



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

**Simulação Numérica do Processo de RTM para a Infiltração de Reforços
Espessos Considerando a Variação da Viscosidade da Resina em Função da
Temperatura e do Tempo**

por

Laísa Luiz Soares

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Modelagem Computacional

Rio Grande, fevereiro, 2017.

**Simulação Numérica do Processo de RTM para a Infiltração de
Reforços Espessos Considerando a Variação da Viscosidade da
Resina em Função da Temperatura e do Tempo**

por

LAÍSA LUIZ SOARES

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Avila
Souza

Co-orientador: Prof. Dr. Liércio André
Isoldi

Rio Grande, fevereiro, 2017.

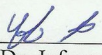
Laísa Luiz Soares

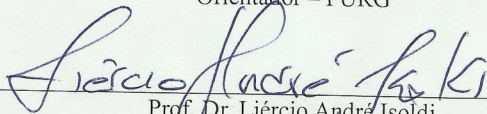
**“ Simulação Numérica do Processo de RTM para a Infiltração em Reforços Espessos
Considerando a Variação da Viscosidade da Resina em Função da Temperatura e do Tempo”**

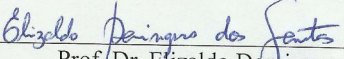
Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Modelagem Computacional da
Universidade Federal do Rio Grande - FURG,
como requisito parcial para obtenção do Grau
de Mestre. Área concentração: Modelagem
Computacional.

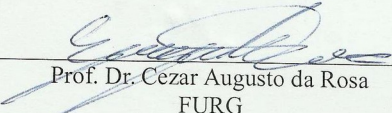
Aprovada em

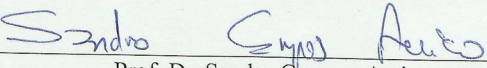
BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Jeferson Avila Souza
Orientador – FURG


Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coorientador – FURG


Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
FURG


Prof. Dr. Cezar Augusto da Rosa
FURG


Prof. Dr. Sandro Campos Amico
UFRGS

Rio Grande - RS
2017

Ficha catalográfica

S767s Soares, Laísa Luiz.

Simulação numérica do processo de RTM para a infiltração em reforços espessos considerando a variação de viscosidade da resina em função da temperatura e do tempo / Laísa Luiz Soares. – 2017.
79 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS, 2017.

Orientador: Dr. Jeferson Avila Souza.

1. Simulação numérica 2. RTM 3. Viscosidade 4. Variação de temperatura 5. Variação de tempo I. Souza, Jeferson Avila II. Título.

CDU 004.41

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus, por me permitir vencer mais essa etapa da vida, e me dar forças para continuar até mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador professor Jeferson Avila Souza, à quem aprendi a admirar como pessoa e profissional. Por me dar todo o suporte e atenção necessário para o desenvolvimento desta pesquisa, e por ter contribuído para meu crescimento profissional e como pesquisadora.

Ao meu coorientador professor Liércio André Isoldi e aos professores da banca examinadora, por contribuírem de forma relevante com o meu trabalho.

Gostaria também de agradecer à minha família, principalmente a minha mãe Carmem Vânia, por todo esforço e dedicação que sempre teve comigo.

Ao Cristiano Souza, pelo grande apoio, confiança e parceria de sempre.

Às amigas construídas na FURG ao longo desses dois anos, especialmente à Paola Avendaño, que foi sempre uma grande amiga, e esteve comigo durante todo esse tempo.

À agência de fomento que financiou a bolsa (CAPES), e à Universidade Federal do Rio Grande (FURG), bem como ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional.

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar, através da simulação numérica, o processo de fabricação de compósitos via moldagem por transferência de resina – RTM (*Resin Transfer Molding*), considerando que a viscosidade da resina é uma função da temperatura e do tempo. Para isto, foi implementado no software de simulação, OpenFOAM, um modelo empírico que representa a mudança na viscosidade, e a equação da energia que calcula a distribuição de temperaturas no interior do molde. Foram realizadas algumas simulações que levaram em conta a variação da viscosidade no interior de moldes finos aquecidos, considerando escoamento retilíneo e radial, e com distribuição isotérmica e não-isotérmica de temperaturas, bem como a simulação do preenchimento de placas espessas aquecidas, considerando escoamento radial, com distribuição não-isotérmica de temperaturas. Os softwares utilizados para as simulações foram o GMSH (gerador de geometria e malha) e o OpenFOAM (solução), no qual este, utiliza volumes finitos como método de discretização. Encontrou-se que o tempo final de injeção para o processo de RTM é dependente do tempo de gel da resina, visto que, quando a mesma entra em fase de gel seu escoamento se torna cada vez mais lento até o momento em que a resina não avança mais. Desta forma, para a fabricação de uma peça por RTM é necessário que a moldagem seja completada antes que a resina gelifique. Uma breve discussão sobre outros parâmetros que influenciam o preenchimento de moldes espessos também foi apresentada neste trabalho, tais como: permeabilidade transversal, pressão inicial de injeção e tempo de preenchimento. Com relação às placas espessas, foi possível identificar o quão difícil é o preenchimento total do molde, devido aos baixos valores da permeabilidade transversal, a qual influencia diretamente o escoamento da resina tanto na direção transversal como no plano, acarretando grandes dificuldades quando o valor da permeabilidade é baixo. Desta forma, a moldagem de placas espessas acaba exigindo um tempo de preenchimento ainda maior do que o tempo de preenchimento de placas finas devido ao seu tamanho e ao escoamento lento da resina.

Palavras-chave: Simulação numérica, RTM, Placas espessas, Viscosidade em função da temperatura e do tempo, Molde aquecido.

ABSTRACT

This work has been developed with the objective of studying, through numerical simulation, the process of composite manufacturing with resin transfer molding (RTM), considering that the resin viscosity is a function of temperature and time. For such, an empirical model representing viscosity changes and the energy equation which calculates temperature distribution inside the mold were implemented into the simulation software, OpenFOAM. Simulations that considered viscosity variation inside thin heated molds were performed regarding rectilinear and radial flow, with isothermal and non-isothermal temperature distribution, as well as the simulation of thick heated plates filling, considering radial flow with non-isothermal temperature distribution. GMSH (geometry and mesh generator) and OpenFOAM (solution) were the softwares used for simulations, in which the last (OpenFOAM) makes use of finite volumes discretization method. It's been noticed that the final injection time for the RTM process is dependant on the resin time as a gel, insofar as when it enters gel phase, its flow becomes increasingly slower until the moment in which the resin doesn't flow further anymore. This way, for the RTM piece manufacturing it is necessary that the molding is completed before the resin gelifies. A brief discussion about other parameters that influence thick mold filling was also presented in this work, such as: transversal permeability, initial injection pressure and filling time. Regarding thick plates, it was possible to identify how hard the filling of the total mold is, due to the low values of transversal permeability, which directly influences resin flow as much in transversal direction as on the surface, resulting in great difficulties when permeability value is low. Thus, thick plates molding ends up requiring an even longer filling time than the one of thin plates because of its size and slow resin flow.

Keywords: Numerical simulation, RTM, Thick plates, Viscosity as a function of temperature and time, Heated mold.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	12
1.1.Motivação.....	13
1.2.Objetivos.....	14
1.3.Descrição dos capítulos.....	14
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1.Materiais compósitos.....	16
2.2.Técnicas de processamento de compósitos.....	17
2.2.1.Infusão.....	17
2.2.2.RTM (<i>Resin Transfer Molding</i>).....	18
2.2.3.RTM- <i>light</i>	19
2.3.Reforço fibroso/meio poroso e permeabilidade.....	20
2.4.Placas espessas.....	22
2.5.Variação da viscosidade da resina durante o preenchimento do molde.....	24
3.MODELAGEM NUMÉRICA DO PROCESSO DE RTM.....	29
3.1.VOF (volume of fluid).....	29
3.2.Método dos Volume Finitos (MVF).....	31
4.SOLUÇÃO NUMÉRICA.....	33
4.1.OpenFoam.....	33
4.1.1.Pré-Processamento.....	33
4.1.2.Processamento.....	35
4.1.3.Pós-processamento.....	36
4.2.Implementação da equação da energia e do modelo de viscosidade no solver <i>interFoam</i>	37
4.3.Verificação da solução numérica.....	39
4.3.1.Escoamento retilíneo.....	40
4.3.2.Escoamento radial.....	43
5.RESULTADOS.....	48
5.1.Placas espessas.....	48
5.2.Viscosidade em função da temperatura e do tempo.....	53
5.2.1.Caso isotérmico.....	53
5.2.2.Caso não-isotérmico.....	56
Validação da distribuição de temperaturas.....	57
Simulação de placa fina com escoamento retilíneo.....	59
Simulação de placa fina com escoamento radial.....	63

Simulação de placa espessa com escoamento radial.....	65
6.CONCLUSÕES.....	67
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
8.APÊNDICES.....	74
8.1.Função kappaf.....	74
8.2.Equação da energia.....	74
8.3.Implementação do modelo de viscosidade.....	75

Lista de Figuras

Figura 2.1. - Processo de infusão (FRANCO, 2008).....	18
Figura 2.2. - Processo de RTM (ALVES, 2006).....	19
Figura 2.3. - Esquema do processo de RTM-light (GARAY et al., 2011).....	19
Figura 2.4. - Representação de um meio poroso (VAFAl, 2005).....	20
Figura 2.5. - Reforço fibroso. (a) Fibra de vidro tipo E em forma de manta. (b) Fibra de vidro tipo E em forma de tecido (LaPol/UFRGS, 2016).....	21
Figura 2.6. - Esquema de escoamento em peça espessa.....	22
Figura 3.1. - Esquema de discretização do domínio contínuo.....	32
Figura 4.1. - Esquema da estrutura do software OpenFOAM.....	34
Figura 4.2. - Esquemas de interpolação.....	35
Figura 4.3. - Janela de processamento do OpenFOAM.....	36
Figura 4.4. - Geometria para simulação numérica do escoamento retilíneo.....	41
Figura 4.5. - Comparação da simulação numérica com o modelo analítico para escoamento retilíneo.....	42
Figura 4.6. - Malha para simulação numérica do escoamento retilíneo.....	43
Figura 4.7. - Geometria para simulação numérica de escoamento radial.....	44
Figura 4.8. - Comparação da simulação numérica com o modelo analítico do escoamento radial.....	45
Figura 4.9. - Malha para simulação numérica de escoamento radial.....	47
Figura 5.1. - Molde espesso.....	49
Figura 5.2. - (a) Visão superior da malha; (b) Visão dos elementos próximos à porta de saída; (c) Visão da lateral da malha.....	49
Figura 5.3. - (a) Visão da face inferior do reforço no tempo de 10.000 s. (b) Visão interior do reforço no tempo de 10.000 s.....	50
Figura 5.4. - Avanço da resina ao longo do tempo para diferentes pressões. (a) Influência da pressão no plano. (b) Influência da pressão na espessura.....	51
Figura 5.5. - Avanço da resina ao longo do tempo para diferentes permeabilidades K_{zz} . (a) Influência da permeabilidade K_{zz} no plano. (b) Influência da permeabilidade K_{zz} na espessura.....	51
Figura 5.6. - Visão da face inferior e superior do molde no tempo de 9000 s.....	52
Figura 5.7. - Visão da face inferior e superior do molde no tempo de 12.000 s.....	52

Figura 5.8. - Visão de uma das faces laterais do molde e do interior do molde no tempo de 12.000 s.....	53
Figura 5.9. - Comportamento da viscosidade em função do tempo para diferentes temperaturas.	54
Figura 5.10. - Comparação dos resultados numéricos obtidos com OpenFOAM e os resultados apresentados por Zhou et al., (2014). (a) resultados de Zhou et al., (2014). (b) resultados obtidos com OpenFOAM.....	55
Figura 5.11. - Tempo máximo que a viscosidade se mantém com menos de 0,8 Pa.s.....	55
Figura 5.12. - Comparação da viscosidade para diferentes solvers.....	57
Figura 5.13. - Posição dos sensores virtuais utilizados para a análise da distribuição de temperaturas no interior do molde. (a) Posição do ponto fixo no plano. (b) Zoom da parede do molde mostrando as diferentes posições na direção z.....	58
Figura 5.14. - Avanço da resina e da temperatura.....	59
Figura 5.15. - Gráfico da distribuição de temperaturas na direção z.....	59
Figura 5.16. - Posição em função do tempo para o molde retilíneo. (a) direção em que foi medido o escoamento da resina no interior do molde. (b) gráfico da posição em função do tempo.....	60
Figura 5.17. - Posição da resina no tempo de 5.600 s.....	61
Figura 5.18. - Distribuição dos sensores no molde de escoamento retilíneo.....	61
Figura 5.19. - Distribuição de temperaturas ao longo do molde.....	62
Figura 5.20. - Distribuição dos sensores no molde de escoamento radial.....	64
Figura 5.21. - Posição da resina no instante 5600 s.....	65
Figura 5.22. - Paredes do molde fino.....	65
Figura 5.23. - Paredes do molde espesso.....	66
Figura 5.24. - Posição máxima da resina no tempo de 330 s.....	66

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Solvers utilizados para a solução das equações.....	36
Tabela 4.2: Condições de contorno.....	40
Tabela 4.3: Comparação da solução analítica com a solução numérica para o fluxo retilíneo (sem a implementação da eq. da energia).....	42
Tabela 4.4: Comparação da solução analítica com a solução numérica para o fluxo retilíneo (com a implementação da eq. da energia).....	43
Tabela 4.5: Valores utilizados na simulação numérica do processo de RTM para placas finas (TRINDADE et al., 2016).....	44
Tabela 4.6: Comparação da solução analítica com a solução numérica para o escoamento radial (sem a implementação da eq. da energia).....	46
Tabela 4.7: Comparação da solução analítica com a solução numérica para o escoamento radial (com a implementação da eq. da energia).....	46
Tabela 5.1: Valores utilizados na simulação numérica do processo de RTM para placas espessas baseados no estudo de (TRINDADE et al., 2016).....	49
Tabela 5.2: Valores utilizados nas simulações com transferência de calor.....	53
Tabela 5.3: Valores da viscosidade da resina para diferentes tempos e temperaturas.....	56
Tabela 5.4: Valores da viscosidade e temperatura em cada sensor do molde retilíneo.....	61
Tabela 5.5: Valores da viscosidade e temperatura em cada sensor do molde radial.....	64

Lista de Abreviaturas e Siglas

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CRTM	<i>Compression Resin Transfer Molding</i>
MVF	<i>Método dos Volumes Finitos</i>
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>
VARTM	<i>Vacuum Assisted Resin Transfer Molding</i>
VOF	<i>Volume of Fluid</i>

Lista de Símbolos

Letras Romanas

c_p	Calor específico [J/kg.K]
f	Fração volumétrica
F	Termo fonte de quantidade de movimento [N/m ³]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
k	Condutividade térmica [W/m.K]
K	Permeabilidade [m ²]
P_0	Pressão [Pa]
P_r	Número de Prandtl
r	Posição da frente de escoamento radial [m]
r_0	Raio de injeção no molde radial [m]
t	Tempo [s]
T	Temperatura [K]
u	Velocidade [m/s]
ν	Viscosidade cinemática [m ² /s]
V	Velocidade [m/s]
V_f	Volume de fibra
x	Coordenada cartesiana [m]
X	Posição da frente de escoamento retilíneo [m]

Símbolos Gregos

δ	Delta de Kronecker
$\bar{\tau}$	Tensor de tensões [Pa]
ε	Porosidade do reforço fibroso
μ	Viscosidade [Pa.s]
ρ	Massa específica [kg/m ³]

Subscritos

<i>f</i>	Fibra
<i>num</i>	numérico
<i>ana</i>	analítico
<i>xx</i>	direção x
<i>yy</i>	direção y
<i>zz</i>	direção z

1. INTRODUÇÃO

Diversas indústrias como as navais, automobilísticas e aeronáuticas, buscam continuamente por materiais que atendam às necessidades de resistência mecânica, rigidez, resistência à abrasão e ao impacto, aliado a um baixo peso. Neste sentido, os materiais compósitos, que possuem elevadas propriedades mecânicas, além de baixo peso, vêm sendo cada vez mais explorados e estudados.

Os materiais compósitos são materiais formados por duas ou mais fases (multifásico), sendo que uma de suas fases é chamada de matriz ou fase contínua, e a outra de reforço ou fase descontínua. Assim, as propriedades finais dos compósitos irão depender das propriedades das fases constituintes. Além disso, a combinação leva à fabricação de um material cujas propriedades mecânicas serão superiores às de qualquer das fases separadamente (CALLISTER et al., 2008).

Alguns exemplos de compósitos podem ser citados, tais como: madeira (constituída de fibras de celulose envolvidas por um material mais rígido chamado de lignina), concreto (no qual a fase reforço é constituído de britas e a fase matriz é o cimento) e compósitos poliméricos, (constituídos de fibras vegetais ou sintéticas unidas por uma matriz polimérica), sendo que, os compósitos poliméricos ainda podem ser divididos em termoplásticos e termofixos. Para este trabalho a atenção será voltada aos compósitos poliméricos termofixos.

De uma maneira geral, os polímeros termofixos são materiais rígidos, no qual se tornam permanentemente sólidos durante sua fabricação, não permitindo amolecimento ou reversão do seu estado físico (CALLISTER et al., 2008).

Para a fabricação dos polímeros termofixos existe uma classe de processo chamada de LCM (*Liquid Composite Molding*), na qual o objetivo é o de saturar os espaços vazios entre as fibras do reforço utilizando uma resina de baixa viscosidade, sendo que, esta saturação deverá ocorrer antes da gelificação da resina utilizada. Dentro desta classe encontra-se o processo de RTM (*Resin Transfer Molding*), VARTM, S-RIM, RTM- *light*, entre outros (ADVANI e SOZER, 2011).

O processo de RTM ou moldagem por transferência de resina, que é a base deste estudo, consiste basicamente da colocação de um reforço fibroso dentro da cavidade de um molde, que é fechado com um contra-molde. Neste fechamento, o reforço fibroso entre os moldes é comprimido, e uma resina líquida de baixa viscosidade é injetada para o seu interior a partir de um recipiente sob pressão. A resina poderá ser injetada através de uma ou mais portas de injeção (entrada de resina) (ADVANI e SOZER, 2011).

O conhecimento de certos parâmetros como a permeabilidade do reforço fibroso, a viscosidade da resina, os pontos de injeção da resina e de saída de ar, bem como a pressão inicial de injeção, é importante para a fabricação de compósitos de boa qualidade, atendendo assim, as

propriedades finais desejadas.

A permeabilidade do reforço fibroso indica o nível de facilidade com que a resina irá escoar através do reforço e impregnar o mesmo. Reforços fibrosos que possuem altos valores de permeabilidade, ou seja, mais permeáveis, fazem com que a resina encontre maior facilidade no seu escoamento. Por outro lado, em reforços fibrosos que possuem baixos valores de permeabilidade, isto é, menos permeáveis, as chances de preenchimento incompleto do molde é maior (ADVANI e SOZER, 2011).

A resina utilizada no processo de RTM deve ter uma viscosidade suficientemente baixa e um tempo de gel longo para que seja possível a total impregnação do reforço fibroso no interior do molde em aceitáveis tempos de ciclos (RUDD, 1997). Neste trabalho, também foi considerado que a viscosidade da resina muda em função da temperatura e do tempo. Segundo Rudd, (1997) a utilização de moldes aquecidos no processo de RTM poderá auxiliar no preenchimento do molde, fazendo com que a resina reduza a sua viscosidade, e portanto, facilite a impregnação do reforço fibroso, diminuindo ainda, o tempo de preenchimento.

Dependendo do molde que será utilizado para a fabricação de peças via RTM, os pontos de injeção de resina e saídas de ar poderão variar de tamanho e quantidades. Quando se trata de moldes com geometrias complexas e grandes, poderá ser necessário mais de um ponto de alimentação de resina, a fim de diminuir o tempo de ciclo de produção e obter uma melhor impregnação das fibras. Para uma peça grande e complexa sendo fabricada, é mais provável o aparecimento de vazios decorrentes do aprisionamento de ar entre as fibras, neste caso, é importante a localização correta das saídas de ar (ADVANI e SOZER, 2011).

No processo de RTM, por ser um processo que utiliza molde fechado, as fibras que são comprimidas aumentam a dificuldade do escoamento da resina no interior do molde devido à permeabilidade que diminui, aumentando assim, o tempo de injeção. Uma alternativa para diminuir o tempo de injeção seria aumentar a pressão inicial, fazendo com que a resina escoe com mais quantidade de movimento, sabendo que, o valor da pressão pode variar para diferentes materiais e limitações mecânicas do molde e do processamento (RUDD, 1997).

1.1. Motivação

A questão sobre a fabricação de materiais compósitos a partir do processo de RTM vem sendo estudada e explorada há algum tempo. O grande interesse sobre o processo de RTM se dá pelo fato de que este processo além de possuir baixa emissão de resíduos, ainda é capaz de fabricar em quantidades moderadas, peças de compósitos resistentes, e que irão desde a geometria mais simples até a mais complexa, tendo ainda um bom acabamento superficial. Considerando o avanço

na produção e aplicação deste material, já existem grupos de estudo que têm o objetivo de aplicar os compósitos fabricados por RTM em protetores balísticos, como a blindagem de veículos e colete à prova de balas. Assim, com esta nova perspectiva, é relevante que sejam estudadas novas metodologias capazes de prever o comportamento da fabricação de compósitos espessos por este processo, e com isso, melhorar cada vez mais a qualidade final das peças obtidas. A simulação numérica é uma boa alternativa para este estudo, porque possui baixo custo se comparado ao experimental, e possibilita soluções próximas do real. Logo, é com esta motivação, que o presente trabalho apresenta a simulação numérica do processo de RTM, considerando ainda a variação da viscosidade da resina em função da temperatura e do tempo, tendo a intenção de ampliar os estudos nesta área e auxiliar em sua possível aplicação na fabricação de peças para proteções balísticas. É relevante ressaltar também que, no grupo de pesquisa de RTM da FURG, esta é a primeira vez que uma abordagem considerando mudanças na viscosidade da resina e utilizando a equação da energia está sendo apresentada no modelo matemático do problema.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem o objetivo de simular numericamente o escoamento de resina em um meio poroso, reproduzindo assim, o processo de RTM utilizado para a moldagem de materiais compósitos. Foi considerado que a viscosidade da resina muda em função da temperatura, devido ao aquecimento do molde, e do tempo. Neste sentido, o interesse é analisar como se dá o comportamento da distribuição de temperaturas no interior do molde, e como este gradiente de temperaturas pode auxiliar na diminuição da viscosidade da resina, e proporcionar um melhor preenchimento do molde. Além disso, pretende-se estudar as melhores condições para que moldes finos e espessos sejam preenchidos.

1.3. Descrição dos capítulos

No Capítulo 1, são apresentadas algumas definições de materiais compósitos, bem como algumas definições relacionadas ao processo de RTM, que é a base deste trabalho. Os objetivos a serem alcançados e a motivação de desenvolvimento deste estudo também são descritos neste capítulo.

O Capítulo 2 traz com mais detalhes as definições de materiais compósitos e cita alguns processos que podem ser utilizados para a obtenção destes materiais, dando um enfoque maior no processo de RTM, visto que este, está diretamente relacionado à este estudo. Também é apresentada a revisão bibliográfica de diversos estudos relacionados à este trabalho.

No Capítulo 3, é apresentada a modelagem matemática do processo de RTM, ou seja, são

apontadas as equações que modelam o problema. São apresentados também, os métodos numéricos utilizados para a solução numérica destas equações.

No Capítulo 4, é feita uma discussão sobre o software OpenFOAM, utilizado para a solução numérica, bem como a implementação de equações adicionais neste software, tais como: a equação da energia e um novo modelo de viscosidade. Também é feita a verificação bidimensional da solução numérica do processo de RTM para escoamento retilíneo e radial.

O Capítulo 5 traz os resultados obtidos após a realização das simulações numéricas do problema utilizando o software OpenFOAM. São apresentados casos envolvendo placas finas e espessas, bem como considerando a mudança na viscosidade da resina em função da temperatura e do tempo, para caso isotérmico e não-isotérmico.

No Capítulo 6, são relacionadas as conclusões referentes a este estudo, trazendo ainda algumas ideias para pesquisas futuras. E no Capítulo 7, são apresentadas as referências utilizadas como embasamento para o desenvolvimento deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos e definições pertinentes a este trabalho, bem como discutidas as principais pesquisas utilizadas como base para este estudo.

2.1. Materiais compósitos

Os materiais compósitos são materiais formados por duas ou mais fases (multifásico), sendo que uma de suas fases é chamada de matriz ou fase contínua, e a outra de reforço ou fase descontínua. A fase matriz tem a função de unir os reforços, bem como, protegê-los de reações químicas com o ambiente que poderiam provocar danos ao material, como por exemplo, danos na superfície. Fazendo uma combinação adequada entre matriz e reforço, é muito provável que as propriedades de cada fase sejam melhoradas após a união destas, o que implicaria em um material com propriedades superiores do que cada fase possuía antes de ser unida com a outra. A combinação de fases com propriedades relativamente boas, levam a peças com características melhoradas (CALLISTER, 1991).

O material compósito pode ser classificado conforme o seu reforço. Sendo assim, podem ser citados os materiais compósitos reforçados por fibras, os compósitos reforçados por partículas e os laminados fibra/metal (MARINUCCI, 2011). O compósito reforçado por fibras, como o próprio nome já diz, é aquele no qual o seu reforço é constituído por fibras, sendo que estas podem ser de carbono, de vidro, aramida, ou ainda fibras vegetais como bambu, sisal ou palha (ASKELAND e PHULÉ, 2008; MARINUCCI, 2011). Os compósitos reforçados por partículas são aqueles nos quais a sua fase reforço é constituída por partículas de um ou mais materiais dispersos na fase matriz que por sua vez é de outro material diferente do reforço. Um exemplo de compósito reforçado por partícula é o concreto (MARINUCCI, 2011). O laminado fibra/metal, é um material que permite a união de um conjunto de fibras com um material isotrópico, por exemplo, o alumínio. Nesta união, camadas de fibras com diferentes orientações são intercaladas com o alumínio. A alternância destas camadas gera um material compósito com alta resistência mecânica, visto que, algumas camadas apresentam condições de isotropia e outras de anisotropia (MARINUCCI, 2011).

Algumas das propriedades que os materiais compósitos podem apresentar são: rigidez, resistência mecânica, baixo peso, desempenho em altas temperaturas, resistência à corrosão, dureza e condutividade térmica (ASKELAND e PHULÉ, 2008). Os compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras ganham o seu espaço por possuírem a capacidade de reduzir peso sem comprometer suas elevadas propriedades mecânicas (MARINUCCI, 2011; SHACKELFORD, 2008). Sendo assim, por atenderem a diversas exigências de propriedades mecânicas, os materiais

compósitos vêm sendo utilizados nas diversas indústrias como navais, aeronáuticas, automobilísticas, construção civil e até mesmo em exércitos ou forças armadas, neste caso, tendo a sua aplicação em materiais bélicos ou em proteções balísticas.

2.2. Técnicas de processamento de compósitos

Algumas das técnicas mais utilizadas para a fabricação de compósitos reforçados por fibras são: enrolamento filментар, pultrusão, lay-up (manual), spray-up (projeção), RTM, RTM-*light*, moldagem por compressão e o processo de infusão (ADVANI e SOZER, 2011; MARINUCCI, 2011). Alguns destes processos estão dentro da família de moldagem líquida de compósitos (LCM), são eles: infusão, RTM, e RTM-*light*.

Na família dos processos de moldagem líquida de compósitos (LCM), a fabricação destes materiais envolve basicamente a impregnação por uma determinada resina das fibras, em forma de manta, tecido, ou outro, que são utilizadas como reforço para o compósito. O principal objetivo dos processos de LCM é impregnar totalmente os espaços vazios entre as fibras antes que a resina entre em estado de gel e comece a endurecer. A impregnação total das fibras se torna difícil quando a viscosidade da resina é muito alta, deste modo, maiores pressões de injeção são necessárias para auxiliar na impregnação. Outra maneira de auxiliar a impregnação das fibras é trabalhar com altas temperaturas nos ciclos de moldagem, para diminuir a viscosidade da resina (ADVANI e SOZER, 2011). A seguir, alguns processos de LCM são apresentados, tais como: infusão, RTM e RTM-*light*.

2.2.1. Infusão

No processamento por infusão, a parte superior do molde é substituída por um saco de vácuo. Após a preparação do molde, são colocadas as fibras ou mantas de fibras, e posteriormente cobertas com filme plástico. Este deverá ser bem selado e envolver toda a parte periférica do molde. Estando com o saco de vácuo devidamente posicionado, utiliza-se uma bomba de vácuo para retirar o ar do saco de vácuo e conseqüentemente das fibras, fazendo uma compactação entre reforço e molde. Sendo assim, à medida que o ar vai saindo a resina começa a impregnar o reforço fibroso. Desta forma, a fibra é impregnada por sucção devido ao vácuo criado sob o filme plástico (ADVANI e SOZER, 2011; MARINUCCI, 2011). Na Fig. 2.1 é possível observar um esquema deste processo.

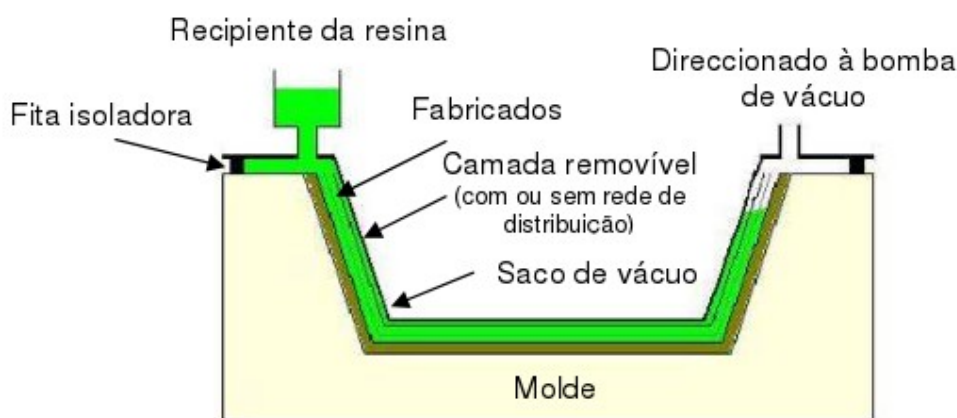


Figura 2.1. - Processo de infusão (FRANCO, 2008).

2.2.2. RTM (*Resin Transfer Molding*)

No processo de RTM, primeiramente os moldes são revestidos e preparados com produtos desmoldantes para que não haja dano na extração da peça após a sua cura. Posteriormente, as fibras já cortadas no formato do molde (tipo fêmea) são posicionadas dentro deste, e é feito o fechamento com o outro molde (tipo macho). Com o fechamento dos moldes, o reforço fibroso fica comprimido entre eles. Após, é feita a injeção da resina dentro do molde e começa a impregnação do reforço fibroso. É importante ressaltar que o molde deverá ter pelo menos uma entrada (onde é injetada a resina) e uma saída, para que o ar que está entre as fibras possa sair e dar espaço à resina. Se peças maiores forem produzidas, poderá ser necessário mais de uma entrada e uma saída. Durante a injeção de resina, é importante o acompanhamento do processo para certificar-se de que o mesmo esteja ocorrendo de maneira correta, ou seja, se o reforço está realmente sendo impregnado pela resina. Por fim, ocorre a cura da resina. Esta etapa poderá se desenvolver com o molde em temperatura ambiente ou aquecido. Após o endurecimento da resina (processo de cura finalizado), a peça pode ser extraída do molde. Se houver necessidade de algum tipo de acabamento na peça, a fim de se obter melhorias em seu aspecto e propriedades, podem ser utilizados produtos que atendam a estas exigências (OLIVEIRA, 2010; DE OLIVEIRA, 2014).

Segundo Bower (2000), as propriedades mecânicas e a qualidade da peça fabricada pelo processo de RTM está intimamente ligada à perfeita impregnação da resina no reforço fibroso. A Fig. 2.2 mostra um esquema do processo de RTM.

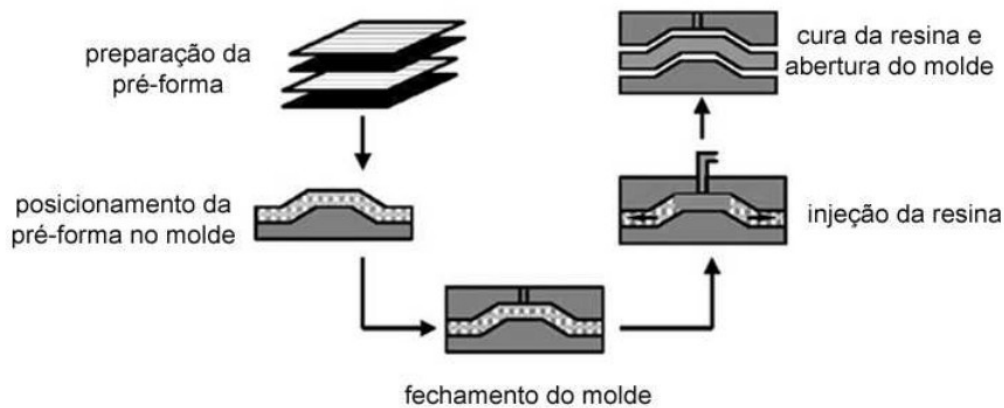


Figura 2.2. - Processo de RTM (ALVES, 2006).

2.2.3. RTM-light

O RTM-light é uma mistura do processo de RTM com moldagem a vácuo, utilizando baixas pressões em seu sistema de injeção de resina. O vácuo em canais periféricos são utilizados para a compressão das fibras, enquanto a pressão positiva de injeção combinada com um vácuo de cavidade controlado produz peças resistentes. No RTM-light, pelo menos um dos lados do molde é feito de material flexível, o que o diferencia do processo de RTM convencional, que utiliza moldes rígidos. Outra característica comum no processo de RTM-light é que o molde é geralmente transparente, permitindo assim, o monitoramento do escoamento da resina em seu interior (GARAY et al., 2011).

Na Figura 2.3 é possível observar um esquema do processo de RTM-light.

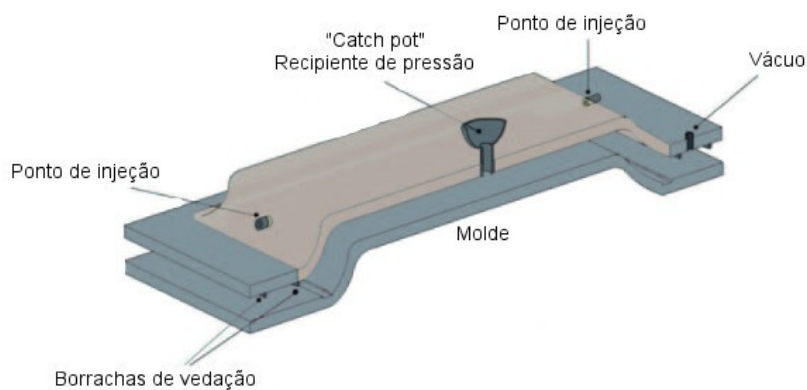


Figura 2.3. - Esquema do processo de RTM-light (GARAY et al., 2011).

2.3. Reforço fibroso/meio poroso e permeabilidade

Um meio definido como poroso pode ser relacionado ou caracterizado como um sólido que contenha poros (espaços vazios) sendo que, entre um espaço vazio e outro, existem conexões. Como exemplos de meios porosos podem ser citados as rochas porosas, e os aglomerados de fibras, como os tecidos (OLIVEIRA, 2014). Um esquema de meio poroso pode ser observado na Fig. 2.4.

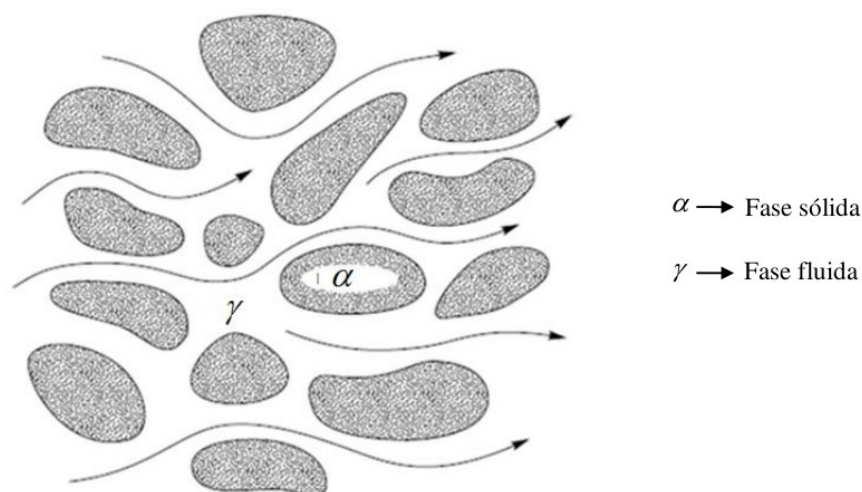


Figura 2.4. - Representação de um meio poroso (VAFAl, 2005).

O fluxo que escoar através do meio poroso é influenciado pela porosidade deste meio. A porosidade, também indica a quantidade de espaços vazios presentes no meio poroso (RUDD, 1997). Segundo Advani e Sozer (2011) a porosidade pode ser calculada como:

$$\varepsilon = 1 - V_f \quad (2.1)$$

onde V_f é a fração volumétrica presente no reforço.

Com relação ao reforço fibroso, este é caracterizado pelo entrelaçamento de fibras na forma de mantas ou tecidos. Segundo Rudd (1997), as mantas são produzidas a partir da disposição aleatória de fibras cortadas em uma esteira em movimento. Este processo dá origem a um material semelhante ao da Fig. 2.5a. Já os reforços fibrosos em forma de tecidos como mostrado na Fig. 2.5b, podem ser produzidos utilizando máquina têxtil convencional para produzir tecidos multi-direcionais (RUDD, 1997).

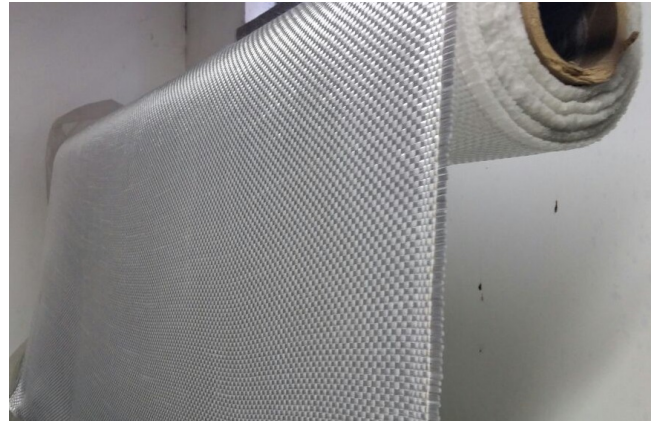
No processo de RTM e similares um reforço fibroso é impregnado por uma resina que escoar entre suas fibras entrelaçadas, dando a ideia de escoar em poros ou em espaços vazios. Assim, o escoamento da resina dentro da cavidade de um molde pode ser considerado como um escoamento em um meio poroso, e a relação entre a pressão da resina e a velocidade da frente de fluxo pode ser dada, segundo (RUDD, 1997) pela Lei de Darcy como:

$$\vec{V} = -\frac{\bar{\bar{K}}}{\mu} \nabla P_0 \quad (2.2)$$

onde, $\vec{V}$ é a velocidade da resina (m/s), $\bar{\bar{K}}$ é o tensor permeabilidade do reforço fibroso (m^2), μ é a viscosidade da resina (Pa.s) e ∇P_0 é o gradiente de pressão (Pa).



(a)



(b)

Figura 2.5. - Reforço fibroso. (a) Fibra de vidro tipo E em forma de manta. (b) Fibra de vidro tipo E em forma de tecido (LaPol/UFRGS, 2016)

O valor da permeabilidade do reforço fibroso, ou meio poroso, representa a facilidade que a resina tem de escoar entre os poros ou fibras. Uma boa e adequada fabricação de compósitos por RTM só será possível se o reforço fibroso presente no molde for totalmente impregnado pela resina injetada. Espaços vazios ou não impregnados poderão acarretar danos irreversíveis à peça fabricada. Neste sentido, Advani e Sozer, (2011) dizem que em todos os processos de moldagem líquida, é de fundamental importância que se tenha um conhecimento do valor da permeabilidade do reforço fibroso, pois este conhecimento irá ajudar a prever o comportamento da resina com relação à impregnação da mesma nas fibras do reforço.

Para produzir compósitos com propriedades ainda mais elevadas, seria vantajoso o aumento no volume das fibras dentro do molde. Contudo, aumentando o volume de fibras, ocorre a compressão das mesmas dentro do molde. Uma vez que estas são comprimidas, ocorre o bloqueio ou alguns canais do meio fibroso ficam contraídos, reduzindo assim a mobilidade do fluxo de resina ou a permeabilidade.

Em termos de modelo analítico e numérico, considerando um meio poroso homogêneo, é

possível calcular a permeabilidade do reforço fibroso através de abordagens computacionais que utilizam a Lei de Darcy para relacionar a queda da velocidade do fluxo com o gradiente pressão. Estas abordagens auxiliam na compreensão sobre o comportamento do escoamento da resina dentro do molde (ADVANI e SOZER, 2011).

Souza, et al. (2012) apresentaram uma metodologia numérica que determina a permeabilidade dos reforços fibrosos no processo de RTM. O método permitiu calcular as três componentes de permeabilidade (K_{xx} , K_{yy} e K_{zz}) a partir de um conjunto de valores de tempo e frente de fluxo da resina adquiridos experimentalmente.

Com o conhecimento da permeabilidade do reforço fibroso, também foi possível prever um valor ideal de pressão para a injeção da resina na pré-forma, visto que, se a pressão for muito baixa, a impregnação não ocorrerá de forma eficiente, e poderá ocorrer o aparecimento de vazios (presença de ar) dentro do reforço fibroso. Por outro lado, com uma pressão superior do que a necessária, poderá ocorrer o arrasto de fibras e até mesmo o empenamento da peça.

2.4. Placas espessas

Na maioria das vezes, os materiais compósitos utilizados para as diversas aplicações, são estruturas delgadas. Assim, no momento da moldagem destes materiais, mesmo que a permeabilidade no plano do reforço fibroso possuisse a mesma ordem de grandeza que ao longo da espessura, o escoamento da resina na direção transversal do molde pode ser ignorado. Contudo, se em algum caso, a componente da permeabilidade do fluxo transversal for muito menor do que os componentes da permeabilidade no plano, o fluxo transversal deverá ser considerado. Em outras palavras, e observando a Fig. 2.6, no processo de RTM uma peça poderá ser considerada espessa quando a distância entre a entrada da resina e a frente de escoamento no plano ($L1$) for muito maior que a distância entre a entrada da resina e a frente de escoamento no volume ($L2$) da pré-forma (ADVANI e SOZER, 2011).

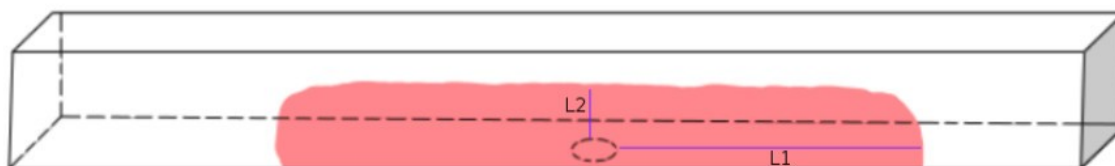


Figura 2.6. - Esquema de escoamento em peça espessa.

Assim, na fabricação de materiais compósitos pelo processo de RTM, deve ser levado em consideração alguns parâmetros como a permeabilidade e a porosidade do reforço fibroso, a

viscosidade da resina, e a pressão inicial de injeção. Além disso, considerando a fabricação de peças espessas, um maior cuidado com a permeabilidade transversal deve ser tomado, visto que, se for muito baixa pode também influenciar o tempo total de preenchimento da pré-forma.

Alguns parâmetros sobre a qualidade do preenchimento do molde e do acabamento de peças fabricadas por RTM estão sendo explorados em casos de placas espessas. Em Amorim Júnior, et al. (2006), foi apresentado um estudo experimental sobre o processo de fabricação de compósito espesso por RTM. Os autores avaliaram como o sistema de injeção de resina poderá influenciar no processo de RTM, bem como qual a possível influência que a quantidade de resina presente no reservatório de injeção terá no processo. Neste sentido, os autores afirmaram que, dependendo do sistema de injeção utilizado (considerando sistemas com diferentes configurações e pressão de injeção), este poderá influenciar no tempo de preenchimento da pré-forma.

Em Saouab et al. (2001), os autores primeiramente realizaram um experimento e analisaram o fluxo transversal da resina. Desta forma, eles conseguiram determinar o comportamento do escoamento da resina em um meio poroso e calcularam a permeabilidade de peças espessas a partir da visualização do caminho da resina no reforço fibroso. Foi proposta uma abordagem matemática onde foram tratados os resultados experimentais e calculadas as permeabilidades. A simulação foi realizada com um código numérico que considera um fluxo tridimensional. Desta forma, foi possível calcular o preenchimento do molde e estimar os parâmetros de cura da resina de acordo com o seu comportamento químico e reológico. Os autores mostraram o comportamento do escoamento da resina em uma placa espessa com uma fração volumétrica $V_f = 0,22$, e observaram que este comportamento foi semelhante ao longo das direções x e y , enquanto ao longo de z o escoamento da resina sofreu uma maior resistência. Quando V_f decresce de 0,22 para 0,19, é possível observar uma notável mudança de permeabilidade, isto é, quanto menor o V_f maior será a permeabilidade do reforço fibroso.

Poodts et al. (2014) apresentaram uma comparação entre resultados experimentais e numéricos (PAM-RTM) da fabricação de uma peça espessa a partir do processo de RTM. Os autores utilizaram um molde cuja entrada da resina é posicionada no centro do molde inferior. É dito que quando o preenchimento acontece de baixo para cima e contra a gravidade, é possível evitar o aprisionamento de ar dentro do molde. Neste estudo, os autores ainda comentaram sobre determinados comportamentos imprevisíveis que ocorrem durante a moldagem, devido ao escoamento da resina. Um deles é a impregnação incompleta da pré-forma, fazendo com que algumas fibras ainda permaneçam secas no final da moldagem. O outro comportamento destacado foi sobre o arraste das fibras para cima, no momento em que a resina começou a entrar no molde. Entre outras hipóteses, os autores disseram que estes comportamentos podem ocorrer por causa do

modo como as fibras são arranjadas no interior do molde.

Trindade et al. (2016) apresentaram um estudo numérico sobre o comportamento do escoamento da resina em um reforço fibroso espesso durante o processo de RTM. Os autores analisaram o efeito da redução da permeabilidade transversal, bem como o efeito da localização das saídas de ar, para o preenchimento total do molde. Como esperado, verificou-se que, o escoamento da resina em moldes espessos é diferente do escoamento em moldes finos. Isto acontece porque a chegada da resina no plano oposto ao da injeção não acontece imediatamente como considerado no processamento de placas finas. Desta forma, os autores concluíram que a permeabilidade transversal desempenha um papel importante no escoamento da resina em moldes espessos. Por outro lado, os autores disseram que, a permeabilidade transversal também pode influenciar no avanço da resina no plano, isto é, para um meio isotrópico ($K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$), a frente de escoamento terá uma forma esférica até que a resina atinja a face superior do molde, ou então, em um meio anisotrópico ($K_{xx} = K_{yy} \neq K_{zz}$) se K_{zz} for muito menor do que a permeabilidade no plano, um comportamento retilíneo poderá ser observado na direção transversal. Além disso, o escoamento na direção transversal poderá ainda levar muito mais tempo do que na direção do plano, sendo assim, a gelificação da resina poderá ocorrer antes do molde estar completamente cheio. Com relação à localização das saídas de ar no molde, não foi notada nenhuma diferença no comportamento da frente de escoamento da resina.

2.5. Variação da viscosidade da resina durante o preenchimento do molde

Nos processos de moldagem líquida, é necessário que a pré-forma de fibra seja totalmente impregnada com a resina antes que ocorra a gelificação da mesma, visto que, no processo de cura, a viscosidade começa a aumentar drasticamente. Para peças finas, isto não é tão complicado, pois o calor pode ser removido rapidamente por condução através da superfície da peça. Já com relação a peças mais espessas, a resistência à passagem do calor é maior, e significativos gradientes de temperatura se desenvolvem, levando ao acúmulo de tensões residuais e, eventualmente, causando um processo de cura desigual e até mesmo o empenamento da peça (ADVANI e SOZER, 2011).

Neste sentido, é de grande relevância que se estude possíveis influências na viscosidade e possíveis soluções que permitam o preenchimento do molde antes da gelificação da resina. Alguns autores apresentam estudos que explicam o processo de cura da resina, e quais fatores influenciam sua rápida gelificação.

Fontana (1998) ilustrou algumas das dificuldades de certos modelos que calculam o grau de cura da resina, considerando a viscosidade dependente da temperatura, bastante utilizados em códigos que modelam os processos de fabricação de compósitos via RTM. O autor ainda propôs

uma aproximação alternativa, que leva em consideração que a propriedade mais significativa com relação à reticulação da resina é a própria viscosidade. Assim, a aproximação é baseada unicamente em medições da viscosidade, e o princípio fundamental do método é que, para qualquer história térmica da resina, a única variável que determina a viscosidade é a temperatura.

Em Kiuna et al. (2002), baseado no estudo de Fontana (1998), foi proposto um modelo matemático para determinar a viscosidade da resina em função do tempo aplicado a processos de RTM e levando em consideração diferentes temperaturas de injeção. Os autores disseram ser quase exponencial o aumento da viscosidade em função do tempo, e mostraram que a velocidade de cura aumenta com o aumento da temperatura da resina. Além disso, é observado que antes do início da cura da resina, a viscosidade inicial varia inversamente com a temperatura, sendo mais baixa em temperaturas mais elevadas. Também que, a maior taxa de cura ocorre nas temperaturas mais elevadas.

Abbassi e Shahnazari (2004) concordaram com Kiuna et al. (2002) quando disseram que existe uma distribuição de temperaturas na resina durante o preenchimento do molde. Afirmaram ainda que o campo de temperaturas desempenha um papel importante no processo de RTM e pode afetar fortemente o fluxo através da sua influência sobre a viscosidade da resina. Eles explicaram que, durante a cura, a temperatura aumenta até um valor máximo e depois diminui devido à condução de calor para a parede do molde.

Shi e Dong (2011), apresentaram formulações numéricas que podem ser aplicadas em casos de moldagem pelo processo de RTM para prever o fluxo de uma resina dentro de um molde, bem como prever a cura desta resina. As simulações foram realizadas tridimensionalmente utilizando uma malha tetraédrica não estruturada e assumindo uma situação não-isotérmica. Os autores afirmaram que, em casos não-isotérmicos, é bastante difícil a modelagem numérica, pois a transferência de calor e a cura da resina afetam fortemente no preenchimento do molde. Neste sentido, foi utilizada a Lei de Darcy para prever o comportamento do fluxo da resina e a equação da energia para descrever a variação de temperatura da resina e da fibra e descrever a convecção de calor da resina. Os resultados mostraram que o grau de cura da resina a uma temperatura constante aumenta com o passar do tempo. Esta cura também irá aumentar com o aumento da temperatura.

Aktas et al. (2015) utilizou o software PAM-RTM para simular o grau de cura de uma resina poliéster, a temperatura exotérmica durante a infusão e o gradiente de temperaturas no estágio de cura, para um processo de infusão a vácuo. Para isso, resultados experimentais da cinética de cura, propriedades dos materiais e as condições de contorno foram introduzidas no software. O modelo empírico que representou o comportamento de cura da resina foi baseado na Lei de Arrhenius. Os resultados numéricos foram comparados com os experimentais tendo uma boa concordância entre

eles.

Para Pandiyan e Neogi (2012), a viscosidade da resina durante o preenchimento de um molde em processos de moldagens líquidas, tem uma dependência implícita da pré-catalisação de cura e da temperatura do processo. Os autores investigaram a viscosidade durante a cura de uma resina e desenvolveram um modelo matemático que descreve a viscosidade em função dos parâmetros que a influenciam.

Zhou et al. (2014) sugeriram dois modelos capazes de prever, levando em consideração a temperatura e o tempo, a cura de uma resina epóxi utilizada em processos de RTM. Os autores combinaram os modelos Dual-Arrhenius e o modelo de viscosidade para prever o comportamento reológico do sistema de cura desta resina. A partir dos resultados obtidos, eles afirmaram que a melhor temperatura de processamento está entre 30 °C e 45 °C, onde se consegue manter a resina com uma viscosidade menor do que 0,8 Pa.s por até 50 min.

Skordos e Partridge (1999) focaram na modelagem e monitoramento da transferência de calor que ocorre durante a cura da resina no processo de RTM. Este monitoramento se deu por conta da inserção de sensores em alguns pontos da peça a ser moldada. Segundo os autores, estudos experimentais apresentaram a existência de consideráveis gradientes térmicos durante a fase de cura da resina no processo de RTM. Os autores disseram que a presença destes gradientes térmicos podem afetar o grau de cura da resina ou até mesmo levar à deterioração das propriedades finais do compósito. Deste modo, se faz importante a incorporação da modelagem e monitoramento da transferência de calor em processos de RTM. Estas aproximações são valiosas para otimizar o processo de cura da resina. No entanto, elas apresentam algumas desvantagens, isto é, a aplicação de uma modelagem correta requer grande conhecimento sobre as propriedades dos materiais utilizados, bem como das características do processo. Estas informações podem ser em alguns casos impossíveis, devido à limitada reprodução de algumas condições de processo, visto que isto poderá afetar negativamente o custo da fabricação.

Considerando que a cura da resina não é uniforme, devido às diferentes temperaturas em diferentes áreas da peça durante a moldagem, para Hardis et al. (2013) surgiu então a necessidade de monitorar e controlar o processo de cura de uma resina epóxi para melhorar a qualidade de fabricação destas peças. Os autores disseram que, não tendo um método para medir diretamente o processo de cura, os fabricantes precisam determinar (empiricamente) um tempo de cura adequado para evitar os piores cenários que podem acontecer nas peças, tais como sub-cura (tempo de cura em excesso, sem necessidade) ou a desmoldagem prematura. Segundo Yenilmez e Sozer (2009) se o molde for aberto muito cedo, a peça não terá obtido a sua resistência e rigidez necessária, o que significa que a peça poderá deformar-se durante ou após a remoção. Por outro lado, se o molde é

aberto muito tarde, o tempo do ciclo de fabricação terá sido desnecessariamente longo.

Assim, o objetivo da pesquisa de Hardis et al. (2013) foi o de controlar o processo de cura durante a fabricação para finalmente alcançar um produto de melhor qualidade. Os autores disseram ser necessário encontrar soluções que controlem o tempo e a temperatura para alcançar a cura completa, e a temperatura ótima para diminuir o tempo de ciclo.

Para Sobotka e Delaunay, (2007) o que condiciona a cinética de polimerização do compósito é a temperatura do molde, e não a temperatura da resina. Assim, eles analisaram a cura da resina a partir da mudança de temperatura no molde, e estimaram ciclos ótimos de temperaturas para a fabricação dos compósitos. Neste trabalho, a modelagem da fase de cura da resina mostrou que a transferência de calor entre o molde e a peça pode ser simulada obtendo boa aproximação do real. Os autores concluíram que a utilização de altas temperaturas influencia na diminuição dos tempos de ciclos de fabricação.

Com relação às peças espessas, foi encontrado na pesquisa de Jahromi et al. (2012) uma metodologia utilizando redes neurais para prever o ciclo de cura de compósitos espessos. Os autores afirmaram que as temperaturas elevadas e não uniformes das peças são mais notadas e dominantes em compósitos espessos. Deste modo, o efeito da espessura também foi investigado. Analisando diferentes espessuras dos moldes, os autores disseram que em uma espessura fina a diferença de temperatura entre o centro do molde e as paredes pode ser negligenciada. No entanto, para peças espessas, uma grande diferença de temperatura entre o centro do molde e as paredes é notada. A mesma tendência é notada para o grau de cura da resina. Assim, pode-se concluir que as peças mais finas são curadas de uma melhor forma e mais uniformemente entre o centro do molde e as paredes.

Rouison et al. (2004) disseram que o tempo de moldagem varia com a quantidade de fibras presentes no molde. Desta forma, o tempo de injeção aumenta drasticamente com teores elevados de fibras, já que o aumento no teor de fibras diminuiu a permeabilidade transversal no molde, e, conseqüentemente, aumenta a sua resistência ao escoamento da resina. Os autores afirmaram ainda que, manter uma temperatura constante no molde é essencial para obter cura rápida e homogênea da peça, já que a estabilidade térmica das fibras do reforço é um parâmetro chave no processamento de compósitos.

O presente trabalho contribuiu para o estado da arte através da utilização de um software livre de CFD, OpenFOAM, para realizar a simulação numérica do processo de RTM. O *solver interFoam*, utilizado para a solução numérica do problema, não contém em seu código a equação da energia, desta forma, foi necessário implementar esta equação. O modelo empírico proposto por Zhou et al. (2014), que considera a variação da viscosidade como uma função da temperatura e do tempo, também foi adicionado ao *solver*. A distribuição, isotérmica e não-isotérmica, de

temperaturas que alimenta o modelo de viscosidade foi calculada a partir da equação da energia. Assim, diferente dos demais trabalhos apresentados até aqui, este mostrou a solução do escoamento de resina no interior de placas finas e espessas utilizando um software de CFD e levando em conta a resistência ao escoamento devido ao aumento na viscosidade da resina em função da temperatura e do tempo de moldagem.

3. MODELAGEM NUMÉRICA DO PROCESSO DE RTM

Como mostrado na seção 2.3, o escoamento de resina que ocorre no interior de um molde utilizado no processo de RTM, onde neste está presente um reforço fibroso, é geralmente assumido, no âmbito da solução numérica, como escoamento em um meio poroso. Assim, para prever o avanço da resina no interior do molde no processo de RTM, o modelo numérico é obtido a partir da aplicação da Lei de Darcy, Eq.(2.2), pela qual é considerado que a velocidade média de um fluido através de um meio poroso é proporcional ao gradiente de pressões estabelecido ao longo deste meio. Além disso, para o desenvolvimento das simulações numéricas do processo de RTM, é utilizada ainda a técnica VOF (*volume of fluid*) que modela problemas envolvendo escoamentos multifásicos de fluidos imiscíveis. Esta técnica está presente no software de simulação OpenFOAM utilizado neste trabalho.

3.1. VOF (volume of fluid)

O VOF é um método simples e eficiente proposto por Hirt e Nichols (1981) para modelar problemas que envolvam escoamentos multifásicos de fluidos imiscíveis, e utiliza a discretização por volumes finitos para calcular a equação aproximada das correspondentes propriedades físicas em estudo. No VOF, as fases são bem definidas e o volume de uma fase não ocupa o lugar da outra. Para a representação das fases no interior de uma célula computacional, o método VOF utiliza o conceito de fração volumétrica (f), supondo que estas frações de volume sejam contínuas no espaço e no tempo, e sua soma dentro de um volume de controle seja igual a 1 (um). Este método resolve um único conjunto de equações para todos os fluidos, sendo este conjunto composto pelas equações da continuidade e da quantidade de movimento. As propriedades físicas de um fluido são calculadas como médias ponderadas baseadas no conceito de fração volumétrica dos dois fluidos em uma determinada célula computacional. Deste modo, o método também resolve uma equação da fração volumétrica para cada fase (fluido) do escoamento.

Assim, para o caso da modelagem numérica do processo de RTM, no qual são apresentadas duas fases (resina e ar), os valores de f variam entre 0 e 1 para qualquer célula do domínio computacional (malha). Quando o valor de f for igual a 0 (zero) a célula computacional está totalmente preenchida com ar, se f for igual a 1 (um) a célula está totalmente preenchida com resina, e se f estiver entre 0 (zero) e 1 (um), a célula contém a interface entre resina e ar.

Este método proporciona um armazenamento mínimo de informações na malha, por consequência acaba sendo um método simples e econômico, podendo ser aplicado em malhas bi ou tri-dimensionais (HIRT e NICHOLS, 1981).

As equações da continuidade, fração volumétrica e quantidade de movimento calculadas pelo VOF para prever e modelar o avanço da resina em um meio poroso simulando o processo de RTM, são mostradas a seguir.

- Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.1)$$

onde ρ é a massa específica (kg/m³) e t é o tempo (s). Esta equação é válida para fluidos compressíveis e incompressíveis.

- Equação da fração volumétrica para a resina:

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

onde f_{resina} é a fração volumétrica da resina.

A partir da equação da fração volumétrica da resina, é possível calcular a fração volumétrica do ar (f_{ar}) como:

$$f_{ar} = 1 - f_{resina} \quad (3.3)$$

- Equação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \nabla P_0 + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.4)$$

onde $\vec{g}$ é a aceleração da gravidade (m/s²), $\vec{F}$ é o termo fonte utilizado para incluir a resistência do fluido ao meio poroso (N/m³), que neste caso é a Lei de Darcy, Eq. (2.2), e $\bar{\bar{\tau}}$ é o tensor de tensões (Pa).

O tensor de tensões $\bar{\bar{\tau}}$ é dado por:

$$\bar{\bar{\tau}} = -P \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \nabla \cdot \vec{V} \right) \quad (3.5)$$

onde δ_{ij} é o delta de Kronecker, u a velocidade (m/s) e x as coordenadas cartesianas (m).

Diversos trabalhos já utilizaram o modelo matemático apresentado aqui, como (OLIVEIRA, 2010), (PORTO, 2012), (ISOLDI, et al., 2012) e (OLIVEIRA, et al., 2013).

Entretanto, para este trabalho, também foi utilizada a equação da conservação de energia, a fim de modelar o problema considerando que o molde seria aquecido, e que a viscosidade da resina sofre mudanças em função da temperatura. É relevante ressaltar que, neste grupo de pesquisa, esta é a primeira vez que a equação da energia está sendo utilizada no modelo matemático deste problema. Assim, considerando um escoamento incompressível, com condutividade térmica e calor específico

constantes e sem geração de calor, a equação da energia utilizada neste trabalho é mostrada a seguir.

- Equação da conservação de energia:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3.6)$$

onde c_p é o calor específico (J/kg.K), T é a temperatura (K), e k é a condutividade térmica (W/m.K).

A partir da definição de fração volumétrica, a massa específica e a viscosidade local em uma determinada célula computacional podem ser calculadas segundo Srinivasan et al. (2011) como:

$$\rho = f_{resina} \rho_{resina} + (1 - f_{resina}) \rho_{ar} \quad (3.7)$$

$$\mu = f_{resina} \mu_{resina} + (1 - f_{resina}) \mu_{ar} \quad (3.8)$$

Considerando que, neste trabalho é apresentado um molde aquecido que faz com que a resina que escoa em seu interior apresente mudanças na sua viscosidade em função da temperatura de aquecimento, bem como do tempo total de moldagem, um modelo que calcula esta mudança também precisou ser utilizado. Este modelo foi proposto por Zhou et al. (2014) e foi obtido de forma empírica considerando o comportamento de cura em função da temperatura e do tempo de uma resina epóxi, com base no modelo de viscosidade Dual-Arrhenius. O modelo em questão é apresentado a seguir:

$$\mu_{resina} = 1,1380 \times 10^{-8} e^{\left(\frac{7248,5623}{T} + 1,587 \times 10^9 e^{\left(\frac{-7735,0037}{T} \right) t} \right)} \quad (3.9)$$

onde a temperatura T deste modelo é calculada pela solução da Eq. (3.6).

3.2. Método dos Volume Finitos (MVF)

Esta seção apresenta uma breve descrição do Método dos Volumes Finitos (MVF), já que este é o método utilizado pelo OpenFOAM para a discretização das equações diferenciais que modelam o problema proposto nesta pesquisa.

Além do MVF, outros métodos podem ser citados para a solução destas equações, tais como: Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método das Diferenças Finitas (MDF). No entanto, o foco maior é efetivamente no MVF.

Basicamente o MVF realiza um balanço de conservação da propriedade física estudada para cada volume elementar do domínio computacional, e obtém assim a equação aproximada para a correspondente propriedade. Deste modo, o MVF trabalha com volumes de controle, conseguindo assim a conservação das propriedades em um nível discreto (MALISKA, 2004).

O MVF funciona da seguinte forma: primeiramente o domínio contínuo do problema é discretizado em um domínio computacional, gerando assim várias regiões elementares. Este domínio computacional também pode ser chamado de malha. As fronteiras de cada região elementar (volume de controle) da malha são posicionadas na metade do caminho de cada nó existente nos volumes de controle, deste modo, cada nó estará cercado pelas fronteiras de um volume de controle, como mostrado na Fig. 3.1.

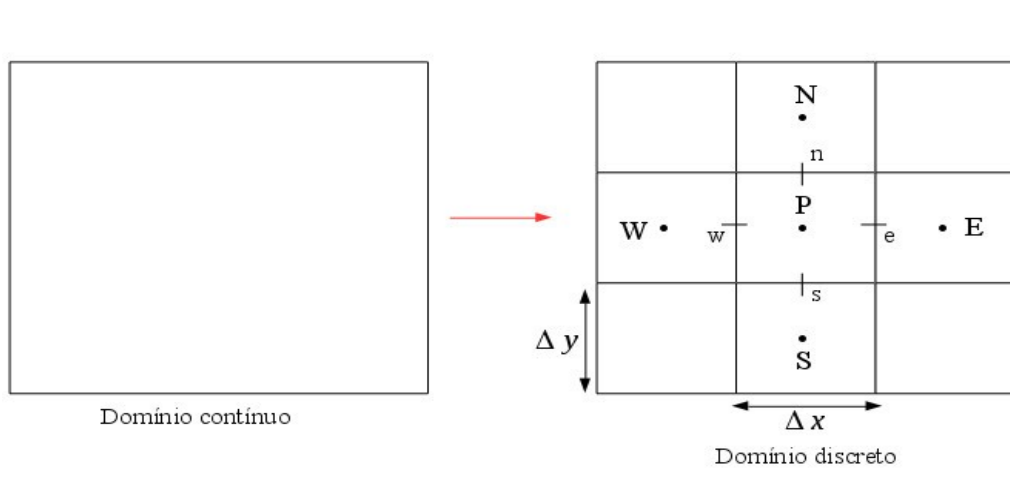


Figura 3.1. - Esquema de discretização do domínio contínuo.

O nó central é definido pela letra maiúscula **P**, e seus vizinhos apresentados na geometria 2D da Fig. 3.1, são os nós Norte, Sul, Leste e Oeste, definidos pelas letras maiúsculas **N**, **S**, **E** e **W**, respectivamente. As fronteiras norte, sul, leste e oeste do volume de controle central são definidas pelas letras minúsculas **n**, **s**, **e** e **w**, respectivamente. As distâncias entre **P-E** e **P-W** são definidas por Δx enquanto as distâncias entre **P-N** e **P-S** são definidas por Δy . O principal objetivo do MVF é integrar sobre um volume de controle as equações que governam o fenômeno físico, a fim de gerar equações discretizadas no ponto central do volume em que está acontecendo esta integração. Neste sentido, é válido ressaltar que a variável ou propriedade física estudada não é definida em qualquer ponto do domínio, ela é definida apenas nos centros dos volumes de controle, deste modo, para calcular os fluxos nas faces do volume de controle é necessário utilizar funções de interpolação que condicionam um certo comportamento da variável em questão entre os volumes vizinhos. Por fim, o problema é resolvido através da propagação das condições de contorno estabelecidas nos limites do domínio discreto. Estas condições de contorno se propagam através da comunicação gerada pelas funções de interpolação, ligando cada volume de controle com o seu vizinho (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

4. SOLUÇÃO NUMÉRICA

A aplicação de técnicas numéricas para a solução de problemas de engenharia vem sendo bastante utilizada pela sua versatilidade e relativa simplicidade de uso. Além disso, os computadores estão cada vez mais rápidos e com maior capacidade de armazenamento, aumentando ainda mais a motivação da utilização de simulação numérica para novos projetos de engenharia (MALISKA, 2004).

4.1. OpenFoam

O OpenFOAM é um software de CFD livre em linguagem C++ e com código aberto, que dá a possibilidade do usuário compilar novos códigos em sua fonte e criar *solvers* padronizados a fim de modelar problemas de acordo com a sua necessidade. Além disso, o usuário também é livre para escolher os esquemas de interpolação, bem como, todos os outros parâmetros necessários para a solução do problema. O OpenFOAM é bastante utilizado nas organizações acadêmicas em diversas áreas de engenharia e ciência. Este software disponibiliza inúmeros recursos para resolver problemas de mecânica dos fluidos, envolvendo reações químicas, turbulência, transferência de calor, mecânica dos sólidos, entre outros (User Guide OpenFOAM, 2017)

O OpenFOAM não possui interface gráfica, sendo assim, sua estrutura é organizada a partir de diretórios raízes, onde nestes estarão contidos subdiretórios que possuem todos os arquivos necessários para a simulação. Existe uma estrutura básica dentro de cada diretório caso (diretório raiz) que contém um conjunto de arquivos necessários para executar uma solução. A Figura 4.1 descreve esta estrutura, sendo que, a estrutura básica padrão do OpenFOAM, contém apenas os subdiretórios “0”, “*constant*” e “*system*” mostrados na Fig. 4.1. O subdiretório “*Grid*” foi criado especialmente para as simulações dos casos apresentados neste trabalho, a fim de guardar os arquivos de geometria e malha criados a partir do software GMSH.

O funcionamento e manipulação de dados no OpenFOAM pode ser dividido em etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento. A seguir, estas etapas são descritas.

4.1.1. Pré-Processamento

Primeiramente é necessário gerar a geometria e a malha do problema. Para isto, o OpenFOAM sugere a utilização da ferramenta *BlockMesh*, onde é possível a geração de malhas simples de blocos e células hexaédricas, ou ainda a utilização da ferramenta *snappyHexMesh*, para a geração de malhas mais complexas. Além destas ferramentas, o OpenFOAM ainda permite utilizar ferramentas de outros pacotes, onde a malha criada é convertida para um formato que o

OpenFOAM consiga ler. A geração da malha utilizada nesta pesquisa foi desenvolvida pelo software livre GMSH, e exportada para o OpenFOAM. Com a malha já criada, para dar início à solução do problema, primeiramente é necessário escolher o *solver* a ser utilizado. É importante que o *solver* escolhido, ou desenvolvido pelo usuário, contenha as equações necessárias que modelam o problema físico corretamente.

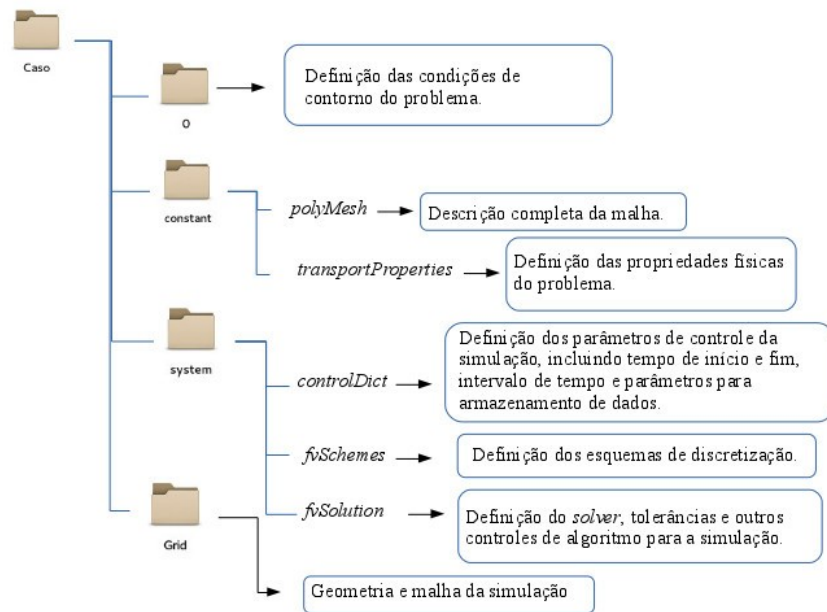


Figura 4.1. - Esquema da estrutura do software OpenFOAM.

Os *solvers* têm a função de ler as informações do caso, tais como a malha e condições de contorno, e resolver o problema. Os *solvers* são gerados a partir da compilação dos arquivos fonte, enquanto a solução numérica irá depender da maneira como as bibliotecas do OpenFOAM serão utilizadas para montar o algoritmo de solução. Basicamente, a função dos *solvers* é ler as informações da simulação, resolver as equações que modelam o problema, utilizando para isto metodologias de solução que dependem de cada caso, e gerar arquivos de resultados para posteriormente o usuário ter acesso aos dados da resolução e, portanto, realizar o pós-processamento do problema (User Guide OpenFOAM, 2017). Para este trabalho, o *solver* escolhido foi o *interFoam* presente na versão 2.4.0 do software OpenFOAM. Este *solver* é apropriado para solucionar problemas de escoamentos multifásicos. No entanto, como neste problema ocorre também a transferência de calor, e o *interFoam* não tem implementado em seu código a equação da energia, foi necessário ainda compilar esta equação dentro do *solver*. Mais detalhes são descritos na seção 4.2.

Ainda na etapa de pré-processamento é necessário configurar alguns arquivos, de modo que a solução do problema seja desenvolvida corretamente e conforme a necessidade do usuário. Assim, para dar início à solução é necessário configurar o arquivo *controlDic*, que está presente na pasta *system*. A configuração deste arquivo permite definir os parâmetros do início da solução, bem como os parâmetros essenciais de saída, para a geração do banco de dados da solução. Neste arquivo é também possível controlar como a saída de dados será gravada, e em quais intervalos de tempo durante a execução.

No arquivo *fvSchemes*, também presente na pasta *system*, são definidos os esquemas numéricos de interpolação para os termos gradientes, divergências. Na Figura 4.2 é possível observar os esquemas utilizados para a solução do problema presente nesta pesquisa. Já os *solvers* utilizados para resolver as equações que modelam o problema estão descritos na Tab.4.1.

```

18 ddtSchemes
19 {
20     default          Euler;
21 }
22
23 gradSchemes
24 {
25     default          Gauss linear;
26 }
27
28 divSchemes
29 {
30     div(rhoPhi,U)    Gauss linearUpwind grad(U);
31     div(rhoPhi,T)    Gauss linearUpwind grad(T);
32     div(phi,alpha)   Gauss vanLeer;
33     div(phirb,alpha) Gauss interfaceCompression;
34     div((muEff*dev(T(grad(U)))) Gauss linear;
35 }

```

Figura 4.2. - Esquemas de interpolação.

4.1.2. Processamento

Na etapa de processamento ocorre a resolução das equações que modelam o problema. Nesta etapa, é possível monitorar e controlar o progresso da solução.

Os solvers disponíveis para a solução das equações são divididos entre matrizes simétricas e matrizes assimétricas. A simetria das matrizes irá depender da estrutura da equação que está sendo resolvida. Desta forma, se um solver for escolhido de modo que não atenda a exigência de simetria da matriz o OpenFOAM mostra uma mensagem de erro para informar ao usuário que o solver selecionado é inadequado para a solução da equação (User Guide OpenFOAM, 2017).

Tabela 4.1: *Solvers* utilizados para a solução das equações.

EQUAÇÃO	<i>SOLVER</i>	CARACTERÍSTICA
Temperatura	PBiCG	Utilizado para matrizes assimétricas.
Pressão	PCG	Utilizado para matrizes simétricas.
Fração volumétrica da resina	smoothSolver	Utilizado para matrizes simétricas ou assimétricas como um suavizador para reduzir resíduos.
Velocidade	smoothSolver	Utilizado para matrizes simétricas ou assimétricas como um suavizador para reduzir resíduos.

Quando um solver é executado, este relata a condição da solução das equações em uma janela de saída de dados como é mostrado na Fig. 4.3, onde para cada equação que é resolvida, uma linha de relatório é escrita com o nome do solver, a variável que é resolvida, seus resíduos iniciais e finais e o número de iterações.

```

PIMPLE: iteration 1
smoothSolver: Solving for alpha.resin, Initial residual = 1.49551e-05, Final residual = 1.48575e-13, No Iterations 1
Phase-1 volume fraction = 0.000444354 Min(alpha.resin) = 0 Max(alpha.resin) = 1
MULES: Correcting alpha.resin
MULES: Correcting alpha.resin
Phase-1 volume fraction = 0.000444354 Min(alpha.resin) = 0 Max(alpha.resin) = 1
DILUPBiCG: Solving for T, Initial residual = 2.48622e-05, Final residual = 1.58391e-08, No Iterations 5
DICPCG: Solving for p_rgh, Initial residual = 1.02273e-07, Final residual = 9.76083e-08, No Iterations 1
time step continuity errors : sum local = 2.45782e-09, global = 2.28203e-09, cumulative = 6.31278e-06
DICPCG: Solving for p_rgh, Initial residual = 1.00891e-07, Final residual = 9.90916e-08, No Iterations 1
time step continuity errors : sum local = 2.49552e-09, global = 2.28151e-09, cumulative = 6.31506e-06
DICPCG: Solving for p_rgh, Initial residual = 1.01973e-07, Final residual = 9.48122e-08, No Iterations 1
time step continuity errors : sum local = 2.38781e-09, global = 2.2815e-09, cumulative = 6.31734e-06
ExecutionTime = 1542.97 s ClockTime = 1545 s

Courant Number mean: 7.33664e-06 max: 0.00066247
Interface Courant Number mean: 3.23517e-07 max: 0.00066247
deltaT = 0.487805
Time = 1400.97561

```

Figura 4.3. - Janela de processamento do OpenFOAM.

4.1.3. Pós-processamento

Na etapa de pós-processamento é possível visualizar de forma gráfica ou numérica os resultados gerados após a simulação. A principal ferramenta de pós-processamento do OpenFOAM é o Paraview, contudo, outras ferramentas podem ser utilizadas, como por exemplo a ferramenta Visit. Estas ferramentas permitem analisar dados em grande ou pequena escala, além de permitir a geração, com certa rapidez, de visualizações e animações ao longo do tempo. É permitido também a manipulação de dados e o armazenamento das imagens e animações resultantes. Neste trabalho, as

duas ferramentas citadas foram utilizadas para fazer o pós-processamento das simulações, cada uma utilizada conforme as vantagens que oferecem.

4.2. Implementação da equação da energia e do modelo de viscosidade no solver *interFoam*

O solver *interFoam* é utilizado para resolver problemas de escoamentos multifásicos, e não contém em seu código a equação da energia, necessária para a solução numérica do problema presente neste trabalho. Contudo, o OpenFOAM, por ser um código aberto, possibilita ao usuário modificar os *solvers* de maneira que consiga alcançar as necessidades exigidas para resolver diversos problemas de engenharia. Diferente do FLUENT por exemplo, que possui interface gráfica e as equações utilizadas no modelo matemático precisam apenas ser selecionadas através de menus, no OpenFOAM, se o *solver* não possuir por padrão as equações e modelos necessários para a solução numérica do problema, estes deverão ser implementados dentro do código fonte de cada *solver*. Para a solução numérica deste trabalho, foi necessário implementar a equação da energia e o modelo de viscosidade proposto por Zhou et al. (2014) no *solver interFoam*.

Para a implementação da equação da energia, Eq. (3.6), foi utilizado dois tutoriais que podem ser acessados através dos links http://www.wolfdynamics.com/images/conf_and_publ/interTempFoam.pdf e http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2011/QingmingLiu/Project_QingmingLIU-final.pdf.

Primeiramente, considerando a presença de duas fases diferentes, o número de parâmetros necessários a serem definidos não só duplica como também impõe considerar a existência da interface entre os dois fluidos, como já acontece por padrão para a massa específica ρ e para a viscosidade cinemática μ .

A partir da Eq. (3.6), a condutividade térmica (k) não foi definida diretamente, mas foi calculada utilizando o número de Prandtl Eq. (4.1).

$$k = \frac{\rho C_p \nu}{Pr} \quad (4.1)$$

onde ν é a viscosidade cinemática (m^2/s) e Pr é o número de Prandtl.

Para isto, foi necessário definir os parâmetros C_p e Pr para as duas fases, visto que o ρ e ν já estão definidos, bem como definir suas respectivas dimensões. Após definidos estes parâmetros, os mesmos serão lidos e poderão ter seus valores modificados no arquivo *transportProperties* presente na pasta *constant*, que por sua vez faz parte do diretório raiz do

OpenFOAM. Uma vez conhecidos os valores de ρ , C_p , ν e Pr a condutividade térmica pode ser calculada nas faces de cada célula a fim de avaliar o fluxo térmico. Para isto, uma nova função também precisou ser implementada nos códigos dos arquivos utilizados pelo *solver*, esta função é chamada de “kappaf” e pode ser lida no Apêndice 8.1.

Contudo, os tutoriais utilizados, não relatam alguns problemas que podem ocorrer envolvendo a distribuição de temperaturas na interface entre os dois fluidos. Por exemplo, após a realização de algumas simulações notou-se que os gradientes de temperaturas estavam mostrando resultados físicos absurdos, isto é, a temperatura do campo interno estava tendendo a zero na interface entre os dois fluidos. Como nenhum tipo de sumidouro foi implementado junto à equação, isto não poderia estar acontecendo. Assim, após algumas pesquisas na internet, foi encontrada uma solução para este problema, isto é, foi necessário dividir toda a equação da energia por C_p . E como a função “kappaf” é utilizada para calcular a condutividade térmica presente na equação da energia, esta também precisou ser dividida por C_p .

A instabilidade térmica próximo da interface entre os dois fluidos ocorre devido às significantes diferenças entre as propriedades térmicas das duas fases, e neste caso um refinamento de malha não foi suficiente para obter a estabilidade da solução. Desta forma, uma alternativa para eliminar a instabilidade na interface entre os fluidos foi dividir a Eq. 3.6 por C_p , onde a condutividade térmica passa do termo convectivo para o termo difusivo da equação, tornando a interface entre os fluidos mais estável, mesmo quando as propriedades térmicas forem significativamente diferentes.

Parte do arquivo contendo a correta implementação da função kappaf pode ser observado no Apêndice 8.1, para melhor entendimento. Logo, foi necessário compilar o código utilizando os comandos `wclean` (para limpar compilações anteriores) e `wmake libso` para compilar as novas bibliotecas.

Algumas modificações nos códigos do *solver* também foram necessárias. Primeiramente, foi criado o escalar C_p e o campo de temperaturas T . Foi criado, ainda, um arquivo dentro da pasta do *solver* para escrever a equação da energia. Este arquivo pode ser observado no Apêndice 8.2. Por fim, foi necessário compilar o código utilizando os comandos `wclean` (para limpar compilações anteriores) e `wmake` para compilar o novo *solver*.

A implementação do modelo de viscosidade, Eq. (3.9), no *solver interFoam*, foi feita a partir do tutorial de Payandeh et al. (2012) e utilizando o modelo de viscosidade proposto por Zhou et al., (2014).

Primeiramente foram definidas as variáveis que seriam utilizadas no modelo de viscosidade.

Estas variáveis foram definidas em um arquivo presente na pasta da classe *viscosityModels*, que nada mais é do que uma classe utilizada para modelos de viscosidade de escoamentos incompressíveis. Os parâmetros definidos aqui, serão lidos e poderão ter seus valores modificados no arquivo *transportProperties* presente na pasta *constant*, que por sua vez faz parte do diretório raiz do OpenFOAM. Após a definição dos parâmetros, é adicionado o modelo de viscosidade no mesmo arquivo. As modificações feitas no arquivo podem ser observadas no Apêndice 8.3 para um melhor entendimento. As dimensões destes parâmetros são definidas como um escalar e devem ser adicionadas em um segundo arquivo também presente na pasta *viscosityModels*.

É importante ressaltar que, da mesma forma que este modelo foi implementado, qualquer outro modelo escolhido pelo usuário poderá também ser implementado.

Por fim, feitas as modificações necessárias para a implementação do modelo de viscosidade, é então preciso compilar o código utilizando o comando `wclean` (para limpar compilações anteriores) e `wmake libso` para compilar as novas bibliotecas.

4.3. Verificação da solução numérica

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) resolve sistemas de equações diferenciais parciais não lineares, utilizando para isto malhas discretizadas com volumes de controle finito e passos de tempo finito que cobrem a região de interesse e seus limites. Esta técnica dá origem a possíveis erros numéricos, sendo estes muitas vezes inevitáveis na modelagem CDF. Desta forma, torna-se necessário desenvolver métodos para quantificar o nível de confiança dos resultados (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

Segundo Maliska, (2004), para detectar erros numéricos é necessário comparar a solução numérica com outras soluções numéricas ou analíticas. Isto irá atestar o bom desempenho dos métodos numéricos utilizados para a solução das equações diferenciais. Versteeg e Malalasekera, (2007), chamam isto de verificação, e afirmam que este processo determina se uma implementação de modelo está representando com precisão a descrição conceitual do problema físico e a sua solução. Ou seja, a verificação pode determinar se as equações do modelo matemático estão sendo resolvidas de forma correta.

Desta maneira, a modelagem computacional é segura quando o modelo matemático representa adequadamente o problema físico e os métodos numéricos escolhidos resolvem corretamente as equações que modelam o problema (MALISKA, 2004).

Para a validação numérica da modelagem computacional bidimensional do processo de RTM realizado pelo software OpenFOAM, duas soluções analíticas foram utilizadas. A primeira representa o escoamento retilíneo da resina e a segunda representa o escoamento radial da resina no

interior do molde.

Todas as simulações foram realizadas em um notebook com processador intel core i5 e memória RAM de 4 GB.

4.3.1. Escoamento retilíneo

Para o caso de escoamento retilíneo, foi desenvolvido um molde retangular com 0,3 m de comprimento, 0,025 m de largura e espessura de apenas 0,003 m.

Foi considerado um $V_f = 0,5$, permeabilidade de $1,58 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, viscosidade da resina de 0,3 Pa.s e uma pressão de injeção inicial igual a 0,5 bar (TRINDADE et al., 2016).

O modelo analítico utilizado para fazer a comparação com o resultado numérico do fluxo retilíneo é dado por Rudd; (1997) como:

$$X = \sqrt{\frac{2 K_{xx} P_0}{\mu \varepsilon} t} \quad (4.2)$$

onde x é a posição da frente de fluxo da resina (m), e K_{xx} é a permeabilidade no eixo x (m^2).

A solução numérica foi testada para quatro refinamentos de malha e comparada com a solução analítica. A Fig. 4.4 mostra a geometria do molde para fluxo retilíneo desenvolvido a partir do software GMSH. Já a Tabela 4.2 mostra as condições de contorno para cada superfície mostrada na Fig. 4.4.

Tabela 4.2: Condições de contorno.

	Entrada	Saída	Parede	Superior	Inferior
Resina	$f = 1$	$\frac{\partial f}{\partial \hat{n}} = 0$	$\frac{\partial f}{\partial \hat{n}} = 0$	Empty	Empty
Pressão	$P = P_0$	$P = P_{\text{atm}}$	$\frac{\partial P}{\partial \hat{n}} = 0$	Empty	Empty
Velocidade	PressureInlet Velocity*	$\frac{\partial V}{\partial \hat{n}} = 0$	$\bar{V} = 0$	Empty	Empty
Temperatura	$T = T_0$	$\frac{\partial T}{\partial \hat{n}} = 0$	$T = T_0$	Empty	Empty

*O valor da velocidade irá depender da pressão especificada pelo usuário.

O software OpenFOAM não trabalha com domínios bi-dimensionais, mas simula esta

condição em domínios que tenham apenas um volume na direção normal ao escoamento. Para tanto, é necessário ainda definir uma condição de contorno específica, chamada de *empty*, nas paredes superior e inferior da geometria mostrada na Fig. 4.4. Esta condição permite que o OpenFOAM interprete as fronteiras que possuem a condição de *empty* como “vazias”, assim a simulação ocorre desprezando a terceira dimensão, ou seja, ocorre em duas dimensões.

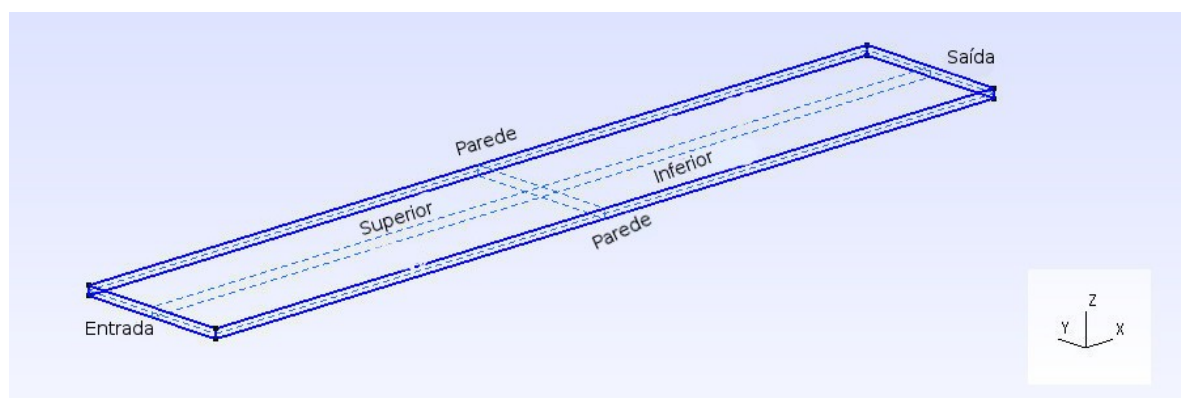


Figura 4.4. - Geometria para simulação numérica do escoamento retilíneo.

A Figura 4.5, mostra a comparação da solução numérica com a solução analítica para algumas discretizações. Foram utilizados os resultados da solução numérica que não possui a equação da energia implementada e outra solução numérica que possui a equação da energia implementada (legenda com a abreviação “Temp.”). É possível observar que os dois casos da simulação numérica (com e sem a implementação da equação da energia), representam adequadamente a solução analítica.

A Tabela 4.3 mostra as posições da frente de fluxo do escoamento para a solução analítica e para cada caso numérico sem a implementação da equação da energia, e a Tab. 4.4 idem, porém com a implementação da equação da energia. Os resultados mostrados referentes às posições da resina para cada caso, mesmo que possuam uma pequena diferença entre eles, indicam que quanto mais refinada for a malha, mais próxima ficará a solução numérica da solução analítica. Assim, os resultados mostram que, a malha que mais se aproxima da solução analítica é a malha com 5.782 volumes quadrangulares, esta malha pode ser visualizada na Fig. 4.6.

Analisando as Tabs. 4.3 e 4.4 é possível observar que no caso da solução numérica com a equação da energia o tempo de processamento foi maior, isto acontece por que anteriormente o VOF calculava apenas três equações (continuidade, quantidade de movimento e fração volumétrica), e agora são quatro, já que a equação da energia também faz parte da modelagem numérica do problema. Também é notado nas Tabs. 4.3 e 4.4 que há uma desigualdade nas posições da frente de escoamento da resina para os dois *solvers* utilizados, é normal que isto aconteça já que,

as soluções numéricas são obtidas de formas diferentes para cada *solver* (com e sem a implementação da equação da energia). Assim, esta desigualdade também irá influenciar na “Diferença %” de erro mínimo numérico.

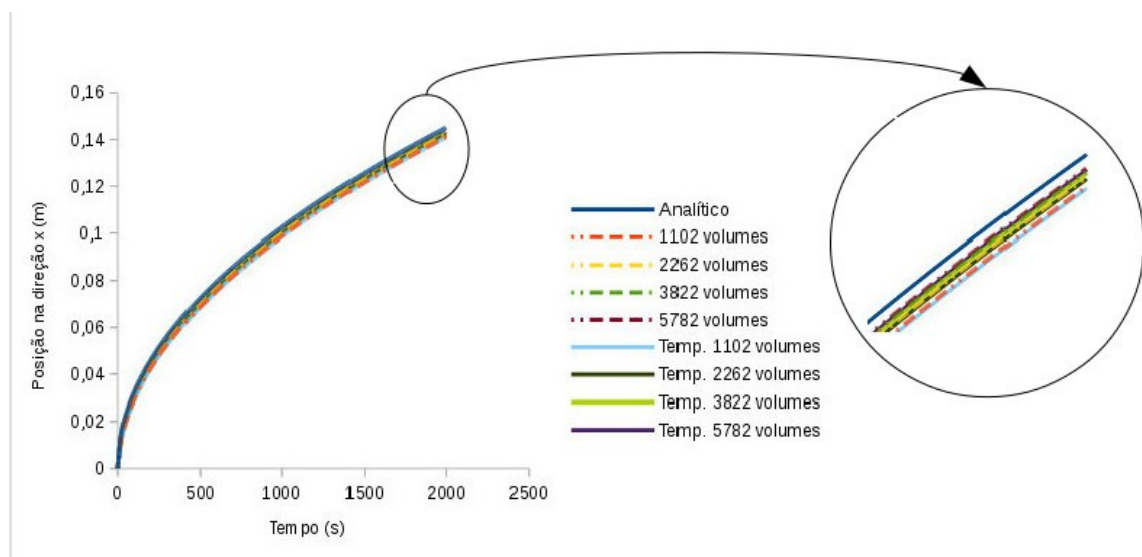


Figura 4.5. - Comparação da simulação numérica com o modelo analítico para escoamento retilíneo.

Tabela 4.3: Comparação da solução analítica com a solução numérica para o fluxo retilíneo (sem a implementação da eq. da energia).

	Tempo (s)	Posição (m)	*Diferença %	Tempo de processamento (s)
Solução analítica	2000	0,1451	---	---
Solução numérica – 1.102 volumes	2000	0,1411	-2,76	16
Solução numérica – 2.262 volumes	2000	0,1423	-1,93	30
Solução numérica – 3.822 volumes	2000	0,1430	-1,45	49
Solução numérica – 5.782 volumes	2000	0,1434	-1,17	71

*Diferença % = $100 \times (x_{\text{num}} - x_{\text{ana}})/x_{\text{ana}}$

Tabela 4.4: Comparação da solução analítica com a solução numérica para o fluxo retilíneo (com a implementação da eq. da energia).

	Tempo (s)	Posição (m)	*Diferença %	Tempo de processamento (s)
Solução analítica	2000	0,1451	---	---
Solução numérica – 1.102 volumes	2000	0,1409	-2,89	132
Solução numérica – 2.262 volumes	2000	0,1420	-2,14	243
Solução numérica – 3.822 volumes	2000	0,1427	-1,65	401
Solução numérica – 5.782 volumes	2000	0,1432	-1,31	645

*Diferença % = $100 \times (x_{\text{num}} - x_{\text{ana}})/x_{\text{ana}}$

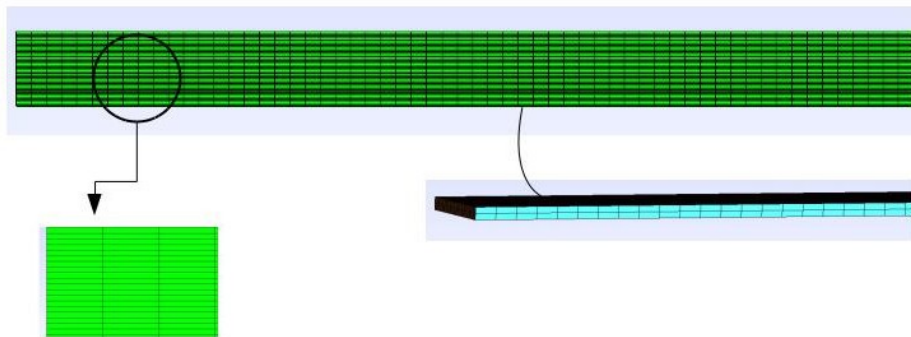


Figura 4.6. - Malha para simulação numérica do escoamento retilíneo.

4.3.2. Escoamento radial

Para o caso de fluxo radial, foi desenvolvido um molde quadrado com 0,3 m de lado e com espessura de apenas 0,0001 m. É importante ressaltar que, a espessura delgada desta malha foi escolhida a fim de simular o mais próximo possível um escoamento 2D, já que a solução analítica apresentada é válida para problemas bidimensionais. A entrada da resina foi posicionada no centro da face inferior e as saídas de ar foram posicionadas nos quatro cantos da face superior do molde. A Fig. 4.7 mostra uma visão superior da geometria utilizada. As condições de contorno são idênticas

as descritas para o caso retilíneo, Tab. 4.2, e os parâmetros utilizados para estas simulações são mostrados na Tab. 4.5.

Tabela 4.5: Valores utilizados na simulação numérica do processo de RTM para placas finas (TRINDADE et al., 2016).

Propriedade	Valor
Volume de fibra (V_f)	50% ou 0,50
Porosidade (e)	50% ou 0,50
Massa específica (ρ)	1100 kg/m ³
Permeabilidade planar ($K_{xx} = K_{yy}$)	1,58x10 ⁻¹¹ m ²
Viscosidade da resina (μ)	0,3 Pa.s
Pressão de injeção (P_0)	0,5 bar

Estes parâmetros foram retirados do trabalho de (TRINDADE et al., 2016), onde os valores são próximos do real. Foram também testados quatro refinamentos de malha.

O modelo analítico utilizado para fazer a comparação com o resultado numérico do escoamento radial é dado por Rudd; (1997) como:

$$t = \frac{\mu \varepsilon}{2 K P_0} \left[r^2 \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) - \frac{1}{2} (r^2 - r_0^2) \right] \quad (4.3)$$

onde K é a permeabilidade em x ou em y (m²), r é a posição da frente de escoamento (m) e r_0 é o raio de injeção (m).

Vale salientar que, o modelo representado pela Eq. (4.3) só é válido para casos isotrópicos.

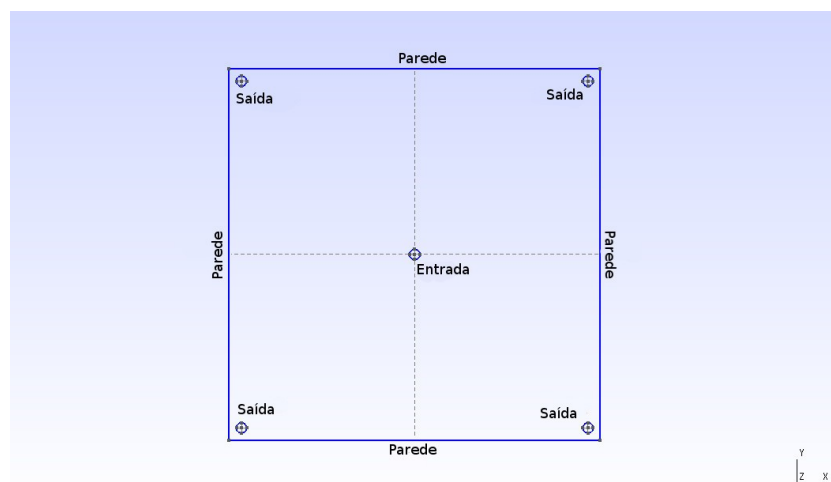


Figura 4.7. - Geometria para simulação numérica de escoamento radial.

A Fig. 4.8 mostra a comparação dos resultados analíticos com os resultados numéricos para quatro refinamentos de malha. É possível observar que igualmente ao caso de fluxo retilíneo, conforme a malha é refinada, a solução numérica (com ou sem a implementação da equação da energia) se aproxima mais da solução analítica.

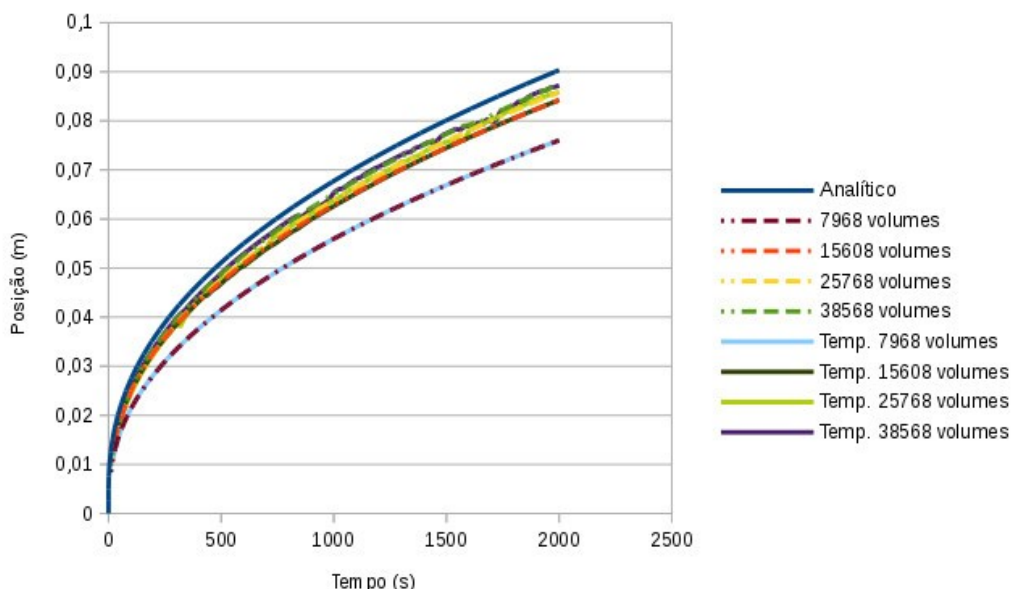


Figura 4.8. - Comparação da simulação numérica com o modelo analítico do escoamento radial.

Contudo, diferentemente do caso de fluxo retilíneo, no fluxo radial, há uma maior dificuldade em obter uma boa aproximação entre solução analítica e numérica, e um dos motivos desta dificuldade está associado à dificuldade de conservar a massa nesta geometria, visto que agora a malha não está mais alinhada com as linhas de corrente do escoamento.

A Tabela 4.6 mostra as posições da frente de fluxo do escoamento para a solução analítica e para cada caso numérico sem a implementação da equação da energia, enquanto que a Tab. 4.6 mostra as posições da frente de fluxo do escoamento para a solução numérica com a implementação da equação da energia. Neste caso, a solução numérica com a implementação da equação da energia também demora um tempo maior para resolver as equações. Os resultados mostram que a malha que mais se aproxima da solução analítica é a malha com 38.568 volumes, esta pode ser visualizada na Fig. 4.9.

Tabela 4.6: Comparação da solução analítica com a solução numérica para o escoamento radial (sem a implementação da eq. da energia).

	Tempo (s)	Posição (m)	*Diferença %	Tempo de processamento (s)
Solução analítica	2000	0,0903	---	---
Solução numérica – 7.968 volumes	2000	0,0760	-15,8300	143
Solução numérica – 15.608 volumes	2000	0,0842	-6,76	322
Solução numérica – 25.768 volumes	2000	0,0858	-4,98	1002
Solução numérica – 38.568 volumes	2000	0,0874	-3,21	2716

*Diferença % = $100 \times (x_{\text{num}} - x_{\text{ana}})/x_{\text{ana}}$

Tabela 4.7: Comparação da solução analítica com a solução numérica para o escoamento radial (com a implementação da eq. da energia).

	Tempo (s)	Posição (m)	*Diferença %	Tempo de processamento (s)
Solução analítica	2000	0,0903	---	---
Solução numérica – 7.968 volumes	2000	0,0760	-15,8300	330
Solução numérica – 15.608 volumes	2000	0,0842	-6,76	790
Solução numérica – 25.768 volumes	2000	0,0858	-4,98	3354
Solução numérica – 38.568 volumes	2000	0,0872	-3,43	4219

*Diferença % = $100 \times (x_{\text{num}} - x_{\text{ana}})/x_{\text{ana}}$

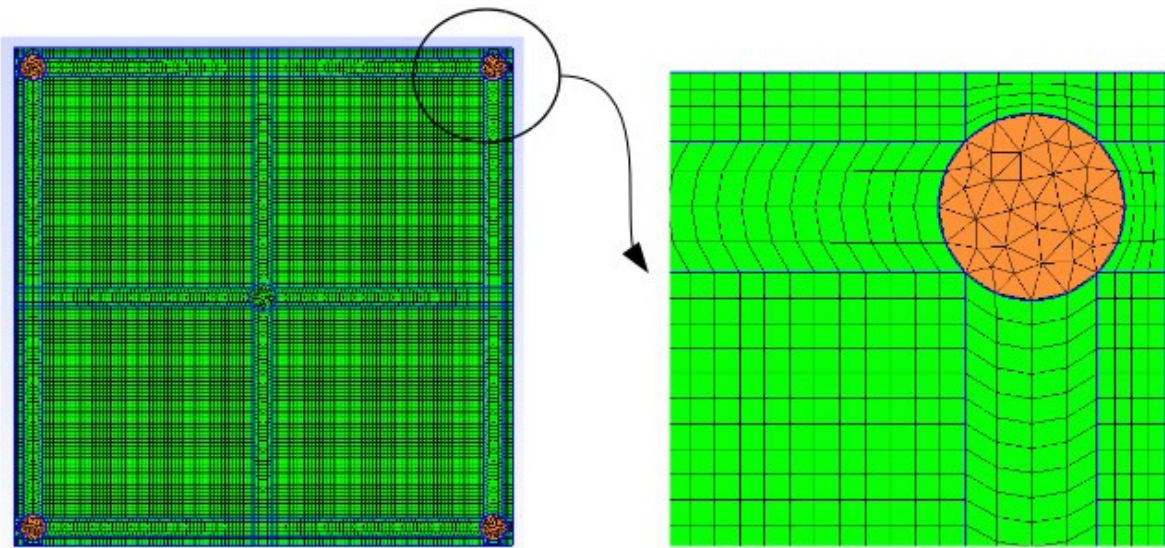


Figura 4.9. - Malha para simulação numérica de escoamento radial.

5. RESULTADOS

Os resultados numéricos obtidos com o OpenFoam foram verificados com soluções analíticas, e com resultados numéricos presentes na literatura. Nesta seção, serão apresentadas as simulações numéricas da moldagem por transferência de resina - RTM de peças espessas, bem como, a simulação numérica de peças finas e espessas considerando as mudanças que ocorrem na viscosidade da resina em função da temperatura e do tempo.

5.1. Placas espessas

Para a simulação numérica da fabricação de placas espessas pelo processo de RTM, foi utilizado um molde e malha semelhantes aos das Figs. 4.7 e 4.9, porém com espessura de 0,0254 m. A geometria e malha são mostradas nas Figs. 5.1 e 5.2, respectivamente. As condições de contorno utilizadas neste caso são as mesmas apresentadas na Tab. 4.2, porém aqui, não foi considerado a face inferior e superior como vazias, já que este caso foi simulado considerando a terceira dimensão. Assim, as faces inferior e superior foram consideradas como paredes. As medidas do molde e os parâmetros para a simulação foram escolhidos a partir do trabalho de Trindade et al. (2016). O molde possui entrada de resina no centro da face inferior e saídas de ar nos quatros cantos da face superior. A configuração das portas de entrada e saída do molde foram escolhidas seguindo o que Poodts et al. (2014) afirmam quando dizem que, se o preenchimento acontece de baixo para cima e contra a gravidade, é possível evitar o aprisionamento de ar dentro do molde. A malha possui elementos triangulares nas portas de entrada e saída, e elementos quadrangulares no restante do molde totalizando 154.272 volumes. Na Tabela 5.1 são mostrados os valores dos parâmetros que foram utilizados para a simulação numérica da moldagem de placa espessa pelo processo de RTM. Estes valores são considerados constantes durante a simulação, ocorrendo algumas mudanças apenas na permeabilidade K_{zz} e na pressão de injeção. Por enquanto, o objetivo é avaliar apenas o comportamento do escoamento da resina em peças espessas, por isso, ainda não serão consideradas as mudanças na viscosidade da resina.

Tabela 5.1: Valores utilizados na simulação numérica do processo de RTM para placas espessas baseados no estudo de (TRINDADE et al., 2016).

Propriedade	Valor
Volume de fibra (V_f)	50% ou 0,50
Porosidade (ϵ)	50% ou 0,50
Massa específica (ρ)	1100 kg/m ³
Permeabilidade planar ($K_{xx} = K_{yy}$)	$1,58 \times 10^{-11} \text{ m}^2$
Permeabilidade transversal (K_{zz})	$1,58 \times 10^{-13}$ e $1,58 \times 10^{-12} \text{ m}^2$
Viscosidade da resina (μ)	0,3 Pa.s
Pressão de injeção (P_0)	1, 2 e 3 bar

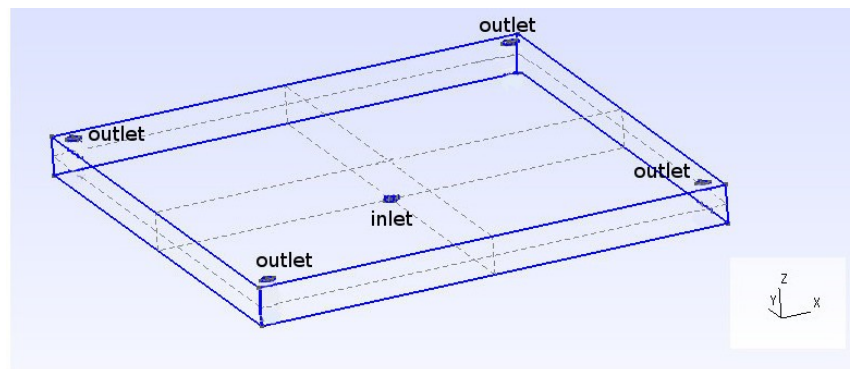


Figura 5.1. - Molde espesso.

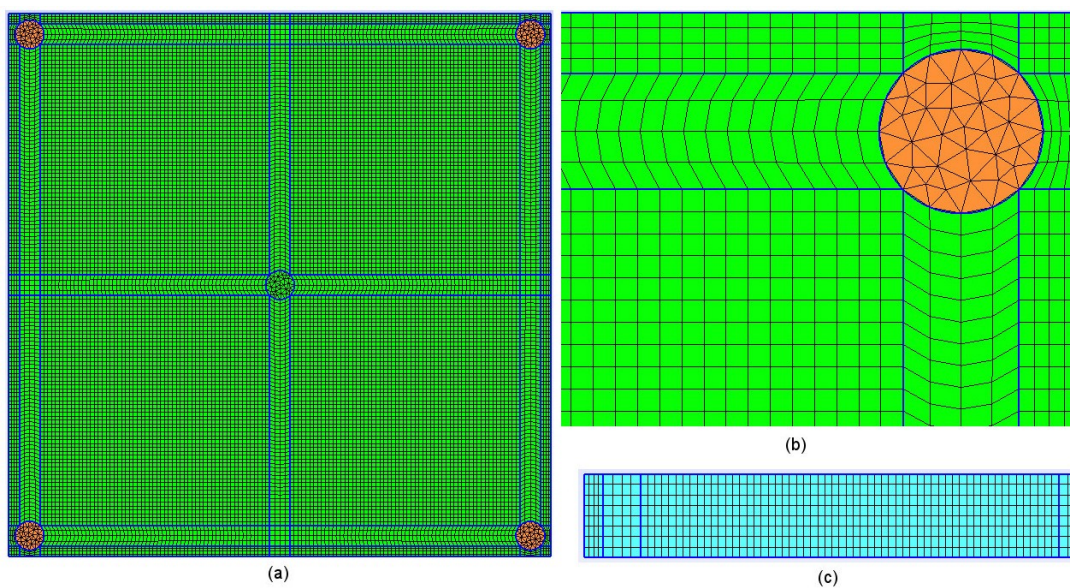


Figura 5.2. - (a) Visão superior da malha; (b) Visão dos elementos próximos à porta de saída; (c) Visão da lateral da malha.

Para a primeira condição com permeabilidade K_{zz} de $1,58 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ e pressão igual a 1 bar, quando a simulação atingiu os 10.000 s, o escoamento da resina não conseguiu alcançar o topo do molde. Isto acontece por que a permeabilidade do reforço fibroso é baixa, e provavelmente exigiria pressões maiores. Como mostrado na Fig. 5.3, enquanto a resina já avançou até a posição 0,076 m no plano inferior, na direção transversal o escoamento conseguiu alcançar apenas a posição de 0,0083 m. Desta forma, para que a resina preencha uma maior região do molde, a pressão de injeção foi aumentada para 2 e 3 bar. A influência da pressão de injeção tanto no plano como na espessura pode ser observada nas Figs. 5.4a e 5.4b, respectivamente, as quais mostram o gráfico da posição *versus* tempo para diferentes pressões. É possível observar que, quanto maior a pressão, mais longe a resina consegue escoar, tanto no plano como na direção da espessura.

Os valores indicados por “Resina” na fig. 5.3 são a fração volumétrica f . Quando o valor é igual a 1 (um) a posição está totalmente preenchida com resina (cor vermelha), quando o valor é igual a 0 (zero) a posição está completamente preenchida com ar (cor azul), e se o valor estiver entre 0 e 1 representa a interface entre resina e ar (cores intermediárias entre vermelho e azul).

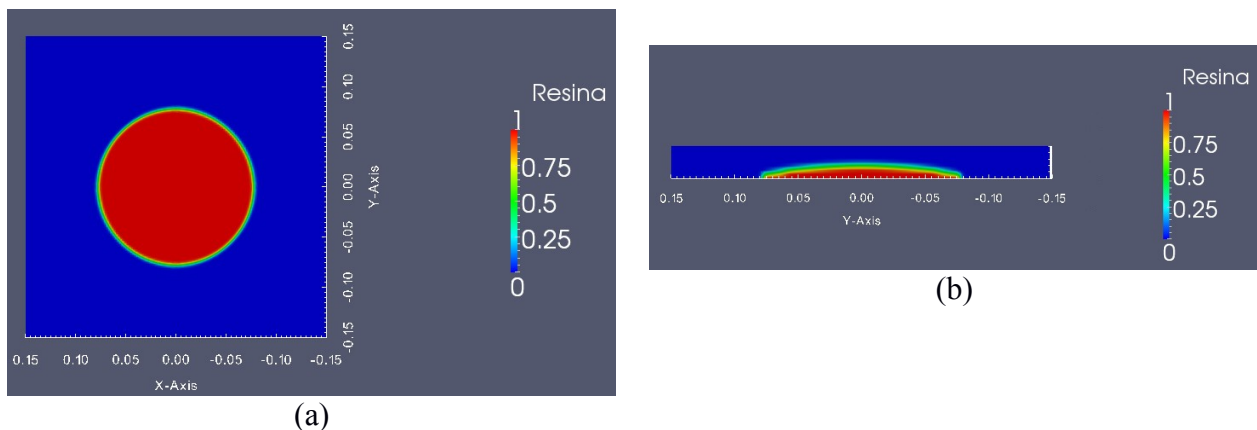


Figura 5.3. - (a) Visão da face inferior do reforço no tempo de 10.000 s. (b) Visão interior do reforço no tempo de 10.000 s.

Observando as Figs. 5.4a e 5.4b, percebe-se que a resina não conseguiu alcançar o topo do molde (0,0254 m) mesmo com o aumento da pressão, chegando no máximo na posição 0,011 m. Assim, com o intuito de conseguir um melhor preenchimento do molde na direção transversal, a permeabilidade K_{zz} foi aumentada de $1,58 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ para $1,58 \times 10^{-12} \text{ m}^2$. A pressão utilizada foi 3 bar, pois, segundo os resultados das Figs. 5.4a e 5.4b, este valor de pressão foi o que melhor auxiliou a resina a preencher o molde. A influência no aumento da permeabilidade pode ser claramente notada, tanto no plano como na espessura como mostram as Figs. 5.5a e 5.5b, respectivamente. O resultado da influência da mudança de permeabilidade concorda com os resultados obtidos no trabalho de Trindade et al., (2016), onde os autores afirmam que a

permeabilidade transversal também irá influenciar no escoamento da resina no plano.

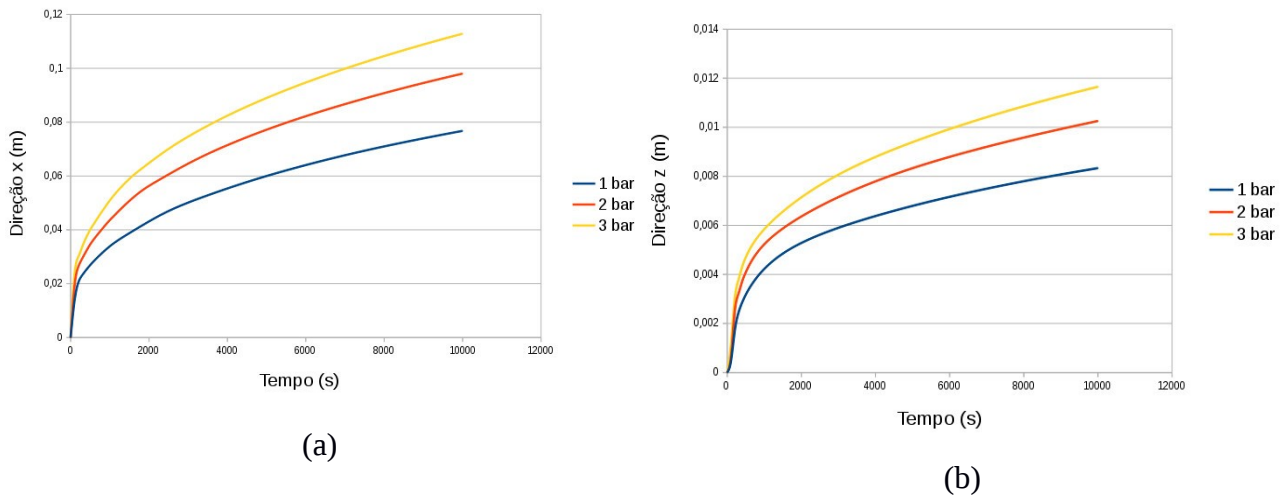


Figura 5.4. - Avanço da resina ao longo do tempo para diferentes pressões. (a) Influência da pressão no plano. (b) Influência da pressão na espessura.

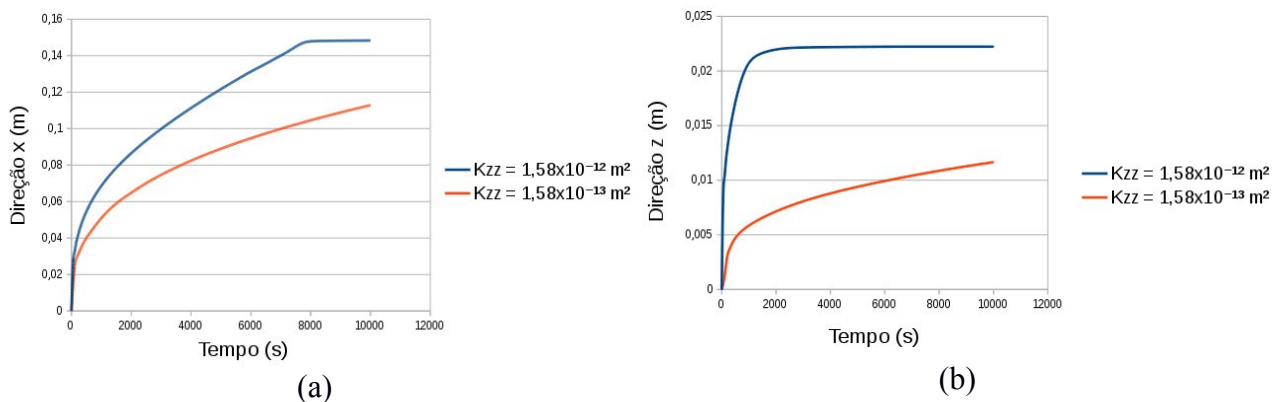


Figura 5.5. - Avanço da resina ao longo do tempo para diferentes permeabilidades K_{zz} . (a) Influência da permeabilidade K_{zz} no plano. (b) Influência da permeabilidade K_{zz} na espessura.

Considerando que a pressão de 3 bar e a permeabilidade K_{zz} de $1,58 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ foram os parâmetros que melhor atuaram para que o escoamento da resina avançasse com mais facilidade, logo, os próximos resultados foram gerados utilizando estes parâmetros. Desta forma, a resina começa a dar sinais de impregnação na face superior do molde em torno dos 2000 s. Neste momento, na face inferior do molde o escoamento da resina já está na posição de aproximadamente 0,08 m. Ou seja, a resina escoar com mais facilidade no plano, já que a permeabilidade planar é maior do que a transversal. Desta forma, a resina que já começou a escoar no plano, sobe lentamente através da espessura até alcançar o topo do molde. Sendo assim, é provável que a resina

impregne primeiro o plano inferior, para posteriormente impregnar o plano superior. Desta forma, o escoamento da resina no plano inferior (plano de injeção da resina) não será igual ao preenchimento no plano superior. Este resultado pode ser observado na Fig. 5.6.

Para o preenchimento total do molde a simulação precisou ser continuada até 12.000 s. O resultado pode se observado na Fig. 5.7. Vê-se a presença de ar nas paredes do molde (espaços vazios ou não impregnados) representado pelo gradiente de cores que vai do amarelo até o verde. Ou seja, a peça não foi totalmente impregnada. A maior parte de reforços secos é encontrada nas laterais da peça e o interior da peça foi preenchido, como mostrado na Fig. 5.8.

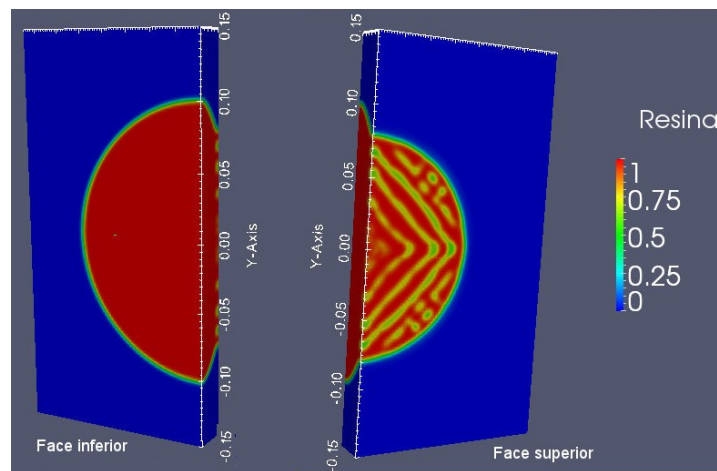


Figura 5.6. - Visão da face inferior e superior do molde no tempo de 9000 s.

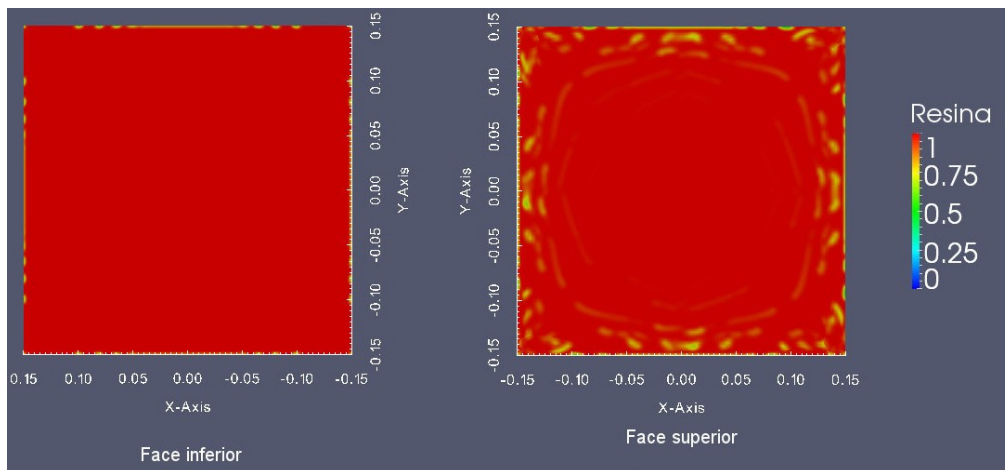


Figura 5.7. - Visão da face inferior e superior do molde no tempo de 12.000 s.

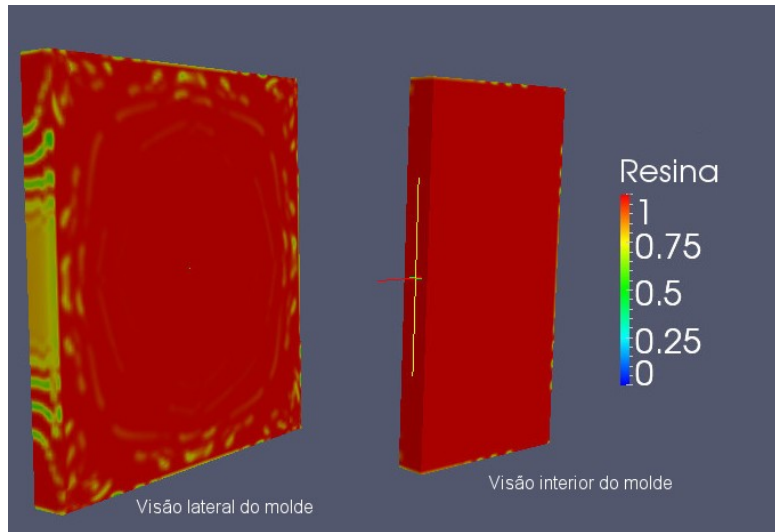


Figura 5.8. - Visão de uma das faces laterais do molde e do interior do molde no tempo de 12.000 s.

5.2. Viscosidade em função da temperatura e do tempo

A Eq. (3.9) foi compilada no software openFOAM a fim de modelar a mudança da viscosidade da resina em função da temperatura e do tempo. A partir deste modelo é possível simular numericamente casos isotérmicos e não-isotérmicos da mudança de viscosidade da resina em processos de RTM, sendo que para os casos não-isotérmicos a Eq. (3.6) também foi compilada no software. Os parâmetros utilizados para gerar estas simulações encontram-se nas Tabs. 5.1 e 5.2.

Tabela 5.2: Valores utilizados nas simulações com transferência de calor.

Propriedade	Valor
Calor específico da resina (c_p)	1680 J/kgK*
Calor específico do ar (c_p)	1004 J/kgK**
Número de Prandtl da resina (P_r)	2,78*
Número de Prandtl do ar (P_r)	0,71**

*(SHI e DONG, 2011)

**(INCROPERA et al., 2008)

A seguir são apresentados os resultados dos casos isotérmicos e não-isotérmicos.

5.2.1. Caso isotérmico

Dada uma determinada temperatura para o modelo da Eq. (3.9), esta temperatura é mantida constante durante toda a simulação, e a viscosidade da resina só muda com o passar do tempo, em função de um único valor de temperatura. Sendo assim, foram geradas simulações para o caso

isotérmico e os resultados serão apresentados a seguir.

Conforme os estudos de Fontana, (1998), Kiuna et al., (2002) e Zhou et al., (2014), a viscosidade inicial da resina é menor em temperaturas mais elevadas. Por outro lado, o grau de cura da resina aumenta com o aumento da temperatura. Neste sentido, ocorre o que Fontana (1998) chama de efeitos concorrentes, que podem ser analisados pela Fig. 5.9.

Observando a Fig. 5.9, percebe-se que para as diferentes temperaturas consideradas nas simulações, quanto maior for a temperatura, mais rápido será o aumento na viscosidade da resina, isto é, mais rápido ocorrerá a cura. Quando se utiliza, por exemplo, a temperatura de 100 °C, a resina possui baixa viscosidade no início da simulação, porém, por se tratar de uma temperatura alta, a viscosidade da resina sobe rapidamente, e por isso o gráfico da temperatura de 100 °C se comporta de forma exponencial.

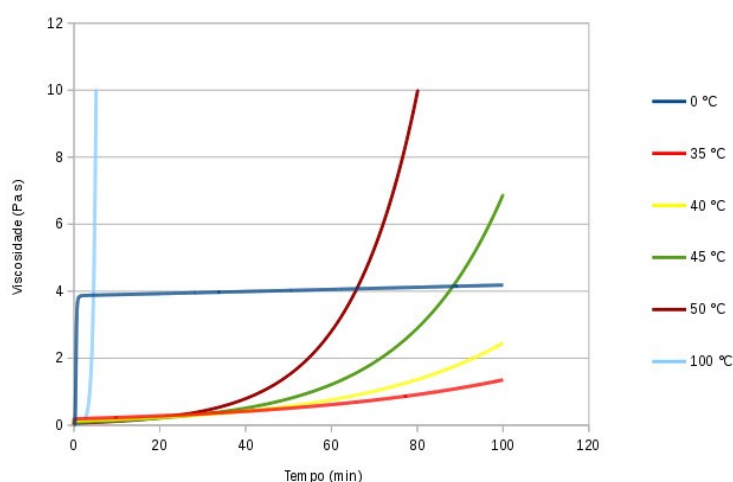


Figura 5.9. - Comportamento da viscosidade em função do tempo para diferentes temperaturas.

O modelo que representa estes resultados foi sugerido por Zhou et al. (2014) e foi implementado e reproduzido com o OpenFOAM. É válido destacar ainda que as curvas de 0 e 100 °C são extrapolações, isto é, Zhou et al. (2014) não apresentou resultados para estas temperaturas. A simulação que comparou os resultados foi realizada sem a implementação da equação da energia, isto é, apenas o modelo de viscosidade foi utilizado nesta simulação. A malha utilizada para a simulação foi a malha de escoamento radial mostrada na Fig. 4.9. Para obter os valores da viscosidade e gerar o gráfico mostrado na Fig. 5.10, um sensor para capturar estes valores foi instalado próximo à seção de entrada do molde. A implementação no OpenFOAM do modelo proposto por Zhou et al., (2014) conseguiu reproduzir bem os resultados já mostrados pelo autor. A comparação entre o modelo matemático sugerido por Zhou et al., (2014) e a implementação no OpenFOAM podem ser observadas na Fig. 5.10.

Por outro lado, considerando os efeitos concorrentes que cada temperatura apresenta, é

necessário que uma temperatura ótima de moldagem seja encontrada. Neste sentido, segundo Zhou et al., (2014) a temperatura ótima de moldagem está entre 30 e 45 °C, já que com estas temperaturas a resina consegue ser mantida com uma viscosidade menor do que 0,8 Pa.s por 50 min ou mais. Isto pode ser observado na Fig. 5.11, a qual esta, representa um “zoom” da área onde se localiza a viscosidade com até 0,8 Pa.s do gráfico mostrado na Fig. 5.9.

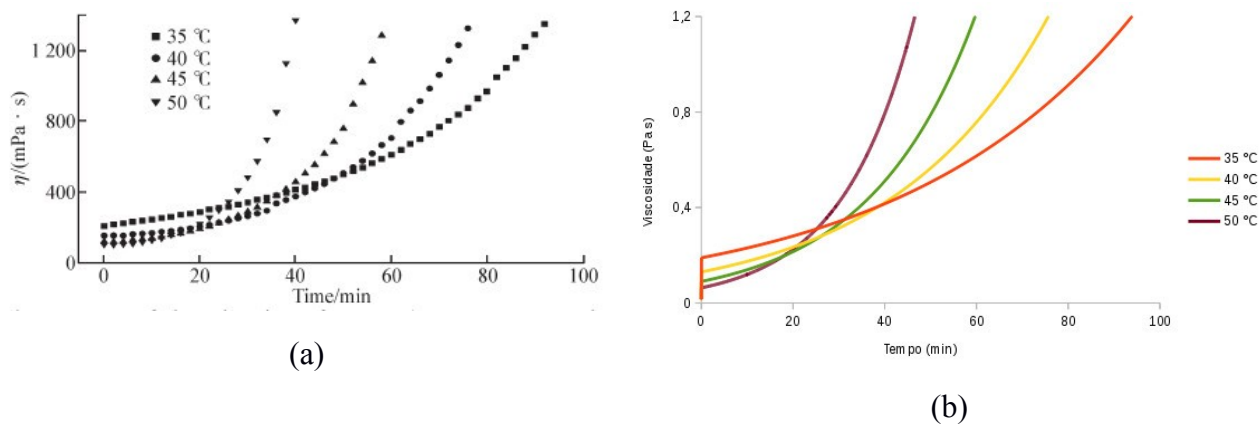


Figura 5.10. - Comparação dos resultados numéricos obtidos com OpenFOAM e os resultados apresentados por Zhou et al., (2014). (a) resultados de Zhou et al., (2014). (b) resultados obtidos com OpenFOAM.

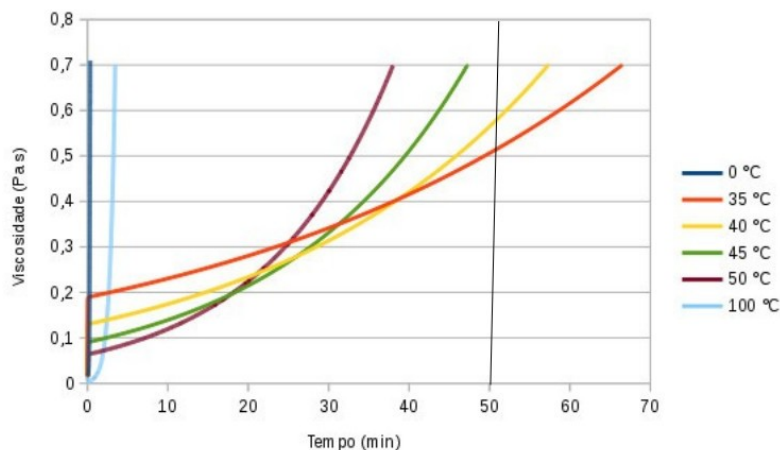


Figura 5.11. - Tempo máximo que a viscosidade se mantém com menos de 0,8 Pa.s.

Na Tabela 5.3 é possível observar os valores da viscosidade máxima nos tempos de 50, 60 e 70 min para diferentes temperaturas. Considerando então, que a janela ótima de temperaturas para o processamento está entre 35 e 45 °C, o próximo passo foi simular estas situações em casos não-isotérmicos.

Tabela 5.3: Valores da viscosidade da resina para diferentes tempos e temperaturas.

Temperatura	Viscosidade [Pa.s]						
Tempo							
	0 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	100 °C
50 min	3,96	0,53	0,50	0,56	0,78	1,43	$2,73 \times 10^{28}$
60 min	3,96	0,60	0,61	0,75	1,21	2,75	$1,70 \times 10^{35}$
70 min	4,07	0,69	0,74	1,01	1,87	5,17	$1,06 \times 10^{42}$

5.2.2. Caso não-isotérmico

Para simular casos não-isotérmicos no processo de RTM, a Eq. (3.9) e a Eq. (3.6) foram compiladas no software OpenFOAM, como mostrado na seção 4.2. Primeiramente, foi feita uma comparação entre o *solver interFoam*, com apenas a Eq. (3.9) compilada (caso isotérmico), e o *solver interTempFoam*, com a Eq. (3.9) e a Eq. (3.6) compiladas (caso não-isotérmico). Para a simulação numérica de cada caso para diferentes temperaturas foi utilizada a malha com escoamento radial mostrada na Fig. 4.9. Na realização das simulações numéricas utilizando o *solver interTempFoam* foi necessário impor condições de contorno para a temperatura. Com relação ao *solver interFoam*, que não possui a equação da energia compilada, as condições de contorno seguem as mesmas já apresentadas na seção 4.3.1, e a temperatura é definida diretamente na eq. (3.9), onde esta é mantida constante durante toda a simulação. Foram realizadas 6 (seis) simulações numéricas com diferentes temperaturas, sendo elas: 0, 35, 40, 45, 50 e 100 °C. Já para o caso da utilização do *solver interTempFoam*, é necessário impor condições de contorno para a temperatura levando em conta que estas condições devem respeitar a mesma situação que ocorre quando está sendo utilizado o *solver interFoam*, isto é, o meio deve se manter com temperatura constante durante toda a simulação a fim de comparar se os resultados serão os mesmos, já que a condição para a simulação é a mesma para os dois *solvers*.

Sendo assim, considerando que a primeira simulação foi realizada utilizando a temperatura de 0 °C, as condições de contorno para o caso da simulação numérica com o *solver interTempFoam*, foram as seguintes: na seção de entrada, bem como nas paredes, na face superior, e inferior, e no campo interno do molde foram especificadas temperaturas prescritas de 0 °C. Já na seção de saída foi especificada uma condição de *zeroGradient*, que impõe um gradiente de temperaturas nulo neste local (fluxo nulo). Estas condições mantêm o meio com temperatura constante, que é o que acontece quando é utilizado um valor constante de temperatura no modelo de viscosidade presente no *solver interFoam*. Para simular os outros casos com temperaturas de 35, 40, 45, 50 e 100 °C, as

condições de contorno foram as mesmas, mudando apenas o valor de cada temperatura para cada simulação.

A comparação entre estes dois *solvers* serviu para a certificação de que o aumento de mais uma equação não interferiu nos resultados já obtidos. Para a obtenção dos valores da viscosidade utilizados para gerar o gráfico mostrado na Fig. 5.12, foi colocado um sensor próximo a seção de entrada de resina no molde.

A comparação entre os dois *solvers* pode ser observada na Fig. 5.12.

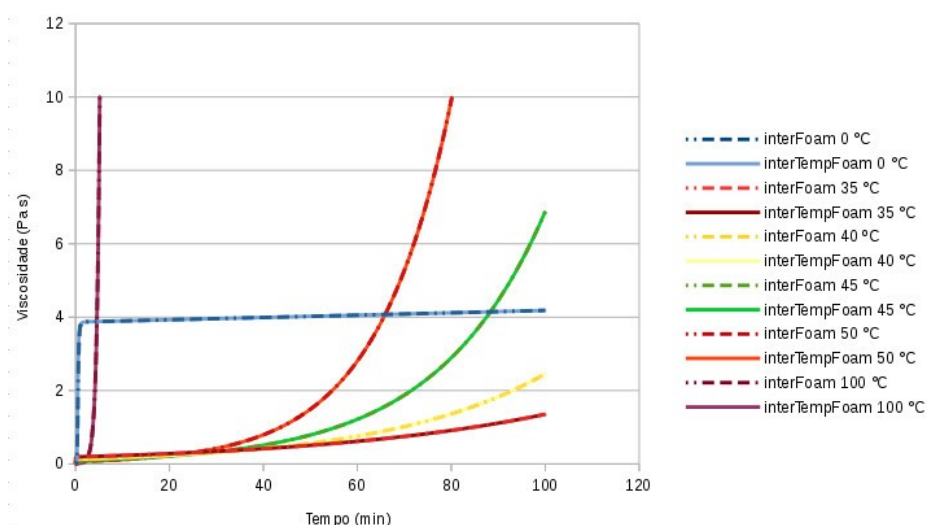


Figura 5.12. - Comparação da viscosidade para diferentes *solvers*.

Logo, com a verificação de que tudo está ocorrendo de maneira correta entre os dois *solvers*, as próximas simulações foram realizadas considerando que há mudanças também na temperatura, enquanto ocorre a moldagem. Assim, para a certificação de que o problema de transferência de calor está sendo bem resolvido, um teste foi realizado com um molde espesso, onde é possível visualizar melhor a distribuição de temperaturas na direção transversal.

Validação da distribuição de temperaturas

Para a realização desta simulação foi utilizada a malha com escoamento radial apresentada na Fig. 5.2, porém com uma espessura menor, 0,012 m, e impostas as seguintes condições de contorno: temperatura igual a 27 °C no interior do molde, 27 °C na parede superior e 100 °C na parede inferior, a resina também entra no molde com uma temperatura de 27 °C. As paredes laterais e as saídas do molde receberam as condições de contorno de *zeroGradient*. A Figura 5.13 mostra a posição em que foram colocados os sensores para analisar os valores de temperatura durante o

avanço da resina no interior do molde, e a distribuição de temperaturas pode ser observada nas Figs. 5.14 e 5.15, respectivamente.

A Figura 5.14 mostra como a temperatura está sendo distribuída no interior do molde à medida que a resina avança, ou seja, a transferência de calor neste caso está ocorrendo por convecção e condução, já que há uma troca de calor devido ao movimento do fluido no interior do molde em contato com o mesmo. Contudo, mesmo depois que a resina não mostra mais avanço no seu escoamento dentro do molde, a transferência de calor continua ocorrendo, porém agora, somente por condução.

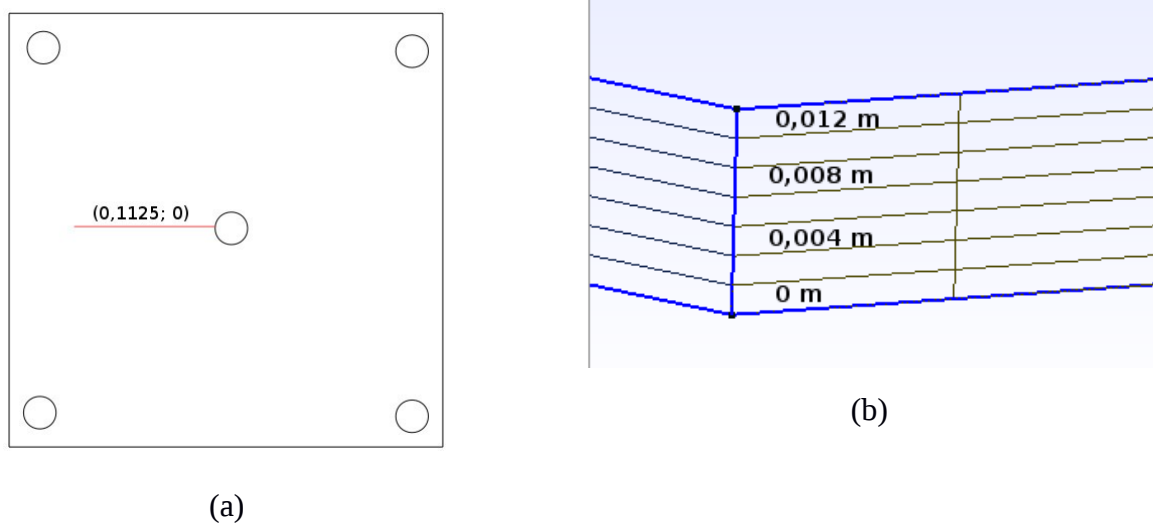


Figura 5.13. - Posição dos sensores virtuais utilizados para a análise da distribuição de temperaturas no interior do molde. (a) Posição do ponto fixo no plano. (b) Zoom da parede do molde mostrando as diferentes posições na direção z

Já a Figura 5.15, mostra o gráfico da distribuição de temperaturas na direção transversal e no interior do molde para as posições mostradas na Fig. 5.13. Inicialmente o campo interno começa com uma temperatura de aproximadamente $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, (que é a condição inicial imposta para a temperatura do campo interno) logo, a temperatura aumenta e começa a subir linearmente até atingir a máxima temperatura que o campo interno poderá chegar nos 14 min, que é o tempo máximo utilizado para esta simulação. Ainda na Fig 5.15, é possível observar que, no caso da curva da posição de $0,012\text{ m}$, a temperatura não atinge os $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Isto ocorre por que, enquanto as posições mais baixas, que por sua vez estão mais próximas da base aquecida do molde, possuem uma temperatura maior, nos pontos mais altos este calor demora um pouco mais para chegar, desta forma, para que esta posição também alcançasse os $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ um tempo maior de simulação deveria ser disponibilizado. Com este resultado, pode-se dizer que, o *solver interTempFoam*, que possui a equação da energia compilada em seu código, está funcionando de maneira esperada (validação

qualitativa), já que, o gráfico mostra um comportamento da distribuição de temperaturas coerentes para as condições de contorno impostas. Isto é, em nenhuma posição são encontradas temperaturas maiores ou menores do que as temperaturas impostas pelas condições de contorno, e isto realmente não poderia ocorrer, visto que, não há nenhuma geração ou sumidouro de calor implementado na equação da energia.

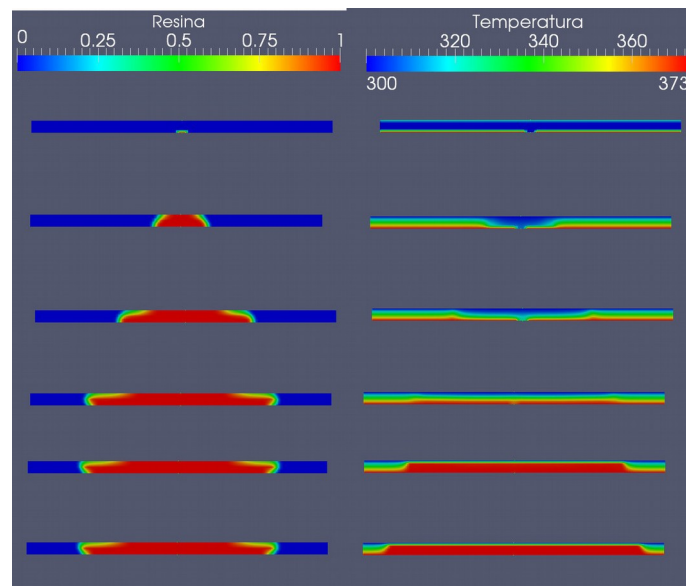


Figura 5.14. - Avanço da resina e da temperatura

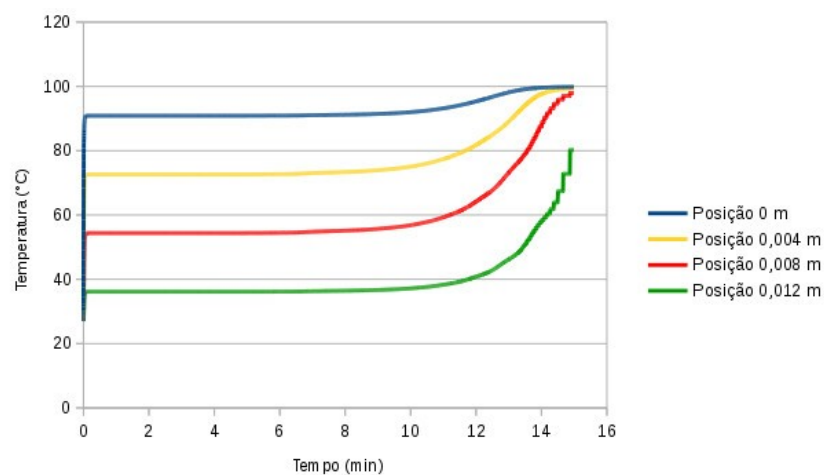


Figura 5.15. - Gráfico da distribuição de temperaturas na direção z

Simulação de placa fina com escoamento retilíneo

Para estas simulações foram utilizados molde e malha de escoamento retilíneo idênticos aos das Fig. 4.4 e 4.6, respectivamente.

Neste caso, o molde teve sua base aquecida com 35, 40 e 45 °C, enquanto o restante foi considerado com temperatura de 20 °C. A resina também entrou com uma temperatura de 20 °C. Os outros parâmetros utilizados nesta simulação seguem a Tab. 5.1, sendo que a pressão é de 1 bar e a viscosidade inicial é de 0,3 Pa.s, mudando seu valor em função da temperatura e do tempo.

O tempo total desta simulação foi de 5.600 s, visto que, neste momento a resina já alcança uma viscosidade de aproximadamente 1 Pa.s, e seu escoamento se torna cada vez mais lento. Neste tempo, e para as condições citadas acima, em termos de posição que a resina conseguiu alcançar no interior do molde, as temperaturas que possibilitaram um maior escoamento foram as temperaturas de 40 e 45 °C, no qual a resina escoou até a posição de 0,25 m. Na Fig. 5.16 é possível observar em qual direção do molde a medição do escoamento da resina foi feita, bem como o gráfico do avanço da resina ao longo do molde em função do tempo para as três diferentes temperaturas.

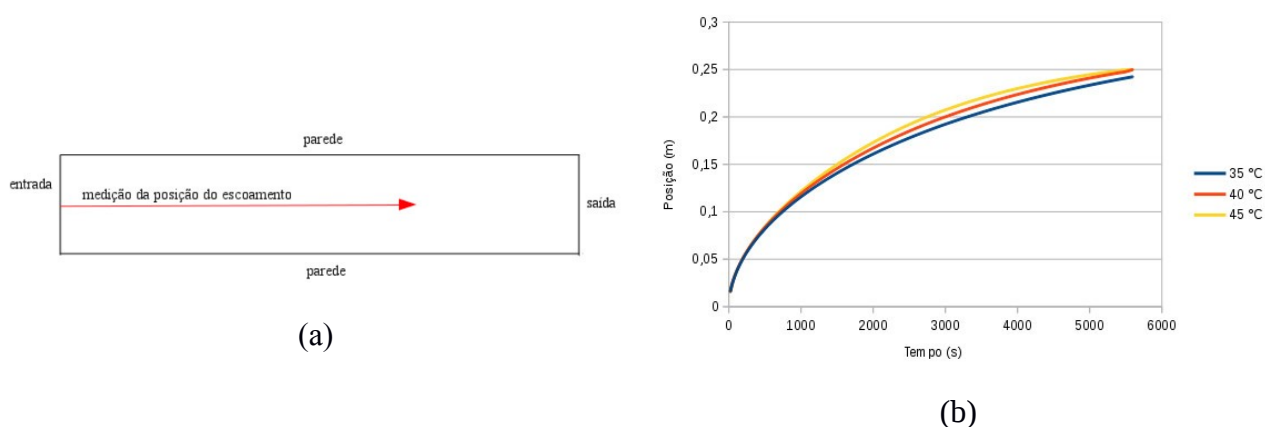


Figura 5.16. - Posição em função do tempo para o molde retilíneo. (a) direção em que foi medido o escoamento da resina no interior do molde. (b) gráfico da posição em função do tempo.

A seguir, na Fig 5.17, é possível visualizar a resina no interior do molde no tempo de 5.600 s para a situação em que a base do molde é aquecida com 40 °C. Nesta posição a resina já alcançou uma viscosidade de 1,32 Pa.s, e seu avanço se torna cada vez mais difícil. É provável que neste ponto a resina já esteja entrando em estado de gel.

Alguns sensores para monitorar a viscosidade da resina foram distribuídos ao longo do molde. As posições destes sensores são: 0,10 m, 0,15 m, 0,20 m, e 0,25 m, que serão chamados de S_1 , S_2 , S_3 e S_4 , respectivamente. Para um melhor entendimento, pode-se observar a distribuição destes sensores na Fig. 5.18.

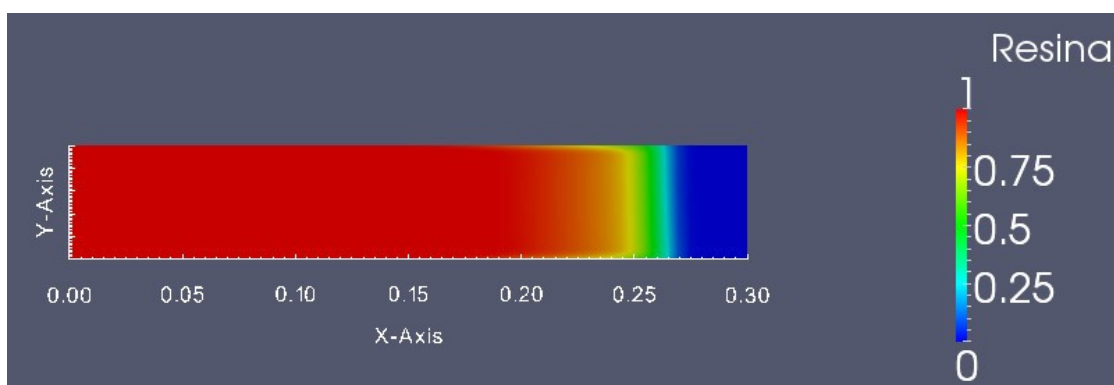


Figura 5.17. - Posição da resina no tempo de 5.600 s.

Na Tabela 5.4 são mostrados os tempos que a resina demorou para chegar em cada sensor, bem como, os valores de viscosidade e temperatura nestes pontos e neste tempo. É possível perceber que, quanto mais longe se encontra o sensor, maior será a viscosidade detectada por ele neste ponto. Isto acontece por que, diferentemente da resina que acabou de entrar no molde (posição 0,1 m), à medida que esta vai avançando e chegando ao final do mesmo, ela vai trocando calor com a base aquecida do molde e sua viscosidade muda em função disso. Outro parâmetro que também influencia na mudança da viscosidade é o tempo. Como pode-se perceber também na Tab.5.4, a resina demora um determinado tempo para chegar em cada ponto de cada sensor, essa demora também influencia na mudança da viscosidade.

Com a troca de calor ocorrendo à medida que a resina avança, uma distribuição de temperaturas acontece ao longo do molde. Como pode ser visto na Tab. 5.4, a temperatura aumenta conforme a resina avança, e esta irá se estabilizar em aproximadamente 36 °C.

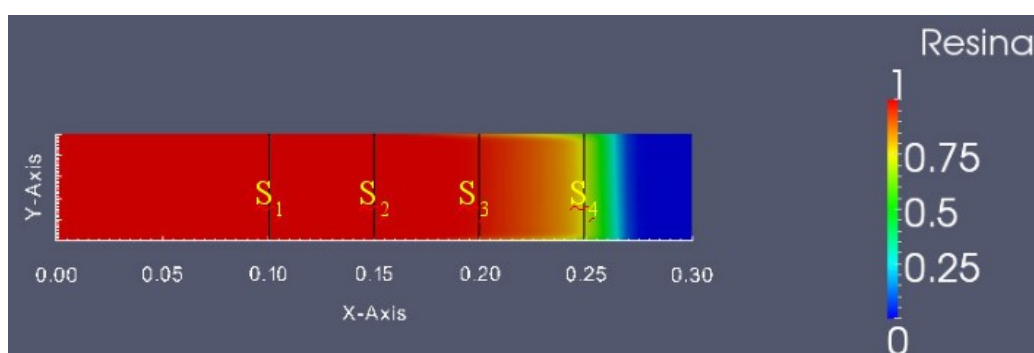


Figura 5.18. - Distribuição dos sensores no molde de escoamento retilíneo.

Tabela 5.4: Valores da viscosidade e temperatura em cada sensor do molde retilíneo.

Sensor	Posição	Tempo	Viscosidade	Temperatura
S ₁	0,10 m	720 s	0,28 Pa.s	31 °C
S ₂	0,15 m	1600 s	0,34 Pa.s	33 °C
S ₃	0,20 m	3000 s	0,49 Pa.s	34 °C
S ₄	0,25 m	5600 s	1,32 Pa.s	36 °C

Na Figura 5.19 é possível visualizar melhor a distribuição de temperaturas na base do molde em função do tempo.

Estes resultados estão de acordo com o que Hardis et al. (2013) afirmam em sua pesquisa, dizendo que “a cura da resina não é uniforme devido as diferentes temperaturas em diferentes áreas da peça durante a moldagem”.

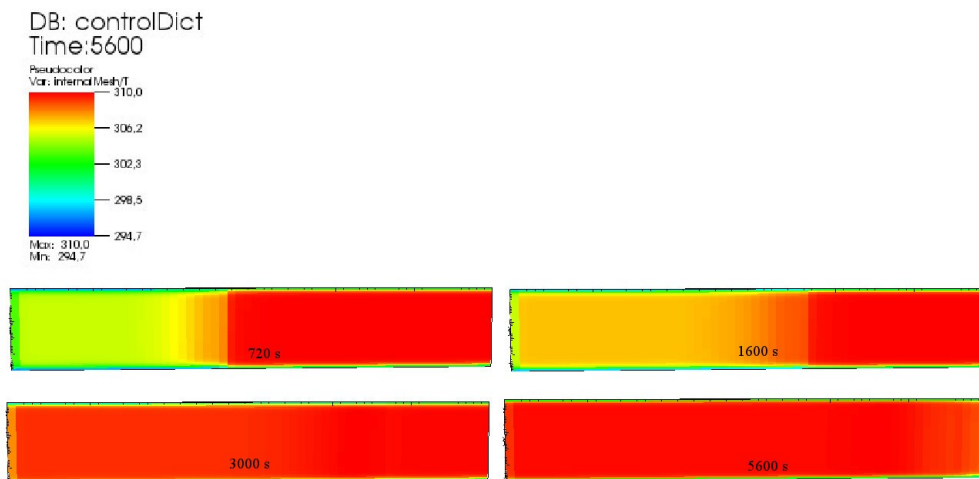


Figura 5.19. - Distribuição de temperaturas ao longo do molde.

Nesta simulação, a resina não alcançou a posição final do molde, e isto pode ter acontecido por conta da permeabilidade planar que é bastante baixa ($1,58 \times 10^{-11} \text{ m}^2$). Para a certificação de que o baixo valor da permeabilidade seja o provável causador do tempo elevado de moldagem, bem

como do não preenchimento total do molde, foi feita uma comparação entre uma simulação considerando a viscosidade constante e uma simulação considerando o modelo de viscosidade utilizado neste trabalho. Foi observado que, com as mesmas condições, porém considerando a viscosidade constante durante toda a moldagem, no tempo de 5600 s a resina alcançou a posição de 0,29 m. Já para a simulação considerando o modelo que leva em conta o aumento da viscosidade em função da temperatura e do tempo, no tempo de 5600 s a resina alcançou a posição de 0,25 m. Estes resultados são coerentes, visto que, é evidente que a resina com viscosidade constante irá escoar com mais facilidade e preencherá um espaço maior do molde, mesmo assim, esta demorou em torno de 1 h 30 min para preencher totalmente o molde. Já no caso da resina com a viscosidade aumentando seu valor durante a moldagem, é também evidente que o escoamento tenha maior dificuldade para preencher o molde, e provavelmente a resina gelifique antes do total preenchimento, que foi o que aconteceu. No tempo de 5600 s, a resina já estava com uma viscosidade de 1,32 Pa.s, e esta tinha alcançado apenas a posição de 0,25 m.

Simulação de placa fina com escoamento radial

A simulação numérica do escoamento radial em placa fina foi realizada utilizando o molde e a malha mostrados nas Fig. 4.7 e 4.9, respectivamente. As condições de moldagem foram as mesmas do caso retilíneo, porém neste caso, foi utilizada apenas a temperatura de 40 °C para o aquecimento da base.

Uma análise semelhante ao do caso anterior de escoamento retilíneo, foi também realizada para escoamento radial, isto é, quatro sensores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 foram distribuídos ao longo do molde a fim de avaliar os valores de viscosidade e temperatura nestes pontos. A localização dos sensores foi escolhida a partir da posição em que a resina se encontrava nos mesmos tempos utilizados no caso anterior. Logo, as posições dos sensores foram as seguintes: 0,06 m, 0,08 m, 0,11 m, e 0,13 m. Na Figura 5.20 são mostradas as posições destes sensores no molde. Os valores de viscosidade e temperatura encontrados nestes pontos são mostrados na Tab. 5.5. Assim, é possível perceber que, a distribuição de temperaturas é semelhante ao caso do molde retilíneo. Desta forma, o valor da viscosidade também será semelhante para os mesmos instantes.

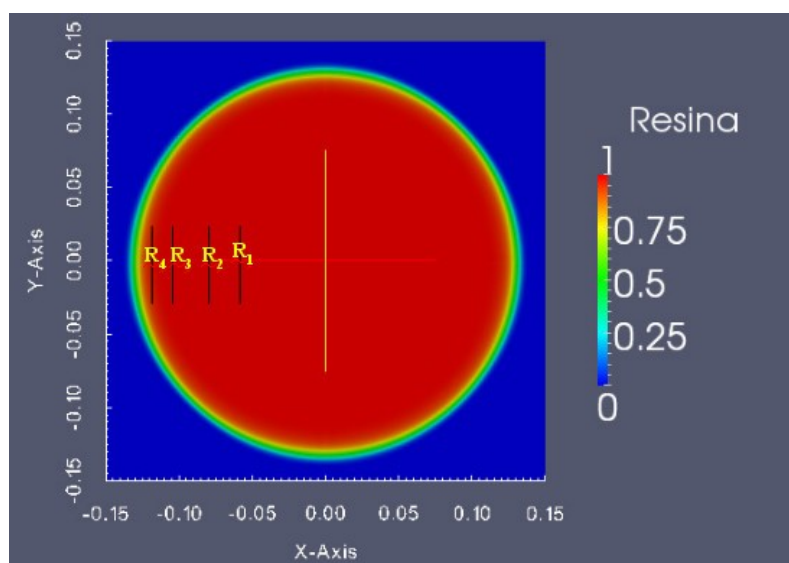


Figura 5.20. - Distribuição dos sensores no molde de escoamento radial.

Percebe-se ainda, na Tab. 5.5 que, a diferença de posição do instante 3000 s para o instante 5600 s é mínima, cerca de 0,02 m apenas, isto é, a resina demorou aproximadamente 43 min para escoar 0,02 m. Neste sentido, pode-se considerar que neste momento a resina já tenha alcançado o seu estado de gel, e seu avanço já é quase imperceptível.

Na Fig. 5.21 é possível observar a posição em que a resina encontra-se no instante 5600 s.

Tabela 5.5: Valores da viscosidade e temperatura em cada sensor do molde radial.

Sensor	Posição	Tempo	Viscosidade	Temperatura
R ₁	0,06 m	720 s	0,28 Pa.s	31 °C
R ₂	0,08 m	1600 s	0,34 Pa.s	33 °C
R ₃	0,11 m	3000 s	0,49 Pa.s	35 °C
R ₄	0,13 m	5600 s	1,32 Pa.s	36 °C

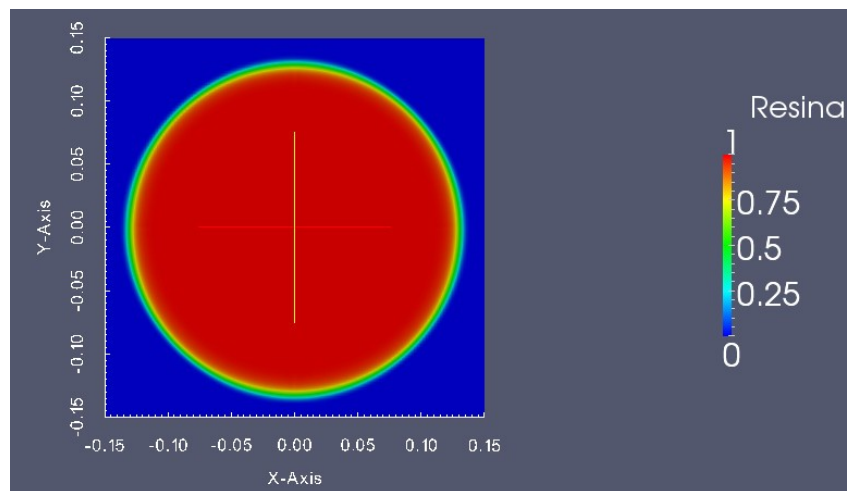


Figura 5.21. - Posição da resina no instante 5600 s.

O molde não foi totalmente preenchido, pois a resina gelificou antes do total preenchimento.

Simulação de placa espessa com escoamento radial

A simulação numérica do escoamento radial em placa espessa foi realizada utilizando o molde e a malha mostrados nas Fig. 5.1 e 5.2, respectivamente. A simulação foi realizada considerando as mesmas condições mostradas na Tab. 5.1, com permeabilidade transversal K_{zz} de $1,58 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ e pressão de injeção de 3 bar.

Devido à espessura do molde, a diferença de temperatura entre a base e o topo do molde se torna relevante, o que não acontece com moldes finos, já que a espessura é mínima. Esta comparação pode ser feita visualizando as paredes do molde fino e espesso, mostrados nas Fig. 5.22 e 5.23, respectivamente.

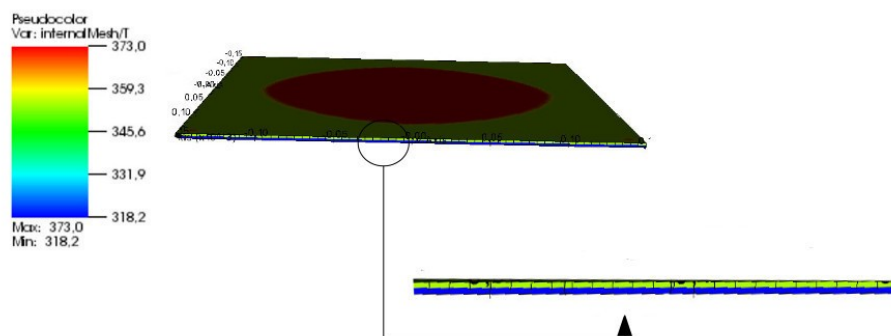


Figura 5.22. - Paredes do molde fino.

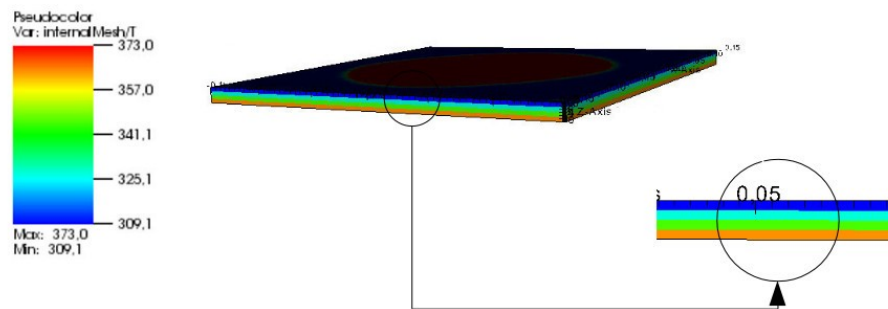


Figura 5.23. - Paredes do molde espesso.

É perceptível o gradiente de temperaturas na direção transversal do molde espesso mostrado na Fig. 5.23. Desta forma, fica evidente que a cura da resina não será uniforme, já que, relevantes gradientes de temperaturas se formam tanto no plano, como também ao longo da espessura do molde. Esta é uma questão delicada com relação à moldagem de peças espessas, já que, de acordo com Advani; Sozer, (2011), nos moldes espessos a resistência à passagem do calor é maior, e significativos gradientes de temperatura se desenvolvem, levando ao acúmulo de tensões residuais e, eventualmente, causando um processo de cura desigual e até mesmo o empenamento da peça.

A Figura 5.24 a seguir, mostra a posição máxima que a resina alcançou para as condições utilizadas nesta simulação.

Neste caso, a resina conseguiu avançar até os 330 s, a partir deste momento é provável que esta já tenha alcançado seu estado de gel. O tempo de moldagem neste caso foi pequeno devido às altas temperaturas utilizadas no molde, a base por exemplo, foi aquecida com 100 °C.

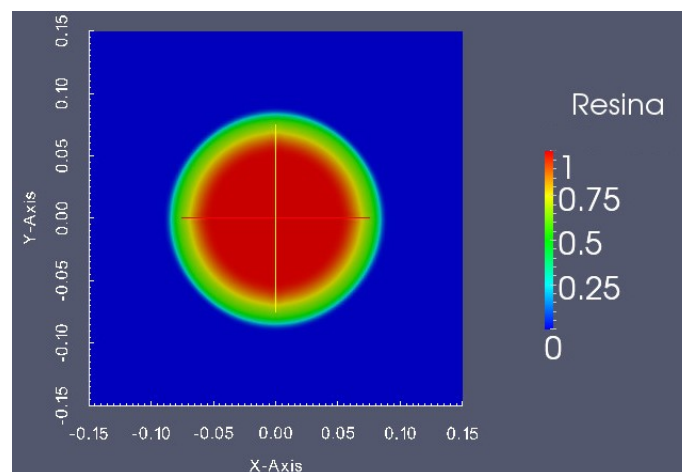


Figura 5.24. - Posição máxima da resina no tempo de 330 s.

6. CONCLUSÕES

Foram realizadas simulações numéricas do processo de RTM envolvendo placas finas com escoamento retilíneo e radial, e placas espessas com escoamento radial. Os resultados numéricos foram comparados com resultados analíticos e numéricos retirados da literatura, obtendo uma boa concordância com ambos.

Foi analisado o preenchimento do molde para placas espessas, a influência do aumento da pressão de injeção e a influência de diferentes permeabilidades transversais. Concluiu-se que, quanto menor for a permeabilidade transversal maior será a dificuldade de impregnação da resina, tanto na direção transversal como no plano, visto que, a permeabilidade transversal também afetará no escoamento da resina no plano. O aumento na pressão de injeção poderá auxiliar na impregnação da resina em todas as direções.

Em alguns casos foi considerado que o valor da viscosidade da resina muda em função da temperatura e do tempo. Concluiu-se que, a viscosidade inicial da resina será menor em temperaturas mais elevadas. Por outro lado, o grau de cura da resina aumenta com o aumento da temperatura. Neste sentido, é necessário que sejam encontradas temperaturas ótimas de processamento para que o molde seja impregnado antes que a resina comece a gelificar. É importante ressaltar que, a cura da resina não será uniforme, devido às diferentes temperaturas ao longo do molde, e isto é mais relevante em moldes espessos, onde, consideráveis gradientes de temperatura se desenvolvem tanto no plano, como na direção transversal, acarretando em uma cura desigual da peça.

Outra questão é acerca do tempo de moldagem para cada temperatura. De acordo com Zhou et al. (2014) as temperaturas entre 30 e 45 °C são as temperaturas em que se consegue um tempo maior de moldagem, visto que, a viscosidade da resina consegue se manter menor do que 0,8 Pa.s por 50 min ou mais. Desta forma, é possível concluir também que, o tempo de moldagem será dependente do tempo de gel da resina, pois quando a resina alcança seu estado de gel, esta não irá avançar mais, podendo restar ainda reforço seco sem ser impregnado. Assim, também é necessário que o tempo de moldagem não ultrapasse o tempo de gel da resina.

Com relação à implementação da equação da energia no software OpenFOAM utilizada para modelar problemas que envolvem o aquecimento do molde em processos de RTM, pode ser concluído que, esta implementação gerou resultados relevantes para o avanço nos estudos do grupo de pesquisa de RTM da FURG. Esta equação foi implementada no *solver* interFoam, e teve bom funcionamento, apresentando resultados qualitativos coerentes. Um novo modelo de viscosidade também foi implementado neste *solver*, com o intuito de considerar a transferência de calor que

ocorre no interior do molde, de modo que, a temperatura do molde influencia na mudança da viscosidade da resina.

Uma sugestão para trabalhos futuros é adicionar um termo fonte de geração de calor na equação da energia, para que este represente a cura exotérmica da resina que ocorre no interior do molde durante a moldagem.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASSI, A.; SHAHNAZARI, M. . Numerical modeling of mold filling and curing in non-isothermal rtm process. **Applied thermal engineering**, nov. 2004. v. 24, n. 16, p. 2453–2465.

ADVANI, S. G.; SOZER, E. M. **Process modeling in composites manufacturing**. 2nd ed ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011.

AKTAS, A. KRISHNAN, L. KANDOLA, B. BOYD, SW. SHENOI, RA. A cure modelling study of an unsaturated polyester resin system for the simulation of curing of fibre-reinforced composites during the vacuum infusion process. **Journal of composite materials**, 1 ago. 2015. v. 49, n. 20, p. 2529–2540.

ALVES, A. L. Dos S. **Processamento de placas compósitas pela técnica de moldagem por infusão de resina de seemann**. Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFRJ, 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Metalúrgica e de Materiais).

AMORIM JÚNIOR, W. F. CHAVES, G. Q. CALADO, V. M. A. BASTIAN, F. L. Processamento de placa espessa de compósito através de moldagem por transferência de resina. **Revista matéria**, 2006. v. 11, n. 3, p. 316–323.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

BOWER, M. V. **Composite materials constituents and fabrication techniques**. Huntsville Alemanha: The University of Alabama in Huntsville, 2000.

CALLISTER JR; WILLIAM D; SOARES, S. M. S. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 2. ed ed. New York: Wiley, 1991.

FONTANA, Q. P. V. Viscosity: thermal history treatment in resin transfer moulding process modelling. **Composites part a: applied science and manufacturing**, jan. 1998. v. 29, n. 1–2, p. 153–158.

FRANCO, R. A. V. S. **Produção de componentes em materiais compósitos por infusão de resina.**

GARAY, A. C. HECK, V. ZATTERA, A. J. SOUZA, J. A. AMICO, S. C. Influence of calcium carbonate on rtm and rtm light processing and properties of molded composites. **Journal of reinforced plastics and composites**, 1 jul. 2011. v. 30, n. 14, p. 1213–1221.

HARDIS, R. JESSOP, J. L. P. PETERS, F. E. KESSLER, M. R. Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using dsc, raman spectroscopy, and dea. **Composites part a: applied science and manufacturing**, jun. 2013. v. 49, p. 100–108.

HIRT, C.; NICHOLS, B. . Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of computational physics**, jan. 1981. v. 39, n. 1, p. 201–225.

INCROPERA, F. P.; INCROPERA, F. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** Rio de Janeiro: Grupo Gen - LTC, 2008.

ISOLDI, L. A. OLIVEIRA, C. P. ROCHA, L. A. O. SOUZA, J. A. AMICO, S. C. Three-dimensional numerical modeling of rtm and lrtm processes. **Journal of the brazilian society of mechanical sciences and engineering**, 2012. v. 34, n. 2, p. 105–111.

JAHROMI, P. E.; SHOJAEI, A.; REZA PISHVAIE, S. M. Prediction and optimization of cure cycle of thick fiber-reinforced composite parts using dynamic artificial neural networks. **Journal of reinforced plastics and composites**, 1 set. 2012. v. 31, n. 18, p. 1201–1215.

KIUNA, N. LAWRENCE, C. J. FONTANA, Q. P. V. LEE, P. D. SELERLAND, T. SPELT, P. D. M. A model for resin viscosity during cure in the resin transfer moulding process. **Composites part a: applied science and manufacturing**, nov. 2002. v. 33, n. 11, p. 1497–1503.

LAPOL. **Laboratório de materiais poliméricos.** Disponível em:
<<http://www.ufrgs.br/lapol/>>.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.** Rio de Janeiro: Livros Tecnicos e Científicos, 2004.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos.** São Paulo: Artliber Editora, 2011.

OLIVEIRA, C. P. **Modelagem numérica do transporte de resinas em um meio poroso**

aplicado ao processo de rtm. Rio Grande-RS: Universidade Federal do Rio Grande, 2010.

Dissertação de Mestrado.

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

OLIVEIRA, I. R. DE. **Infiltração de fluidos carregados em meios porosos via processo rtm: análise teórica e experimental.** Campina Grande-PB: Universidade Federal de Campina Grande, 2014. Tese de Doutorado.

PAYANDEH, M.; PALM, J.; ANDRIC, J. Implementation of a temperature dependent viscosity model in openfoam. 2012. Disponível em: <http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2012/MostafaPayandeh/ViscosityModel%20in%20openFoam%20v2.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2017.

POODTS, E. MINAK, G. MAZZOCCHETTI, L. GIORGINI, L. Fabrication, process simulation and testing of a thick cfrp component using the rtm process. **Composites part b: engineering**, jan. 2014. v. 56, p. 673–680.

PORTO, J. Da S. **Modelagem computacional do processo de moldagem por transferência de resina aplicado à engenharia naval.** Rio grande-RS: Universidade Federal do Rio Grande, 2012. Dissertação de Mestrado.

RAGHU RAJA PANDIYAN, K.; NEOGI, S. Viscosity modeling of a medium reactive unsaturated polyester resin used for liquid composite molding process. **Journal of applied polymer science**, 15 jul. 2012. v. 125, n. 2, p. 1400–1408.

ROUISEON, D.; SAIN, M.; COUTURIER, M. Resin transfer molding of natural fiber reinforced composites: cure simulation. **Composites science and technology**, abr. 2004. v. 64, n. 5, p. 629–644.

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

SAOUAB, A. *et al.* Injection simulations of thick composite parts manufactured by the rtm

process. **Composites science and technology**, fev. 2001. v. 61, n. 3, p. 445–451.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SHI, F.; DONG, X. 3d numerical simulation of filling and curing processes in non-isothermal rtm process cycle. **Finite elements in analysis and design**, jul. 2011. v. 47, n. 7, p. 764–770.

SKORDOS, A. A.; PARTRIDGE, I. K. Monitoring and heat transfer modelling of the cure of thermoset composites processed by resin transfer moulding. **Polymer composites**, 1999. Disponível em: <<https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/1880>>. Acesso em: 10 dez. 2016.

SOBOTKA, V.; DELAUNAY, D. Analysis and control of heat transfer in an industrial composite mold in rtm polyester automotive process. **Journal of reinforced plastics and composites**, 1 jun. 2007. v. 26, n. 9, p. 881–901.

SOUZA, J. A. ISOLDI, L. A. SANTOS, E. D. OLIVEIRA, C. P. AMICO, S. C. A numerical methodology for permeability determination of reinforcements for polymeric composites. 2012. Disponível em: <<http://www.repositorio.furg.br/handle/1/5262>>. Acesso em: 4 mar. 2016.

SRINIVASAN, V.; SALAZAR, A. J.; SAITO, K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (vof) methodology. **Applied mathematical modelling**, ago. 2011. v. 35, n. 8, p. 3710–3730.

TRINDADE, R. S. LANFREDI, P. H. SOUZA, J. A. AMICO, S. C. Study of the transverse permeability influence on thick composites liquid molding with the aid of numerical simulation. *In*: BCCM-3 – BRAZILIAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, 2016, Gramado/RS. **Anais...** Gramado/RS: [s.n.], 2016.

User guide openfoam. [S.l.]: [s.n.], 2017. Licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial- NoDerivs 3.0 Unported License.

VAFAI, K. (Org.). **Handbook of porous media**. 2nd ed ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2nd ed ed. Harlow, England ; New York: Pearson Education Ltd, 2007.

YENILMEZ, B.; MURAT SOZER, E. A grid of dielectric sensors to monitor mold filling and resin cure in resin transfer molding. **Composites part a: applied science and manufacturing**, abr. 2009. v. 40, n. 4, p. 476–489.

ZHOU, Z. JIANG, B. CHEN, X. JIANG, F. JIAN, Y. Rheological behavior and process prediction of low viscosity epoxy resin for rtm. **Journal of wuhan university of technology-mater. sci. ed.**, out. 2014. v. 29, n. 5, p. 1078–1082.

8. APÊNDICES

8.1. Função kappaf

```

193 //my modification
194 Foam::tmp<Foam::surfaceScalarField>
195 Foam::MyincompressibleTwoPhaseMixture::kappaf() const
196 {
197     const surfaceScalarField alphaf
198     (
199         min(max(fvc::interpolate(alphal_), scalar(0)), scalar(1))
200     );
201
202     return tmp<surfaceScalarField>
203     (
204         new surfaceScalarField
205         (
206             "kappaf",
207             (
208                 alphaf*rho1_*cp1_*(1/Pr1_)*fvc::interpolate(nuModel1_->nu())
209                 + (scalar(1) - alphaf)*rho2_*cp2_*(1/Pr2_)*fvc::interpolate(nuModel2_->nu())
210             )/(alphaf*cp1_ + (scalar(1) - alphaf)*cp2_)
211         )
212     );
213 }
214 //end my modification

```

8.2. Equação da energia

```

1 //surfaceScalarField kappaf = twoPhaseProperties.kappaf();
2 surfaceScalarField kappaf = mixture.kappaf();
3
4 fvScalarMatrix TEqn
5 (
6     fvm::ddt(rho, T)
7     + fvm::div(rhoPhi, T)
8     - fvm::laplacian(kappaf, T)
9 );
10 TEqn.solve();

```

8.3. Implementação do modelo de viscosidade

```

49 // * * * * * Private Member Functions * * * * * //
50
51 Foam::tmp<Foam::volScalarField>
52 Foam::viscosityModels::tempdeppowerLaw::calcNu() const
53 {
54
55 //my modification
56 scalar t=U_.mesh().time().value();
57 const volScalarField& T=U_.mesh().lookupObject<volScalarField>("T");
58 // return (nu0_ - nuInf_)/(scalar(1) + pow(m_*strainRate(), n_)) + nuInf_;
59 return nu0_ + a1_*t + a2_*t*t + b1_*exp(b2_/T + b3_*exp(b4_/T)*t)
60 + scalar(0.)*nu0_/(scalar(1) + m_*strainRate()); //last term is
not used. Need it to set variable types in equation
61 //end my modification
62
63
64 }
65
80
81 //my modification
82 nu0_(tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("nu0")),
83 a1_(tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("a1")),
84 a2_(tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("a2")),
85 b1_(tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("b1")),
86 b2_(tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("b2")),
87 b3_(tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("b3")),
88 b4_(tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("b4")),
89 m_(tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("m")),
90 |
91 //end my modification
92
120 //my modification
121 tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("nu0") >> nu0_;
122 tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("a1") >> a1_;
123 tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("a2") >> a2_;
124 tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("b1") >> b1_;
125 tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("b2") >> b2_;
126 tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("b3") >> b3_;
127 tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("b4") >> b4_;
128 tempdeppowerLawCoeffs_.lookup("m") >> m_;
129 //end my modification
130

```