geralmente descritos como o fluxo planar de um fluido Newtoniano e incompressível através de um meio fibroso, considerado como equivalente a um fluxo em múltiplos tubos [Kolodziej, 1998]. Assim, a equação geralmente aceita para descrever este comportamento é a Lei de Darcy (1856) [Schmidt *et al.*, 2009], que estabelece que a velocidade do fluido através do meio fibroso é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade do fluido, dada pela Equação (2):

$$\vec{u} = -\frac{1}{\mu}[\kappa] \cdot \nabla P \quad (2)$$

onde: \vec{u} = vetor velocidade de frente de fluxo composto pelas componentes u_x , u_y e u_z ; μ = viscosidade dinâmica; κ = tensor permeabilidade e ∇P = gradiente de pressão.

Alguns estudos, como os de Tafreshi *et al.* [2009], Jaganathan *et al.* [2007] e Ouagne *et al.* [2010], utilizam apenas as equações de Navier-Stokes para a caracterização do escoamento do fluido em um meio fibroso. Porém para tal, os autores realizam uma análise microscópica do meio, considerando o tamanho e o posicionamento das fibras no reforço (Figura 4). Neste caso o meio poroso passa a ser considerado um meio contínuo, com diversos obstáculos geométricos.

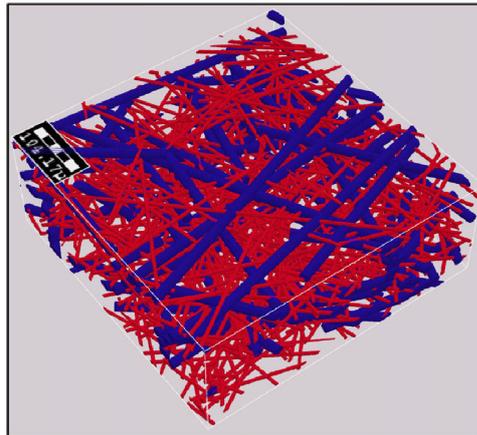


Figura 4 – Representação microscópica de um meio poroso sendo considerado como um meio contínuo [Tafreshi et al., 2009]

Quando não for verificada a linearidade entre a velocidade do fluxo e o gradiente de pressão, ocorrem os chamados escoamentos “não-Darcinianos”, gerados devido à alta velocidade e/ou ao comportamento não-Newtoniano do fluido. Este foi o argumento para o trabalho de Forchheimer [1901], que sugere a inclusão de mais um termo na equação de Darcy, englobando efeitos de inércia e turbulência, gerando a lei de Forchheimer (Equação (3)). O estudo de Teruel *et al.* [2009] mostrou que o fator β é fortemente dependente da porosidade e quase independente do Número de Reynolds (Re) no regime turbulento.

$$\vec{u} = -\frac{1}{\mu}[\kappa] \cdot \nabla P + \beta \rho \vec{u}^2 \quad (3)$$

Onde: β = coeficiente de fluxo inercial (ou de fluxo não-Newtoniano) e ρ = massa específica do fluido.

Apesar de ser amplamente utilizada em modelos de fluxo de RTM, a Lei de Darcy divide opiniões na literatura:

- Yazdchi *et al.* (2011) mencionou o sucesso do modelo aplicado a um meio isotrópico, porém não obteve bons resultados quando aplicado em meios anisotrópicos.

- Hoes et al. (2002) discute que, para baixas velocidades de injeção, a pressão capilar pode ser tornar mais importante que o gradiente de pressão, impossibilitando a aplicação do modelo de Darcy original.
- Visconti *et al.* (1998) identificou diferenças nas medidas de permeabilidade provocadas por alterações na pressão de injeção.
- Lekakou & Bader (1998) observaram desvios em seus resultados, encontrados valores diferentes dos previstos pela Lei de Darcy.
- Gauvin *et al.* (1996) sugere que a taxa de fluxo, a pressão, a natureza do fluido, o manuseio do reforço e a rigidez da cavidade do molde estão entre os fatores que podem influenciar fortemente as medidas de permeabilidade.

Apesar de todos os questionamentos, a Lei de Darcy ainda é o modelo mais aplicado para descrever o comportamento do fluxo em um processo RTM. Como mencionado por Amico [2000], as discrepâncias apontadas podem ser devido aos efeitos do fluxo microscópico, que não são em geral considerados.

3.3.3 Permeabilidade

Como já analisado, no estudo do escoamento de um fluido durante uma moldagem por RTM, é necessário determinar a permeabilidade do meio fibroso. A permeabilidade (κ), é um tensor (Equação (4)) que está relacionado à resistência ao fluxo do fluido no reforço fibroso, e indica o tamanho médio dos poros de um meio poroso, por isso sua unidade m^2 . [Barros, 2008]. Esta grandeza é definida pelas propriedades do meio e do fluido e influencia diretamente o preenchimento do meio fibroso [Morren, 2008]. A unidade de κ no SI é m^2 , mas é comum também a utilização da unidade “Darcy” (1 Darcy = $9,87 \times 10^{-13} m^2$).

$$\kappa = \begin{bmatrix} \kappa_{xx} & \kappa_{xy} & \kappa_{xz} \\ \kappa_{yx} & \kappa_{yy} & \kappa_{yz} \\ \kappa_{zx} & \kappa_{zy} & \kappa_{zz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

A permeabilidade pode ser determinada experimentalmente por escoamento retilíneo ou por escoamento radial (Figura 5) [Han, 2000], ou ainda através de outras técnicas, como a estudada por Morren *et al.* [2008], que utiliza um sistema de sensores elétricos para a determinação de κ . A infiltração retilínea é uma medida simples e prática para se determinar a permeabilidade na direção do fluxo unidirecional [Garay, 2010], porém a infiltração radial possui algumas vantagens sobre a retilínea, pois é possível determinar, simultaneamente, as duas componentes no plano da permeabilidade [Luo Y, 2001].

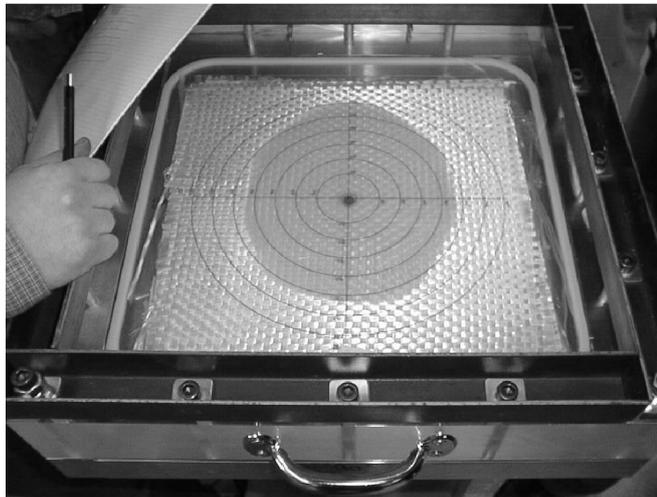


Figura 5 – Determinação da permeabilidade através de escoamento radial [Lundström *et al.*, 1999].

Na infiltração retilínea à pressão de injeção (P_{inj}) constante, o tempo (t_{ff}) requerido para a frente de fluxo do fluido alcançar uma posição (x_{ff}) particular dentro do molde pode ser obtido pela Equação (5).

$$t_{ff} = \frac{\phi \cdot \mu}{2 \cdot \kappa \cdot P_{inj}} \cdot x_{ff}^2 \quad (5)$$

Na infiltração radial, o tempo requerido para o fluido, que passa por uma porta de injeção com raio r_{inj} , preencher uma região de raio r_{ff} dentro do molde é dado pela Equação (6), que pode ser aplicada até que a frente de fluxo alcance a parede do molde, chamado de tempo de infiltração radial máxima (t_{border}). A determinação da permeabilidade de um sistema é feita pela observação da

inclinação da reta obtida em gráficos que relacionam o tempo (t_{ff}) com o quadrado da posição da frente de fluxo do fluido no caso do escoamento retilíneo, ou com o termo ξ (Equação (7)) no caso do escoamento radial.

$$t_{ff} = \frac{\phi \cdot \mu}{2 \cdot \kappa \cdot P_{inj}} \cdot \xi \quad (6)$$

$$\xi = r_{ff}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_{ff}}{r_{inj}}\right) - \frac{1}{2} \cdot (r_{ff}^2 - r_{inj}^2) \quad (7)$$

3.4 Fenômenos de Transporte no Processo RTM

Os fenômenos de transporte como fluxo, calor e massa são influenciados pela microestrutura do meio poroso [Vafai, 2005]. Na prática usam-se as propriedades médias do volume elementar para representar o comportamento macroscópico do sistema poroso, como mostrado na Figura 6.

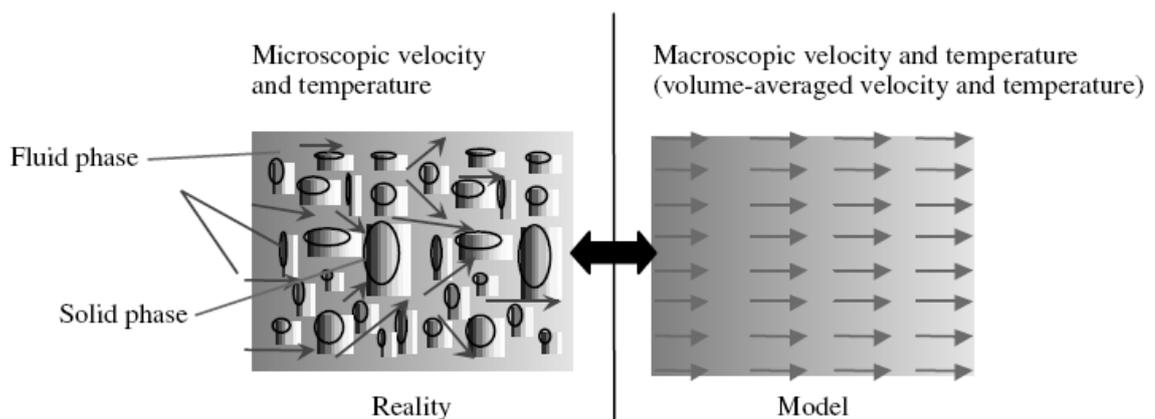


Figura 6 - Visão macroscópica e microscópica do campo de velocidade e temperatura no meio poroso [Vafai, 2005].

Tucker e Dessenberger [1994] desenvolveram as equações que regem o processo de RTM usando a técnica de Volumes Finitos. A equação da

continuidade, para um escoamento incompressível do volume finito é apresentada pela Equação (8).

$$\nabla \cdot \langle u_f \rangle = 0 \quad (8)$$

onde: o operador $\langle * \rangle = \int_f^* dV$ é o operador do volume médio, u_f é a velocidade da fase fluida. Logo, a Lei de Darcy, apresentada na Equação (2), pode ser reescrita com uma notação mais apurada pela Equação (9).

$$\langle u_f \rangle = -\frac{1}{\mu} [\mathbf{S}] \cdot \nabla \langle P_f \rangle^f \quad (9)$$

Nesta notação, \mathbf{S} é o tensor permeabilidade, P_f é a pressão modificada do fluido, definida pela Equação (10):

$$P_f = p_f + \rho g Z \quad (10)$$

onde: p_f é a pressão no fluido, g é a aceleração da gravidade e Z é a altura em relação ao ponto de referência.

Convencionalmente, a equação da energia média do equilíbrio térmico local é utilizada para se determinar o comportamento térmico no processo de RTM [Bear, 1972]. A mais importante característica para o equilíbrio térmico local é a simplicidade, que vem da própria hipótese do equilíbrio térmico local. Esta premissa afirma que a média da temperatura da fase fluida, a média da temperatura da fase sólida e a média da temperatura do volume elementar são localmente equivalentes. Assim, o equilíbrio térmico local simplifica a equação da energia. A equação da energia do equilíbrio térmico local do volume finito é apresentada na Equação (11).

$$\left\{ \sum_{i=s,f} (\rho C_p)_i \varepsilon_i \right\} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + (\rho C_p)_f \langle u_f \rangle \cdot \nabla \langle T \rangle = \nabla \cdot [(k_e + k_D) \cdot \nabla \langle T \rangle] + \sum_{i=s,f} \langle \dot{s}_i \rangle \quad (11)$$

onde $\langle T \rangle$ é a temperatura do volume elementar. Os índices s e f são referentes às fases sólido e líquido, respectivamente, k_e e k_D são os tensores de condutividade térmica e de dispersão térmica, respectivamente, \dot{s}_i é o termo fonte de calor do volume elementar, que pode ser usado para descrever a cinética de cura da resina.

A Tabela 1 apresenta as propriedades térmicas de alguns materiais usualmente utilizados em compósitos.

Tabela 1 - Propriedades térmicas dos materiais [Vafai, 2005].

Material	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg °C)	K (W/m k)
Fibra de carbono	1180	712	$8,0 \times 10^{-6}$
Fibra de vidro - E	2560	670	$1,4 \times 10^{-4}$
1/3 etilenoglicol + 2/3 glicerina	1202	2500	-

Há diversos outros estudos sobre o equacionamento da transferência de calor durante este processo [Shin, 2011; Ruiz, 2005; Abbassi, 2004], onde se procura desenvolver mais precisamente cada termo da Equação (11). No entanto, esta discussão está fora do escopo deste trabalho.

É possível também incluir o fenômeno de transporte da conservação química em um meio fibroso. Entretanto, para simplificar as análises, muitos autores [Chiu et al., 1997; Lin et al., 1991] consideraram que a dispersão e a difusão da massa pode ser desconsiderada, pois é muito pequena comparada à convecção e aos termos transientes. Assim, a equação de reação pode ser descrita pela Equação (12).

$$\varepsilon_f \frac{\partial \langle C_f \rangle^f}{\partial t} + \langle u_f \rangle \cdot \nabla \langle C_f \rangle^f = \varepsilon_f R_c \left\{ \langle C_f \rangle^f + \langle T_f \rangle^f \right\} \quad (12)$$

onde: R_c é a taxa de reação, que depende da conversão da reação química $\langle C_f \rangle^f$ e da temperatura média do fluido $\langle T_f \rangle^f$ [Tucker, 1996]. Uma relação típica entre a temperatura e o histórico da taxa de reação da resina saturada é mostrada na Figura 6, onde uma mesma resina foi submetida a diferentes aquecimentos e teve seu comportamento observado.

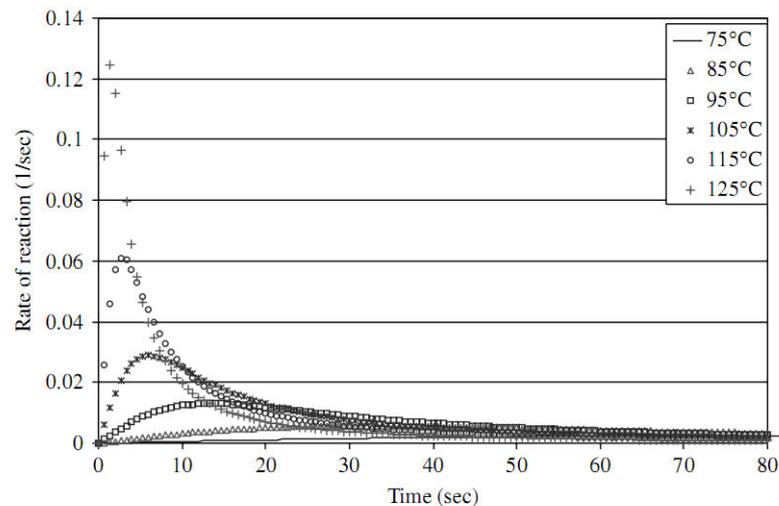


Figura 7 - Taxa de reação da resina em função da variação da temperatura da resina [Antonucci et al., 2002].

A viscosidade da resina depende de $\langle C_f \rangle^f$ e de $\langle T_f \rangle^f$, assim tem-se a relação apresentada na Equação (13). Sabe-se que, quando a conversão se aproxima do ponto de gel da resina, a viscosidade se aproximará do infinito.

$$\mu = \mu \left\{ \langle C_f \rangle^f, \langle T_f \rangle^f \right\} \quad (13)$$

A cinética da reação química que rege o processo de cura e a viscosidade da resina, é muito importante para o controle do processo de RTM. Em processos simples de RTM, opta-se por separar a etapa de injeção de resina da etapa de reação química para se obter um melhor controle do processo [Suresh et al., 2005]. A Figura 8 mostra o comportamento típico da temperatura da resina ao longo do tempo em um processo de moldagem por RTM utilizando um reforço de

manta de fibra de vidro. Observa-se no início da moldagem uma queda de temperatura da resina, provavelmente devido a perda de calor para o molde metálico; passada a região de estado estacionário a resina começa a aumentar sua temperatura, indicando o processo de cura, por fim sua temperatura cai tendendo à sua temperatura inicial.

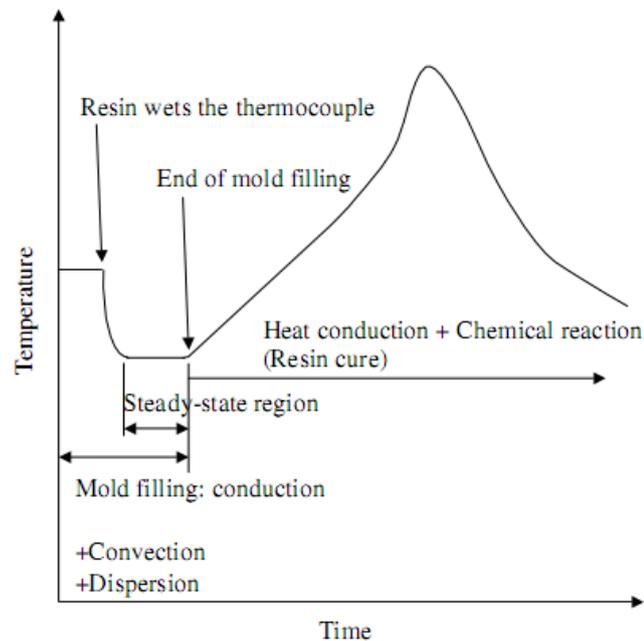


Figura 8 – Comportamento típico da temperatura da resina ao longo do tempo em um processo de moldagem por RTM [Suresh et al., 2005].

3.4.1 Modelo de Escoamento em Meios Fibroso utilizado pelo ANSYS CFX

O modelo utilizado pelo software comercial ANSYS CFX para a análise de escoamentos em meios fibrosos se baseia no modelo Multifísico que utiliza a Lei de Darcy e as equações de Navier-Stokes, considerando a resina e o ar presente no sistema. Esta última, especialmente as equações da conservação da massa (Equação (14)) e conservação da quantidade de movimento (Equação (15)), onde $R = (R^j)$ representa a resistência do escoamento no meio fibroso.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi\rho) + \nabla \cdot (\rho\kappa \cdot \bar{u}) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\rho\phi\bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi(\kappa\bar{u}) \cdot \bar{u}) - \nabla \cdot (\mu_e\kappa(\nabla\bar{u} + \nabla\bar{u}^t)) = -\phi R\bar{u} - \phi\nabla P \quad (15)$$

Em situações de alta resistência ao fluxo, um elevado gradiente de pressão deve ser atribuído para equilibrar a resistência. Durante a simulação computacional, os dois termos da direita da Equação (15) possuem valores elevados e sinais contrários e os termos convectivos e difusivos do lado esquerdo tornam-se insignificantes. Assim, a Equação (15) é reduzida à Equação (16). Assim, neste elevado limite de resistência, uma versão anisotrópica da Lei de Darcy é obtida, com permeabilidade proporcional ao oposto do tensor de resistência.

$$\bar{u} = -R^{-1} \cdot \nabla P \quad (16)$$

3.4.2 Modelo de Escoamento em Meios Fibroso utilizado pelo PAM-RTM

O modelo matemático utilizado pelo software comercial PAM-RTM não é explicitado, não há na literatura informações detalhadas sobre o método utilizado. Na documentação do software é dito apenas que para simulações envolvendo a resolução da Lei de Darcy ele utiliza elementos finitos não-conformes, que somente aceitam malhas com elementos triangulares e tetragonais.

Com base nas características citadas, uma suposição possível é considerar a utilização do modelo de Controle de Volume/Elementos Finitos (*Control volume/Finite element - CV/FE*) com o emprego da técnica FAN (*Flow Analysis Network*). Nesta formulação, o problema é simplificado, considerando apenas a resina. A influência do fluxo de ar é desconsiderada e não é levada em consideração na resolução do modelo. Outra simplificação é com relação à determinação da posição transitória da resina em função do tempo no interior do

molde, onde é obtida por sucessivas soluções de um simples problema de estado estacionário.

O emprego do FAN pode ser inicialmente evidenciado pelo trabalho de Phelan Junior [1997] que a utiliza para prever e controlar o movimento da superfície livre (frente de fluxo), assim, para cada superfície livre, um método de volumes finitos é usado para resolver as equações regentes. O emprego desta técnica pelo PAM-RTM também está evidenciado nos estudos de Comas-Cardonaa *et al.* [2005] e Endruweit *et al.* [2011] que utilizam esta técnica para simular o preenchimento do molde através de um fluxo transiente baseado na Lei de Darcy usando elementos finitos lineares não-conformes e incorporando o acompanhamento da frente de fluxo durante o processo de injeção. Souza *et al.* [2011] utilizam esta metodologia para avaliar o fluxo de massa da resina através das faces dos volumes e para reconstruir a geometria da frente de fluxo.

O PAM-RTM possui ferramentas que possibilitam e facilitam a aplicação de malhas 2D, mesmo aos casos onde deseja-se estudar um comportamento 3D. Em um primeiro momento pode-se pensar que uma malha 3D, por possuir uma quantidade maior de elementos e de informação sobre a geometria, poderá gerar resultados mais precisos em uma simulação numérica. Porém, estudos como os de Ngo *et al.* [2004] e Wong *et al.* [2006], comprovam a eficácia da aplicação de malhas 2D para geometrias simples e regulares, como é o caso da geometria analisada neste estudo. Apesar das simplificações, o processamento de casos utilizando uma malha 2D apresenta resultados comparáveis aos casos 3D, e com menor custo, pois pode ser simulada em computadores de menor performance [Endruweit *et al.*, 2011]. Além disso, é mais comum ocorrer instabilidades numéricas (*i. e.* o problema não convergir), quando se empregam malhas 3D [Mardal *et al.*, 2002].

3.5 Análise Numérica

O uso de técnicas numéricas para a resolução de problemas complexos de engenharia e de física é hoje uma realidade graças ao desenvolvimento de

computadores de alto desempenho e de grande capacidade de armazenamento [Gonçalves, 2007]. O engenheiro ou projetista incumbido de resolver um determinado problema tem à sua disposição, fundamentalmente, três elementos de análise [Chung et al., 2002]: métodos analíticos, métodos numéricos (experimentação numérica) e experimentação em laboratório.

Os métodos analíticos apresentam limitações, pois só podem ser aplicados com consideráveis simplificações, muitas vezes, comprometendo os resultados. A experimentação em laboratório remete aos parâmetros reais do processo, porém pode ter um alto custo ou não ser possível de ser realizada. No entanto ambas têm um papel importante no que diz respeito à validação dos métodos numéricos [Gonçalves, 2007]. A simulação computacional (método numérico) pode resolver problemas complicados, com contornos definidos em geometrias complexas e gerando resultados em um relativo curto período de tempo, tornando-se mais rápida e econômica em relação aos outros métodos, contudo é necessário um conhecimento aprofundado sobre o fenômeno físico e ter um modelo matemático adequado para ser aplicado.

Para a aplicação dos modelos e equações apresentados, faz-se necessário o uso de softwares para a resolução. Em modelagens por RTM, softwares de simulação computacional são usados para prever o perfil de injeção de avanço da resina no interior do molde e assim avaliar o tempo de preenchimento que deve ficar abaixo do tempo de cura da resina [Tan, 2007], pontos de impregnação deficiente, além de determinar os pontos de injeção e de saída de ar/resina mais adequados [Greve, 2006].

Programas de simulação de fluxo podem ser utilizados, aumentando a confiança no projeto do molde e no processo de fabricação de peças. No mercado há softwares dedicados exclusivamente ao processo RTM como o PAM-RTM da *ESI Group*, o RTM-WORX da *Polywork* e o LIMS da *University of Delaware* que muito comumente são utilizados pela indústria por possuírem uma linguagem simples e focada apenas neste processamento. Porém, *softwares* dedicados podem acabar limitando alguns estudos mais profundos sobre o comportamento do processo em situações adversas. De fato, é possível empregar softwares comerciais, não dedicados apenas ao estudo de processamento de compósitos, e

sim ferramentas computacionais que permitem uma personalização do problema a ser estudado. Porém, adaptar estes softwares para a resolução de problemas específicos de RTM pode ser bastante trabalhoso. Os softwares comerciais não-dedicados geralmente utilizados para o estudo de CFD são o Ansys CFX e o FLUENT, ambos da Ansys e o Abaqus/CFD da Simula Abaqus. Em outros casos, como os de Shin *et al.* [2011], Lin *et al.* [2000] e Jaganathana *et al.* [2007] que utilizam CFD em seus estudos, o software utilizado para realizar as análises numéricas não são divulgados.

3.5.1 Métodos de Discretização

O ponto de partida de qualquer método numérico é o modelo matemático, um conjunto de equações diferenciais parciais e condições de contorno que regem o processo [Li, 2000]. Para facilitar e diminuir o tempo de processamento, a escolha de um modelo apropriado para a aplicação alvo pode conter simplificações das leis de conservação. Um método numérico é normalmente desenvolvido para encontrar uma solução aproximada de um conjunto particular de equações, uma vez que é impraticável criar um método de resolução que seja aplicável a todas as situações.

Em seguida, escolhe-se um método de discretização apropriado, ou seja, um método de aproximar as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas para as variáveis do problema que serão obtidas em localizações discretas no espaço e no tempo [Blasek, 2001]. Existem vários métodos, sendo os mais conhecidos: Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Volumes Finitos (MVF) e Método dos Elementos Finitos (MEF) [Kundu, 2002].

A partir do problema que se deseja representar numericamente, e definido o método a ser empregado na discretização das equações envolvidas no fenômeno, a definição da malha computacional é fundamental uma vez que essas equações são solucionadas em cada elemento da malha [Marques, 2005]. Os pontos em que as variáveis serão calculadas são definidos pela malha que é uma representação discretizada do domínio geométrico no qual o problema será

resolvido [Thompson, 1998]. A malha divide o domínio da solução em um número finito de subdomínios (elementos, volumes de controle, etc.).

A unidade fundamental da malha é denominada célula. Cada célula possui como limites as faces em cujos vértices encontram-se os nós. Em três dimensões as faces são superfícies limitadas por “bordas” e em duas dimensões faces e “bordas” são rigorosamente análogas (Figura 9).

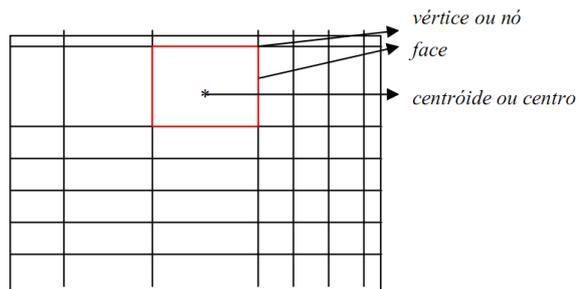


Figura 9 - Representação dos elementos de uma malha bidimensional [Marques, 2005].

As malhas não estruturadas (Figura 10) podem ser compostas por elementos 3D (prismáticos, tetraédricos, hexaédricos ou piramidais) [Maliska, 2004] e são caracterizadas por não apresentarem sequência na numeração dos volumes e por apresentarem um número variável de volumes adjacentes [Batista, 2005]. Este tipo de malha é adequada para geometrias mais complexas por ser mais flexível, conseguindo se adaptar mais facilmente à fronteira do domínio de solução [Gonçalves, 2007]. Teoricamente, estas malhas podem ser usadas com qualquer método de discretização, mas adaptam-se melhor para volumes finitos ou elementos finitos. Os elementos ou volumes de controle podem ter qualquer forma e não há restrição ao número de elementos vizinhos ou vértices.

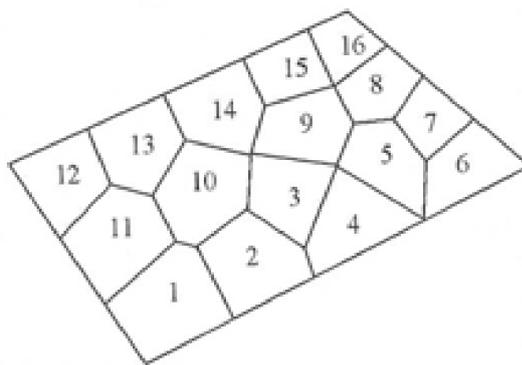


Figura 10 - Representação de uma malha não estruturada [Maliska, 2004].

As malhas estruturadas (Figura 11) são compostas exclusivamente por elementos hexaédricos estruturados, que são caracterizados por apresentarem número constante de elementos adjacentes e uma sequência na numeração dos volumes [Maliska, 2004].

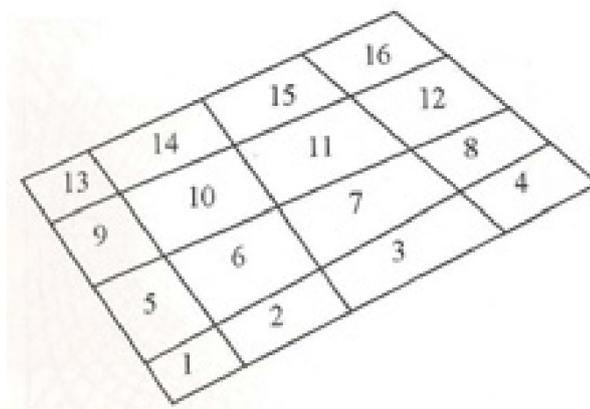


Figura 11 - Representação de uma malha estruturada bidimensional [Maliska, 2004].

A desvantagem destas malhas é que somente podem ser aplicadas a geometrias de média complexidade [Gonçalves, 2007]. Outra desvantagem é que a distribuição dos pontos da malha pode ser complicada. Isto ocorre devido à precisão de cálculo, implicando necessariamente em um menor espaçamento em outras regiões do domínio, ocorrendo assim um desperdício de recursos. Esta questão é ainda mais grave em problemas 3D [Maliska, 2004]. Com o objetivo de contornar estas limitações, foi desenvolvido o conceito de **malhas estruturadas por blocos** (Figura 12). Neste tipo de malha, existem dois (ou mais) níveis de

subdivisão do domínio de solução [Wesseling, 1991]. Em um nível mais grosseiro, existem blocos lógicos com regiões relativamente largas do domínio e a sua estrutura pode ser irregular ou mesmo sobrepor-se. Em níveis mais refinados (dentro de cada bloco) é criada uma malha estruturada. Neste tipo de malha é necessário um tratamento especial nas interfaces dos blocos.

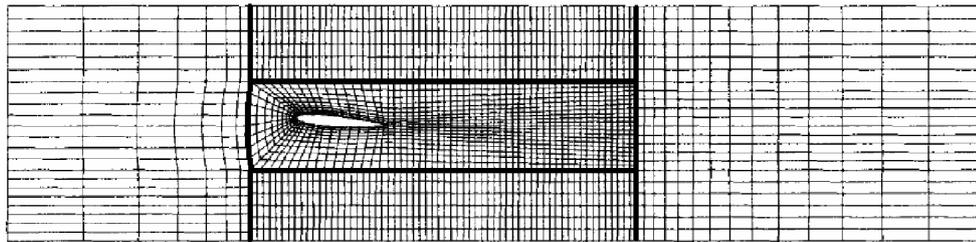


Figura 12 - Representação de uma malha estruturada com blocos [Batchelor, 1967].

A seguir, apresenta-se resumidamente os dois principais métodos para discretização de problemas da mecânica dos fluidos:

a) Método dos Volumes Finitos (MVF): Neste, o domínio de solução é dividido em um número finito de volumes de controle (VC) contínuos e a equação de conservação em análise é integrada em cada VC [Gonçalves, 2007]. Isto garante que a equação discretizada resultante expresse os princípios de conservação para um volume de controle finito, assim como a equação diferencial expressa o mesmo para um volume de controle infinitesimal.

Outra implicação é que o princípio de conservação é perfeitamente satisfeito para qualquer grupo de volumes de controle [Nieckele, 1996]. O MVF pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, por isso adapta-se a geometrias complexas. A malha define apenas as fronteiras do volume de controle e não necessita estar relacionada a um sistema de coordenadas. Como desvantagem, tem-se a dificuldade em desenvolver métodos com ordem superior a 2 em modelos 3D com malhas não estruturadas.

b) Método dos Elementos Finitos (MEF): o MEF é similar ao MVF em vários aspectos. O domínio é dividido em um conjunto discreto de elementos, ou

elementos finitos, que usualmente são não-estruturados [Gonçalves, 2007]. O que diferencia o MEF do MVF é a multiplicação das equações por uma função peso antes de serem integradas sobre todo o domínio. Na forma mais simples do MEF, a solução é aproximada por uma função linear com os elementos de modo a garantir a continuidade da solução através das fronteiras dos elementos. O principal inconveniente, que é comum a todos os métodos que usam malhas não-estruturadas, é o fato de as matrizes das equações linearizadas não serem tão bem estruturadas como as das malhas organizadas fazendo com que seja mais difícil encontrar métodos de resolução eficientes.

Estes métodos de discretização são utilizados em estudos de escoamento de fluido em meios fibrosos, e amplamente aplicados ao processo RTM, como mostram os estudos de Lam *et al.* [2000], Jiang *et al.* [2007], Choi *et al.* [1998] e Li *et al.* [2005].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo foi dividido em três partes, na primeira são apresentados os materiais e métodos utilizados para os experimentos de determinação da viscosidade e da densidade do fluido, da porosidade e da permeabilidade do sistema fibroso. Na segunda, é descrita a metodologia para utilização do software ANSYS CFX (software comercial de análise computacional) para a simulação numérica do problema. Por fim, é descrita a metodologia aplicada para utilização o software comercial de análise computacional PAM-RTM.

4.1 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram:

- Óleo vegetal (óleo de soja) comercial refinado da marca Liza;
- Tecido plano (0/90) de fibra de vidro-E da *Owens Corning* (300 g/m²).

4.2 Métodos

4.2.1 Experimento RTM e medição de κ

A Figura 13 apresenta o sistema RTM utilizado, disponível no LACOMP/UFRGS. Este sistema é composto por vários equipamentos que incluem: compressor, vaso de pressão (modelo 6100E da Kaizen Tech), molde superior em vidro reforçado, cavidade do molde inferior em aço, controlador de pressão (modelo Druck DPI 530 da GE Sensing), transdutor de pressão (modelo NP-430D da Novus Automation), sistema de aquisição de dados e câmera (Sony modelo *Cyber-shot* DSC-H9). Na Figura 14 é possível ver detalhadamente o posicionamento da pré-forma na cavidade do molde, no caso desta ilustração utilizando 3 camadas de tecido, o que varia para cada experimento. A cavidade

do molde possui dimensões de 300 x 300 mm com uma espessura de 2 mm. Os canais de entrada e de saída de fluido possuem um raio interno de 2,29 mm.

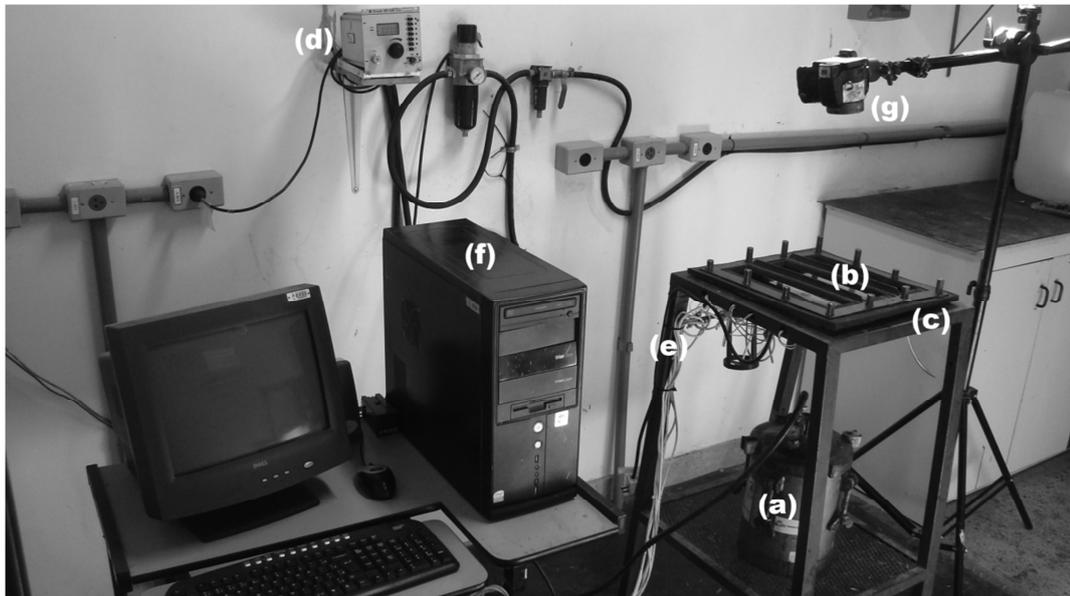


Figura 13 - Sistema RTM do LACOMP/UFRGS: (a) Vaso de pressão, (b) Molde superior em vidro reforçado, (c) Molde inferior em aço, (d) Controlador de pressão (Druck), (e) Transdutor de pressão, (f) Sistema de aquisição de dados e (g) Câmera.

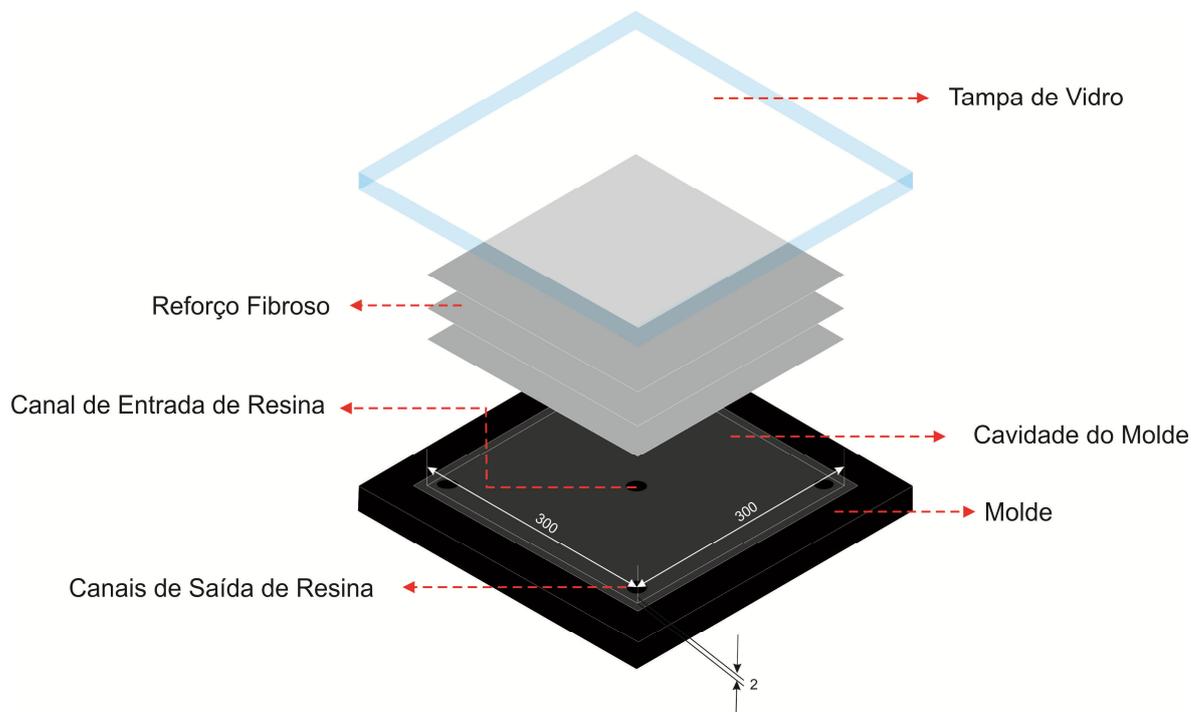


Figura 14 – Ilustração do posicionamento do reforço fibroso no sistema RTM UFRGS/LACOMP.

Para se determinar a permeabilidade em um molde de injeção radial (Equação (6)), primeiramente é necessário conhecer as propriedades do fluido. Neste trabalho optou-se por utilizar um óleo vegetal, que representa um fluido Newtoniano, sendo de fácil manuseio e de baixo custo. A sua massa específica foi medida por picnometria, onde o fluido foi inserido dentro do picnômetro modelo BLAUBRAND NS10/19 (Figura 15), ocupando todo o seu volume de 50 ml. A massa específica medida para o óleo foi de $0,914 \text{ g/cm}^3$.

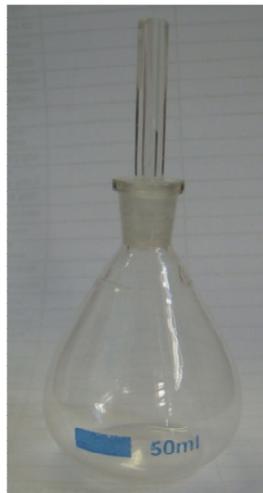


Figura 15 – Picnômetro utilizado para determinar a massa específica do fluido.

A viscosidade do fluido foi medida em diversas temperaturas (de 18 a 70°C) com o viscosímetro Brookfield HBDV-II+C/P (Figura 16) com o *spindle* S40. Para verificar o comportamento do fluido, mediu-se também a viscosidade para diversas taxas de cisalhamento para uma temperatura constante de 20°C .



Figura 16 – Viscosímetro utilizado para determinar a viscosidade do fluido em várias temperaturas.

Os parâmetros dos experimentos realizados neste estudo estão descritos na Tabela 2. A nomenclatura utilizada indica a pressão de injeção, o volume de fibras e a temperatura de cada experimento.

Tabela 2 - Parâmetros dos experimentos realizados.

	Nomenclatura	P_{inj}(bar) – pré-set	V_f (%) – pré-set	V_{f real} (%)	Temperatura (°C)
Variação de V_f	P01V20T23	0,1	20	24,0	23
	P01V30T23	0,1	30	30,3	23
	P01V40T23	0,1	40	43,4	23
Variação de P_{inj}	P03V40T23	0,3	40	41,7	23
	P05V40T23	0,5	40	41,6	23
	P07V40T23	0,7	40	42,2	23
	P09V40T23	0,9	40	41,7	23
	P10V40T23	1,0	40	41,9	23
Variação de Temperatura	P03V40 T40	0,3	40	41,7	40
	P03V40 T60	0,3	40	42,2	60
Casos Especiais	P09cteV40T23	0,9	40	41,8	23
	P09V40T23-OB	0,9	40	-	-

Os experimentos P03V40T40 e P03V40T60 foram realizados com o molde aquecido a 40 e 60°C, respectivamente. O sistema de aquecimento do molde consiste de 3 resistências elétricas acopladas no interior molde, cujo controle é feito através de termopares. Para se aferir a temperatura do molde, foram tiradas fotos da superfície do molde com o equipamento Fluke TiR32 *Thermal Imager*, mostrado na Figura 17. Este equipamento possui uma faixa de captura de temperatura de -20 a 600 °C, e seu sistema de leitura baseia-se na emissão de ondas infravermelho da superfície a ser medida, gerando uma imagem com escalas de cores. Logo, foi necessário utilizar um valor de emissividade, referente ao material da cavidade interna do molde para calibrar o equipamento e obter leituras precisas. A emissividade utilizada foi de 0,28 que é o valor indicado para superfícies de aço polido.



Figura 17 – Equipamento Fluke TiR32 Thermal Imager utilizado para aferir a temperatura do molde.

O procedimento de determinação da permeabilidade foi realizado a pressão constante. Para tal, espera-se até que o controlador de pressão (*Druck*) mostre uma estabilização na P_{inj} , o que demanda um determinado tempo em cada condição experimental. A Figura 18 apresenta, como ilustração, o comportamento da pressão do fluido ao longo do tempo para o experimento P09V40T23, medido através de um transdutor de pressão acoplado ao canal de injeção do molde.

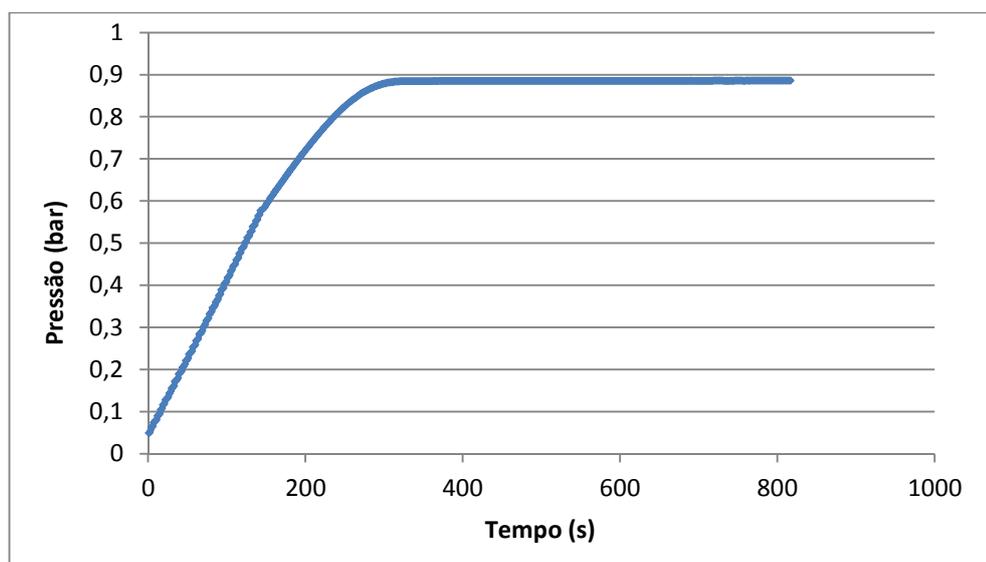


Figura 18 – Gráfico do comportamento da pressão para o experimento P09V40T23.

Durante o processo de injeção do fluido, a câmera fotográfica é posicionada acima do molde possibilitando acompanhar (*i.e.* fotografar) o avanço do fluido ao longo do tempo como ilustrado na Figura 19. O tempo medido foi controlado utilizando um cronometro que era ligado no instante que o fluido começava a impregnação. Assim, era possível conhecer o raio da frente de fluxo (r_{ff}) em diversos instantes de tempo para posteriormente determinar κ . Para esta determinação do r_{ff} , foi utilizado o *software* Corel Draw conforme ilustra a Figura 20. Assim, foram obtidas as permeabilidades para todos os experimentos listados na Tabela 2. Na Figura 21, é apresentado o gráfico da variação do tempo com o termo ξ referente ao experimento P05V40T23 como ilustração.

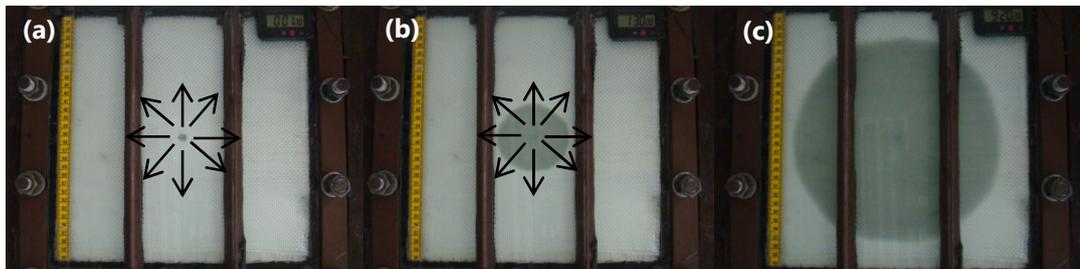


Figura 19 - Evolução do escoamento do fluido na injeção radial RTM para 1 s (a), 90 s (b) e 560 s (c).

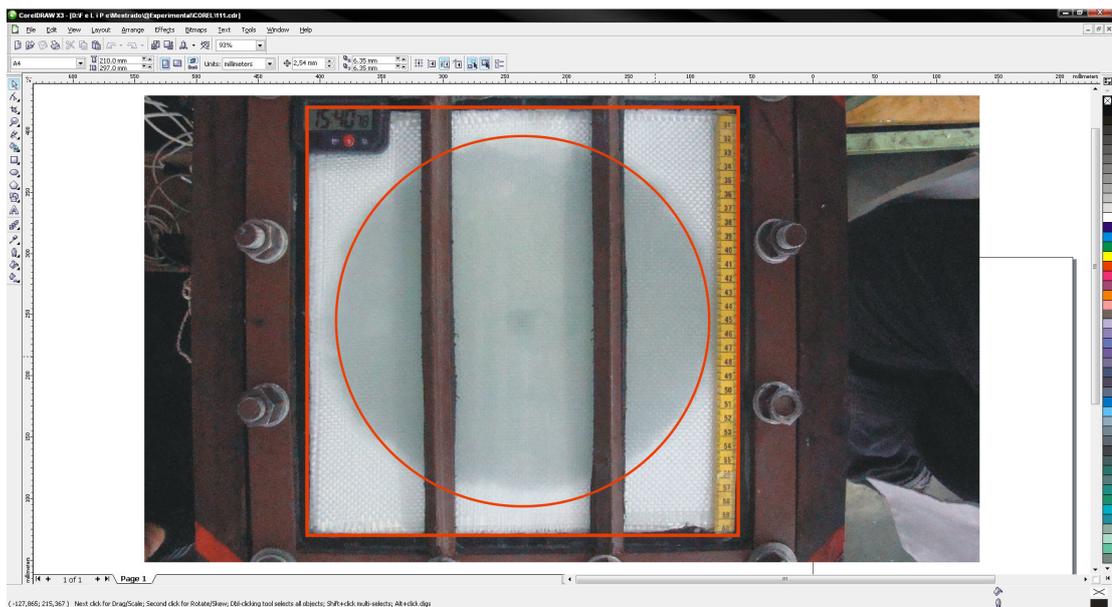


Figura 20 – Utilização do software Corel Draw para a determinação do r_{ff} .

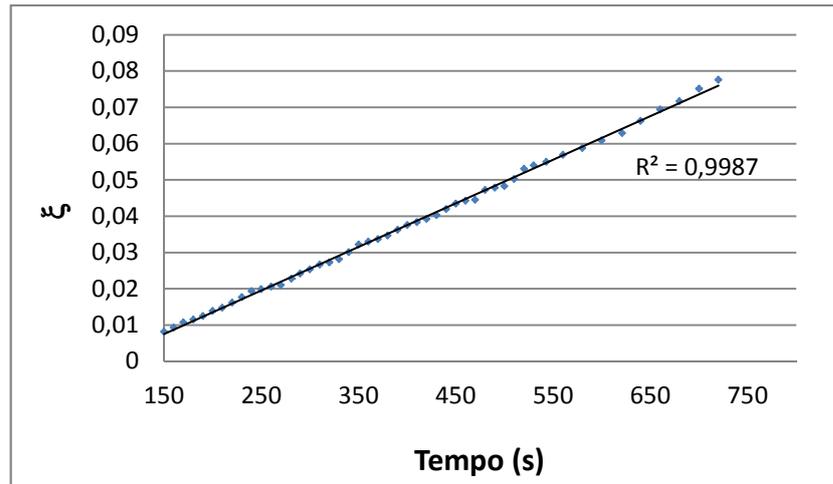


Figura 21 – Variação do termo ξ vs. tempo para o cálculo de κ no experimento P05V40T23 e ajuste linear dos pontos.

A fim de se analisar o comportamento do escoamento do fluido em uma geometria não regular, diferente dos demais casos, foi realizado o experimento: caso especial P09V40T23-OB. Nele foram inseridos obstáculos geométricos no reforço fibroso, conforme mostra o desenho da Figura 22. Considera-se que estes obstáculos são impermeáveis ($\phi = 0$), ou seja, não há escoamento do fluido através deles. Para a realização experimental deste caso, os tecidos de fibra de vidro foram cortados seguindo a geometria selecionada (Figura 23), apresentado na Figura 23a, e nos rasgos foi inserido plasticina (massa de modelar) conforme se observa na Figura 23b.

Nesta etapa houve um cuidado especial para que a altura da plasticina não fosse maior que a altura dos tecidos, pois se isso ocorresse haveria um escoamento preferencial por cima do tecido. Por outro lado, caso a altura da plasticina fosse menor que a dos tecidos, haveria escoamento preferencial por cima da plasticina. Com este novo caso procurou-se avaliar o comportamento do fluido em um caso com uma geometria irregular, que poderia ser encontrada em uma situação prática de processamento de peças industriais. Para esta geometria não é possível o emprego da Equação (6), pois o perfil circular logo é desfeito ao encontrar a parede dos obstáculos geométricos. Portanto, esta análise será de cunho qualitativo/comparativo, não sendo calculada a permeabilidade do sistema nem o t_{border} , apenas o t_{fill} e o perfil de impregnação.

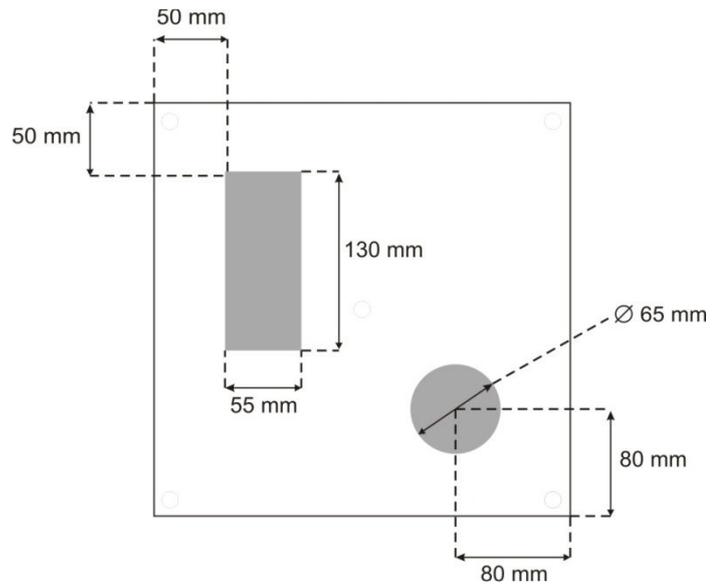


Figura 22 – Geometria e posicionamento dos obstáculos geométricos do caso especial P09V40T23-OB.

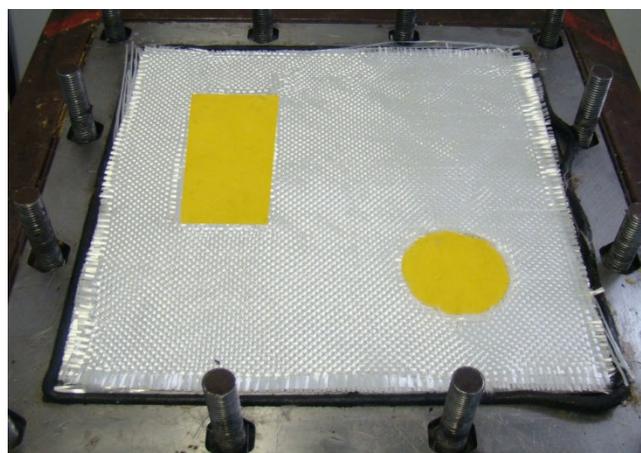
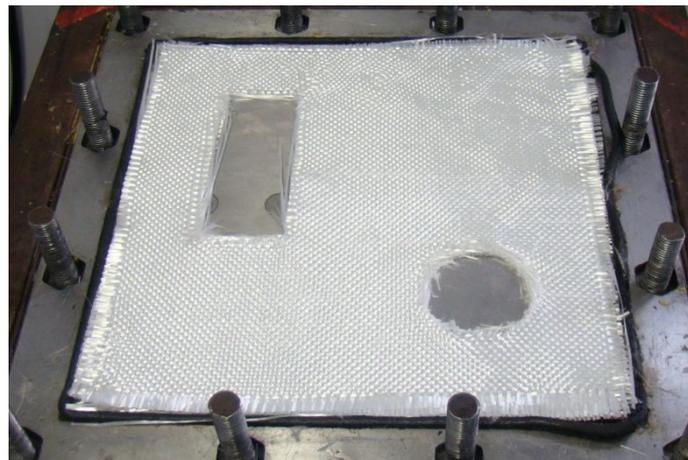


Figura 23 – Preparação experimental para a realização do caso especial P09V40T23-OB, rasgos nos tecidos (a) e preenchimento com a plasticina (b).

4.2.2 Análise Computacional

4.2.2.1 Geração da geometria e malhas 2D e 3D da cavidade do molde

A geometria da cavidade inferior do molde RTM foi desenhada utilizando o software ANSYS ICEM v12.0.1, respeitando suas dimensões e o posicionamento dos canais de entrada e saída do fluido, como apresentado na Figura 24 em uma vista do plano XY.

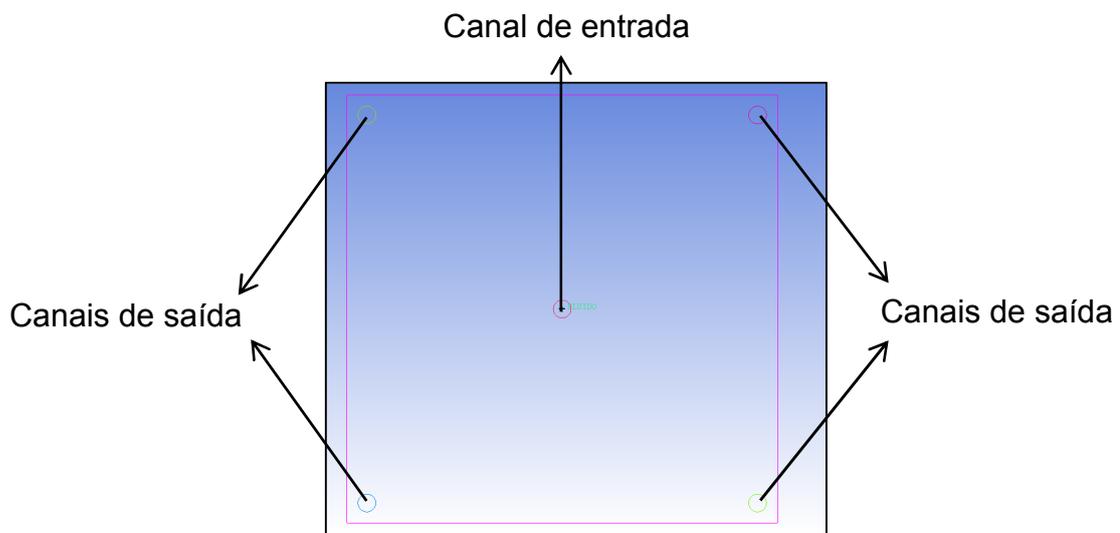


Figura 24 – Geometria 3D da cavidade interna do molde RTM em uma vista no plano.

Para se determinar qual seria o tipo de malha 3D que melhor se adaptaria ao problema no ANSYS CFX, foram avaliadas 4 tipos de malhas, todas contendo somente elementos tetraédricos, detalhadas na Tabela 3. As malhas E17K e E12K foram geradas a partir de alterações no tamanho e na quantidade dos elementos da malha E50K, resultando em malhas com diferentes densidades de elementos e nós. Em todas as malhas houve uma preocupação em aumentar a densidade de elementos nas regiões de entrada e saída do fluido, pois são as regiões mais importantes na aplicação do modelo matemático (regiões de maiores gradientes de velocidade e pressão).

Todas as malhas estruturadas (Figura 25a) foram geradas com o auxílio de blocos, como mostra a Figura 25b. A Figura 25c mostra em detalhes a região do canal de entrada do fluido na malha E17K, e a Figura 25d, este detalhe em um outro ângulo. A malha NE é apresentada na Figura 26a em uma vista no plano

XY, e em um outro plano na Figura 26b, e sua região do canal de entrada do fluido é mostrada em detalhe na Figura 26c e em um outro ângulo na Figura 26d.

Tabela 3 – Diferentes tipos de malhas 3D geradas para o ANSYS CFX.

Nomenclatura	Tipo	Nº de elementos	Nº de nós
NE	Não Estruturada	454258	84832
E12K	Estruturada/Blocos	12365	15885
E17K	Estruturada/Blocos	17532	23876
E50K	Estruturada/Blocos	56184	47046

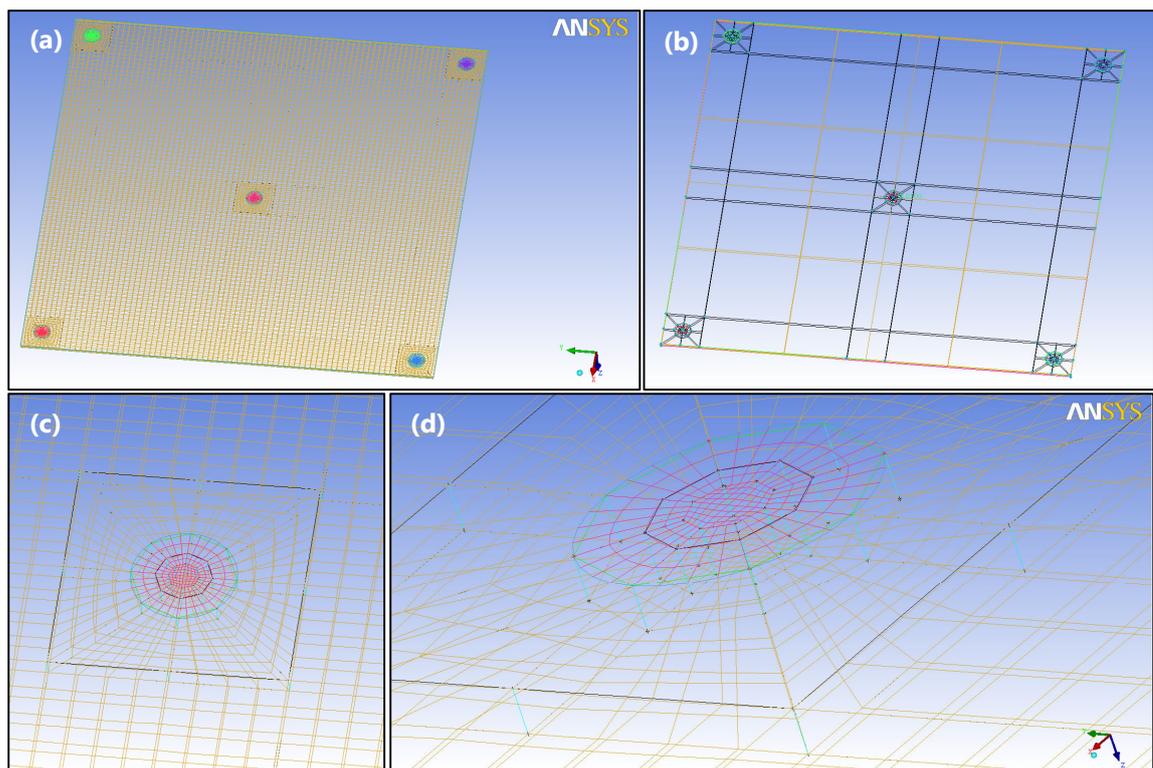


Figura 25 – Malha E17K (a) com a utilização de blocos em sua estrutura (b), detalhe da sua região do canal de entrada do fluido (c) e em um diferente ângulo (d).

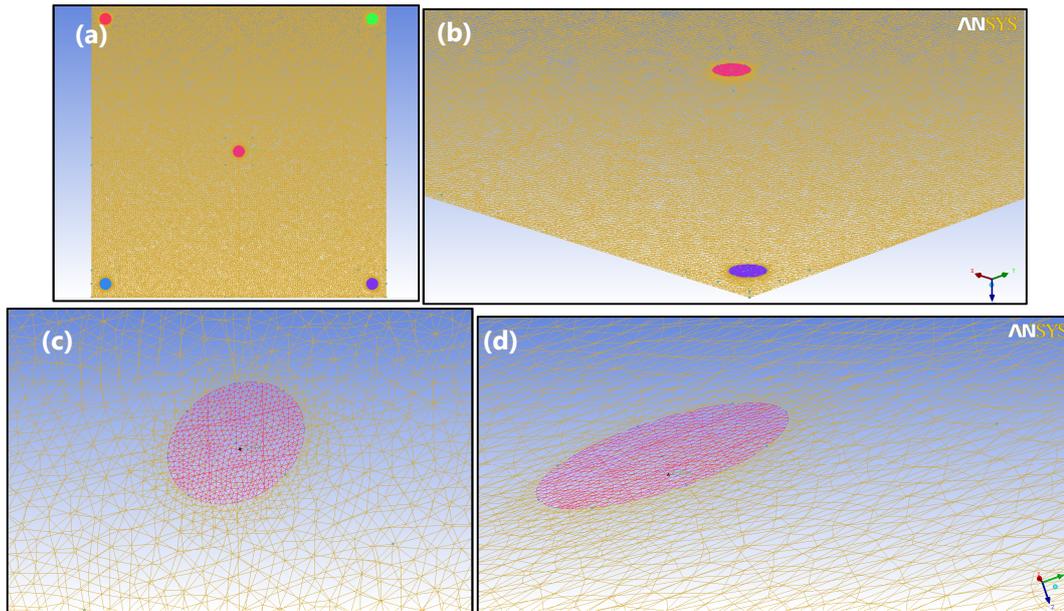


Figura 26 – Malha NE em uma vista no plano XY (a) e em outro plano (b), e detalhe do canal de entrada do fluido (c) e em outro ângulo (d).

Para as simulações numéricas no PAM-RTM foram utilizadas apenas malhas 2D, obtidas a partir das malhas 3D criadas para o ANSYS CFX. Para isto editou-se a malha 3D final selecionada para o ANSYS CFX e retirou-se apenas a casca da superfície superior do molde, mantendo, inicialmente, a mesma quantidade e topografia dos elementos da malha 3D. Após, foi necessário realizar uma conversão dos elementos tetraédricos para elementos triangulares, como pode ser observado na Figura 27, que é a única geometria de elemento aceita para simulações 2D no PAM-RTM.

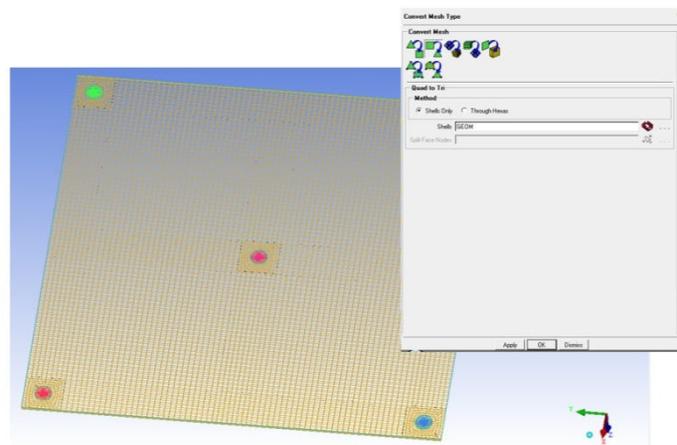


Figura 27 – Conversão para elementos triangulares da malha 2D.

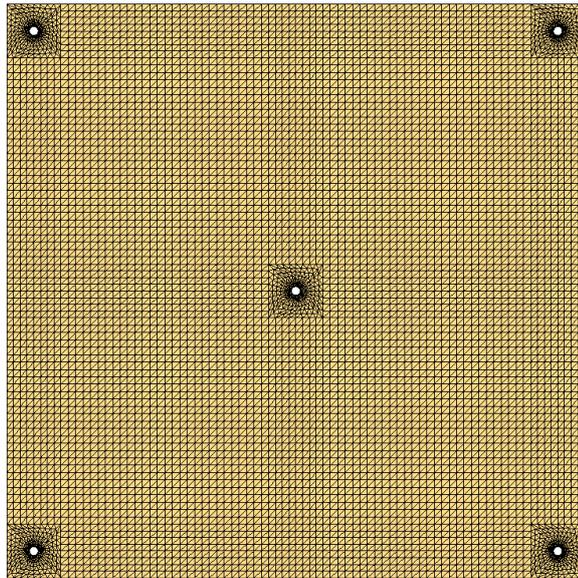


Figura 28 – Malha 2D utilizada nas simulações computacionais do PAM-RTM.

Neste trabalho foram realizadas simulações computacionais dos casos P01V20T23, P01V30T23, P01V40T23, P03V40T23, P05V40T23, P07V40T23, P09V40T23, P10V40T23, P09cteV40T23 e P09V40T23-OB. Ou seja, não foram contemplados os casos que envolviam variação da temperatura (P03V40T40 e P03V40T60), pois a complexidade das simulações fugiriam ao escopo deste trabalho.

4.2.2.2 Condições de Contorno do Problema

No *software* ANSYS CFX a malha foi inicialmente dividida em 3 regiões: canal de entrada (*inlet*), canais de saída (*outlet*) e paredes (*walls*), no PAM-RTM dividiu-se em enchimento (*flow front*) e paredes (*walls*). Considerou-se inicialmente haver pressão (P_i), temperatura (T_i) e saturação do ar (S_{ar}) homogeneamente distribuída ao longo da pré-forma com os seguintes valores: $P = P_{atm} = 1013,23$ mbar, $T_i = 296$ K e $S_{ar} = 1$ (consequentemente a saturação do fluido é $S_{flu} = 0$). Estas condições de contorno para ambos os *softwares* estão representadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Condições de contorno do problema para ambos os *softwares*.

Modelo	Região	f_a	f_f	P (mbar)	U_a (m/s)	U_r (m/s)
Multifluid (ANSYS CFX®)	Inlet	0	1	P(t), Equação (17)	-	-
	Outlet	-	-	1013,25	-	-
	Walls	-	-	-	0	0
CV/FE (PAM-RTM)	Inlet	-	1	P(t), Dados experimentais (manométrica)	-	-
	Enchimento (Flow Front)	-	-	0 (manométrica)	-	-
	Walls	-	-	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$	-	-

onde: f_a e f_f são as frações volumétricas do ar e do fluido, respectivamente; U_a e U_r são os vetores velocidade do ar e da resina, respectivamente e P é a pressão nas regiões *inlet* e *outlet* da pré-forma no ANSYS CFX, dada pela Equação (17) que é apresentada em função do tempo requerido para atingir a pressão estável (t_e). A Eq. (17) é obtida a partir da interpolação de leituras experimentais de pressão de injeção em função do tempo, e é única para cada experimento.

$$P_{inj}(t) = \begin{cases} P_0 + A.t^{0,25} + E.e^{\left(\frac{B.t}{C+D.t}\right)}, & \text{para } 0 \leq t \leq t_e \\ P_e, & \text{para } t \geq t_e \end{cases} \quad (17)$$

4.2.2.3 Criação do modelo no ANSYS CFX

A Equação (17) foi desenvolvida para ajustar os dados experimentais de pressão para cada experimento, como explicado na Figura 18, e assim inserir essa informação no modelo do ANSYS CFX. Para cada experimento há um ajuste de curva diferente, que copia o seu comportamento experimental; as constantes A , B , C , D e E são necessárias para este ajuste. P_e é a pressão final (pressão estável) atingida no experimento e t_e , o instante de tempo onde P passa a ser considerada P_e . Assim, o modelo criado no ANSYS CFX considera P_{inj} variável

até t_e e depois passa a considerar $P_{inj} = P_e$ (constante). O ajuste de pressão do experimento P05V40T23 pode ser observado na Figura 29. Estas curvas de ajuste foram criadas utilizando o software *Wolfram Mathematica* e seu algoritmo pode ser analisado no Anexo 1.

A fim de se criar um modelo prático para simular todos os casos no ANSYS CFX, foi empregado um sistema de variáveis (no ANSYS chamado de *expressions*). Assim, a partir de um modelo genérico chamado MODELO_ZERO.cfx (arquivo de pré-processamento do ANSYS CFX) são chamadas as variáveis do experimento específico a partir de um arquivo .ccl, gerando um novo arquivo contendo o nome específico do experimento e suas variáveis. Na Figura 30 são listadas as variáveis do caso P05V40T23, nesta ilustração estão contidas as variáveis da forma com que elas são lidas pelo ANSYS CFX, portanto não há uma preocupação com a acentuação e/ou com a ortografia das palavras.

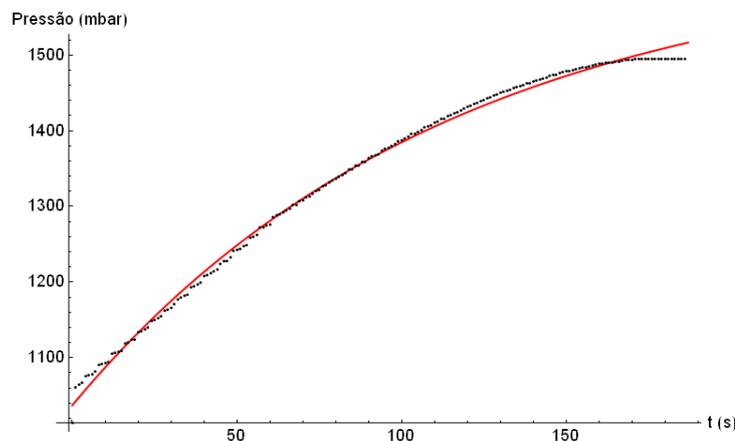


Figura 29 – Ilustração da curva de ajuste de pressão do experimento P05V40T23 gerado no *Wolfram Mathematica*.

A variável **passo de tempo** (*timestep*) é um dos pontos mais importantes para o sucesso da simulação computacional no ANSYS CFX, pois determina o número de iterações numéricas que cada simulação terá. Como não é possível determinar analiticamente um valor-ótimo para esta variável, diversos testes foram realizados variando o *timestep* para cada caso a fim de fazer convergir a simulação numérica em um tempo menor. Assim, foi gerado um arquivo .ccl para

cada um dos casos a serem simulados. A Figura 31 mostra a interface de pré-processamento do ANSYS CFX carregado com as variáveis do caso P05V40T23. As setas indicam o sentido de entrada e saída do fluido.

Finalizada a etapa de pré-processamento, os modelos foram carregados nos computadores responsáveis pelo processamento matemático. Os computadores utilizados para as simulações possuíam processadores Quad Core 2.66 GHz, 8 GB de memória RAM e 1 TB de memória física (HD). A interface de processamento do ANSYS CFX é chamada de *CFX-Solver Manager* 12.0. Por fim, os dados gerados no processamento foram encaminhados para o pós-processamento (*CFD Post*) (Figura 32). Estes resultados serão analisados, discutidos e comparados no próximo capítulo.

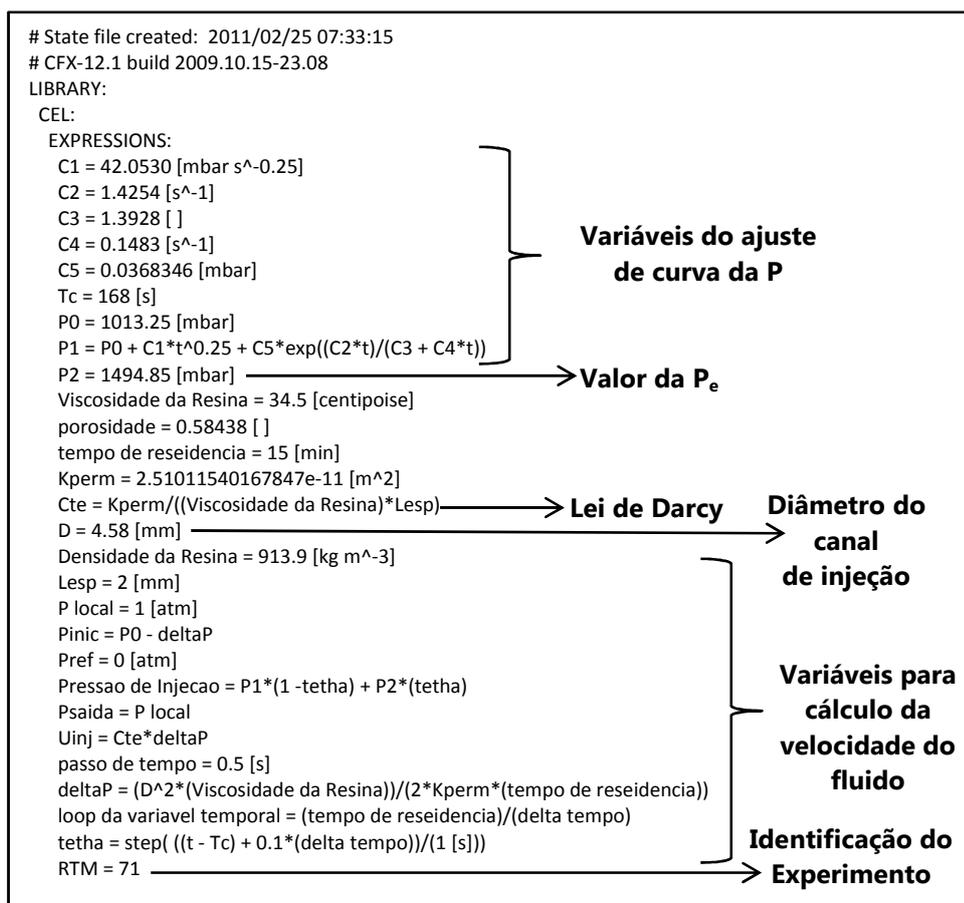


Figura 30 – Sistema de variáveis aplicado o modelo ANSYS CFX do caso P05V40T23.

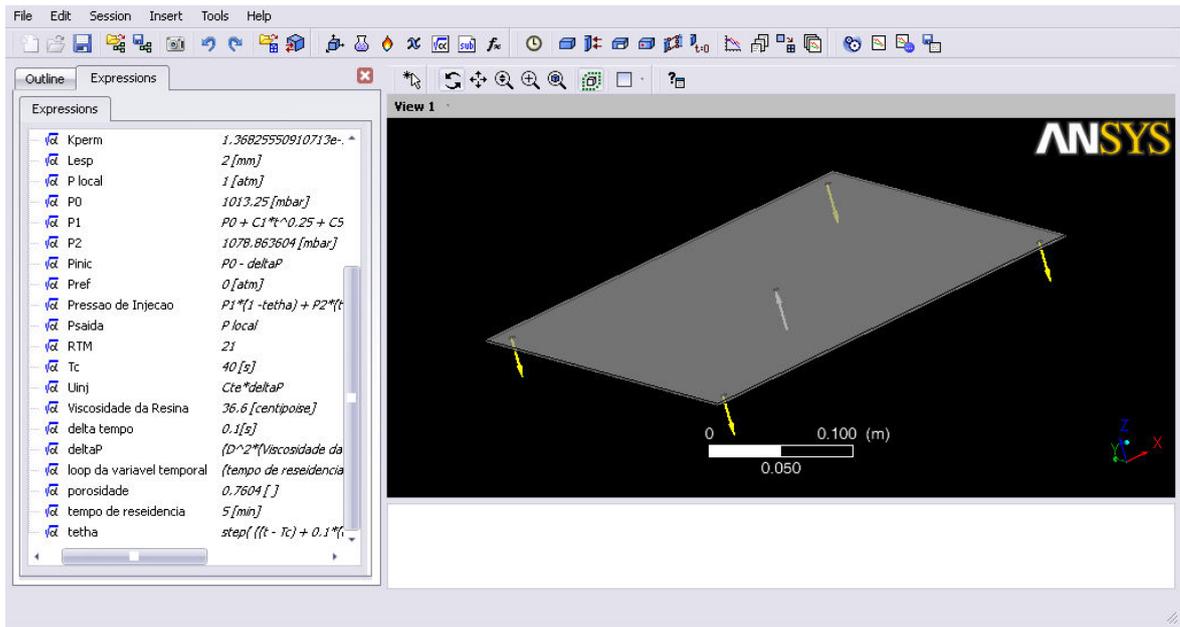


Figura 31 – Interface do pré-processamento do ANSYS CFX carregada com as variáveis do caso P05V40T23.

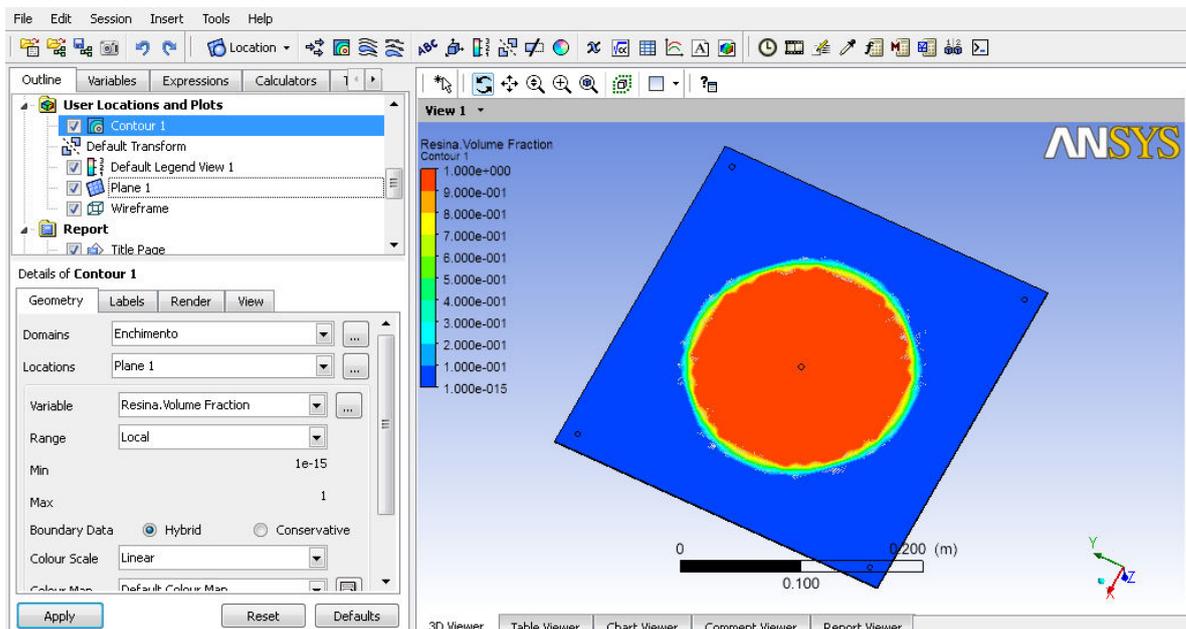


Figura 32 – Interface do ANSYS CFX Post.

4.2.2.4 Criação do modelo no PAM-RTM

O PAM-RTM, diferentemente do ANSYS CFX, é um software comercial dedicado ao estudo das moldagens por RTM, logo, não se faz necessário realizar

adaptações ou implementar um sistema de carregamento de variáveis, e todos os dados do caso a ser estudado são preenchidos em campos pré-determinados. As condições de contorno já foram abordadas e estão presentes na Tabela 4. O layout do *software*, aberto com o caso P05V40T23, é apresentado na Figura 33, com detalhe para o menu-guia lateral, onde estão localizados os conjuntos dos campos para preenchimento das especificações de cada caso.

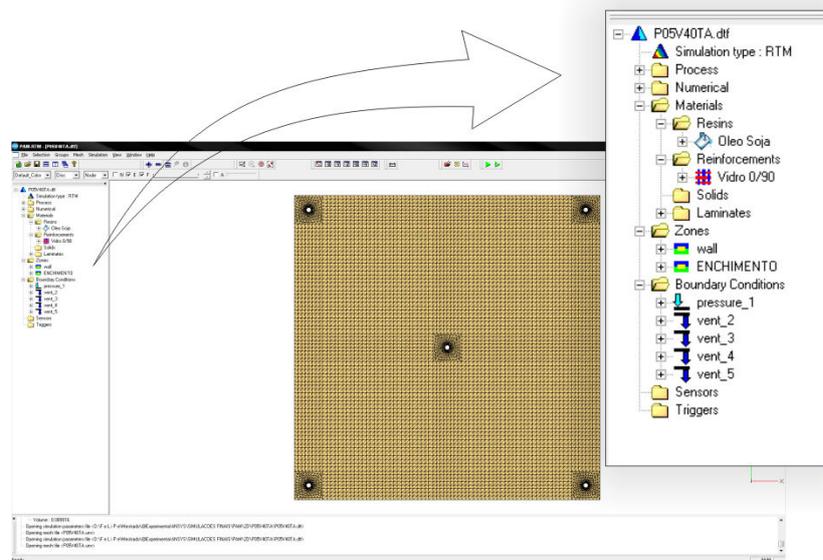


Figura 33 – Layout do *software* PAM-RTM com detalhe no menu-guia lateral.

A malha 2D foi importada para o PAM-RTM e se iniciou o processo de *setup* para cada caso. Primeiramente foi adicionado um novo fluido no campo *Materials* > *Resins*, nomeado “Oleo Soja”, nele foram inseridos os dados de densidade e viscosidade do fluido, observado na Figura 34a. Após, foi adicionado um novo reforço fibroso no campo *Materials* > *Reinforcements*, nomeado “Vidro 0/90”, nele foram inseridos os dados referentes à permeabilidade do reforço fibroso, observado na Figura 34b. Na sequência, foram determinados os parâmetros de processo, tais como tempo máximo de injeção (tempo a partir do qual a simulação é encerrada, mesmo que não haja o preenchimento completo do molde) e especificação da gravidade, observada na Figura 34c. Após, foram determinados os parâmetros da simulação, as variáveis que se deseja calcular (*i.e.* pressão, tempo de preenchimento e velocidade) e o período de amostragem desejado, observado na Figura 34d.

Na sequência, dividiu-se a malha em duas zonas, ENCHIMENTO e WALL, observado na Figura 35. Nesta etapa é informado ao PAM-RTM que estas zonas possuem uma espessura de 2 mm (espessura da cavidade do molde), indicando este valor no campo *Zone > Thickness*, que também pode ser observado na Figura 35. Assim, o caso passa a ter uma terceira dimensão, representando o caso real em 3D. Na zona *wall*, que são as paredes internas da cavidade do molde, determina-se a condição de velocidade zero, atribuindo a ela $\phi = 1$. A zona enchimento foi subdividida em 5 grupos, 1 *inlet* e 4 *outlets*, como observado da Figura 36.

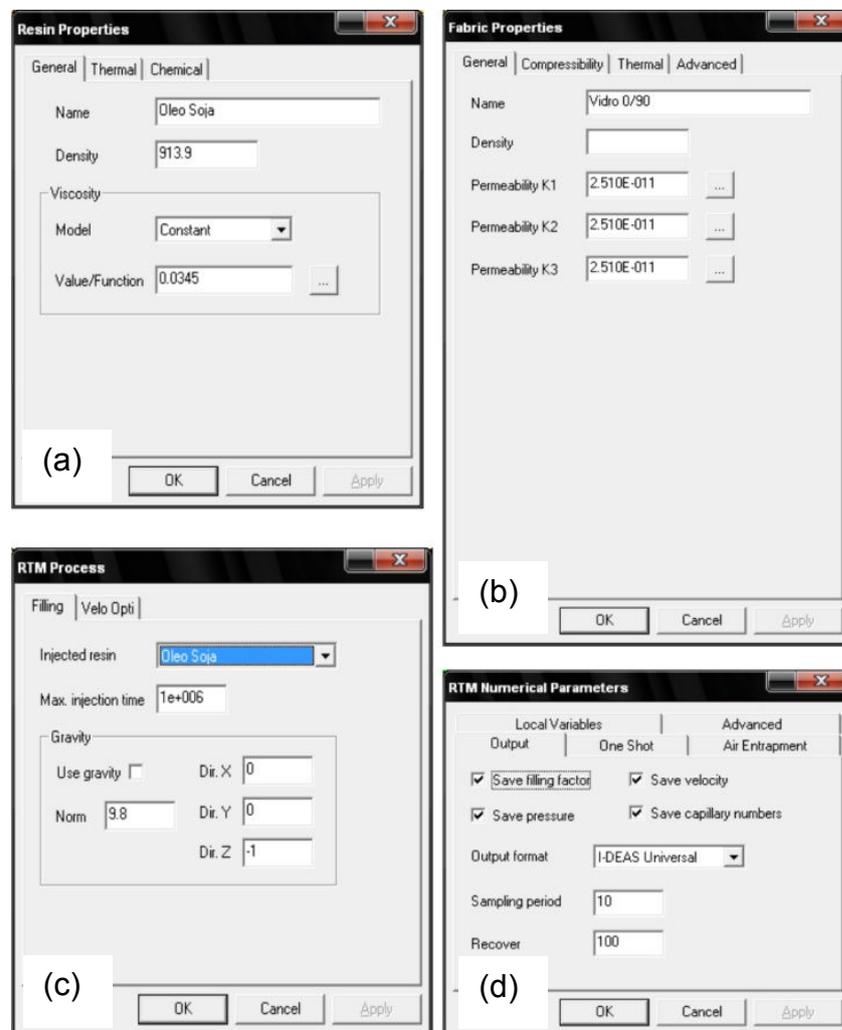


Figura 34 – Preenchimento dos campos das propriedades do caso P09V40T23 no PAM-RTM. Propriedades da Resina (a), Propriedades do Reforço (b), Parâmetros do Processo (c) e Parâmetros Numéricos (d).

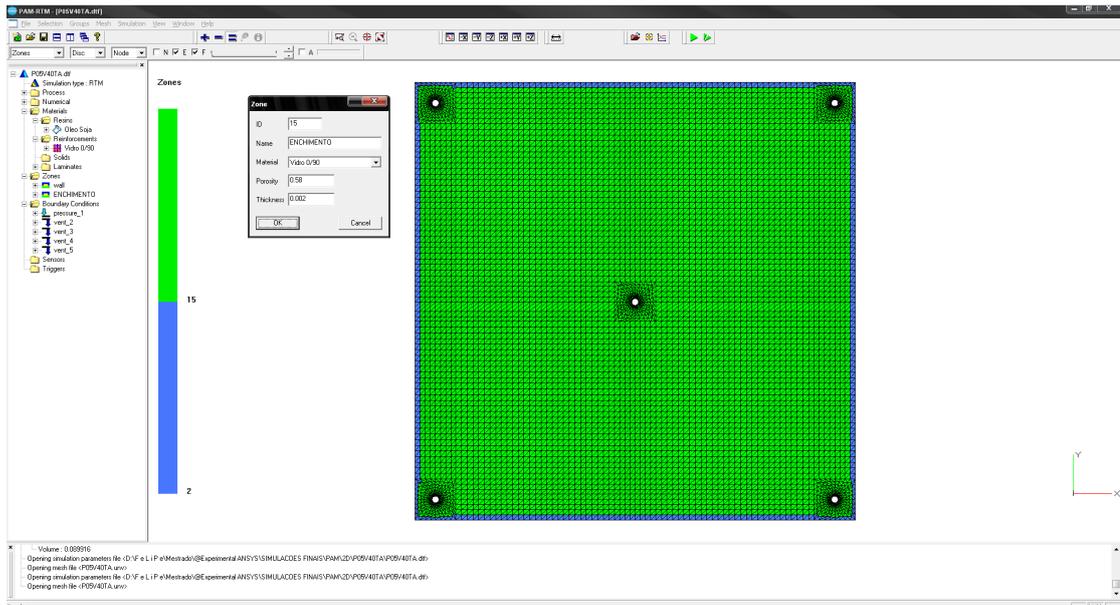


Figura 35 – Divisão da malha 2D em duas zonas. wall em azul e enchimento em verde.

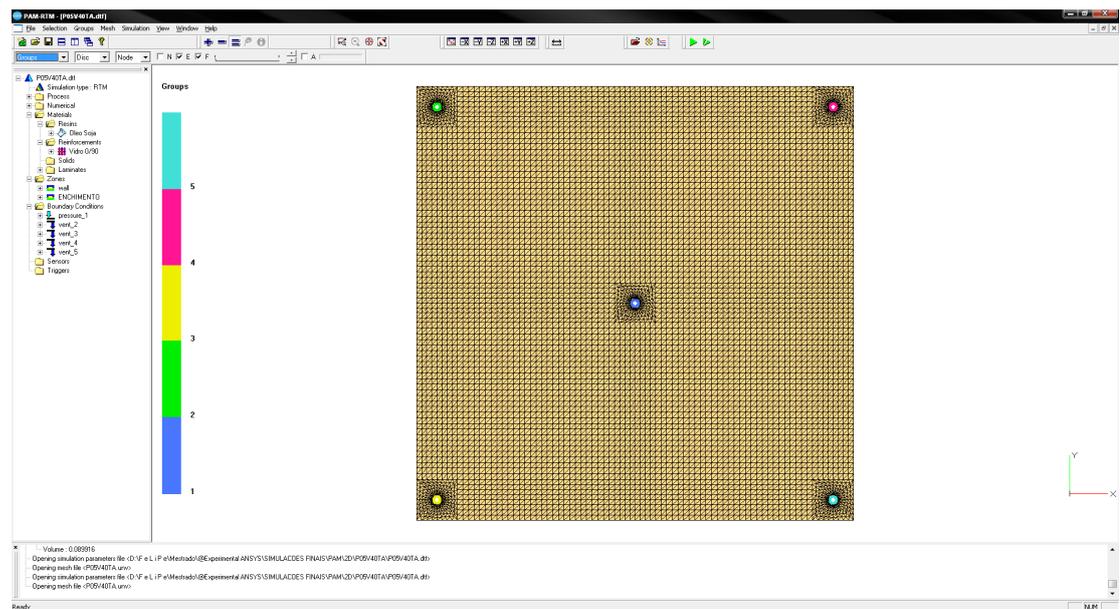


Figura 36 – Criação dos grupos Inlet e Outlet.

Por fim, determinou-se as condições de contorno de pressão. Para os grupos *outlet*, foi atribuído a condição de *vent* (abertura), com pressão manométrica nula. Para o grupo *inlet* atribuiu-se os valores da pressão experimental, variando com o tempo. Para isto, foi preenchido o campo de pressão variável com os dados experimentais, observados na Figura 37a. E na Figura 37b, é apresentado o gráfico gerado pelo PAM-RTM com estes dados carregados.

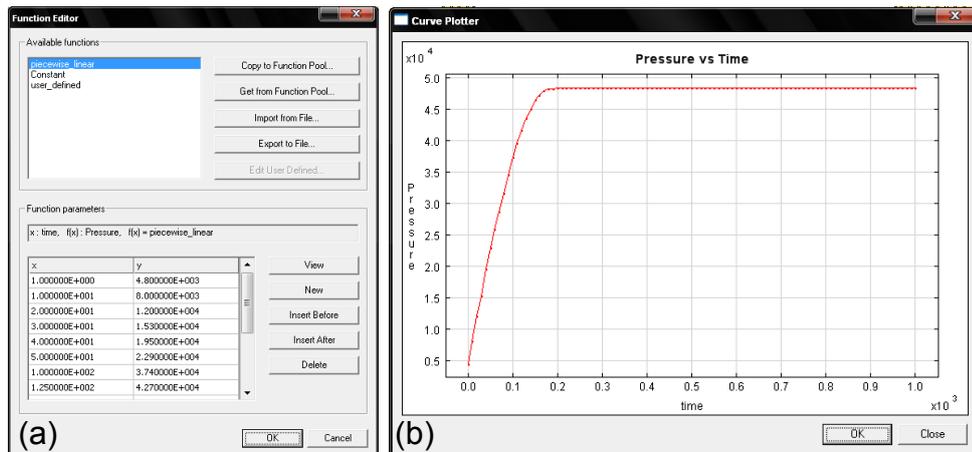


Figura 37 – Preenchimento com os valores de P_{inj} do caso P05V40T23 no PAM-RTM (a) e o gráfico gerado (b).

Finalizada a etapa de pré-processamento, os modelos foram carregados e processados em um Computador com processador Intel® Atom™ N270 1,66 GHz, 2 GB de memória RAM e 250 GB de memória física (HD). Por fim, os dados gerados no processamento foram carregados no próprio PAM-RTM, conforme apresentado na Figura 38. Estes resultados serão analisados e discutidos no próximo capítulo.

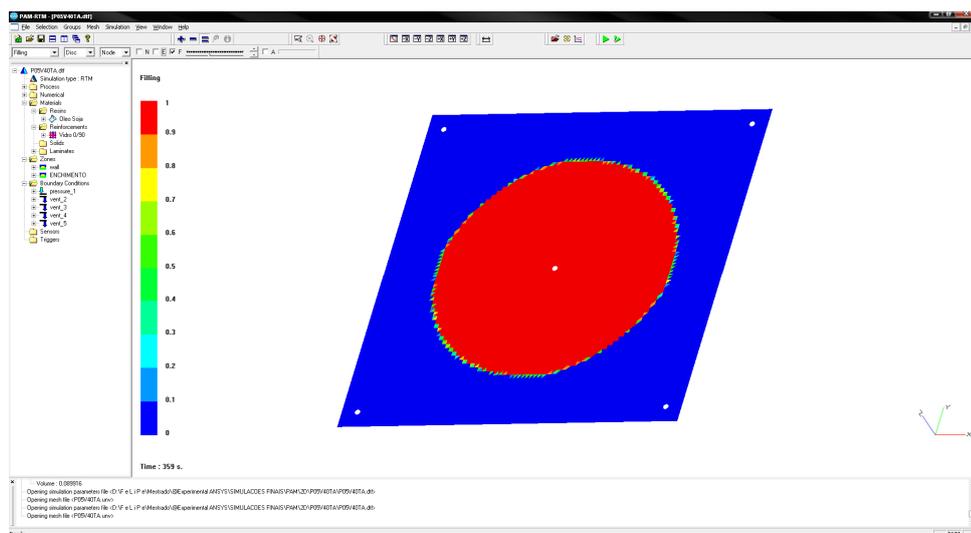


Figura 38 – Interface do PAM-RTM carregada com os resultados do caso P05V40T23.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliações Preliminares dos Experimentos RTM

5.1.1 Viscosidade do Fluido

O resultado das medidas de viscosidade para o fluido em diversas temperaturas está apresentado na Figura 39. O fluido apresentou um comportamento típico, tendo sua viscosidade variando inversamente proporcional ao aumento da temperatura [Rudd *et al.*, 1997]. Nas temperaturas de interesse deste estudo, 23, 40 e 60 °C, o fluido apresentou as viscosidades de 58,6, 30,5 e 16,5 cP, respectivamente. Na Figura 40a é observado o comportamento do fluido quando se varia a taxa de cisalhamento para a temperatura de 20 °C, e na Figura 40b, para a temperatura de 70 °C. Em ambos os casos, a tensão de cisalhamento variou linearmente com a variação da taxa de cisalhamento, comprovando tratar-se de um fluido Newtoniano, que portanto, pode ser utilizado com a Lei de Darcy. Mesmo fluidos Não-Newtonianos são aplicados, como nos estudos de Justin *et al.* [2011], Park *et al.* [2011] e Teoh *et al.* [2011].

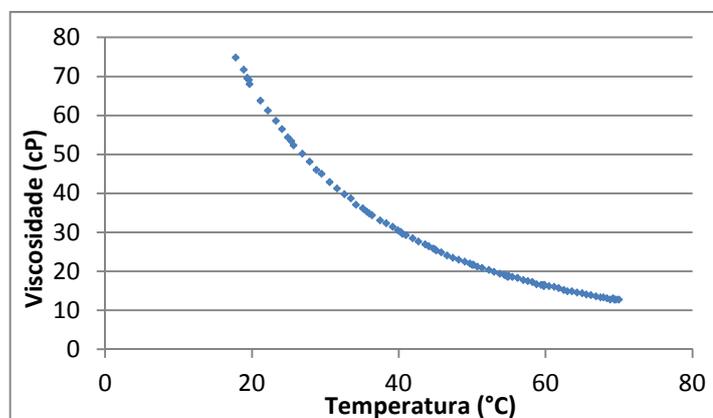


Figura 39 - Gráfico da variação da viscosidade com a temperatura do óleo de soja.

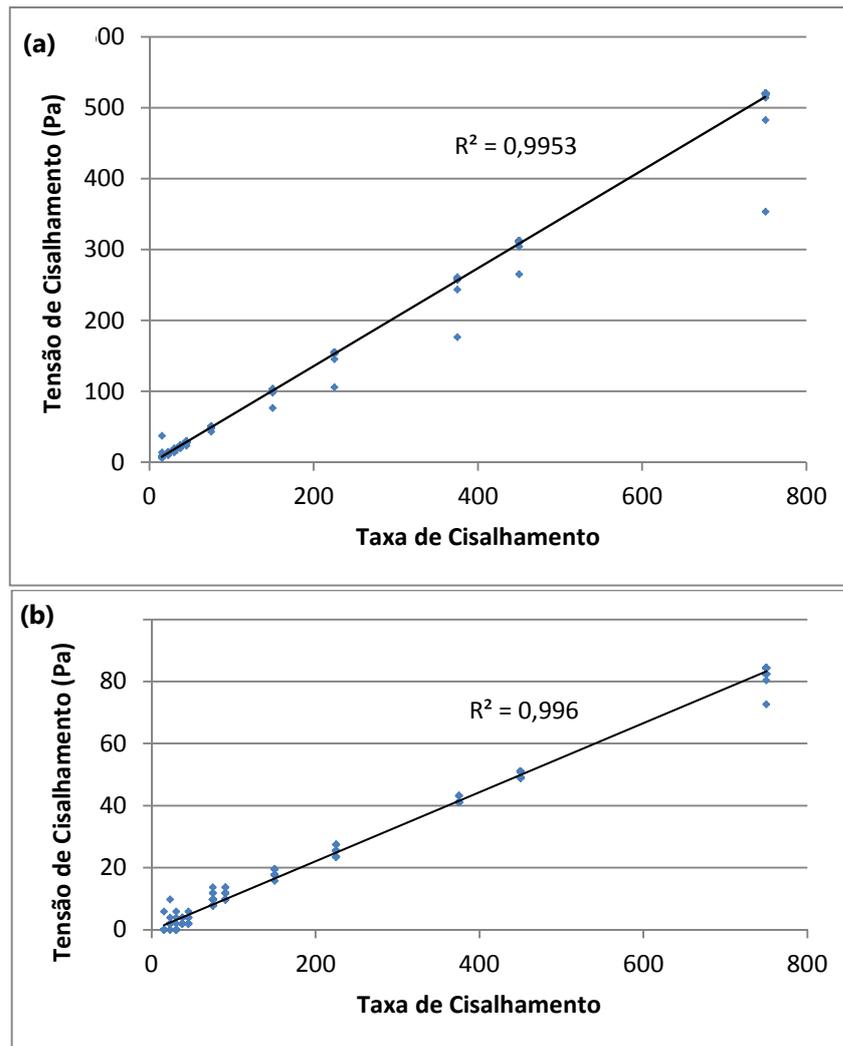


Figura 40 – Variação da Taxa de Cisalhamento com a Tensão Cisalhante para o óleo de soja a 20 °C (a) e 70 °C (b).

5.1.2 Pressão de Injeção

A Tabela 5 apresenta os tempos (t_e) necessários para que cada experimento estabilize sua P_{inj} pre-set no controlador de pressão e atinja a P_e (P_{inj} -real). Observa-se nos experimentos P01V20T23, P01V30T23 e P01V40T23 o aumento de t_e à medida que se aumenta o V_f . Comportamento semelhante observa-se para os experimentos com V_f constante, onde t_e aumenta à medida que se aumenta P_e . Nos experimentos P03V40T23, P03V40T40 e P03V40T60 observa-se a influência da temperatura na estabilização da pressão, neste caso os valores de t_e reduziram com o aumento da temperatura.

Tabela 5 – Tempo de estabilização da pressão para os diversos experimentos.

	P_e (bar)	t_e (s)
P01V20T23	0,07	30
P01V30T23	0,07	71
P01V40T23	0,07	95
P03V40T23	0,27	109
P05V40T23	0,47	148
P07V40T23	0,66	226
P09V40T23	0,87	281
P10V40T23	0,98	315
P03V40T40	0,27	94
P03V40T60	0,27	89

5.1.3 Temperatura do Molde

As Figuras 41a e 41b apresentam a temperatura em que se encontra o molde antes dos experimentos P03V40T40 e P03V40T60, respectivamente. O equipamento indicou uma faixa de leitura de temperatura entre 38,2 e 40,3 °C para o experimento P03V40T40 e, para o experimento P03V40T60, entre 55,8 e 60,1 °C. Assim, foi verificado que grande parte da área da cavidade útil do molde estava na temperatura desejada para a realização dos experimentos.

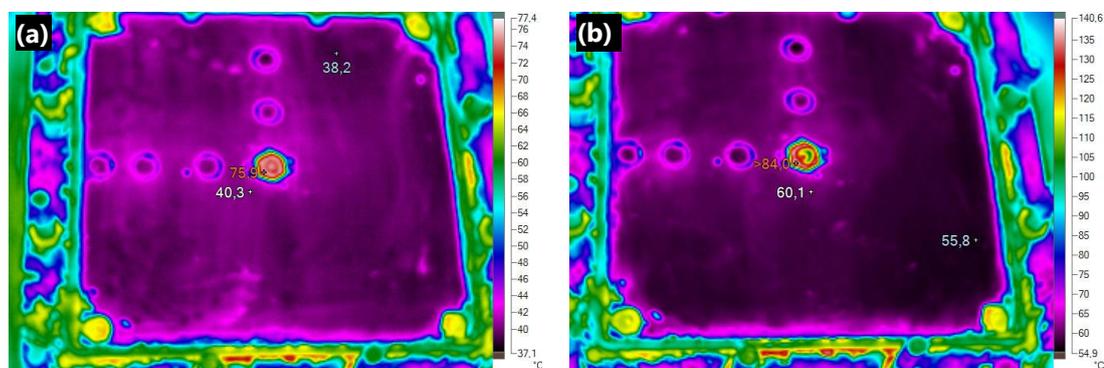


Figura 41 - Imagens térmicas do molde: Molde a 40 °C (a) e Molde a 60 °C (b).

5.2 Permeabilidade e tempo de infiltração radial máxima

Os resultados das medidas de permeabilidade (κ) e dos tempos de infiltração radial máxima (t_{border}) para os diversos experimentos estão apresentados na Tabela 6. Observando-se os experimentos P03V40T23, P03V40T40 e P03V40T60, nota-se que o aumento da temperatura pouco alterou os valores de permeabilidade. Estes experimentos possuem a mesma P_{inj} e V_f , porém a viscosidade do fluido varia com a temperatura. Para calcular a permeabilidade (Equação (6)) dos experimentos P03V40T40 e P03V40T60, assumiu-se os valores de viscosidade do fluido nas temperaturas de aquecimento do molde, ou seja, mesmo o fluido estando inicialmente na temperatura ambiente, foram considerados os valores de viscosidade do fluido nas temperaturas de 40°C e 60°C, respectivamente. Esta consideração foi feita porque acredita-se que o t_e destes experimentos, 94 s para o P03V40T40 e 89 s para o P03V40T60, é bem mais longo que o tempo para que o calor seja transferido do molde metálico para a lâmina de fluido (de apenas 2 mm), alterando rapidamente sua viscosidade.

Tabela 6 - Permeabilidade e tempo de preenchimento para os diversos experimentos

	Experimento	V_f (%)	P_{inj} (Pa)	κ (10^{-11} m^2)	t_{border} (s)
Variação de V_f	P01V20T23	23,964	7420	136,8	130
	P01V30T23	30,27	7780	30,9	420
	P01V40T23	43,41	7460	4,4	2280
Variação de P_{inj}	P03V40T23	41,715	28570	3,0	1000
	P05V40T23	41,562	48260	2,5	700
	P07V40T23	42,242	67240	2,2	640
	P09V40T23	41,726	88450	2,0	560
	P10V40T23	41,862	99800	3,7	380
Variação de Temperatura	P03V40T40	41,66	27200	2,5	790
	P03V40T60	42,17	27200	1,6	780

Ao se analisar a variação da pressão nesses experimentos, observa-se que à medida que se aumenta a pressão a permeabilidade diminui levemente, provavelmente dentro do erro experimental. Estudos mostram diferenças nas

medidas de permeabilidade provocadas por alterações na pressão de injeção [Visconti *et al.*, 1998], bem como sugerem que a taxa de fluxo, a pressão, a natureza do fluido, o manuseio do reforço e a rigidez da cavidade do molde estão entre os fatores que podem influenciar fortemente as medidas de permeabilidade [Gauvin *et al.*, 1996]. O experimento P10V40T23 é uma exceção, pois sua permeabilidade aparente aumentou. Isto se deve ao fato de que seu t_e possui um valor elevado (315 s), próximo ao seu t_{border} (380 s), deixando poucos pontos para serem empregados na resolução da Equação (6), levando a erros na determinação experimental de κ . Assim, conclui-se que o sistema RTM (*i.e.* o molde de 300 x 300 mm) utilizado não pode ser empregado nestas condições de moldagem para determinar κ . Apesar da utilização da Lei de Darcy ser algumas vezes controversa, como apresentado por Amico [2000], nestes experimentos ela se demonstrou confiável.

Os experimentos P01V20T23 e P01V30T23 foram os que apresentaram os maiores valores de permeabilidade. Isto era esperado, pois são os experimentos com menor V_f , ou seja, com um maior volume de poros para o fluido percorrer, ou seja, o reforço torna-se mais permeável. Ao se analisar o tempo t_{border} , é visível sua relação com a P_{inj} , ou seja, quanto maior a pressão, menor o tempo para preencher o molde. O aumento da temperatura também diminuiu o t_{border} dos experimentos P03V40T23, P03V40T40 e P03V40T60, que possuem os valores de 1000, 790 e 780 s, respectivamente.

5.3 Avaliações Preliminares da Análise Computacional

5.3.1 Malhas 2D e 3D e Timestep

Ao fim dos testes preliminares de avaliação das malhas, apresentados de forma qualitativa na Tabela 7, a malha 3D que apresentou a melhor resposta foi a malha E17K, com um passo de tempo de 0,5 s, apresentando uma convergência no menor tempo de processamento. Portanto, foi empregada para a simulação no ANSYS CFX de todos os demais experimentos. Para comparação, a malha final 2D, utilizada pelo PAM-RTM, ficou com 14819 elementos e 16775 nós.

Tabela 7 – Análise de convergência das simulações com o ANSYS CFX*

Malha	Timestep (s)			
	1	0,5	0,05	0,005
E12K	NC	C	C	C
E17K	NC	C	C	C
E50K	NC	NC	NC	-
NE	NC	C	-	C

*(C = convergiu, NC = não convergiu).

5.3.2 Ajuste da Curva de Pressão do ANSYS CFX

São apresentados na Tabela 8 os coeficientes utilizados na Equação (17) para fazer o ajuste da curva de pressão no ANSYS CFX e o respectivo R^2 resultante para cada caso. Na Figura 42 são apresentados os gráficos de pressão com os ajustes de curva. Analisando os valores de R^2 observa-se a precisão da relação entre os dados experimentais e a curva gerada, garantindo a reprodução do comportamento experimental da pressão no modelo computacional do ANSYS CFX.

Tabela 8 – Constantes utilizadas na Equação (17) e coeficiente de determinação.

	P_e (mbar)	t_e (s)	A (mbar s ^{-0,25})	B (s ⁻¹)	C	D (s ⁻¹)	E (mbar)	R^2
P01V20T23	1078,86	40	13,61	7,09	1,29	0,62	$6,01 \times 10^{-4}$	0,9998
P01V30T23	1091,02	85	20,21	6,76	1,55	0,56	$1,62 \times 10^{-4}$	0,9997
P01V40T23	1085,81	35	25,21	8691,63	1232,42	637,45	$2,74 \times 10^{-5}$	0,9997
P03V40T23	1303,15	132	29,19	7,02	9,93	0,87	$1,30 \times 10^{-1}$	0,9988
P05V40T23	1494,85	168	42,05	1,42	1,39	0,14	$3,68 \times 10^{-2}$	0,9997
P07V40T23	1679,72	240	30,41	-72,28	-178,62	-9,67	$5,29 \times 10^{-1}$	0,9985
P09V40T23	1888,35	294	45,20	-3099,14	-6960,16	-352,70	0,18	0,9985
P10V40T23	2008,90	325	45,87	4,54	32,35	0,75	3,99	0,9996

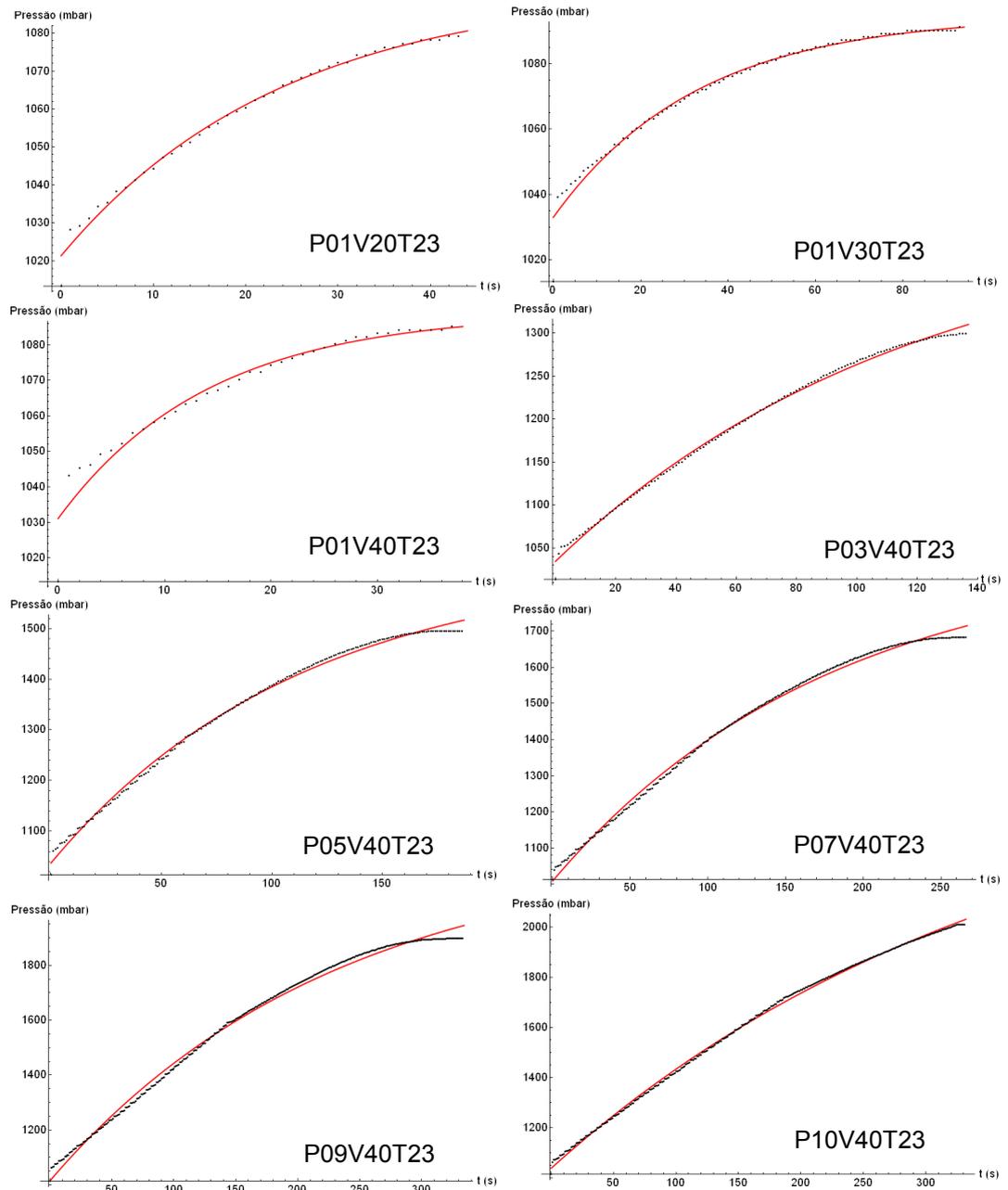


Figura 42 – Gráficos dos ajustes de pressão do ANSYS CFX gerados no Wolfram Mathematica para todos os casos simulados.

5.4 Comparação de resultados experimentais e numéricos (ANSYS CFX e PAM-RTM)

5.4.1 Tempo de processamento

Os tempos de processamento para cada caso simulado no ANSYS CFX e no PAM-RTM estão apresentados na Tabela 9. O tempo médio de processamento do ANSYS CFX foi de 22469 min (aproximadamente 374 h), já no PAM-RTM o tempo médio foi de 19 min. Sabe-se que o modelo matemático aplicado para a resolução do problema é diferente para cada software, bem como o tipo de malha utilizada e o computador (*i. e.* processador) empregado. Mesmo assim, é notável a na redução do tempo de processamento quando se aplica uma malha 2D, na simulação do problema, mesmo utilizando um computador de nível de processamento inferior. Ao longo deste capítulo, será analisada e investigada a possibilidade da existência de implicações negativas no uso de uma modelo 2D para a solução de casos de escoamento em meios fibrosos.

Tabela 9 – Tempos de processamento para cada caso.

	Tempo de processamento (min)	
	ANSYS CFX	PAM-RTM
P01V20T23	9070	13
P01V30T23	14200	12
P01V40T23	15530	12
P03V40T23	13380	11
P05V40T23	17550	12
P07V40T23	20600	15
P09V40T23	16500	11
P10V40T23	15700	12
P09cteV40T23	18950	16
P09V40T23-OB	23210	78

5.4.2 Fração Volumétrica das Fases

A variação da fração volumétrica do fluido nos experimentos e nas simulações do ANSYS CFX e do PAM-RTM foi analisada. A Figura 43 mostra um comparativo da evolução da fração volumétrica do fluido do caso P09V40T23 no experimento e na simulação numérica gerada pelo ANSYS CFX e pelo PAM-RTM em três tempos diferentes 60 s, 150 s e 360 s.

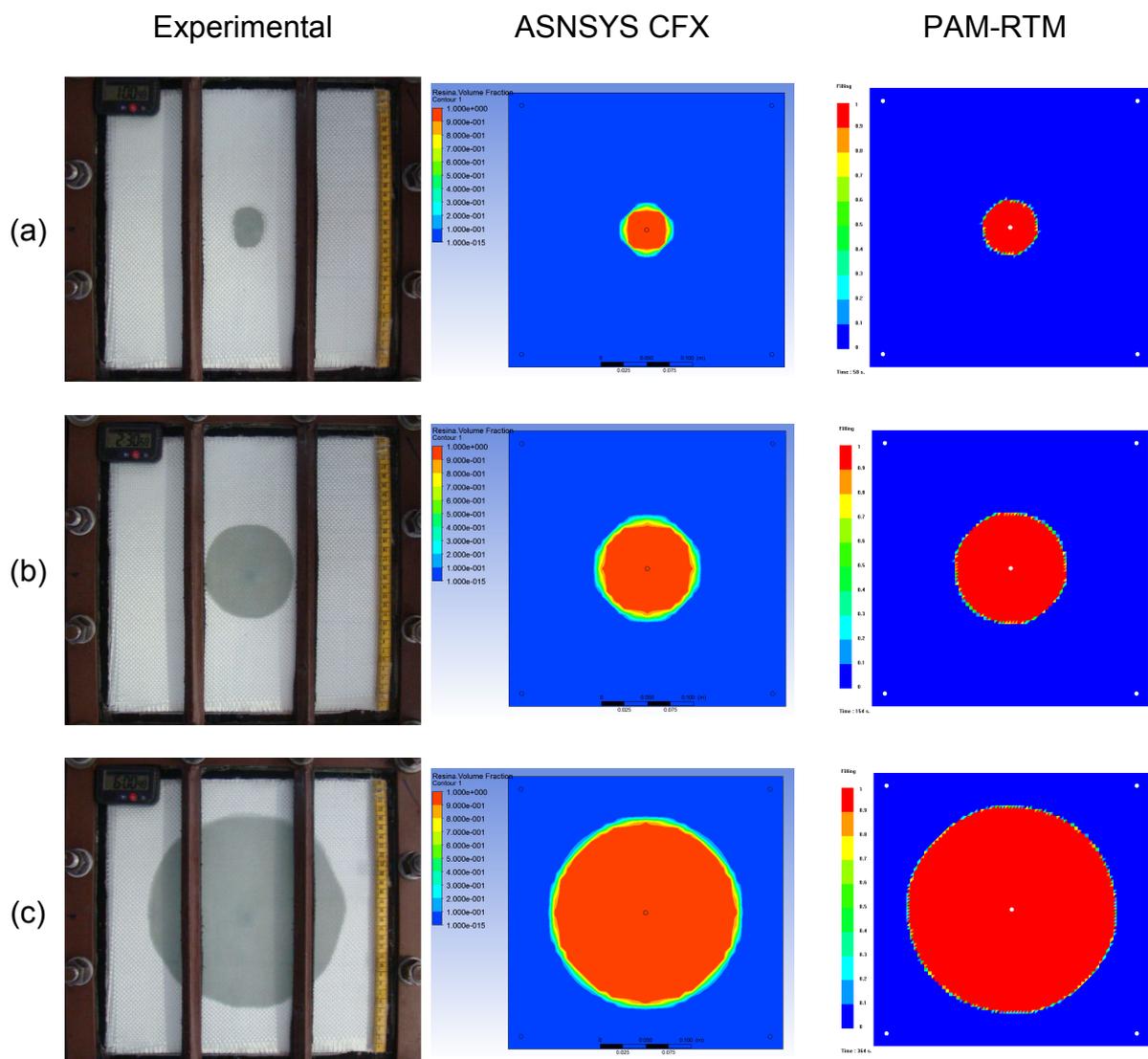


Figura 43 - Evolução da frente de fluxo do fluido no caso P09V40T23 em 60 s (a), 150 s (b) e 360 s (c), e para o caso experimental, simulado no ANSYS CFX e no PAM-RTM.

As áreas circulares vermelhas (mais escuras) são as regiões onde o tecido já está totalmente impregnado, enquanto as áreas azuis (mais claras) representam onde ainda está seco. Observa-se que as frentes de fluxo experimentais avançam radialmente, e nas simulações o mesmo comportamento é observado, porém a região impregnada está mais definida e observa-se um círculo mais regular. Isto ocorre porque nas simulações se considera uma distribuição homogênea das fibras no tecido, o que nem sempre acontece experimentalmente. Onde há uma variação local da concentração de fibras, gera-se um avanço heterogêneo do fluxo.

É apresentado na Figura 44 um comparativo entre o r_{ff} experimental, o r_{ff} simulado pelo ANSYS CFX e o r_{ff} simulado pelo PAM-RTM no instante t_{border} experimental para os casos P07V40T23, P09V40T23 e P10V40T23. Porém, para facilitar a comparação, optou-se por comparar o t_{border} de todos os casos. Assim, a Tabela 10 apresenta um comparativo entre o t_{border} experimental e o t_{border} simulado no ANSYS CFX e no PAM-RTM para todos os 8 casos simulados (não incluindo os casos especiais), mostrando os respectivos desvios percentuais em relação ao t_{border} experimental.

Ao se comparar os t_{border} , observa-se que não há erros superiores a 10%, indicando uma forte relação entre a análise numérica das equações do meio poroso e o procedimento experimental. Observando-se os casos P01V20T23, P01V30T23 e P01V40T23 constata-se uma relação entre o erro e a variação de V_f , pois a medida que se aumenta V_f , mantendo P_{inj} constante, o erro também aumenta. Este comportamento não é observado nos demais casos, quando se aumenta a P_{inj} e se mantém V_f constante.

Como visto na Tabela 6, os maiores valores de κ são encontrados nestes mesmos três casos, logo os desvios comparativos com as simulações numéricas podem estar relacionados a erros de natureza experimental, como na determinação de κ , que é uma propriedade determinante para o sucesso da simulação numérica. Assim, os desvios apontados na Tabela 10 podem estar vinculados ao processo experimental, e entre as possíveis fontes de erros experimentais, pode-se citar a falta de homogeneidade das propriedades do tecido, sensibilidade do operador ao começar as medidas de tempo e nas leituras

do raio da frente de fluxo. O desvio da leitura do t_{border} PAM para o caso P10V40T23 acusou um valor abaixo de zero, iniciando que este tempo foi inferior ao tempo experimental, como este foi o único caso em que isto ocorreu, é evidenciada a hipótese destes erros estarem relacionados a erros experimentais.

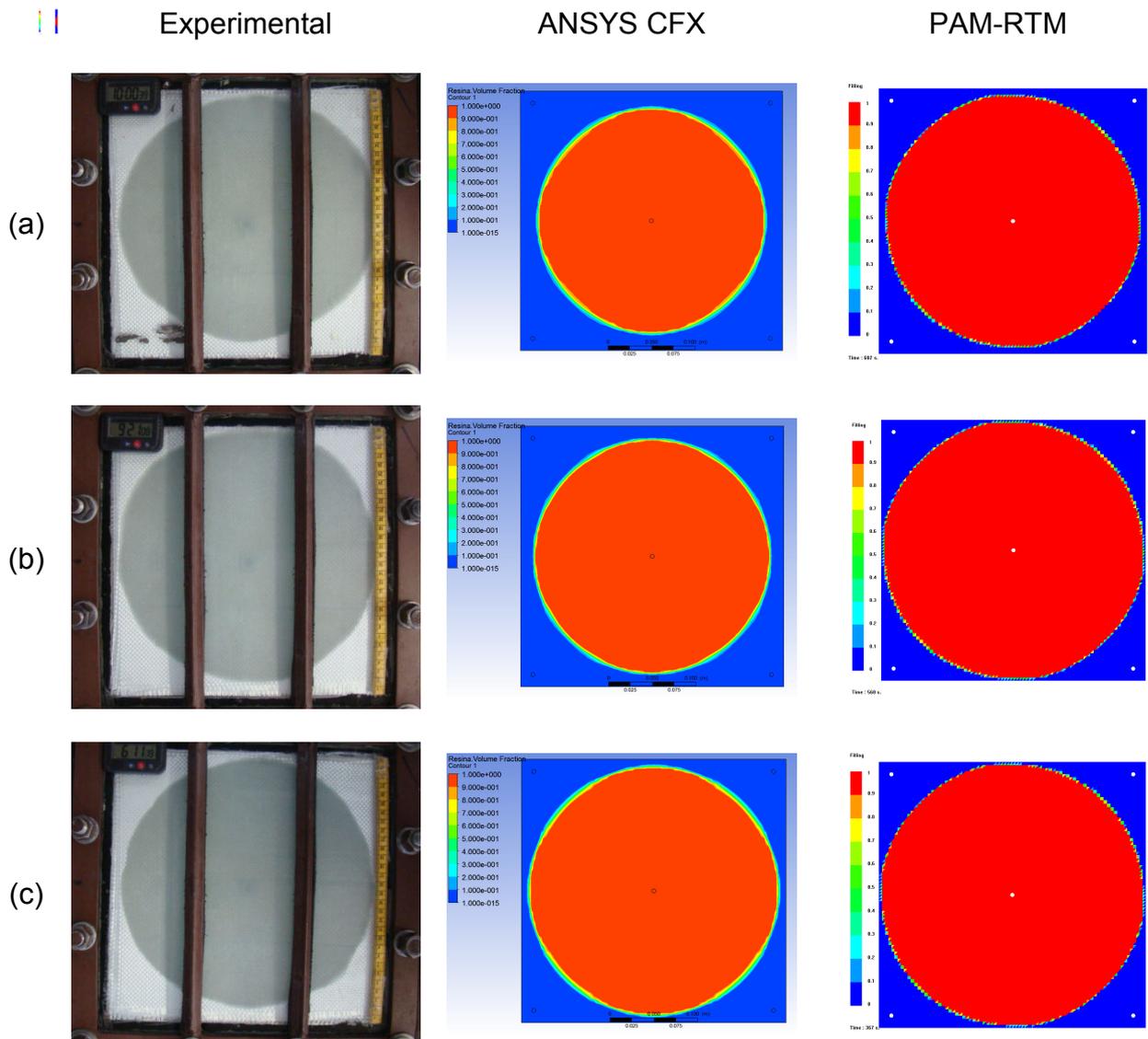


Figura 44 - Comparativo entre o r_{ff} experimental e o r_{ff} simulado pelo ANSYS CFX e pelo PAM-RTM no instante t_{border} experimental para os casos P07V40T23 (a), P09V40T23 (b) e P10V40T23 (c).

Tabela 10 – Comparativo entre os t_{border} experimental, simulado pelo ANSYS CFX e simulado pelo PAM-RTM e seus respectivos desvios em relação ao t_{border} experimental.

	Experimental	ANSYS CFX		PAM-RTM	
	t_{border} (s)	t_{border} (s)	desvio (%)	t_{border} (s)	desvio (%)
P01V20T23	130	138	6,15	131	0,77
P01V30T23	420	450	7,14	430	2,38
P01V40T23	2280	2506	9,91	2389	4,78
P03V40T23	1000	1098	9,80	1031	3,10
P05V40T23	700	768	9,71	722	3,14
P07V40T23	640	700	9,38	648	1,25
P09V40T23	560	588	5,00	568	1,43
P10V40T23	380	405	6,58	378	-0,53

Observando-se os desvios apresentados na Tabela 10, constata-se que estes são maiores nas simulações do ANSYS CFX em todos os casos, variando de 5,0 a 9,91%, enquanto no PAM-RTM estes desvios estiveram na faixa entre -0,53 e 4,78%. Em ambos, os maiores desvios foram encontrados para o caso de mais elevado t_{border} , o P01V40T23, porém como citado anteriormente, este é o caso com maior erro experimental. Além disso, como o menor desvio encontrado para o ANSYS CFX foi o do caso P09V40T23 e para o PAM-RTM, o P10V40T23, não há uma relação aparente do desvio com o tempo de moldagem.

Comparando diretamente os desvios do ANSYS CFX com os desvios do PAM-RTM não é observado uma relação de proporcionalidade entre eles, como mostra o baixo R^2 do gráfico da Figura 45, logo, não é possível associá-los.

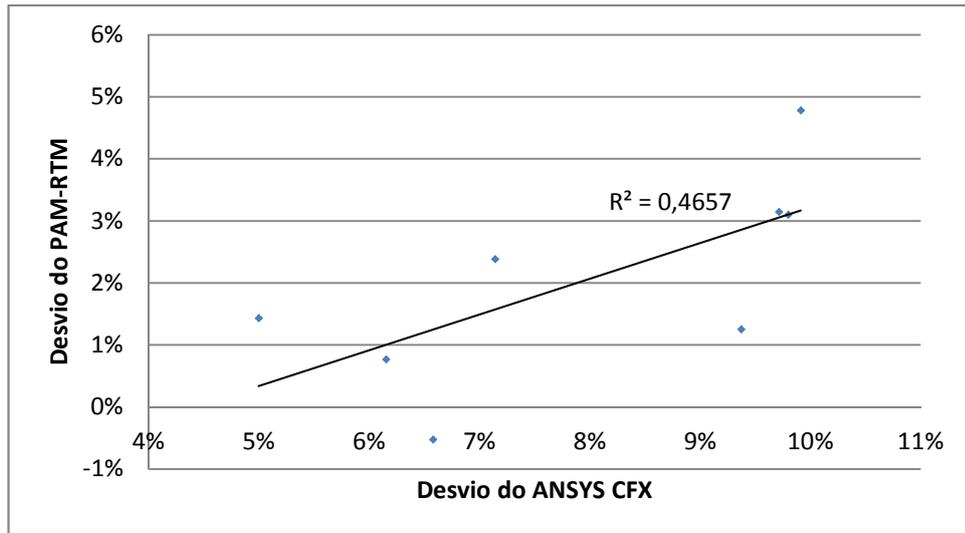


Figura 45 – Relação entre os desvios percentuais do t_{border} gerados pelo ANSYS CFX e pelo PAM-RTM.

5.4.3 Campo de Pressão

A Figura 46 apresenta a distribuição de pressão ao longo do molde no instante t_{border} para o caso P09V40T23 simulado no ANSYS CFX (Figura 46a) e simulado no PAM-RTM (Figura 46b). Como esperado, a pressão máxima está localizada no canal de injeção do fluido e diminui à medida que se afasta deste ponto, formando um campo de pressão regular. No modelo simulado no ANSYS CFX, a pressão total corresponde a soma de P_{inj} mais a P_{atm} , por isso o valor elevado de pressão indicado na Figura 46a; no PAM-RTM, a pressão exibida é a manométrica. No gráfico apresentado na Figura 47, observa-se esta perda de pressão à medida que aumenta a distância em relação ao canal de injeção para os tempos de 50, 100, 200, 350 e 560 s (t_{border}), para o caso P09V40T23, a partir dos dados gerados na simulação numérica do ANSYS CFX.

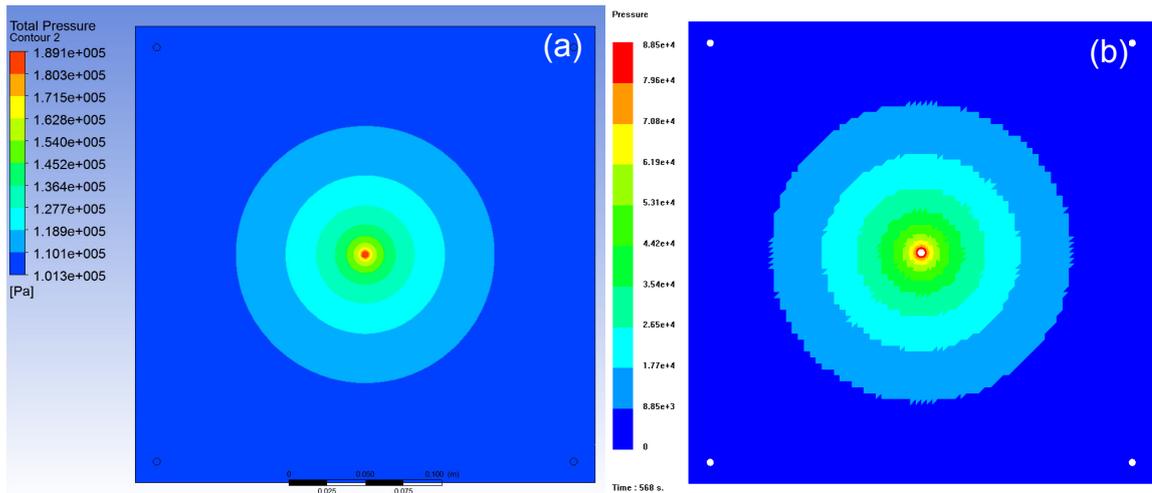


Figura 46 – Campo de Pressão Total do caso P09V40T23 no t_{border} simulado no ANSYS CFX (a) e no PAM-RTM (b).

O campo de pressão observado em um plano transversal está apresentado na Figura 48a e com detalhe no canal de injeção, na Figura 48b, ambos gerados com o ANSYS CFX. Ressalta-se que este nível de detalhamento não é possível de ser observado no modelo 2D do PAM-RTM. A pressão na maior parte do molde é de 1,01 bar, 42,19% menor do que a P_{inj} (1,89 bar), mostrando quantitativamente a perda de pressão ao longo do molde.

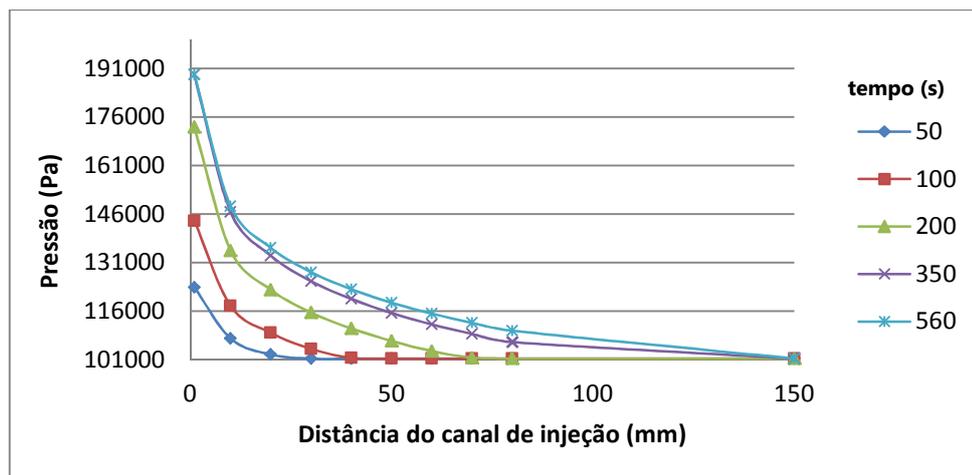


Figura 47 – Gráfico da variação da pressão com a distância do canal de injeção para diversos tempos.

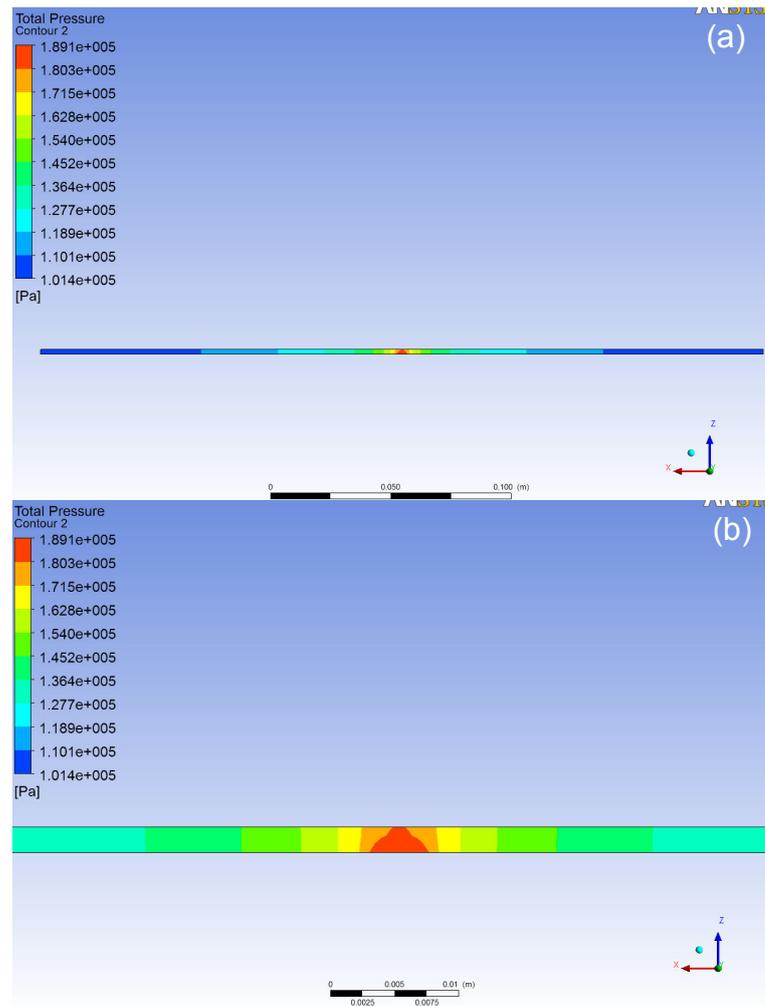


Figura 48 - Campo de Pressão Total gerado com o ANSYS CFX em um plano transversal para o caso P09V40T23 (a) e o detalhamento do canal de injeção (b).

5.4.4 Campo de Velocidade

Na Figura 49 é observado o campo de velocidade do fluido ao longo do molde no instante t_{border} para a simulação no ANSYS CFX e no PAM-RTM. As duas simulações apresentam uma pequena discrepância de valores, porém o comportamento do fluido apresentado é o mesmo. A velocidade é mínima em quase toda a região do molde. Na região próxima ao canal de injeção, observada em detalhe na Figura 49b, a velocidade varia e apresenta seu valor máximo, $1,918 \times 10^{-2}$ m/s para o ANSYS CFX e $2,07 \times 10^{-2}$ m/s para o PAM-RTM.

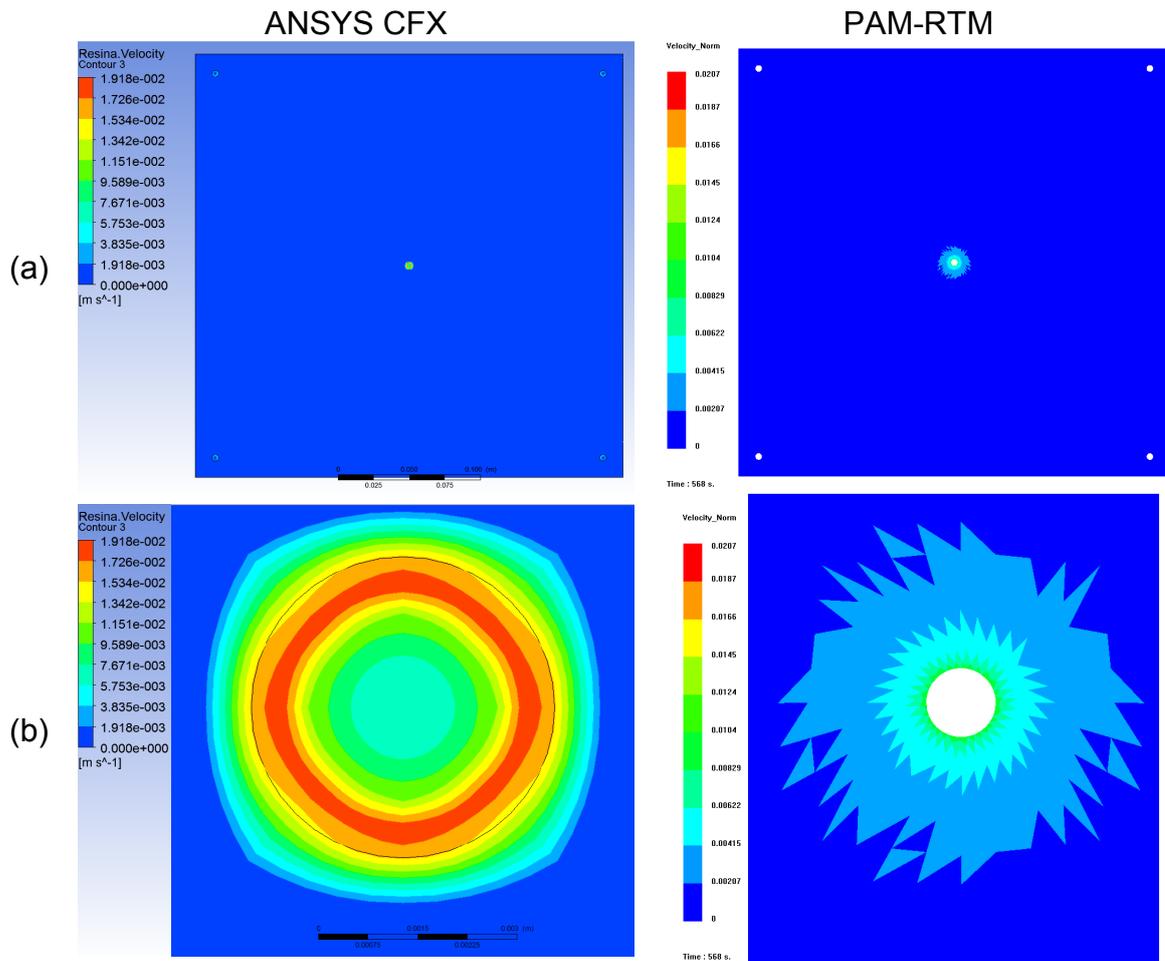


Figura 49 - Campo de velocidade do fluido no caso P09V40T23 no t_{border} (a) com zoom no canal de injeção (b) para as simulações no ANSYS CFX e no PAM-RTM.

5.4.5 Visualização dos Vetores Velocidade

A análise computacional gerada pelo ANSYS CFX também permite a visualização de resultados através dos seus vetores. Os vetores velocidades do caso P09V40T23 podem ser observados na Figura 50a para o t_{border} , na Figura 50b mostra-se em detalhes a região do canal de injeção e a Figura 50c, um dos canais de saída. Observa-se que a direção dos vetores da Figura 50b complementa o que foi observado no campo de pressão da Figura 48b, uma distribuição de velocidades bastante irregular e que atinge valores mínimos a poucos milímetros de distância do canal de injeção. Normalmente esta visualização não é possível no modelo 2D utilizado pelo PAM-RTM.

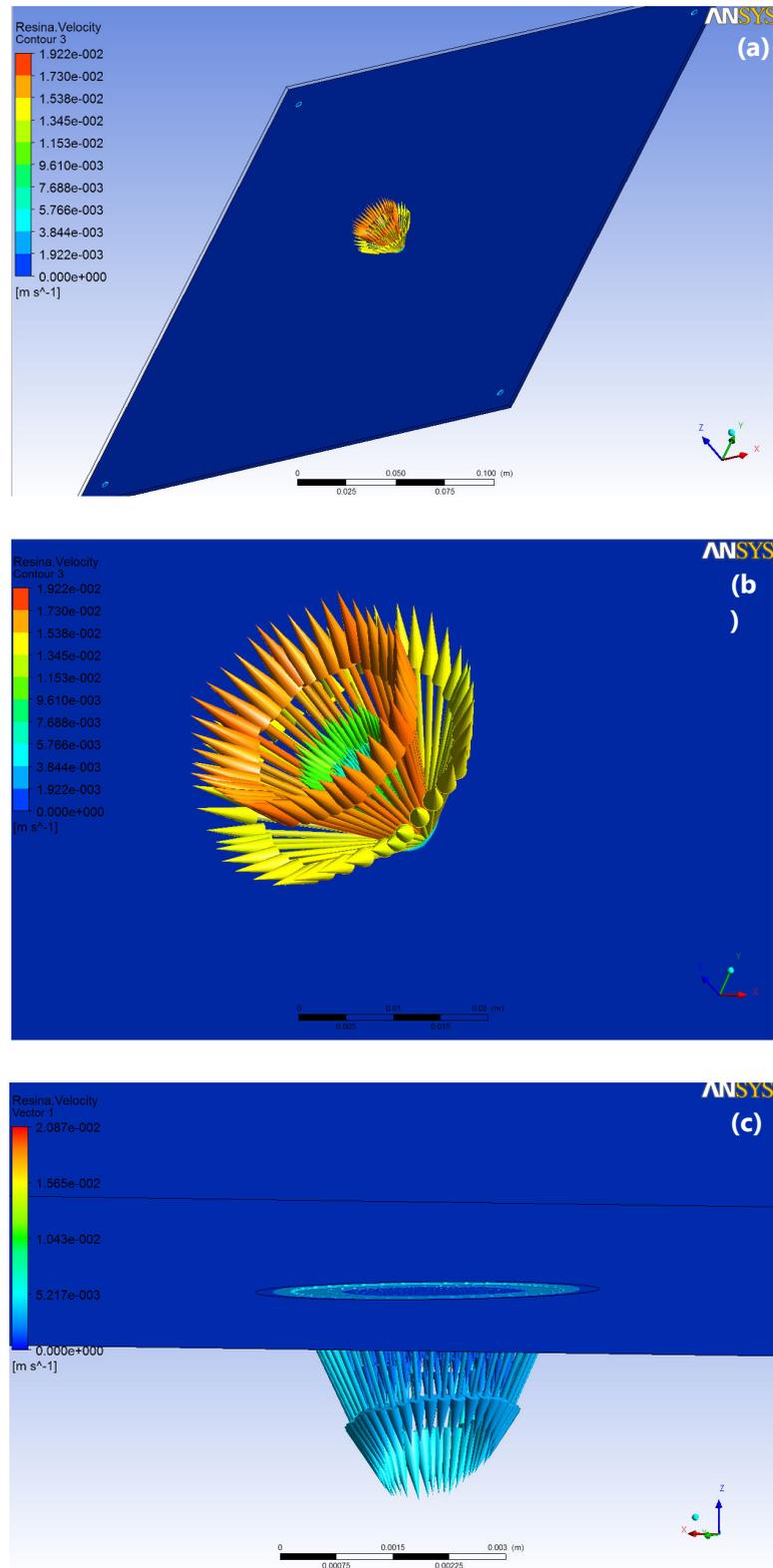


Figura 50 – Vetores Velocidade no caso P09V40T23 gerados pelo ANSYS CFX no t_{border} (a), detalhe no canal de injeção (b) e detalhe em um dos canais de saída (c).

5.5 Caso Especial I: Fração Volumétrica a P_{cte}

A fim de avaliar o erro gerado pelos modelos computacionais caso não tivessem sido considerado o comportamento experimental da pressão, foi simulado um caso especial do experimento P09V470T23, denominado de P09cteV40T23. Nesta simulação, a P_{inj} considerada foi constante e igual a P_e , neste caso 888,35 mbar, desde o início da infiltração. A Figura 51 apresenta a fração volumétrica do fluido no caso P09V40T23 comparada com a do caso P09cteV40T23 no instante t_{border} experimental (560 s) simulada no ANSYS CFX e no PAM-RTM. Observa-se que para este tempo a resina nas simulações já ultrapassou as bordas do molde, indicando que a infiltração à pressão constante foi bem mais rápida. O tempo que o fluido encosta nas bordas do molde pelo ANSYS CFX foi de 439 s, apresentando um desvio de 21,61% em relação ao t_{border} experimental, já na simulação do PAM-RTM, este valor foi de 444 s, apresentando um desvio de 20,71%. Portanto, a aplicação da pressão variável no modelo computacional é fundamental para que uma simulação reproduza fielmente o processo experimental, especialmente quando o tempo t_e for comparável ao t_{fill} .

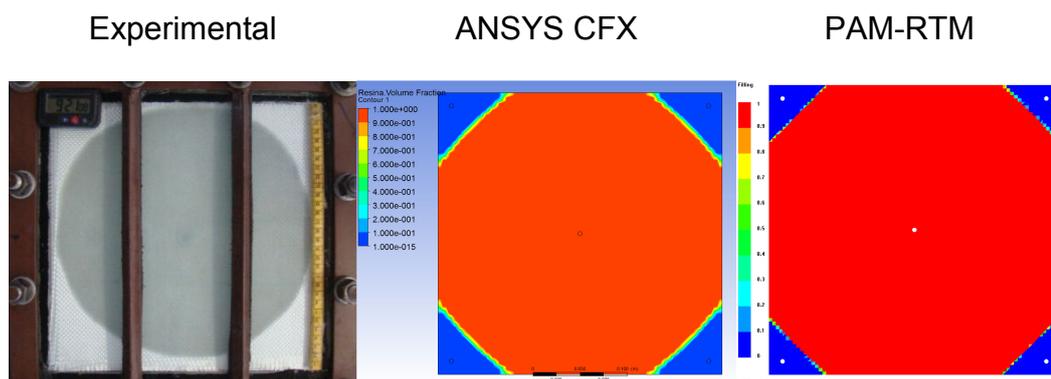
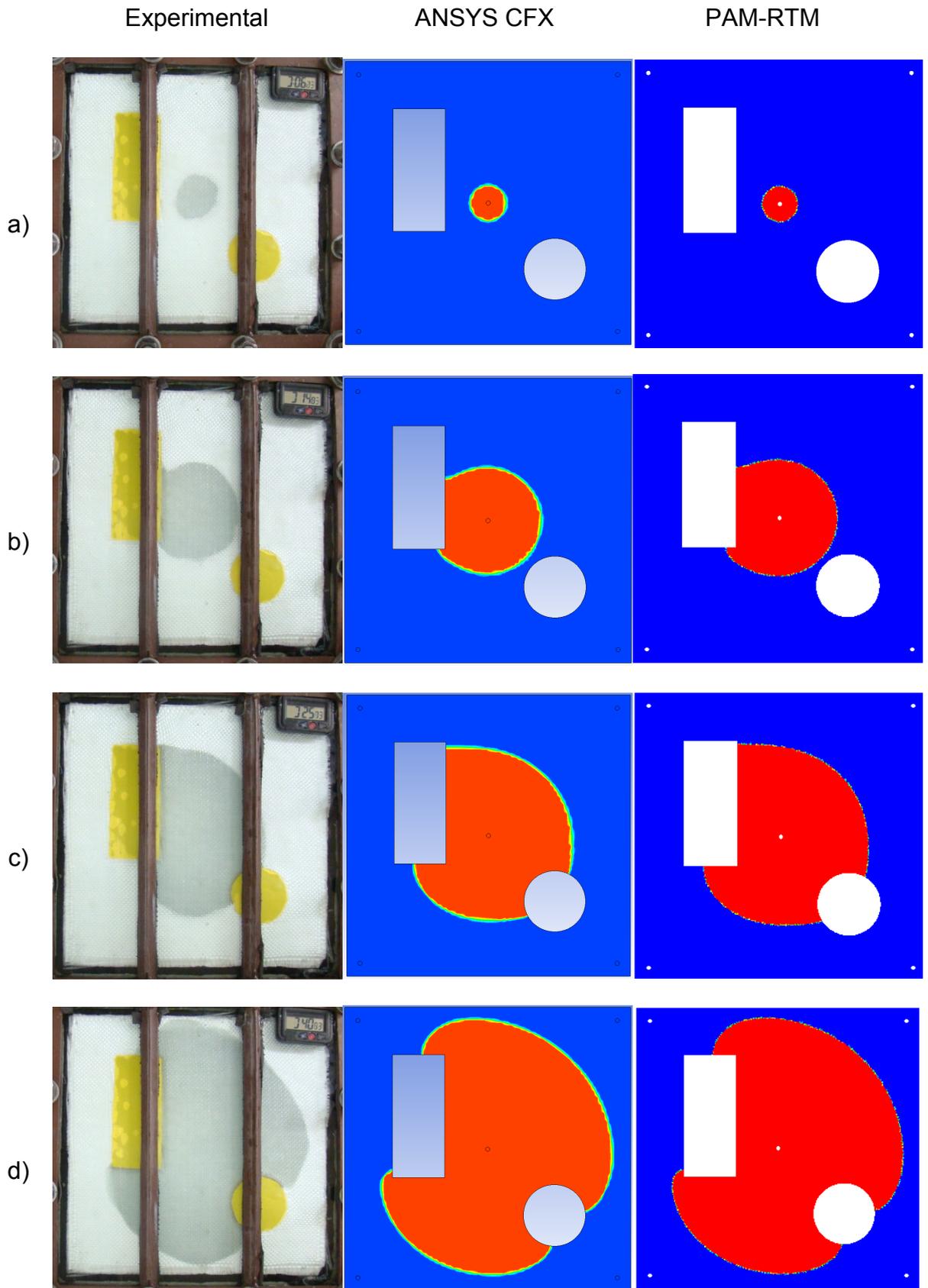


Figura 51 - Comparativo da fração volumétrica no instante t_{border} para os casos P09V40T23 (experimental) com o P09cteV40T23 (numérico).

5.5 Caso Especial II: RTM com Obstáculos Geométricos

Na Figura 52 é apresentada a evolução experimental da impregnação e da simulação computacional no ANSYS CFX e no PAM-RTM para o caso P09V40T23-OB em diversos tempos. Mesmo com todo o cuidado experimental tomado durante a realização do experimento, é possível observar que a evolução da frente de fluxo neste caso especial (P09V40T23-OB) ocorre em um menor tempo comparado ao caso original (P09V40T23). Isto ocorreu provavelmente devido a baixa compactação do reforço fibroso, gerada pela presença da plasticina na cavidade interna do molde, assim, o tampo de vidro não pode alcançar sua posição de costume, deixando a cavidade interna do molde com uma altura superior aos demais casos. Assim, com um maior volume interno, e com a mesma quantidade de fibras, o V_f deste experimento provavelmente foi inferior aos 40% previamente estipulados, logo sua porosidade e permeabilidade foram alteradas. Como o r_{ff} deste experimento logo perde sua forma circular, a determinação experimental da permeabilidade neste experimento é inviável. Porém nas simulações, o comportamento do avanço da frente de fluxo em função do tempo manteve-se íntegro, repetindo o comportamento que teria no V_f original, o que era esperado já que inconvenientes experimentais não afetam a simulação computacional. Portanto esta análise será apenas qualitativa.

Observa-se na Figura 52 que o padrão de escoamento do fluido observado experimentalmente é seguido pelas simulações. Por exemplo, nas Figuras 50b-d é notável a forma com que o fluido contorna a circunferência e o retângulo em direção as saídas, e as mesmas formas são observadas nas simulações. Mesmo não podendo comparar os tempos das simulações com os tempos experimentais, é possível comparar os tempos das simulações geradas pelo ANSYS CFX e pelo PAM-RTM, como apresentado na Tabela 11 para os instantes (a), (b), (c), (d), (e), (f) e (g) da Figura 52. Nesta tabela, observa-se um comportamento similar dos valores de t_{border} , com o ANSYS CFX apresentando valores superiores aos do PAM-RTM, ou seja, no modelo utilizado pelo ANSYS CFX, o fluido demanda um tempo maior para alcançar uma mesma posição calculada pelo modelo do PAM-RTM. Isto indica que provavelmente o modelo empregado pelo ANSYS CFX leva em consideração a presença de ar dentro da cavidade do molde.



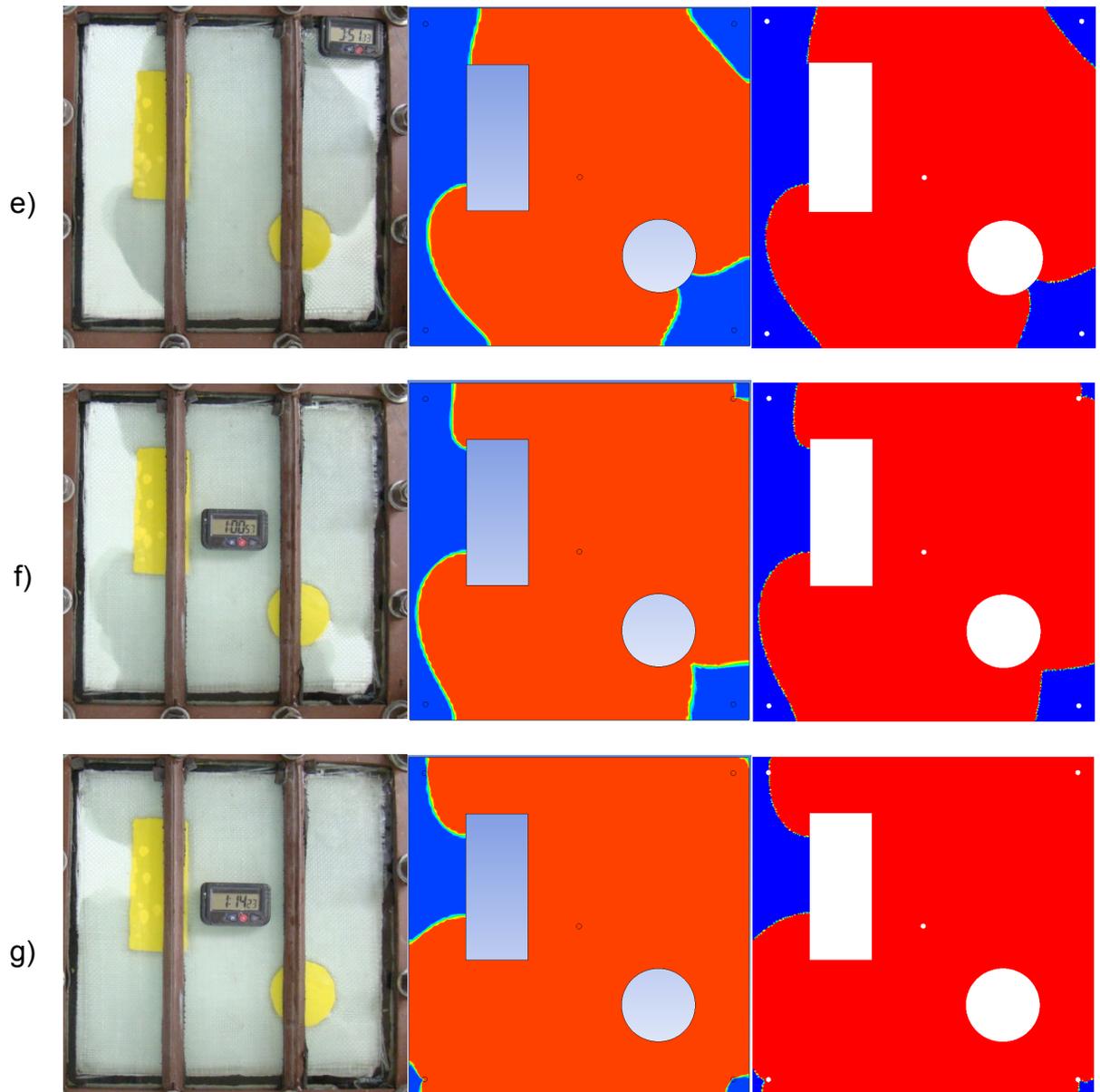


Figura 52 – Comparativo visual do comportamento do fluido ao longo do tempo no caso P09V40T23-

OB.

Tabela 11 – Comparação entre os tempos de preenchimento do caso P09V40T23-OB para o ANSYS CFX e o PAM-RTM.

tempo (s)		
	ANSYS CFX	PAM-RTM
(a)	38	33
(b)	156	153
(c)	266	250
(d)	446	429
(e)	646	594
(f)	726	658
(g)	824	781

Assim, observa-se que a utilização de simulações computacionais vai se tornando mais poderosa à medida que se aumenta a complexidade geométrica das peças estudadas. Logo, esta aplicação torna-se vital em peças normalmente encontradas nas aplicações comerciais de RTM, como na indústria automobilística e aeronáutica.

6 CONCLUSÕES

Os modelos utilizados mostraram-se empregáveis no estudo do comportamento do fluxo do fluido em um processo de moldagem por RTM. Quanto maior for o V_f , menor será a permeabilidade, e a variação da temperatura no molde provocou alterações na permeabilidade. O tempo de preenchimento do molde é diretamente afetado pela pressão de injeção e pela temperatura do molde. Com os experimentos realizados foi possível caracterizar o comportamento do fluido no meio fibroso proposto e assim ter dados suficientes para uma futura aplicação em uma análise numérica.

A análise numérica provou ser muito confiável, apresentando erros inferiores a 10% nas medidas dos valores de t_{border} para diversos casos, tanto no ANSYS CFX como no PAM-RTM. Com a simulação numérica, foi possível ter um maior entendimento do comportamento do fluxo do fluido durante o processo RTM e observar comportamentos que não seriam possíveis de serem observados apenas realizando os experimentos laboratoriais.

A montagem do modelo no software comercial dedicado PAM-RTM foi mais fácil e prática do que no software comercial não-dedicado ANSYS CFX. A presença de campos pré-determinados a serem preenchidos no software dedicado facilita a sua utilização até mesmo para usuários sem conhecimento em simulações numéricas e/ou processamento de materiais compósitos. Porém o software não-dedicado apresenta maiores possibilidades de personalização dos casos a serem estudados, não ficando restrito apenas a simulações de processamento de materiais compósitos. O tempo de processamento em todos os casos foi bem maior no ANSYS do que no PAM-RTM, indicando o sucesso da aplicação de um modelo 2D para o processamento do problema, evidenciado pelos erros gerados pelas simulações no ANSYS CFX, que tiveram valores maiores que as geradas pelo PAM-RTM.

Portanto o que determinará a escolha entre um software ou o outro é a aplicação de interesse. O ANSYS CFX possui mais versatilidade, podendo incorporar outras análises ao estudo, não apenas de escoamento de fluidos em

meios porosos, porém apresenta um maior tempo de processamento e maiores erros, comparado a simulações de escoamento em meios porosos de um software dedicado. Por outro lado, o PAM-RTM é ideal para um estudo focado apenas em processamento de materiais compósitos, apresentando uma interface objetiva, com um modelo dedicado, rápido processamento e erros relativamente pequenos em relação às determinações experimentais.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Incorporar o estudo da influência da temperatura às simulações numéricas tanto do ANSYS CFX como do PAM-RTM;
- Aprimorar o modelo do ANSYS CFX aplicado a estudos de processamento de materiais compósitos, a fim de reduzir ainda mais o erro comparado ao processo experimental;
- Realizar simulações computacionais considerando geometrias de complexidade similar a componentes reais produzidos por RTM;
- Avaliar outros softwares comerciais dedicados e não-dedicados a fim de avaliar e comparar com o comportamento dos erros encontrados neste trabalho.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbassi, A.; Shahnazari, M. R. Numerical modeling of mold filling and curing in non-isothermal RTM process. *Applied Thermal Engineering*, 24, 2453, 2004.

Amico, S. C. Tese de Doutorado, University of Surrey, UK, 2000.

Antonucci, V.; Giordano, M.; Hsiao, K.T.; Advani, S.G. A methodology to reduce thermal gradients due to the exothermic reactions in composites processing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 1675, 2002.

Barros, P. H. L. Modelagem Analítica e Experimental da Filtração em Meios Porosos. Dissertação de Mestrado, UFRN, Rio de Janeiro, 2008.

Batchelor, G. K. *An introduction to fluid dynamic*. Cambridge University Press, 1967.

Batista, V. H. F. Geração de malhas não-estruturadas tetraédricas utilizando um método avançado de fronteira. Dissertação de mestrado, UFRN, Rio de Janeiro, 2005.

Bear, J. *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Elsevier, 1972.

Blasek, J. *Computational fluid dynamics: principles and applications*. Elsevier, 2nd Edition, 2001.

Chiu, H.T.; Chen, S. C.; Lee, L.J. Analysis of heat transfer and resin reaction in liquid composite molding. *SPE ANTEC Conference*, Toronto, 2424, 1997.

Choi, M. A.; Lee, M. H.; Chang, J.; Lee, S. J. Permeability modeling of fibrous media in composite processing. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 79, 585, 1998.

Chung, T. J. Computational fluid dynamics. Cambridge University Press, 2002.

Comas-Cardona, S.; Binetruya, P. G.; Krawczaka, C. P. A generic mixed FE-SPH method to address hydro-mechanical coupling in liquid composite moulding processes. *Composites: Part A*, 36, 1004, 2005.

Demirzic; Muzaferija, S.; Peric, M. Benchmark solutions of some structural analysis problems using finite-volume method and multigrid acceleration. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 40, 1893, 1997.

Endruweit, A.; Long, A.C. A model for the in-plane permeability of triaxially braided reinforcements. *Composites: Part A* 42, 165, 2011.

Filho, O. T. S. Dispersão térmica em meios porosos periódicos: um estudo numérico. Tese de Doutorado Instituto Politécnico do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2004.

Gauvin, R.; Trochu, F.; Lemenn, Y.; Diallo, L.; *Polymer Composites*, 17, 34, 1996.

Gonçalves, N. D. F. Método dos volumes finitos em malhas não-estruturadas. Tese de doutorado, Universidade do Porto, 2007.

Gourichon, B.; Deléglise, M. Binetruy, C.; Krawczak, P. Dynamic void content prediction during radial injection in liquid composite molding. *Composites Part A* 39, 46, 2008.

Greve L.; Pickett A. K. Delamination testing and modeling for composite crash simulation. *Composites Science and Technology*, 66, 816, 2006.

Haider, M.; Hubert, P.; Lessard, L. An experimental investigation of class A surface finish of composites made by the resin transfer molding process. *Composites Science and Technology*, 67, 3176, 2007.

Han, K. K.; Lee, C. W.; Rice, B. P. Measurements of the permeability of fiber preforms and applications. *Composites Science and Technology*, 60, 2435, 2000.

He, F.; Wang, Y.; Huang, Y.; Wan, Y. Preparation and mechanical properties of 3-D braided glass fiber reinforced light-cured resin composites. *Materials Letters*, 60, 3339, 2006.

Hoes, K.; Dinescu, D.; Sol, H.; Vanheule, M.; Parnas, R. S.; Luo, Y.; Verpoest, I. *Composites: Part A* 33, 959, 2002.

Jaganathana, S.; Vahedi, H. T.; Pourdeyhimi, B. A realistic approach for modeling permeability of fibrous media: 3-D imaging coupled with CFD simulation. *Chemical Engineering Science*, 63, 244, 2007.

Jiang, S.; Li, Y.; Alsoliby, S.; Zhou, G. PCG solver and its computational complexity for implicit control-volume finite-element method of RTM mold filling simulation. *Composites, Science and Technology* 67, 3316, 2007.

Júnior, W. F. A. Processamento de placa espessa de compósito através de moldagem por transferência de resina. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

Justin, B.; Alms, Suresh, G. A.; James L. G. Liquid Composite Molding control methodologies using Vacuum Induced Preform Relaxation. *Composites: Part A* 42, 57, 2011.

Kolodziej, J. A.; Dziecielak, R.; Konczak, Z. Permeability tensor for heterogeneous porous medium of fibre type. *Transport in Porous Media*, 32, 1, 2008.

Kruckenber, T. R. P. Resin transfer moulding for aerospace structures. London: Kluwer Academic Publishers; 1998.

Kundu, K. P.; Cohen, I. M. *Fluid Mechanics*, Academic Press, 2002.

Lam, Y. C.; Joshi, S. C.; Liu, X. L. Numerical simulation of the mould-filling process in resin-transfer moulding. *Composites Science and Technology*, 60, 845, 2000.

Leclerc, J. S.; Ruiz, E. Porosity reduction using optimized flow velocity in Resin Transfer Molding. *Composites Part A*, 39,1859, 2008.

Lekakou, C.; Bader, M. G. Mathematical modelling of macro- and micro-infiltration in resin transfer moulding (RTM). *Composites Part A*, 29, 29, 1998.

Li, J.; Zhang, C.; Liang, R.; Wang, B. Statistical characterization and robust design of RTM processes. *Composites Part A*, 36, 564, 2005.

Li, R.; Chen, Z.; Wu, W. Generalized difference methods for differential equations – numerical analysis of finite volume methods; Marcel Dekker; 2000.

Lin, M. Y.; Kang, M. K.; Thomas H. H.; A finite element analysis FF convection problems in RTM using internal nodes. *Composites: Part A*, 31, 373, 2000.

Lin, R.; Lee, L. J.; Liou, M. Non-isothermal mold filling and curing simulation in thin cavities with preplaced fiber mats. *International Polymer Processing*, 6, 356, 1991.

Lundström, T. S.; Stenberg, R.; Bergström, S.; Partanen, H.; Birkelandd; P. A. In-plane permeability measurements: a nordic round-robin study. *Composites: Part A* 31, 29, 1999.

Maliska, C. R. *Transferência de Calor e Mecanica dos Fluidos Computacional*, LTC Editora, 2nd Edition, 2004.

Mardal, K. A.; Tai, X. C ; Winther, R. A robust finite element method for darcy–stokes flow. *SIAM Journal of Numeric Analsys*, 40,1605, 2002.

Marques, A. C. Desenvolvimento de modelo numérico utilizando o método dos volumes finitos em malhas não-estruturadas. Dissertação de mestrado, UFES, Vitória, 2005.

Morren G.; Bottiglieri, M.; Bossuyt, S.; Sol, H.; Lecompte, D.; Verleye, B.; Lomov, S. V. A reference specimen for permeability measurements of fibrous reinforcements for RTM. *Composites: Part A* 40, 244, 2009.

Morren, G.; Bossuyt, S.; Sol, H. 2D permeability tensor identification of fibrous reinforcements for RTM using an inverse method. *Composites Part A*, 39, 1530, 2008.

Ngo, N. D.; Tamma, K. K. Complex three-dimensional microstructural permeability prediction of porous fibrous media with and without compaction. *International Journal of Numeric Methods Engineering*, 60, 1741, 2004.

Nieckele, A. A. Computação avançada em fenômenos de transporte: Programa CFT para solução de problemas bidimensionais elípticos. Dissertação de Mestrado, UFRN, Rio de Janeiro, 1996.

Ouagne, P.; J. Bréard, J. Continuous Transverse permeability of fibrous media. *Composites Part A*, 41, 22, 2010.

Park, C. H.; Lebel, A.; Saouab, A.; Bréard, J.; Lee, H. Modeling and simulation of voids and saturation in liquid composite molding processes. *Composites: Part A* 42, 658, 2011.

Pezzin, S. H.; Coelho, L. A. F.; Amico, S. C. New generation of multifunctional composites, with carbon nanotubes for space applications. *Polymers in Defence & Aerospace Applications; Conference Proceedings*, 15, 1, 2010.

Phelan Junior, F. R. Simulation of the injection process in resin transfer molding. *Polymer Composites*, 18, 460, 1997.

Potter, K. D. The early history of the resin transfer moulding process for aerospace Applications. *Composites: Part A*, 30, 619, 1999.

Rudd, C. D.; LAC, K. N.; Mangin, C. G. E. Liquid Moulding, Structural Reaction Injection Moulding and Related Processing Techniques. Woodhead Publishing Limited, 1997.

Ruiz, E; Trochu, F. numerical analysis of cure temperature and internal stresses in thin and thick RTM parts. *Composites: Part A*, 36, 806, 2005.

Schmidt, M. T.; Goss, T. M.; Amico, C. S.; Lekakou, C. Permeability of hybrid reinforcements and mechanical properties of their composites molded by resin transfer molding. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28, 2839, 2009.

Shin, F; Dong, X . 3D Numerical simulation of filling and curing processes in non-isothermal RTM process cycle. *Finite Elements in Analysis and Design*, 47, 764, 2011.

Souza, J. A.; Rocha, L. A. O.; Amico, S. C.; Vargas, J. V. C.; A numerical investigation of the resin flow front tracking applied to the rtm process. *Materials Research*, received: March 16, 2011; Revised: May 31, 2011.

Suresh G.; Advani; Kuang-Ting, H. Chapter in *Handbook of Porous Media*. Second Edition, Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton, FL., 2005.

Tafreshi V.; Rahmana, M. S. A.; Jaganathanb, S.; Wangb, Q.; Pourdeyhimi, B. Analytical expressions for predicting permeability of bimodal fibrous porous media. *Chemical Engineering Science*, 64, 1154, 2009.

Tan, H.; Roy, T.; Pillai, K. M. Variations in unsaturated flow with flow direction in resin transfer molding: An experimental investigation. *Composites Part A*, 38, 1872, 2007.

Teoh, K. J.; Hsiao, K. Improved dimensional infidelity of curve-shaped VARTM composite laminates using a multi-stage curing technique – Experiments and modeling. *Composites: Part A* 42, 762, 2011.

Thompson, J. F.; Soni, B.; Weatherill, K.; Handbook of Grid Generation, CRC Press, 1998.

Tucker, C. L. III. Dessenberger, R. B. Governing equations for flow and heat transfer in stationary fiber beds. Polymer Composites Manufacturing, New York: Elsevier Science, 257, 1994.

Tucker, C. L. III. Heat transfer and reaction issues in liquid composite molding. Polymers Composites 17, 60, 1996.

Vafai, K. Handbook of Porous Media, Second Edition. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton, FL., 2005.

Visconti, I. C.; Langella, A. Duarte, M.; In 8th European Conference on Composite Materials, 737, 1998.

Wesseling, P.; An introduction to multigrid methods. John Wiley & Sons, 1991.

Wong, C. C.; Long, A. C.; Sherburn, M.; Robitaille, F.; Harrison, P.; Rudd, C. D. Comparisons of novel and efficient approaches for permeability prediction based on the fabric architecture. Composites Part A, 37, 847, 2006.

Woodhead, L. H.; Handbook of Polymer Composites for Engineers. Cambridge: Publishing Limited, 1994.

Yazdchi, K.; Srivastava, S.; Luding, S. Microstructural effects on the permeability of periodic fibrous porous media. International Journal of Multiphase Flow, 37, 956, 2011.

Callister, W. D. Jr. Materials science and engineering. An Introduction. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1991.

Gay, D., Suong; Hoa, V.; Tsai, S. W. Composite Materials: design and applications. Traduzido por Stephen W. Tsai. Publicado por CRC Press, 2003

Padilha, A. F. *Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades*. Publicado por Hemus, 1997.

Gamstedt, E. K.; Sandell, R.; Berthold, F.; Pettersson, T.; Nordgren, N. Characterization of interfacial stress transfer ability of particulate cellulose composite materials. *Mech. Mater.*, 43, 693–704 (2011).

Asaad, J.N.; Tawfik, S.Y. Polymeric composites based on polystyrene and cement dust wastes. *Mater. Design.* 32, 5113–5119 (2011).

Lawrence, J.; Simacek, P.; Advani, S. New advances in modeling and simulation of liquid composite molding processes. In: *Proceedings of the International SAMPE Symposium and Exhibition* pp. 1–12. Long Beach, USA (2006).

Nordlund, M.; Lundstro, T. S.; Frishfelds, V.; Jakovics, A. Permeability network model for non-crimp fabrics. *Composites: Part A* 37 826–835 (2007).

Garay, A.C.; Heck, V.; Zatera, A.; Amico, S.C. Influence of the Calcium carbonate (CaCO₃) in the infiltration process and properties of composites molded by RTM and RTM light. In: *19º Brazilian Congress of Materials Sciences and Engineering*. Campos do Jordão, Brazil (2010).

Chohra, M.; Gokce, A.; Advani, S.G.; Walsh, S.M. Permeability estimation algorithm to simultaneously characterize the distribution media and the fabric preform in vacuum assisted resin transfer molding process. *Comp. Sci. Tech.* 65, 2129–2139 (2005).

Shou, D.; Fan, J.; Ding, F. Hydraulic permeability of fibrous porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 4009–4018 (2001).

Zhu, Q.Y.; Xie, M.H.; Yang, J.; Li, Y. A fractal model for the coupled heat and mass transfer in porous fibrous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 1400–1409 (2001).

Ashari, A.; Bucher, T.M.; Tafreshi, H. V. Modeling motion-induced fluid release from partially saturated fibrous media onto surfaces with different hydrophilicity. *International Journal of Heat and Fluid Flow* (2011)

Forchheimer, P. *Wasserbewegung durch Boden*, 7 VDI, vol.45, p.1781-1788 (1901).

Teruel, F. E.; Uddin, R. Characterization of a porous medium employing numerical tools: Permeability and pressure-drop from Darcy to turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 5878–5888 (2009).

Barros, P. H. L. Modelagem analítica e experimental da filtração em meios porosos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo – UFRN (2008).

Han, K.; Jiang, S.; Zhang, C.; Wang, B. Flow modeling and simulation of SCRIMP for composites manufacturing. *Comp.: Part A*. 31, 79–86 (2000).

Luo, Y; Verpoest, I.; Hoes, K; Vanheule, M.; Sol, H.; Cardon, A. Permeability measurement of textile reinforcements with several test fluids. *Composites: Part A* 32 1497 – 1504 (2001).

Lundström, T. S.; Stenberg, R.; Bergström, R.; Partanen, H.; Birkeland, P. A. In-plane permeability measurements: a nordic round-robin study. *Composites: Part A* 3 29–43 (1999).

Anexos

ANEXO 1 – Algoritmo para ajuste da curva de pressão escrito no Wolfram Mathematica carregado com os dados do experimento P05V40T23.

```
In[15]:= Clear[data, a, b, x];

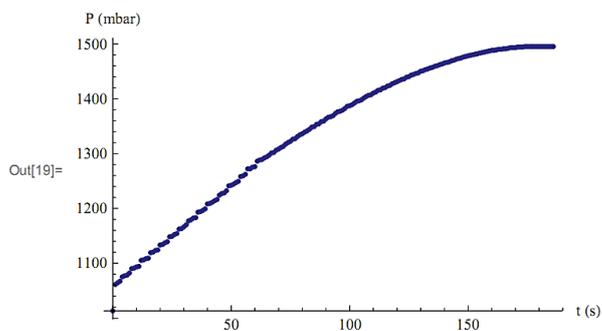
experimentos = FindFile[SystemDialogInput["FileOpen", "dados.dat"]]

data = Import[experimentos, "Table"];

M = Length[data]; (* Tempo Final *)

Show[ListPlot[data], Axes → True,
  AxesLabel → {"t (s)", "P (mbar)"}, AxesOrigin → {0, data[[1, 2]]}]
```

Out[16]= C:\Users\LCAD\Desktop\Casa_retificado\Casa_retificado\Exp71.dat



```
In[172]:= Clear[a, b];

(*ajuste = data[[1,2]]+b*x^0.2 + a*(1 +Exp[x/b]) + Exp[b x/(c+d x)];

modelo=NonlinearModelFit[data,ajuste,{{a,1},{b,5},{c,5},{d,1}},x]; *)

ajuste = data[[1, 2]] + a * x^0.25 + e * Exp[b x / (c + d x)];

modelo = NonlinearModelFit[data, ajuste, {{a, 1}, {b, 5}, {c, 0.1}, {d, 0.1}, {e, 0.1}}, x];

modelo[{"ParameterTable", "RSquared"}]

valores = modelo["ANOVATableEntries"];

Grid[Join[{"", "d.f.", "s2.o.s.", "m.s."}, Join[
  {"function"}, {"error"}, {"sum"}, {"corrected sum"}], valores, 2], Alignment → Right]

modelo["FitCurvatureTable"]

Plot[modelo[x], {x, 0, M}, Epilog → Point[data], PlotStyle → {Red, Thick}, Axes → True,
  AxesLabel → {"t (s)", " Pressão (mbar)"}, AxesOrigin → {-1, data[[1, 2]]}
  (*, AxesOrigin → {0, 999}, PlotRange → {{0, M+1}, {0, modelo[M]}} *)
```

