



Fluidodinâmica Computacional Aplicada à Simulação do Processo de Moldagem por Transferência de Resina

Fabiola Carreira de Rezende Bustamante

Julliana de Oliveira Guimarães

Vinícius Luís de Melo Seixas

Projeto Final de Curso

Orientadores

Veronica Maria de Araujo Calado, D.Sc.
Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

Fevereiro de 2012

FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA À SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA

Fabiola Carreira de Rezende Bustamante
Julliana de Oliveira Guimarães
Vinícius Luís de Melo Seixas

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:


Antonio de Oliveira Samel Moraes, M.Sc.


Cleber Couto da Costa, D.Sc.


João Felipe Mitre de Araujo, D.Sc.

Orientado por:

Veronica Maria de Araujo Calado, D.Sc.


Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil
Fevereiro de 2012

Bustamante, Fabiola. Guimarães, Julliana. Seixas, Vinícius.
Fluidodinâmica Computacional Aplicada à Simulação do Processo de Moldagem por
Transferência de Resina / Fabiola Carreira de Rezende Bustamante, Julliana de Oliveira
Guimarães, Vinícius Luís de Melo Seixas. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ,2012.
xiv, 52p.;il

(Projeto Final de Curso) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química,
2012.

Orientadores: Veronica Maria de Araujo Calado e Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva.

1. RTM. 2. CFD. 3. Estudo de Caso. 4. Projeto Final de
Curso. (Graduação - UFRJ/EQ). 5. Veronica Maria de Araujo Calado e Luiz Fernando
Lopes Rodrigues Silva. I. Fluidodinâmica Computacional Aplicada à Simulação do
Processo de Moldagem por Transferência de Resina.

A todos que ainda acreditam que é possível vencer com honestidade e com o suor da luta.

Porque tudo vale a pena quando a alma não é pequena.

“Somos muito melhores do que sabemos.
Temos capacidades ignoradas que só aparecem nas crises.”

Lance Armstrong

"Porque eu sou do tamanho daquilo que sinto,
que vejo e que faço, não do tamanho
que as pessoas me enxergam."

Carlos Drummond de Andrade

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, que durante toda essa nossa caminhada nos fez vitoriosos a cada passada, sempre nos guiando e nos colocando no caminho da honra, da verdade e do amor. Sem Ele, com certeza nossa felicidade não estaria completa.

Agradecemos também à nossa família, por todo amor e suporte emocional dado em todos os momentos de nossas vidas, nos acalmando quando a tempestade aparece, nos confortando quando a tristeza paira, sorrindo e comemorando com as nossas conquistas, enfim, amor incondicional!

Aos nossos amigos, pela compreensão, apoio e conselhos. Por conviverem conosco boa parte de nossas vidas, sendo muitas das vezes nossa segunda família, e por nos fazer sentir queridos e bem-vindos sempre! Que nossos laços de amizade sejam como laços de irmandade!

E finalmente aos nossos queridos orientadores Luiz Fernando e Veronica. Muito obrigado por compartilharem seus preciosos conhecimentos, pela paciência e dedicação conosco. Por aceitar orientar esse trio de personalidade bem peculiar e diferenciada, por entender nossas dificuldades e problemas. Porém, mais importante que tudo isso, sabemos que podemos contar com vocês sempre, e isso, levaremos por toda a vida.

Resumo de Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

FUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA À SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA

Fabiola Carreira de Rezende Bustamante
Julliana de Oliveira Guimaraes
Vinícius Luís de Melo Seixas

Fevereiro de 2012

Orientadores: Prof^ª. Veronica Maria de Araujo Calado, D.Sc
Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc

Embora o conceito de compósitos exista há milênios, a tecnologia do compósito ou plástico reforçado com fibras de vidro (PRFV) é mais recente, tendo seu primeiro produto datado em meados da década de 1930. Por apresentarem características como baixo peso molecular e boa resistência mecânica, os compósitos revolucionaram desde a indústria aeroespacial até a civil e, portanto, seus diversos processos de fabricação vêm sendo estudados e otimizados desde então.

O Processo de Moldagem por Transferência de Resina (*Resin Transfer Molding - RTM*) é um dos mais eficientes e atrativos processos de fabricação de compósitos poliméricos devido à sua capacidade de produção em média escala, a baixo custo e alto desempenho. Este fato, somado com o crescimento brasileiro de diversos setores como o automotivo e o civil, que utilizam os compósitos poliméricos, e o constante desenvolvimento desta tecnologia serviram de motivadores para a realização deste trabalho.

O presente trabalho teve como objetivo principal descrever o processo de fabricação de compósitos RTM usando a abordagem de Fluidodinâmica Computacional (CFD), já que este tipo de abordagem na literatura é escasso. Além disso, a abordagem de CFD é feita por um pacote comercial, o ANSYS CFX[®], facilitando o tratamento de dados.

Abstract of Final Project presented to Escola de Química as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Chemical Engineer.

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS APPLIED TO THE SIMULATION OF THE PROCESS OF RESIN TRANSFER MOLDING

Fabiola Carreira de Rezende Bustamante
Julliana de Oliveira Guimaraes
Vinícius Luís de Melo Seixas

February, 2012

Advisors: Prof^a. Veronica Maria de Araujo Calado, D.Sc
Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc

While the concept of composites has been in existence for several millenia, the technology of composite or fiberglass reinforced polymer (FRP) is quite recent, dating from its first product in the mid 1930's. Because of FRP's features as light molecular weight and good mechanical resistance, composites have revolutionized industries from aerospace to civil, and therefore, different manufacturing processes have been studied and optimized since then.

Resin Transfer Molding (RTM) is one of the most efficient and attractive composite manufacturing processes due to its medium volume production at low cost and high performance. Besides, there is the growth of various Brazilian sectors such as automotive and civil, which use FRP materials, and the constant development of this technology serving as a motivator for this work.

The main objective of this work is to describe a composite manufacturing process called RTM, using Computational Fluid Dynamics (CFD) approach, once there are a few papers related to this in the state-of-the-art. In addition, a CFD approach is carried out by a commercial package, ANSYS CFX[®], making data processing easier.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1: Introdução | 1 |
| 1.1 Objetivos | 2 |
| 1.2 Estrutura do Trabalho | 3 |
| Capítulo 2: Revisão da Literatura | 4 |
| 2.1 Compósitos | 4 |
| 2.1.1 <i>Resinas</i> | 6 |
| 2.1.2 <i>Reforços de Fibra</i> | 9 |
| 2.2 Cinética de Cura | 10 |
| 2.3 Enchimento do Molde | 13 |
| 2.4 Escoamento em Meio Poroso | 14 |
| 2.5 O processo <i>Resin Transfer Molding (RTM)</i> | 16 |
| Capítulo 3: Fluidodinâmica Computacional (CFD) e Modelagem Matemática | 19 |
| 3.1 Fluidodinâmica Computacional (CFD) | 19 |
| 3.1.1 <i>Definição e Metodologia</i> | 19 |
| 3.1.2 <i>Geometria e Malha</i> | 21 |
| 3.2 Modelagem Matemática | 23 |
| Capítulo 4: Resultados e Discussão | 32 |
| 4.1 Geometria e Malha | 32 |
| 4.1.1 <i>Análise de Convergência de Malha</i> | 34 |
| 4.2 Análises Preliminares | 36 |
| 4.2.1 <i>Influência da Temperatura na Taxa de Cura</i> | 36 |
| 4.2.2 <i>Análise do Enchimento</i> | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3 Análise da Injeção | 42 |
| <i>4.3.1 Análise dos Pontos de Injeção</i> | 43 |
| 4.4 Análise da Reação de Cura | 45 |
| Capítulo 5: Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros | 48 |
| 5.1 Conclusões | 48 |
| 5.2 Propostas para Trabalhos Futuros | 49 |

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-------------------|--|---------|
| Figura 1: | Distribuição de consumo de matéria-prima por processos de fabricação de compósitos. | pag. 2 |
| Figura 2: | a) grupo epóxi; b) grupo glicidil | pag. 7 |
| Figura 3: | Exemplos de fibra de vidro de classe E e C, orientados randomicamente. | pag. 10 |
| Figura 4: | a) Uma molécula típica de epóxi e b) um típico endurecedor amínico. | pag. 12 |
| Figura 5: | Mecanismo da cura. | pag. 12 |
| Figura 6: | Vista esquemática do escoamento. | pag. 13 |
| Figura 7: | Exemplo de meio poroso. | pag. 15 |
| Figura 8: | Esquema do processo RTM. | pag. 17 |
| Figura 9: | Equipamentos para o processo RTM. | pag. 17 |
| Figura 10: | Resumo do procedimento geral para solução de um problema CFD descrito pela ANSYS CFX®. | pag. 20 |
| Figura 11: | Tipos de malhas. | pag. 22 |
| Figura 12: | Tipos de elementos para uma malha. | pag. 23 |
| Figura 13: | Escoamento de massa de fluido pelo elemento de volume, δVC . | pag. 25 |
| Figura 14: | Fluxos de <i>momentum</i> de x através das superfícies do elemento de volume. | pag. 26 |
| Figura 15: | (a) Contorno do molde escolhido para as análises preliminares; (b) Molde estruturado com entrada e saída. | pag. 33 |
| Figura 16: | Molde para estudos de enchimento e reação de cura. | pag. 33 |
| Figura 17: | Região de retirada de dados para avaliação das malhas. | pag. 34 |
| Figura 18: | (a) Comparação das malhas M1, M2 e M3 em termos do Grau de Cura. (b) Comparação das malhas M1, M2 e M3 em termos de Temperatura. | pag. 35 |
| Figura 19: | Perfil de Temperatura do molde com aquecimento de 177°C com linhas latitude e longitudinal para cálculo do ΔT . | pag. 38 |

- Figura 20:** Tempo de (a) 112 s, (b) 180 s, (c) 240 s, (d) 12 min. pag. 39
- Figura 21:** Grau de cura atingido durante o enchimento do molde para velocidade de (a) 1,36 m/s e (b) 0,68 m/s. pag. 40
- Figura 22:** (a) Perfil de velocidade para o escoamento da resina durante o enchimento do molde; e (b) Retirada de dados de velocidade ao longo do eixo x. pag. 41
- Figura 23:** Gráfico de Velocidade ao longo do eixo x para diferentes porosidades ($\varepsilon = 0,4, 0,5$ e $0,6$). pag. 41
- Figura 24:** (a) Geometria A com entrada lateral e (b) Geometria B entrada superior central. pag. 42
- Figura 25:** Geometrias com pontos de injeção distribuídos (a) na região central superior e (b) e na região central lateral. pag. 43
- Figura 26:** Fração volumétrica de compósito para enchimento do molde com pontos de injeção de resina na região central lateral. pag. 44
- Figura 27:** Perfil de alfa no tempo de 120s na simulação de aquecimento de 177°C (a) na parede externa do molde (b) na parede externa do molde e na parede dos obstáculos. pag. 45
- Figura 28:** Perfil de alfa no tempo de 142,5s na simulação de aquecimento de 177°C (a) na parede externa do molde (b) na parede externa do molde e na parede dos obstáculos. pag. 46
- Figura 29:** Perfil de alfa no tempo de 170s na simulação de aquecimento de 177°C (a) na parede externa do molde (b) na parede externa do molde e na parede dos obstáculos. pag. 46
- Figura 30:** Perfil de alfa no tempo de 185s na simulação de aquecimento de 177°C (a) na parede externa do molde (b) na parede externa do molde e na parede dos obstáculos. pag. 47

ÍNDICE DE TABELAS

| | | |
|-------------------|--|---------|
| Tabela 1: | Resumo das principais propriedades de PRFV e suas vantagens nas aplicações. | pag. 4 |
| Tabela 2: | Vantagens comparativas entre resinas epóxi e resinas de poliéster insaturado. | pag. 6 |
| Tabela 3: | Principais tipos de resinas epóxi e suas características. | pag. 8 |
| Tabela 4: | Classificação das fibras de vidro e suas características. | pag. 9 |
| Tabela 5: | Dados do meio poroso. | pag. 24 |
| Tabela 6: | Valores dos parâmetros das Equações 22 e 23. | pag. 29 |
| Tabela 7: | Valores dos parâmetros das Equações 24 a 27. | pag. 30 |
| Tabela 8: | Classificação das malhas usadas para o teste de malha. | pag. 34 |
| Tabela 9: | Erros relativos da Temperatura e do Grau de Cura entre as malhas M2 e M3. | pag. 36 |
| Tabela 10: | As diferentes temperaturas aplicadas à parede do molde simples e sua influência no grau de cura (α). | pag. 37 |
| Tabela 11: | Valores de tempo computacional para as simulações de enchimento em geometrias com entrada lateral e entrada central. | pag. 43 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas

| | |
|--------|---|
| RRIM | <i>Reinforced Reaction Injection Molding</i> |
| RTM | <i>Resin Transfer Molding</i> |
| VOC | Compostos Orgânicos Voláteis |
| ABMACO | Associação Brasileira de Materiais Compósitos |
| SMC | <i>Sheet Molding Compound</i> |
| PRFV | Plástico Reforçado com Fibras de Vidro |
| PET | Tereftalato de Polietileno |
| PEAD | Polietileno de Alta Densidade |
| PEBD | Polietileno de Baixa Densidade |
| PEBDL | Polietileno de Baixa Densidade Linear |
| PVC | Cloretos de Polivinila |
| PP | Polipropileno |
| PS | Poliestireno |
| VC | Volume de controle |

Letras Latinas

| | |
|--------------|--|
| k' | Constante de velocidade de reação na temperatura T |
| E | Energia de Ativação |
| R | Constante Universal dos Gases |
| T | Temperatura Absoluta |
| A | Fator pré-exponencial ou de Frequência |
| v | Velocidade superficial/intersticial |
| \mathbf{v} | Vetor velocidade superficial/intersticial |
| p | Pressão |
| n | Ordem de reação |
| t | Tempo |
| S_M | Fonte de <i>momentum</i> |
| S_E | Fonte de calor |

| | |
|------------|---|
| K_{perm} | Permeabilidade |
| K_{loss} | Coefficiente de perda |
| k | Condutividade térmica |
| e | Energia |
| c_p | Capacidade calorífica |
| U | Energia de ativação para o fluido viscoso |
| D | Comprimento característico |
| C | Comprimento |
| H | Altura |
| E | Espessura |

Letras Gregas

| | |
|---------------|--------------------------------------|
| ρ | Densidade |
| μ | Viscosidade dinâmica |
| μ_0 | Constante 1 do modelo de viscosidade |
| α | Grau de cura |
| ε | Porosidade |
| κ | Constante 2 do modelo de viscosidade |
| ϕ | Fração volumétrica |
| Φ | Fluxo combinado de <i>momentum</i> |
| δ | Vetor unitário |
| τ | Tensor tensão cisalhante |
| π | Fluxo molecular de <i>momentum</i> |

Subscrito

| | |
|-----------|-----------------------------------|
| x, y, z | Coordenadas cartesianas (direção) |
| T | Matriz transposta |
| ef | Efetivo (a) |
| c | Compósito |
| f | Fibra |
| r | Resina |

Capítulo 1: Introdução

Existem diversos processos de fabricação de compósitos, que se dividem em dois tipos gerais: os de molde aberto e os de molde fechado. *Hand Lay-Up*, *Spray-up*, *Filament Winding*, fazem parte do primeiro grupo e, Moldagem por compressão, Pultrusão, *Reinforced Reaction Injection Molding (RRIM)*, *Resin Transfer Molding (RTM)*, *Vacuum Bag Molding*, *Vacuum Infusion Processing*, *Centrifugal Casting* e Laminação Contínua integram o último grupo. A escolha por um processo específico se dá após análise de alguns fatores como: tamanho do produto, necessidades do usuário, desempenho, complexidade da superfície, aparência, taxa de produção, volume total de produção, limitações econômicas, materiais, máquinas e montagem, equipamento e corpo de trabalhadores [1-4].

No entanto, os processos manuais e de moldes abertos têm sofrido significativa redução no mercado dos compósitos, uma vez que a tecnologia dos compósitos tem alcançado processos mais limpos e eficientes, incentivado por exigências ambientais e pela questão de sustentabilidade. Logo, está sendo feita a transição para os processos de molde fechado e, nesse sentido, encontra-se em destaque o RTM (*Resin Transfer Molding*), já que é um processo com melhor controle, com menos desperdício de material, que exige baixo investimento em equipamentos e oferece alta qualidade no acabamento, além de reduzir, consideravelmente, a emissão de compostos orgânicos voláteis (COVs) no ar.

Segundo a Associação Brasileira de Materiais Compósitos (ABMACO), a previsão para os próximos cinco anos é que os processos de molde aberto correspondam a apenas 35% do total dos processos de fabricação de compósitos. Em 2009, o processo RTM era responsável por apenas 10% do mercado, como ilustra a Figura 1. A tendência agora, por todos os motivos já discutidos acima, é que esse número cresça ainda mais ao longo dos próximos anos [6].

Estudar o processo RTM, que está em alta no mercado, em uma abordagem nova e que pode facilitar estudo e otimização de tal processo em uma ferramenta relativamente simples, configura-se como principal motivador do presente trabalho.

CONSUMO DE MATÉRIA-PRIMA POR PROCESSO - 2009

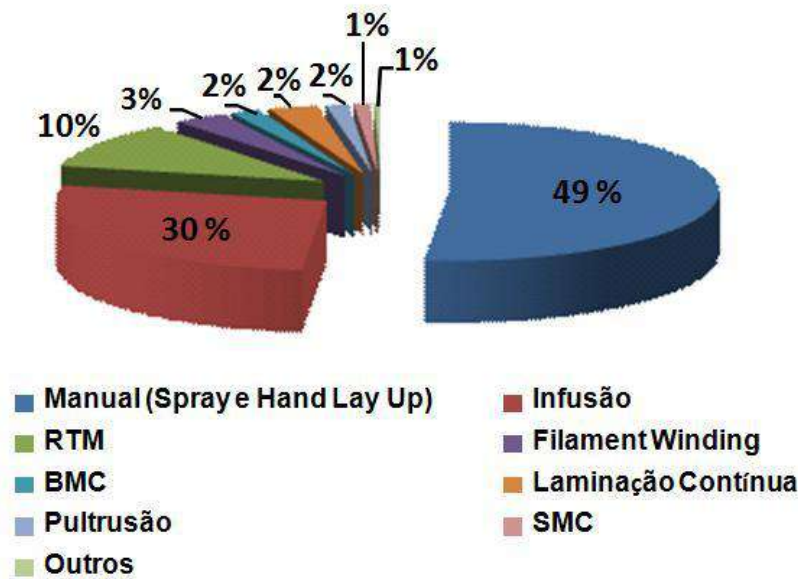


Figura1: Distribuição de consumo de matéria-prima por processos de fabricação de compósitos.

Fonte: ABMACO [6].

1.1. Objetivos

Os objetivos do presente trabalho podem ser citados da seguinte maneira:

- Objetivo Geral:

- Testar a viabilidade da abordagem de Fluidodinâmica Computacional (CFD) no processo de RTM, implementando-a no *software* ANSYS CFX[®] e, por meio dos resultados obtidos, verificar se os mesmos são coerentes com a física do processo.

- Objetivos Específicos

- Realizar simulações no ANSYS CFX para obter o perfil de velocidade e de cura do processo RTM, usando o sistema resina diglicidil éter bisfenol A e fibra de vidro classe E, analisando qualitativa e quantitativamente seus resultados.
- Fazer uma análise de sensibilidade do processo às variáveis físicas, como porosidade, e geométricas, como pontos de injeção no molde, para avaliar o ponto ótimo de entrada de resina para uma dada geometria.

1.2. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira:

- O Capítulo 1 aborda uma introdução sobre o tema, assim como os objetivos a serem alcançados e a forma como este trabalho foi desenvolvido.
- O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica dos trabalhos relacionados ao processo RTM, além de também apresentar alguns modelos disponíveis na literatura.
- O Capítulo 3 discorre sobre Fluidodinâmica Computacional (CFD) e modelagem matemática do processo RTM. Neste capítulo, descreve-se a formulação do modelo utilizado no presente trabalho.
- O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nas simulações numéricas, bem como as discussões a respeito destes resultados.
- O Capítulo 5 traz as principais conclusões obtidas e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2: Revisão da Literatura

Uma pesquisa bibliográfica foi realizada com a intenção de apresentar uma breve discussão sobre os tipos de resinas e fibras componentes de compósitos poliméricos, a cinética de cura e o escoamento em meio poroso. Além disso, foi estudado o processo de fabricação de compósitos chamado RTM, bem como suas vantagens e desvantagens.

2.1. Compósitos

Compósito pode ser definido como um material composto por um reforço envolvido por uma matriz cerâmica, metálica ou polimérica. A matriz, um material polimérico, é a fase contínua do compósito e responsável por dar forma à estrutura do compósito, bem como transmitir às fibras, as forças que são impostas externamente. Já o reforço, as fibras, neste caso, como próprio nome diz, confere rigidez e força aos compósitos, além de outras propriedades mecânicas importantes [5,7].

Há dois tipos de material compósito: o avançado e o de engenharia. Os materiais compósitos ditos avançados são, por exemplo, peças usadas em aviões. São grandes, de alta *performance* e, portanto, são caros e de baixa produção. Por outro lado, os de engenharia, também chamados de plástico reforçado com fibras de vidro (PRFV), são pequenos, baratos, com produção larga e de grande escala, sendo aplicados desde o casco de barcos a chuveiros. No caso dos PRFV, além da resina e da fibra, podem ser adicionados ainda, cargas (*fillers*), aditivos e *core materials*, a fim de modificar e melhorar o produto final. A Tabela 1 resume as principais propriedades dos PRFV.

Tabela 1: Resumo das principais propriedades de PRFV e suas vantagens nas aplicações.

Adaptado de *American Composites Manufactures Association* [5]

Propriedades de PRFV

Baixo peso molecular: importante, principalmente para as peças de avião, uma vez que reduz o consumo de combustível e aumenta sua velocidade.

Alta resistência/força: compósitos podem ser projetados para ter força/resistência em uma só direção.

Alta razão força/peso: compósitos têm a maior razão força-peso dos materiais da atualidade, por isso, são utilizados para construção de aeronaves.

Resistência à corrosão: resistem ao tempo e mudanças de temperatura, permitindo o

uso em lugares onde produtos químicos são manipulados e estocados.

Alta resistência a impactos: por absorverem impactos de balas e destroços de explosões, são usados em coletes à prova de balas, painéis para proteger aviões, edifícios e veículos militares.

Flexibilidade de design: podem ser modelados em formas complexas, imitando texturas, aplicado, por exemplo, em *design* de barcos, a custos menores.

Não condutores: os compósitos não conduzem eletricidade, portanto, podem ser aplicados em postes elétricos e painéis eletrônicos. Podem-se ter compósitos condutores, caso haja necessidade de condutividade elétrica.

Não magnéticos: usados em equipamentos de ressonância magnética de hospitais, por exemplo, além de serem utilizados nos vergalhões de paredes e chão de salas hospitalares.

Invisíveis a radares: interessante para uso militar.

Baixa condutividade térmica: não conduzem calor facilmente, portanto usados em portas, painéis e janelas de edifícios como proteção extra a clima severo.

Durável: estruturas feitas de compósitos têm vida longa e precisam de pouca manutenção, podem durar mais de meio século.

As propriedades mecânicas e composição de um PRFV podem ser personalizadas para um determinado uso. O tipo e a quantidade de materiais selecionados, bem como a escolha do processo de fabricação do produto, afetam diretamente as propriedades mecânicas e o desempenho deste. Para fabricar um determinado compósito polimérico, para um uso específico, há de considerar alguns fatores como:

- Tipo de reforço de fibra;
- Percentual volumétrico de fibra (fração volumétrica de fibra);
- Orientação da fibra (0° , 90° , $\pm 45^\circ$ ou uma combinação destes);
- Tipo de resina;
- Custo do produto;
- Volume de produção;
- Processo de manufatura;
- Condições de uso.

2.1.1. Resinas

Resinas são materiais poliméricos que ainda não estão na forma final. A maioria é líquida, mas existem algumas que são sólidas e fundem na hora da moldagem. Podemos agrupá-las em duas categorias: resinas termoplásticas e termorrígidas.

As resinas termoplásticas não têm ligações entre as moléculas, chamadas de *crosslinkings*, são modeladas enquanto estão em um estado semifluido aquecido e se tornam rígidas após o resfriamento. Por ficarem fluidas com aumento de temperatura, podem ser remodeladas, i.e., o processo é reversível. Tereftalato de polietileno (PET), polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD) e polietileno de baixa densidade linear (PEBDL), cloretos de polivinila (PVC), polipropileno (PP) e poliestireno (PS) são alguns exemplos de resinas termoplásticas.

As resinas termorrígidas são geralmente líquidas ou de baixo ponto de fusão, têm *crosslinkings* e, uma vez modeladas, não fundem com o aumento da temperatura, pois a temperatura de fusão está muito acima da temperatura de degradação do material. Não podem ser recicladas e nem reprocessadas, causando preocupações ambientais e fazendo com que se busquem soluções para isso. Pode-se citar alguns exemplos de resinas termorrígidas, como as fenólicas, epóxi, vinil éster, poliéster, poliuretano.

A resina escolhida como matriz do compósito do presente trabalho é a epóxi à base de Bisfenol A porque, embora seja cara por ser uma resina nobre, é a segunda mais usada dentre as resinas termorrígidas, aplicada em uma vasta gama de produtos, especialmente os de alta *performance*. Pode ter sua estrutura projetada e formulada com diferentes materiais para alcançar características específicas de desempenho, além de ser compatível com a maioria dos processos de fabricação de compósitos. A Tabela 2 mostra as vantagens comparativas com a resina de poliéster, a resina mais usada do grupo das termorrígidas.

Tabela 2: Vantagens comparativas entre resinas epóxi e resinas de poliéster insaturado

Fonte: Brent, 2008 [7]

| Propriedades | Epóxi | Poliésterinsaturado |
|-----------------------------|-------------------|----------------------------|
| Adesão | Excelente | Boa |
| Resistência ao cisalhamento | Excelente | Boa |
| Força/Rigidez | Excelente | Boa |
| Resistência à deformação | Moderada para boa | Moderada |

| | | |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| Estabilidade térmica | Boa | Moderada |
| Resistencia Elétrica | Excelente | Moderada |
| Resistência à absorção de água | Moderada | Baixa para moderada |
| Resistência a solventes | Boa | Baixa para moderada |
| Resistência a UV | Baixa para moderada | Baixa para moderada |
| Resistência a flamabilidade | Baixa para moderada | Baixa para moderada |
| Emissão de odores | Menor | Maior |
| Custo | Médio | Baixo |

A palavra epóxi vem do grego "EP" (sobre ou entre) e do inglês "OXI" (oxigênio) e significa, literalmente, "oxigênio entre carbonos". Em um sentido geral, o termo refere-se a um grupo constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono, como mostra a Figura 2a. Se o anel epóxi está ligado a um carbono, que por sua vez está ligado a um grupo orgânico qualquer dá origem a uma combinação chamada grupo glicidil (Figura 2b).

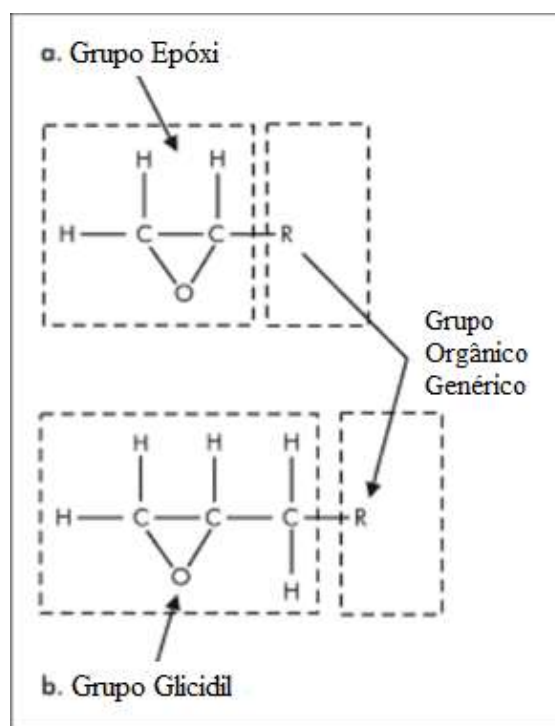


Figura 2: a) grupo epóxi; b) grupo glicidil.

Fonte: Brent, 2008 [7]

A resina epóxi pode ser separada em duas partes: em uma ponta, tem-se o anel epoxídico e na outra, o resto da cadeia carbônica genérica chamada de R. Porém, para uma visão mais completa da natureza da resina epóxi, há de se levar em consideração o conjunto, i.e., o anel e a cadeia R.

Existem três principais métodos de síntese de resina epóxi:

1. Pela dehidrohalogenação da cloridrina obtida pela reação da epiclорidrina com Di ou Polihidroxi ou qualquer outra molécula contendo hidrogênios ativos;
2. Pela dehidrohalogenação de cloridrininas obtidas por outros mecanismos diferentes do primeiro;
3. Pela reação de olefinas com compostos contendo oxigênio, tais como peróxidos e perácidos.

Eles consistem, basicamente, em adicionar o anel epóxi no final da cadeia polimérica ou em criar um polímero contendo o anel epóxi. Porém, essas reações de síntese são feitas pelos fabricantes de resina e não apresentam quaisquer ligações com a reação química da cura e o processo de moldagem de compósitos poliméricos.

A Tabela 3 mostra os principais tipos de resina epóxi comercializadas e suas características.

Tabela 3. Principais tipos de resinas epóxi e suas características

Adaptado de SILAEX [8]

| Tipos de Resina Epóxi | Características |
|--|---|
| A base de Bisfenol A | São as mais utilizadas, versáteis, de menor custo, líquidas, sólidas ou semi-sólidas. |
| A base de Bisfenol F e/ou Novolac | Maior <i>crosslink</i> , melhor desempenho mecânico, químico e térmico, principalmente quando curadas com anidridos ou aminas aromáticas. |
| Epóxi Bromadas | Auto extingüível. |
| Epóxi Flexíveis | Longas cadeias lineares, pouco ramificadas, de baixa reatividade, usadas como flexibilizantes reativos em outras resinas. |

2.1.2. Reforços de Fibra

As propriedades mecânicas dos compósitos PRFV são dependentes do tipo, da quantidade, do comprimento e da orientação da fibra escolhida para uma determinada aplicação. Pelo fato dos reforços permitirem que sua arquitetura seja modelada para um determinado projeto e uso, o desempenho do compósito é otimizado e os custos e gastos com esses materiais são reduzidos.

A maior parte dos reforços, tanto para resinas termoplásticas quanto para as termorrígidas, recebem um tratamento na sua superfície, seja no processo de fabricação ou em uma etapa subsequente. Alguns materiais, como: aglutinantes de resina e lubrificantes são adicionados às fibras durante sua produção, com objetivo de mantê-las unidas e protegidas da degradação causada pelo processo de abrasão. Há, ainda, adição de metais e óxidos metálicos nos reforços especializados de alta resistência usados em altas temperaturas (peças de aeronave, por exemplo).

Reforços de fibra podem ser naturais e sintéticos, sendo os últimos mais comercializados que os primeiros. São exemplos de reforços de fibra mais comuns: fibra de vidro, de carbono e de aramida. A fibra de vidro além do baixo custo confere ótimas propriedades, é a mais usada e, junto com a resina epóxi forma um sistema de compósito muito estudado, e, portanto, objeto deste trabalho. A Tabela 4 mostra os diferentes tipos de fibras de vidro e suas características, sendo que a fibra de vidro do tipo E (aluminoborosilicato) foi escolhida para o presente trabalho.

Tabela 4: Classificação das fibras de vidro e suas características.

Adaptado de *American Composites Manufactures Association* [5]

| Tipo de fibra de vidro | Características |
|-------------------------------|--|
| E | O tipo mais usado; alta propriedade de isolamento elétrico; baixa suscetibilidade a umidade e elevadas propriedades mecânicas. |
| S | Alta resistência/força; resistência ao calor. |
| C | Alta resistência à corrosão e ataques químicos. |
| A | Resistente a químicos, especialmente os alcalinos. |

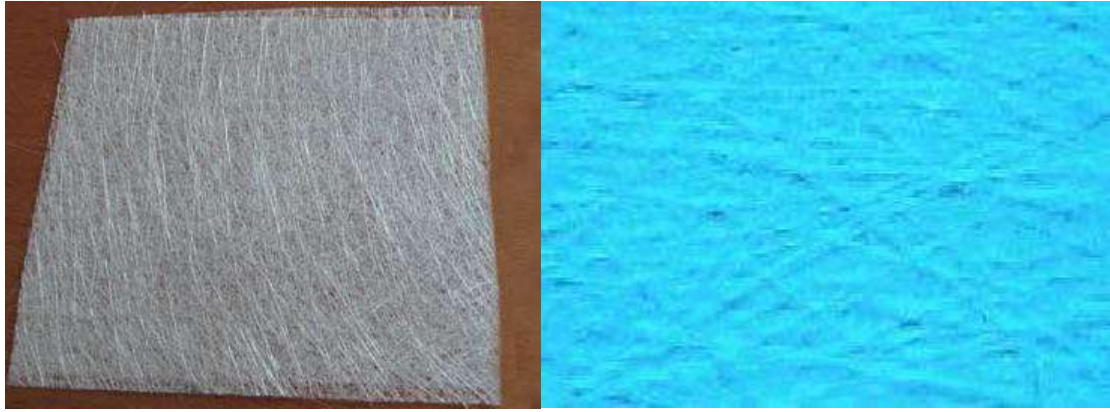


Figura 3: Exemplos de fibra de vidro de classe E e C, orientados randomicamente.

Fonte: Pamplona, 2006 e Segante, 2010 [9, 10].

As fibras de vidro usadas como reforços de compósitos têm diâmetro na faixa de 9 a 23 μm , e possuem boa resistência a impactos, embora sejam mais pesadas que as fibras de carbono e aramida. Devido à pequena dimensão delas, é necessário um tratamento especial, já que rigidez é um ponto crítico. Apesar disso, são amplamente utilizadas na fabricação de compósitos por terem baixo custo e por conferirem a eles boas propriedades isolantes e térmicas, além de serem transparentes a radiação da frequência de rádio, são aplicados em antenas de radar.

2.2. Cinética de cura

A cura de uma resina termorrígida é um processo complexo, regido por uma reação química exotérmica que promove mudanças químicas e físicas irreversíveis em uma determinada formulação resina/endurecedor, sob a ação de calor e variadas condições de pressão e vácuo. Essas mudanças podem ser acompanhadas macroscopicamente devido a dois fenômenos: gelificação e vitrificação. O primeiro diz respeito à formação de uma rede de alto peso molecular e o sistema passa de um líquido viscoso para um gel elástico. O segundo corresponde à formação de um sólido vítreo a partir de um monômero, quando a reação química é resfriada durante o ciclo de cura. Vale lembrar que a resina não atinge o estado de cura total.

Há dois mecanismos no que se refere à cinética da reação de cura: a de ordem n e a autocatalítica. Para a resina diglicidil éter bisfenol A, usada no presente trabalho, será utilizada a cinética de cura de ordem n , por ser mais simples de modelar e pelo fato, em geral,

dos sistemas epoxídicos serem muito bem modelados por essa cinética. No entanto, a cinética autocatalítica também poderia ser utilizada, uma vez que não existem regras que determinem casos para cada tipo de cinética [11]. Para sistemas que obedecem à cinética de cura de ordem n , a taxa de conversão é função da concentração do reagente que é consumido no decorrer da Equação 1:

$$f(\alpha) = \frac{d\alpha}{dt} = k'(T)(1 - \alpha)^n \quad (1)$$

em que α é o grau de cura, também definido como a concentração dos reagentes consumidos no tempo t , e n é a ordem da reação.

Como a força-motriz da reação de cura da maioria das resinas termorrígidas, incluindo a epóxi, é a temperatura, pode-se considerar que esta ocorre segundo a Equação de Arrhenius [11], dado por:

$$k' = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

onde k (s^{-1}) é a constante de velocidade da reação, E (J/mol) é a energia de ativação, R (J/mol.K) é a constante universal dos gases, T (K) é a temperatura absoluta e A (s^{-1}) é o fator pré-exponencial ou de frequência.

A reação de reticulação da resina epóxi é baseada na abertura do anel epoxídico por um grupo reativo, chamado endurecedor, contendo, tipicamente, dois grupos amínicos, conforme Figura 4. O Nitrogênio do grupo amínico (NH_2) é o responsável pela abertura do anel epoxídico, enquanto o Hidrogênio, parcialmente positivo, faz uma ligação com o Oxigênio que pertencia ao anel. É importante ressaltar que a nova ligação Carbono-Nitrogênio é a crítica para a reação de reticulação. O mecanismo dessa reação está ilustrado na Figura 5.

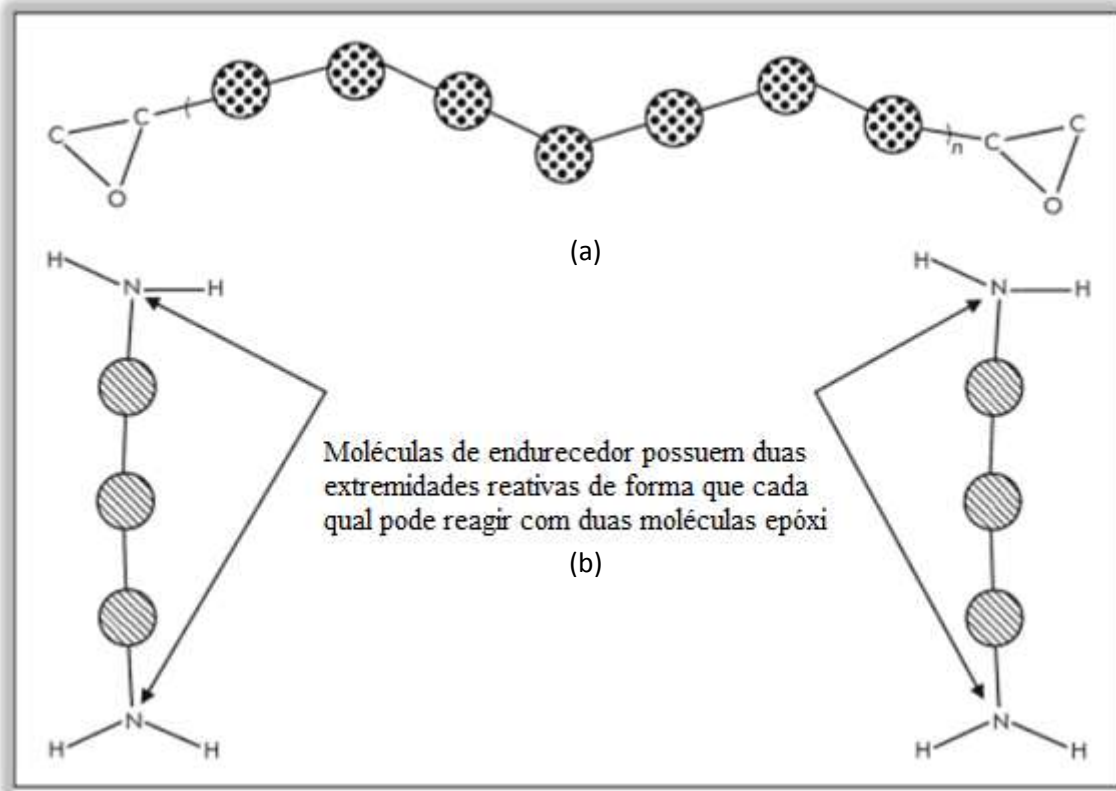


Figura 4: a) Uma molécula típica de epóxi e b) um típico endurecedor amínico.

Fonte: Brent, 2008 [7]

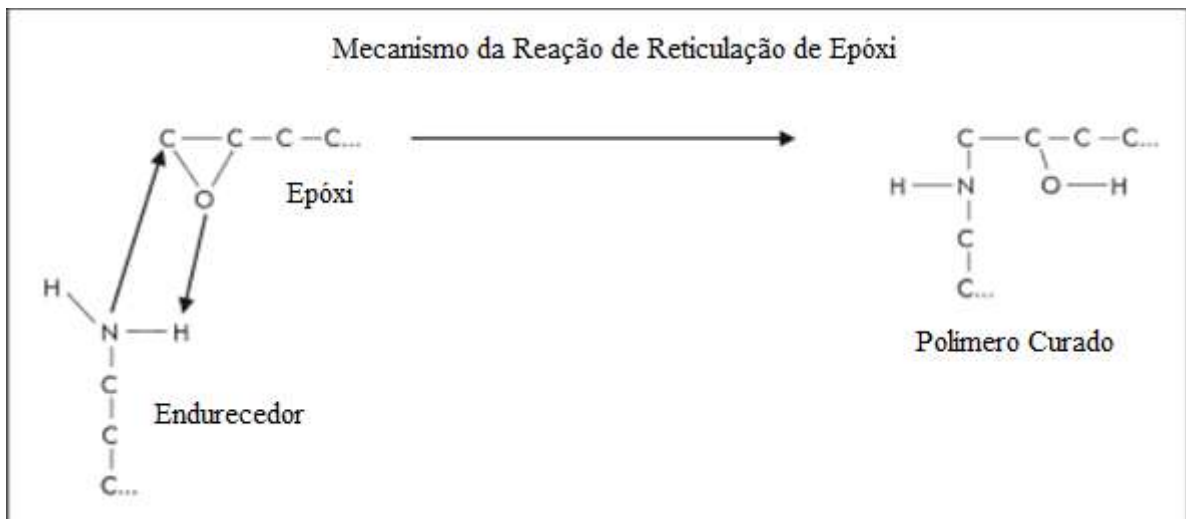


Figura 5: Mecanismo da cura.

Fonte: Brent, 2008 [7]

A taxa de cura pode ser controlada através da seleção adequada de endurecedores e/ou sistemas de catalisador. Geralmente, resinas epóxi são curadas pela adição de um endurecedor

anidrido contendo amina. A quantidade e o tipo de endurecedor produzem um perfil de cura diferente e influenciam nas propriedades finais do compósito.

As resinas epóxi podem ser curadas em temperatura ambiente, dependendo do endurecedor, mas para acelerar o processo, aquecemos o molde. Existem resinas que possuem maiores dificuldades de realizar a reação de reticulação, estando esta dificuldade relacionada com o tipo da resina e do catalisador. Para estas resinas a temperatura ideal para a cura está em torno de 177°C [7, 12].

2.3. Enchimento do Molde

O enchimento do molde consiste no escoamento da resina através de um leito de fibra, que pode ser estudado tanto em escala microscópica quanto em escala macroscópica. A abordagem microscópica é mais complexa, uma vez que envolve o campo de fluxo local entre os filamentos de fibra, enquanto que a abordagem macroscópica é considerada como um processo de escoamento em meio poroso.

A etapa de enchimento do molde no processo RTM é de suma importância, uma vez que interfere diretamente nas propriedades mecânicas do produto final, que são determinadas de acordo com a finalidade de uso deste compósito.

Para alcançar as propriedades mecânicas desejadas, é essencial que, durante o enchimento, toda a fibra seja molhada completamente pela resina líquida que escoar, fazendo com que o número de espaços vazios seja reduzido ao máximo. Um escoamento inapropriado pode acarretar em um longo tempo de enchimento, levar à formação de pontos secos, criar uma alta pressão de moldagem, prejudicar a estrutura da fibra e até deformá-la em regiões próximas à entrada da resina.

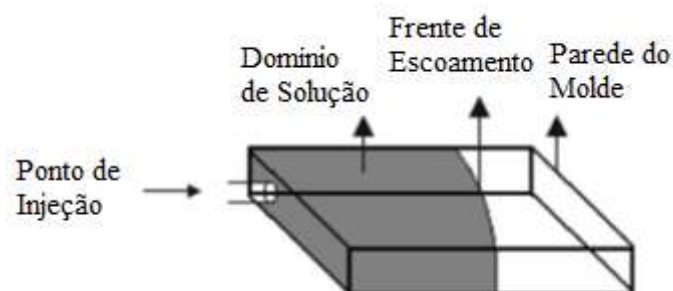


Figura 6: Vista esquemática do escoamento.

Fonte: Shojaei, 2002 [13].

A fluidodinâmica da etapa de enchimento de um molde de RTM é fortemente afetada pela geometria do molde, propriedades do material e parâmetros do processo. As propriedades do material incluem a reologia da resina e arquitetura da fibra, enquanto que os parâmetros de processo envolvem as estratégias de injeção como, por exemplo, a injeção em um ponto único e a injeção distribuída, a temperatura e a vazão da resina na entrada [13].

A otimização desses parâmetros possui grande relevância no custo-desempenho do processo RTM. A minimização do tempo de enchimento do molde permite uma redução considerável nos custos totais de processamento, podendo ser alcançado através do aumento da velocidade de injeção. No entanto, este aumento da vazão de injeção deve ser realizado de forma cuidadosa devido aos problemas anteriormente mencionados, não devendo exceder o valor crítico de velocidade de impregnação da fibra, que pode ser estimado [14].

2.4. Escoamento em Meio Poroso

Bear e Bachmat [15] definem meio poroso como sendo a parte do domínio ocupada por uma fase sólida permanente, chamada matriz sólida; a parte remanescente é conhecida como espaço vazio, conforme evidenciado na Figura 7.

Ainda segundo [15], uma fase pode ser definida como sendo uma porção quimicamente homogênea do sistema e que se encontra separada de outra fase por uma espécie de limite físico definido – uma interface entre fases.

A fase ainda pode ser entendida pela ideia de componente, uma espécie ou conjunto de espécies químicas homogêneas identificáveis, em que o número de componentes necessários para se descrever uma fase é dado pelo modelo conceitual, ou seja, dependendo somente dos processos físicos para modelá-la [16].

Portanto, fica claro que, em um escoamento em meio poroso, o espaço vazio (volume de poros) é que será ocupado, ou por outra fase, podendo esta ser gasosa, um único líquido ou uma mistura de líquidos.

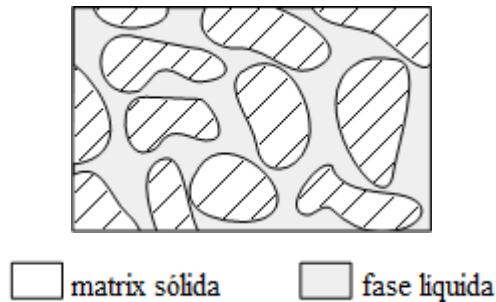


Figura 7: Exemplo de meio poroso.

Fonte: adaptado de Bastian, 1999 [16].

Para correta modelagem do fenômeno do escoamento em meio poroso algumas restrições devem ser impostas no que diz respeito à geometria do meio poroso [16]:

- O espaço vazio do meio poroso deve ser conexo. Isto quer dizer que, ao tomarmos quaisquer 2 (dois) pontos pertencentes ao domínio, estes podem ser conectados por uma curva que se encontra completamente dentro do mesmo;
- As dimensões do espaço vazio devem ser muito maiores do que o chamado livre caminho médio das moléculas fluidas, ou seja, a distância média entre sucessivas colisões com outras moléculas;
- As dimensões do espaço vazio devem ser pequenas o suficiente para que o escoamento possa ser controlado, nas interfaces sólido-líquido, por forças adesivas, e nas interfaces líquido-líquido, por forças coesivas.

Outro ponto a ser levado diz respeito à isotropia do processo. Caso a propriedade em estudo varie com a direção do escoamento, esta é dita anisotrópica. Caso contrário, isotrópica.

Segundo Chung [17], o escoamento de um único fluido newtoniano através de um meio poroso pode ser equacionado por Navier-Stokes, que já contempla a abordagem do contínuo, base para aplicação das equações diferenciais de conservação.

Pela teoria do contínuo adota-se a hipótese de que a matéria é uma substância hipotética e que é contínua em todo o domínio que ocupa, podendo ser descrita por uma série de variáveis que são funções contínuas e diferenciáveis no espaço e no tempo.

As vantagens do modelo contínuo para o meio poroso são [15]:

- Não é necessário saber a exata configuração das interfaces;
- O processo pode ser descrito em termos de quantidades diferenciáveis, sendo resolvido por métodos matemáticos analíticos em casos simplificados e numéricos em casos mais complexos.

- As quantidades macroscópicas mencionadas acima são mensuráveis.

Contudo, vale ressaltar que a influência macroscópica dessas quantidades sobre o meio poroso se encontra sob a forma de coeficientes empíricos, e para avaliar sua correta estrutura e dependência faz-se necessário o uso de modelos estatísticos e determinação experimental.

2.5. O processo *Resin Transfer Molding* (RTM)

Resin Transfer Molding (RTM) é um processo de produção de médio porte de compósitos, do tipo molde fechado, que oferece produtos dimensionalmente precisos e de alta qualidade de acabamento, injetando resinas termorrígidas sob baixa pressão na cavidade de um molde contendo reforços de fibras, que podem ser de vários tipos e formas.

O processo RTM apresenta vantagens como: baixa emissão de gases por ser um processo fechado, alta qualidade de acabamento pela superfície do molde, produção de peças de 5 a 20 vezes mais rápidas que os processos de molde aberto, além de permitir moldes complexos. As desvantagens são: necessidade de grandes volumes de produção para compensar o alto custo dos equipamentos, quando comparados às técnicas de molde aberto, limitação de materiais de reforço devido ao fluxo e saturação de resina pelas fibras, e tamanho das peças limitado pelo molde.

A Figura 8 mostra o processo RTM que pode ser descrito da seguinte maneira: o molde é coberto por um gel convencional, quando necessário. Depois, o reforço de fibra é posicionado entre duas superfícies de molde que se encaixam, onde uma é a fêmea e outra é a macho. Então, o molde é fechado e vedado, e a resina termorrígida é injetada sob pressão na cavidade do molde, através de uma ou mais portas de injeção. A resina é injetada para preencher todos os vazios dentro do conjunto de moldes e, portanto, penetra e molha todas as superfícies do reforço de fibra, formando as ligações cruzadas e curando a peça. Às vezes, utiliza-se vácuo para aumentar o fluxo de resina e reduzir formação de vazios, assim como aquecimento nas paredes dos moldes já que, em alguns casos, o calor da reação não é suficiente para uma cura apropriada.

Todas as operações do ciclo de processo RTM podem ser divididas em duas etapas: operações de molde aberto, que incluem limpeza do molde, aplicação do desmoldante, pulverização de gel de revestimento, colocação da fibra e acabamento da peça, e a outra é operação de molde fechado, incluindo enchimento do molde e a cura. Embora o processo com

o molde aberto demande mais tempo, é o fechado que controla o ciclo de tempo, *performance* da parte produzida e o custo.

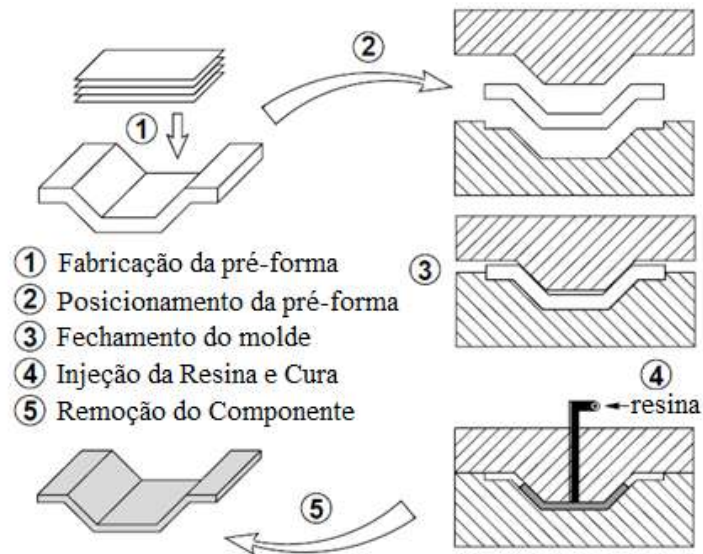


Figura 8: Esquema do processo RTM.

Fonte: Thermoset Cure Kinetics and Rheology [12].

Embora seja uma técnica empregada para produção de compósitos há mais de 20 anos, a automação e a otimização do RTM, fizeram com que as simulações e modelagem do processo se tornassem uma ferramenta efetiva de redução de custo, ajudando a obter informações para o projeto do equipamento e predição das condições de processo, visto que a otimização envolve muitos parâmetros e fazê-la de forma experimental demandaria excessivo tempo e um custo elevado, principalmente para partes complexas, onde o molde é caro e não se pode confiar em técnicas de tentativas e erros. A Figura 9 mostra equipamentos de RTM para utilização em escala industrial.



Figura 9: Equipamentos para o processo RTM.

Fonte: JOACHIM KEIM GmbH [18].

As variáveis comuns para otimização do RTM são: localização das entradas, número de entradas, localização das camadas que permite maior permeabilidade da resina, pressão de injeção, temperatura do molde, geometria e material do equipamento. Em especial, deve-se pensar na redução do tempo de escoamento, pois é um fator importante no ciclo de tempo total e no custo do processo RTM (conhecido por ter um ciclo longo de produção) e na otimização da cura, já que o tempo de cura representa 80% do ciclo de tempo total.

No estágio de enchimento, o fluxo de resina e o perfil de escoamento podem ser modelados e controlados baseados na permeabilidade da pré-forma, na porosidade e viscosidade da resina. E uma vez terminado o enchimento, deve-se controlar a cura a fim de obter uma boa qualidade do compósito. Além da parte econômica de redução de custo, a otimização da cura tem os seguintes objetivos:

- Alcançar uma alta taxa de cura (conversão da resina);
- Minimizar o *stress* residual acumulado, deformação induzida pela temperatura não uniforme no interior do molde e conversão de resina que o compósito sofre durante o processo exotérmico de cura;
- Controlar a temperatura do compósito para não atingir a temperatura de degradação do mesmo;
- Minimizar o tempo total requerido para completar a cura.

O ciclo de tempo pode ser reduzido através do aumento da velocidade de injeção e redução do ciclo de cura, que pode ser obtido através de aquecimento na parede do molde, reduzindo a viscosidade da resina durante o enchimento e catalisando a cinética polimérica de cura. Considerando o equipamento, o processo de injeção no RTM é conduzido, geralmente, a uma velocidade de injeção constante com bombas de injeção para garantir tempo de enchimento certo e taxas de produção. No entanto, um limite de pressão é definido para evitar abertura do molde ou lavagem da pré-forma de fibra.

Quando produzidas estruturas largas de compósitos ou compósitos com alta porcentagem de fibra, o tempo de enchimento pode ser muito longo favorecendo uma cura não uniforme. Como solução podemos aquecer a parede do molde e Antonnuci *et al.* propõe variação da temperatura da parede para controle da cura.

No presente trabalho há a preocupação com a otimização dos seguintes parâmetros: posição da(s) entrada(s) de injeção de resina, temperatura das paredes do molde, porosidade da pré-forma e o tempo para atingir uma taxa de cura de 99%.

Capítulo 3: Fluidodinâmica Computacional (CFD) e Modelagem Matemática

Este capítulo é responsável por apresentar aspectos relacionados à Fluidodinâmica Computacional (CFD) e uma descrição da formulação matemática utilizada no presente trabalho.

3.1. Fluidodinâmica Computacional (CFD)

3.1.1. Definição e Metodologia

A Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD), por definição genérica, é a análise e a simulação numérica de processos físicos e/ou químicos que envolvem escoamento de fluidos, com ou sem troca de calor e massa. Tem se tornado cada vez mais uma área de grande interesse e uma ferramenta eficaz para a solução de muitos problemas. CFD é dedicado para a resolução de equações fundamentais diferenciais não lineares que descrevem fluxo de fluidos, transferência de calor e massa, e da turbulência por via computacional. O processo depende de alta capacidade de processamento para resolver diversas expressões matemáticas seguindo uma abordagem numérica de discretização usando malhas computacionais.

Malhas são construídas para simular blocos finitos do espaço físico, dividindo-o em pequenos elementos discretos. Suas formas podem ser quadrilaterais, triangulares, hexaédricas, tetraédricas ou uma combinação destes elementos.

Para a resolução de um caso é preciso seguir uma sequência lógica de passos. Como pode ser visto na Figura 10, o procedimento de solução em CFD consiste nas seguintes etapas: criação da geometria/malha, definição da física do modelo, resolução do problema de CFD e visualização dos resultados.

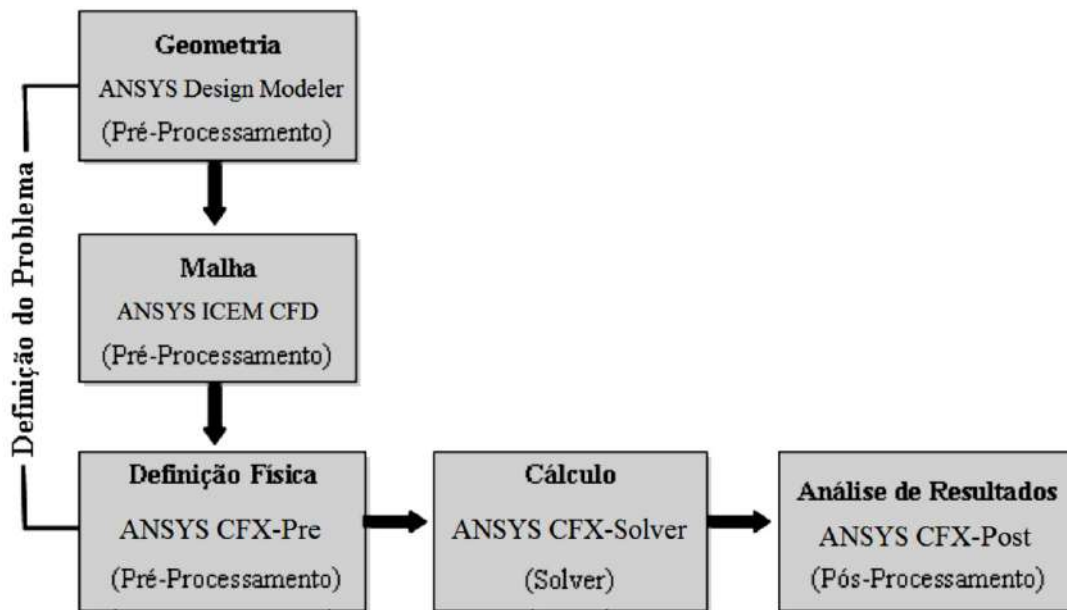


Figura 10: Resumo do procedimento geral para solução de um problema CFD descrito pela ANSYS.

Fonte: ANSYS CFX [20].

Como CFD fornece uma simulação numérica do escoamento, erros podem ocorrer, desviando o resultado numérico do resultado exato, o que faz com que a solução numérica tenha pouca ou nenhuma representatividade quando comparada com a realidade física. Esses desvios podem estar associados a [19]:

- Erros de arredondamento (devido ao arredondamento de dízimas periódicas ou números reais com infinitas casas decimais em operações matemáticas);
- Erros de discretização (relacionado à malha computacional utilizada);
- Erros de modelagem (provenientes de simplificações do modelo, condições de contorno aproximadas ou fenômeno físico representado por modelo não adequado);
- Erros de convergência numérica.

No entanto, a técnica de CFD apresenta como vantagem o fato da modificação dos parâmetros dos modelos utilizados, assim como um melhor ajuste das condições de contorno e geometria, podendo, em muitos casos, substituir a parte experimental.

Um estudo em CFD começa com a análise do problema com o intuito de identificar as variáveis relevantes no processo, além dos limites de estudo do problema físico. A etapa posterior consiste em modelar matematicamente o problema físico, expressando-o por meio das leis de conservação de massa, quantidade de movimento e energia.

Após a etapa de modelagem matemática, deve-se definir o domínio da simulação, bem como sua discretização. A discretização de um domínio consiste em dividi-lo em um número

finito de pontos, onde serão aplicadas as equações, possibilitando a solução numérica do problema, uma vez que esta não pode ser obtida sobre uma região contínua. É importante ressaltar que esses pontos devem ser adequadamente distribuídos no domínio para permitir a obtenção de uma solução representativa do escoamento. A etapa de discretização do domínio espacial é também chamada de geração de malha.

São introduzidas, então, as condições de contorno do problema, bem como suas condições iniciais, propriedades físicas dos fluidos e parâmetros do escoamento. O componente que soluciona o problema de CFD é chamado de Solver pelo CFX e usa o método dos volumes finitos. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são integradas em cada volume de controle e, utilizando o Teorema de Gauss, estas são convertidas em equações algébricas através de um processo de discretização. As equações algébricas devem assim ser resolvidas no domínio discreto. Esta é uma etapa numérica de solução do sistema linear através de um método apropriado, como Gauss-Seidel, GMRES, Gradiente Conjugado, entre outros. A solução obtida é, então, analisada e interpretada através do CFX-Post, que é um componente usado para visualizar e apresentar os resultados, como por exemplo, geometria e volumes de controle, vetores mostrando a direção e magnitude de fluxo, variação de variáveis escalares, entre outras ferramentas.

3.1.2. Geometria e Malha

A criação da geometria é o primeiro passo do procedimento de resolução de um problema em CFD, conforme visto anteriormente na Figura 10. Esta geometria é o domínio da simulação, local onde será produzida uma malha para permitir a aplicação da física do problema. As etapas para a criação da geometria e, posteriormente, da malha, são:

- Definição da geometria da região de interesse;
- A criação de regiões sólidas e nomes de superfície de fronteira;
- Definição de propriedades para a malha.

A malha, também chamada de *grid*, é a representação discreta do domínio geométrico do problema e consiste em um conjunto de elementos onde as equações são resolvidas. A solução das equações que compõem o sistema em cada elemento da malha é utilizada como condição de contorno para os elementos vizinhos. Por este motivo, é de extrema importância a utilização da malha apropriada, com o refinamento adequado.

A quantidade de pontos discretos da malha determina, de forma proporcional, o grau de refinamento desta, ou seja, quanto maior o número de pontos, mais refinada é a malha. No entanto, quanto maior o grau de refinamento da malha, maior é o esforço computacional, acarretando em um tempo maior para a realização das simulações. Cabe ressaltar que, existe um número mínimo de nós, no qual os resultados numéricos não variam significativamente, ou seja, fornecem soluções aceitáveis frente a malhas ainda mais refinadas. Por isto, é essencial fazer o teste de malha com o intuito de encontrar uma que seja refinada o suficiente para fornecer uma solução próxima à exata, com o desvio dentro de um limite de tolerância aceitável (5%).

O tipo de malha (Figura 11) depende da geometria do domínio de simulação e pode ser classificada em três tipos:

- Malhas Estruturadas: apresentam regularidade de distribuição espacial dos seus pontos, como por exemplo, as malhas de elementos hexaédricos. Além disso, podem ser classificadas como uniformes (muito utilizadas em geometrias simples) e não-uniformes.
- Malhas Não-estruturadas: caracterizadas pela ausência de regularidade na distribuição espacial dos pontos e podem assumir formatos diferentes, como triângulos, tetraedros, prismas e pirâmides.
- Malhas Híbridas: empregam os dois tipos de malha citados acima.

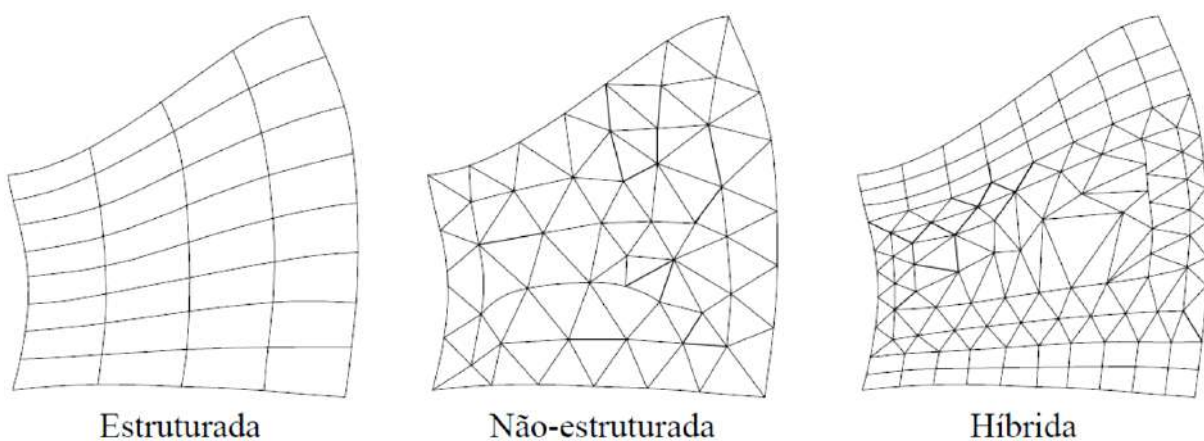


Figura 11: Tipos de malhas.

Fonte: Santos, 2010 [26].



Figura 12: Tipos de elementos para uma malha.

Fonte: Anzai, 2010 [27]

3.2. Modelagem Matemática

Para o software ANSYS CFX[®], o escoamento em meio poroso pode ser definido por um domínio poroso acoplado a um modelo de perda de *momentum*. Nesse caso, a porosidade modifica todos os termos das equações de transporte. Este modelo é uma generalização das equações de Navier-Stokes e da Lei de Darcy para meios porosos e considera ambos os termos de advecção e difusão. Ele é mais comumente utilizado em domínios de geometria complexa, como barras e feixe de tubos [20].

Esta foi a abordagem utilizada no presente trabalho, no que se refere ao estudo de escoamento em meio poroso, dadas às simplicidades da geometria estudada e do modelo. A permeabilidade do meio foi considerada isotrópica, conforme Equações 3, 4 e 5.

$$S_{M,x} = \frac{-\mu}{K_{perm}} v_x - K_{loss} \frac{\rho}{2} |\mathbf{v}| v_x \quad (3)$$

$$S_{M,y} = \frac{-\mu}{K_{perm}} v_y - K_{loss} \frac{\rho}{2} |\mathbf{v}| v_y \quad (4)$$

$$S_{M,z} = \frac{-\mu}{K_{perm}} v_z - K_{loss} \frac{\rho}{2} |\mathbf{v}| v_z \quad (5)$$

sendo S_M = fonte de *momentum*, μ = viscosidade dinâmica, K_{perm} = permeabilidade, K_{loss} = coeficiente de perda, \mathbf{v} = vetor velocidade.

Tem-se que o escoamento é laminar ($Re \leq 1$) [13], dada à baixa velocidade de entrada da resina no molde e das suas propriedades físicas, e, portanto, pode-se desprezar os termos

quadráticos em v (segunda parcela) responsáveis pela perda inercial, resultando as Equações 6, 7 e 8.

$$S_{M,x} = \frac{-\mu}{K_{perm}} v_x \quad (6)$$

$$S_{M,y} = \frac{-\mu}{K_{perm}} v_y \quad (7)$$

$$S_{M,z} = \frac{-\mu}{K_{perm}} v_z \quad (8)$$

As equações simplificadas denotam que a fonte de *momentum* é resultado apenas da perda viscosa (primeira parcela das equações).

Os parâmetros do meio poroso são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: Dados do meio poroso

| Parâmetro | Valor |
|---------------|----------------------------------|
| K_{perm} | $1,0 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ |
| ε | 0,5 |

A modelagem utilizada no estudo do escoamento em meio poroso compreende também as equações governantes do processo (Leis de Conservação de Massa, Quantidade de Movimento e Energia).

A Conservação de Massa (Equação da Continuidade) tem sua origem em um balanço de massa para um volume de controle (VC) previamente definido. Para tanto, considera-se a hipótese do contínuo, em que este volume pode ser dividido em partes pequenas o suficiente (infinitesimais), a fim de que suas propriedades possam ser consideradas uniformes ou que variem continuamente com o tempo [21].

Considerando, portanto, o balanço de massa em um elemento de volume (Figura 13):

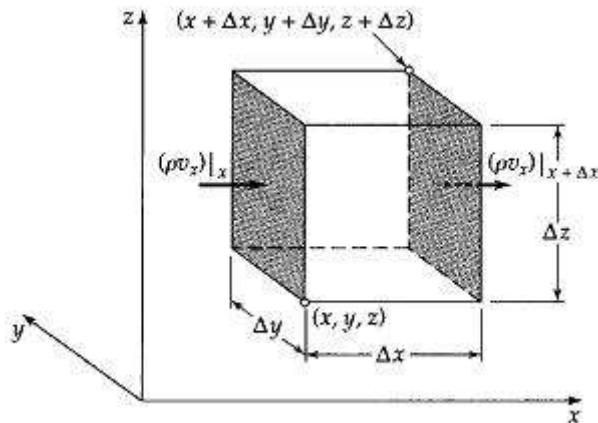


Figura 13: Escoamento de massa de fluido pelo elemento de volume, δ_{VC} .

Fonte: Bird, 2002 [21].

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{taxa de} \\ \text{acúmulo} \\ \text{de massa} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{taxa de} \\ \text{massa que} \\ \text{entra} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{taxa de} \\ \text{massa que} \\ \text{sai} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{taxa de} \\ \text{massa} \\ \text{gerada} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{taxa de} \\ \text{massa} \\ \text{consumida} \end{array} \right\}$$

Cabe ressaltar que, como não há reação química no volume de controle, os dois últimos termos do balanço (termos de geração) podem ser desprezados.

Reescrevendo o balanço de forma a traduzir para a linguagem matemática, obtém-se a Equação 9.

$$\Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial \rho}{\partial t} = \Delta y \Delta z [(\rho v_x)|_x - (\rho v_x)|_{x+\Delta x}] + \Delta z \Delta x [(\rho v_y)|_y - (\rho v_y)|_{y+\Delta y}] + \Delta x \Delta y [(\rho v_z)|_z - (\rho v_z)|_{z+\Delta z}] \quad (9)$$

Dividindo a Equação 9 por $\Delta x \Delta y \Delta z$, tomando o limite $\Delta x, y, z \rightarrow 0$ e usando as definições de derivadas parciais, obtém-se a Equação 10.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \right) \quad (10)$$

Utilizando a notação vetorial, obtém-se, alternativamente a Equação 11.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (11)$$

Fisicamente, a primeira parcela da Equação 11 representa a taxa de acúmulo de massa por unidade de volume e a segunda parcela representa a taxa líquida de adição de massa por unidade de volume, por meio convectivo [21].

A Conservação de *Momentum* (Equação da Quantidade de Movimento) pode ser obtida por um balanço de *momentum* em um dado elemento de volume, conforme a Figura 14:

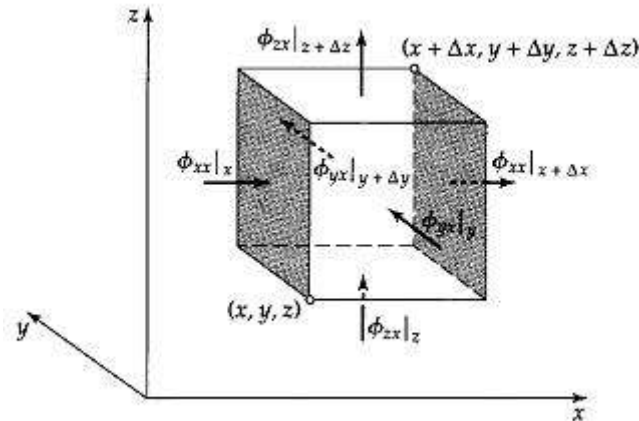


Figura 14: Fluxos de *momentum* de x através das superfícies do elemento de volume

Fonte: Bird, 2002 [21].

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{taxa de} \\ \text{acúmulo de} \\ \text{momentum} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{taxa de} \\ \text{momentum} \\ \text{que entra} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{taxa de} \\ \text{momentum} \\ \text{que sai} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{forças} \\ \text{externas (fonte} \\ \text{de momentum)} \end{array} \right\}$$

Tomando como referência a componente x do *momentum*, o balanço acima é reescrito, resultando na Equação 12.

$$\Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} = \Delta y \Delta z [\phi_{xx}|_x - \phi_{xx}|_{x+\Delta x}] + \Delta z \Delta x [\phi_{yx}|_y - \phi_{yx}|_{y+\Delta y}] + \Delta x \Delta y [\phi_{zx}|_z - \phi_{zx}|_{z+\Delta z}] + S_{M,x} \quad (12)$$

Dividindo a Equação 12 por $\Delta x \Delta y \Delta z$, tomando o limite $\Delta x, y, z \rightarrow 0$ e usando as definições de derivadas parciais, obtém-se a Equação 13.

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \phi_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} \phi_{yx} + \frac{\partial}{\partial z} \phi_{zx} \right) + S_{M,x} \quad (13)$$

As Equações 14 e 15 são obtidas para as componentes y e z:

$$\frac{\partial(\rho v_y)}{\partial t} = -\left(\frac{\partial}{\partial x}\phi_{xy} + \frac{\partial}{\partial y}\phi_{yy} + \frac{\partial}{\partial z}\phi_{zy}\right) + S_{M,y} \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial t} = -\left(\frac{\partial}{\partial x}\phi_{xz} + \frac{\partial}{\partial y}\phi_{yz} + \frac{\partial}{\partial z}\phi_{zz}\right) + S_{M,z} \quad (15)$$

Utilizando a notação vetorial, obtém-se, alternativamente a Equação 16.

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} = -\nabla \cdot \boldsymbol{\phi} + \mathbf{S}_M \quad (16)$$

Sabendo que $\boldsymbol{\phi} = \rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} + \boldsymbol{\pi}$ e que $\boldsymbol{\pi} = p\boldsymbol{\delta} + \boldsymbol{\tau}$, a Equação 16 pode ser reescrita resultando na Equação 17.

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) - \nabla p - \nabla \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad (17)$$

sendo $\boldsymbol{\phi}$ = fluxo combinado de *momentum*, $\boldsymbol{\pi}$ = fluxo molecular de *momentum*, $\boldsymbol{\delta}$ = vetor unitário, $\boldsymbol{\tau}$ = tensor tensão cisalhante.

O termo $\boldsymbol{\tau}$ é descrito pela generalização da Lei da viscosidade de Newton, conforme Equação 18.

$$\boldsymbol{\tau} = -\mu \left(\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{v} \right) \quad (18)$$

Fisicamente, o lado esquerdo da Equação 17 representa a taxa de acúmulo de *momentum* por unidade de volume, enquanto que, no lado direito, a primeira parcela representa a taxa de adição de *momentum* por unidade de volume, por meio convectivo, a segunda e terceira parcela representam a taxa de adição de *momentum* por unidade de volume, por transporte molecular e a quarta parcela representa a ação de força externa, uma fonte de *momentum* [21].

Analogamente aos balanços de massa e *momentum*, pode-se fazer um balanço de energia a fim de obter a equação da Energia. Portanto, a demonstração teórica não será realizada e a equação resultante, Equação 19, é mostrada abaixo.

$$\frac{\partial(\rho e_{ef})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} e_{ef}) = \nabla \cdot (k_{ef} \nabla T) - p \nabla \cdot \mathbf{v} + \tau : \nabla \mathbf{v} + S_E \quad (19)$$

sendo e_{ef} = energia efetiva, k_{ef} = condutividade térmica efetiva, S_E = fonte de calor.

Na Equação 19 o termo $-p \nabla \cdot \mathbf{v}$ foi zerado e o termo $\tau : \nabla \mathbf{v}$ é desprezível porque não haver grande tensão cisalhante grande e a velocidade também não ser alta. Além disso, o termo fonte engloba o termo de resistência ao escoamento (onde inclui-se a permeabilidade).

Cabe aqui ressaltar que para as equações de transporte (Equações 11, 17 e 19) a velocidade superficial, v , nada mais é do que uma resultante da velocidade do fluido, u , pela porosidade (Equação 20).

$$\mathbf{v} = \epsilon \mathbf{u} \quad (20)$$

Já para o termo fonte de energia, S_E , este foi como:

$$S_E = \dot{H} \rho_c \quad (21)$$

$$\dot{H} = \Delta H_r \dot{\alpha} \quad (22)$$

sendo ΔH_r = calor de reação.

Conforme visto no Capítulo 2, dois processos são bastante difundidos para a cinética de cura desta reação: a reação autocatalítica e a reação de ordem n. Para o sistema epoxídico o modelo de ordem n é o mais difundido, além de ser um modelo mais simples de ser trabalhado [11]. Portanto, este foi o modelo utilizado, cuja equação (Equação 23) e respectivos valores dos parâmetros (Tabela 6) seguem abaixo.

$$\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (1 - \alpha)^n \quad (23)$$

Tabela 6: Valores dos parâmetros das Equações 22 e 23

Fonte: X.L. Liu *et al*, 2000 [22]

| Parâmetro | Valor |
|--------------|----------------------------|
| ΔH_r | 323.700 J/kg |
| A | 191.400 s ⁻¹ |
| E | 60.500 J.mol ⁻¹ |
| n | 1,69 |

Para que as equações governantes do processo (Equações 11, 17 e 19) possam ser resolvidas é necessário, ainda, especificar os valores das propriedades físicas dos componentes do processo. Vale ressaltar que, após a cura, não se tem os materiais resina e fibra, mas sim, um único produto final, o compósito.

Para o cálculo das propriedades dos componentes foi utilizada uma espécie de regra de mistura, ponderada na fração volumétrica (Equações 24, 25 e 26), exceto para a viscosidade, em que foi utilizado um modelo empírico (Equação 27) que vem sendo adotado por vários autores conforme observado na literatura [12].

O compósito foi criado de acordo com as propriedades constantes na Tabela 7.

$$\rho_c = \phi_r \rho_r + \phi_f \rho_f \quad (24)$$

$$cp_c = \frac{1}{\rho_c} (\phi_r \rho_r cp_r + \phi_f \rho_f cp_f) \quad (25)$$

$$\frac{1}{k_c} = \phi_r \frac{1}{k_r} + \phi_f \frac{1}{k_f} \quad (26)$$

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{U}{RT} + \kappa\alpha\right) \quad (27)$$

Tabela 7: Valores dos parâmetros das Equações 24 a 27

Fontes: X.L. Liu *et al*, 2000 [22]; Calado, V. & Advani, S. [12]

| Material | Parâmetro | Valor |
|-----------|-----------|--|
| Resina | ϕ_r | 0,55 |
| | ρ_r | 1260 kg.m ⁻³ |
| | cp_r | 1255 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹ |
| | k_r | 0,2 W.m ⁻¹ .K ⁻¹ |
| Fibra | ϕ_f | 0,45 |
| | ρ_f | 2560 kg.m ⁻³ |
| | cp_f | 640 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹ |
| | k_f | 1,04 W.m ⁻¹ .K ⁻¹ |
| Compósito | ρ_c | 1845 kg.m ⁻³ |
| | cp_c | 871 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹ |
| | k_c | 0,314 W.m ⁻¹ .K ⁻¹ |
| | μ | 0,000793 Pa.s |
| | U | 90.800 J.mol ⁻¹ |
| | κ | 14,1 |

Por ser um escoamento multifásico, o tratamento dado pelo ANSYS CFX[®] na descrição desse escoamento pode seguir duas vertentes: o modelo Lagrangeano e o modelo Euleriano.

O modelo Lagrangeano consiste em acompanhar cada partícula de fluido. Esta abordagem é usualmente utilizada na mecânica de corpos rígidos e na descrição de sólidos deformáveis, além de ser mais adequado para escoamentos multifásicos de bolhas e partículas sólidas. A descrição Lagrangiana fornece a posição de cada partícula de fluido em cada instante de tempo [20].

O modelo Euleriano é o mais utilizado para o caso em que o número de partículas se torne excessivamente alto. Para tanto, na descrição do escoamento, o domínio de fluido não é acompanhado à medida que se deforma; o foco está em um domínio espacial fixo, através do qual o fluido escoar. Por esse motivo, esta formulação gera um campo de velocidade a cada ponto do espaço e instante de tempo. Assim, esta descrição não fornece informação sobre o movimento individual de cada partícula, mas ao invés disso, dá a informação em pontos fixos do espaço [20].

O modelo Euleriano pode ainda ser dividido em dois submodelos: o modelo não homogêneo e o modelo homogêneo.

No modelo não homogêneo, a transferência interfacial de massa, *momentum* e calor é dependente da área superficial de contato entre as duas fases, podendo esta ser modelada através dos modelos de partícula ou de mistura.

No modelo homogêneo, o campo de escoamento é partilhado por todos os fluidos, permitindo algumas simplificações. Esse modelo assume que as quantidades transportadas (com exceção da fração volumétrica) durante o processo são as mesmas para todas as fases.

Dados os modelos acima, optou-se pelo modelo mais adequado ao escoamento aplicado no enchimento de meio poroso. Portanto, prosseguiu-se com a abordagem Euleriana homogênea, também conhecida como modelo VOF (*Volume of Fluid*).

Por esta abordagem não é necessário resolver as equações de transporte de cada fase, apenas as equações de transporte de bulk são resolvidas, visto que as propriedades são ponderadas pela fração volumétrica, conforme Equações 28 e 29.

Portanto, as equações de transporte (Equações 11, 17 e 19) continuam válidas, com seus parâmetros (densidade e viscosidade) calculados por uma média ponderada na fração volumétrica. Além disso, a velocidade de cada partícula em cada fase é a mesma.

$$\mathbf{v}_a = \mathbf{v}, \quad 1 \leq a \leq N_p$$

$$\rho = \sum_{a=1}^{N_p} \phi_a \rho_a \quad (28)$$

$$\mu = \sum_{a=1}^{N_p} \phi_a \mu_a \quad (29)$$

Portanto, com esse conjunto de equações e variáveis foi possível implementar o escoamento em questão no software e fazer um estudo de caso do escoamento em meio poroso através das simulações em CFD.

Capítulo 4: Resultados e Discussão

Neste capítulo, são mostrados os resultados dos testes de refino de malha, bem como os das análises preliminares, que estudam a influência de variáveis na cura e no enchimento, como temperatura e porosidade do meio, respectivamente. Por último, apresentam-se os resultados de uma otimização* dos pontos de injeção e da própria reação de cura.

Para as simulações 2D das etapas de enchimento e de cura nas análises preliminares, utilizou-se um laptop Vaio com Windows – Intel® Core™ i3, CPU M350, 2,27GHz, 4GB de memória RAM e Itautec com Windows – Genuine Intel®, CPU T2130, 1,86 GHz, 2GB de memória RAM. O tempo de processamento para as simulações com a malha utilizada foi de até 48 horas. Para os testes de malha e para as simulações 3D de enchimento e de cura, foi utilizado um computador com Linux – 18 Quad-Core AMD Opteron™ Processor 2356, 8 núcleos, 16GB de memória RAM em cada nó - do Laboratório de Termofluidodinâmica da COPPE – UFRJ.

No presente trabalho foram utilizados os seguintes softwares comerciais para as simulações realizadas: ANSYS ICEM CFD® e Desing Modeler 12.0®, para a geração da geometria, ANSYS ICEM CFD® para a geração da malha, CFX-Pre 12.0® para a definição das condições de contorno e iniciais, e dos modelos para a solução numérica no CFX-Solver® 12.0 e o CFX-Post 12.0® para análise e visualização dos resultados.

4.1. Geometria e Malha

As geometrias utilizadas nas simulações, confeccionadas no ICEM CFD® 12.0 e no Design Modeler® 12.0, são representações simplificadas de moldes utilizados no processo RTM. Por se tratar de geometrias simples, utilizou-se malhas hexaédricas, confeccionadas no ICEM CFD®.

O molde, de dimensões 12 x 6 x 3 cm (Comprimento x Altura x Espessura), foi utilizado para análises preliminares em simulações 2D, empregando a condição de simetria no plano xy que simplifica a geometria para um molde retangular. A Figura 15 mostra a geometria do molde e a direção do escoamento.

*A otimização não foi realizada de maneira formal neste trabalho. A rigor, um problema de otimização pressupõe a formulação de um problema de otimização e a utilização de métodos (algoritmo) para a resolução do problema.

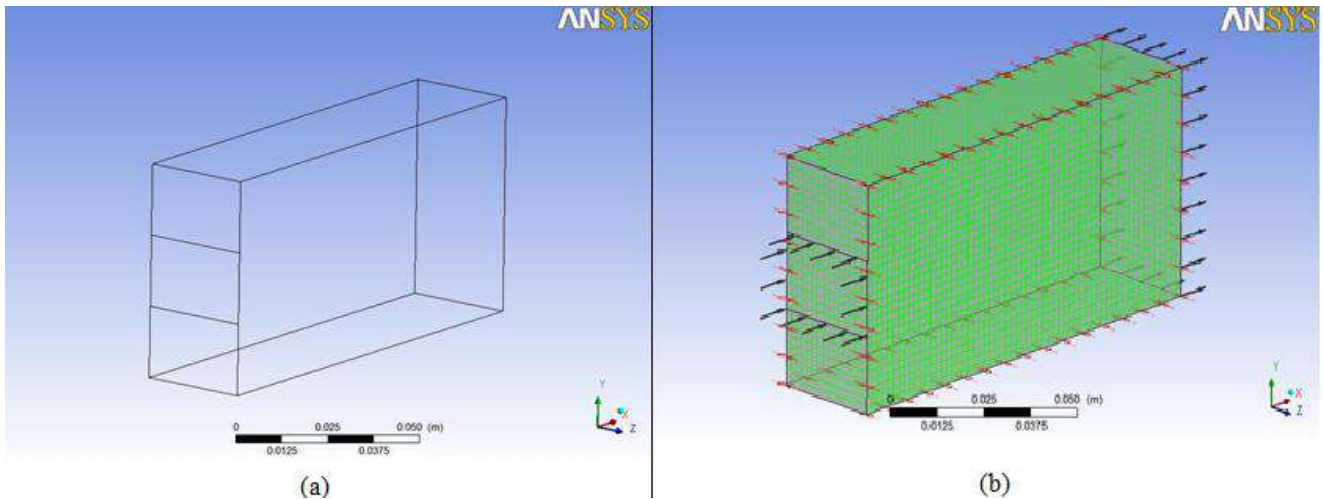


Figura 15: (a) Contorno do molde escolhido para as análises preliminares; (b) Molde estruturado com entrada e saída.

A segunda geometria utilizada foi baseada em Shoajei *et al.* [13]. A estrutura possui as seguintes dimensões: 60 x 30 x 3 cm (Comprimento x Altura x Espessura) e duas cavidades de dimensões 15 x 14 x 3 cm (Comprimento x Altura x Espessura). O molde foi utilizado tanto para estudos de enchimento quanto para estudos da reação de cura, variando o número e a posição de injeção, como mostra a Figura 16.

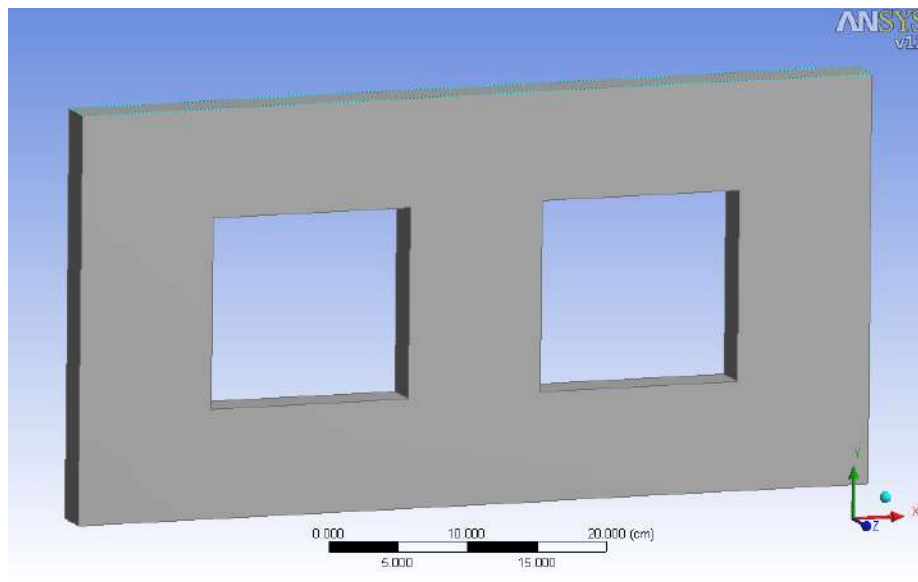


Figura 16: Molde para estudos de enchimento e reação de cura.

4.1.1. Análise de Convergência da Malha

A partir da geometria da Figura 16, foram criadas três malhas hexaédricas com diferentes níveis de refinamento para serem testadas, M1, M2 e M3, em ordem crescente de refinamento (Tabela 8). Tal aumento no grau de refino das malhas tem como objetivo avaliar até que ponto suas características influenciam no resultado da simulação.

Tabela 8: Classificação das malhas usadas para o teste de malha.

| Malha | Nº de nós | Nº de elementos |
|-------|-----------|-----------------|
| M1 | 3.054 | 4.436 |
| M2 | 25.726 | 38.148 |
| M3 | 70.478 | 104.980 |

A avaliação do refino de malhas foi realizada através do comportamento de duas variáveis, grau de cura e temperatura, ao longo do eixo y em simulações da reação de cura. A Figura 17 mostra a linha utilizada para a retirada dos dados que possibilitarão a análise das malhas.

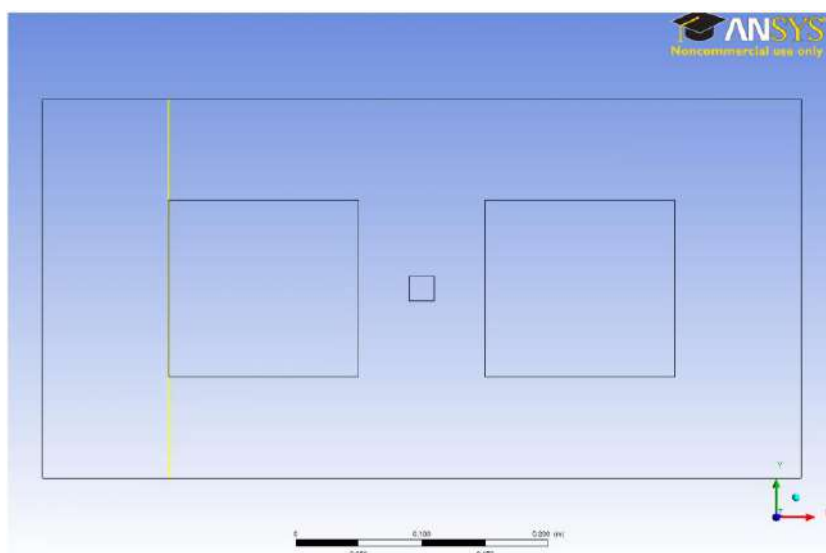


Figura 17: Região de retirada de dados para avaliação das malhas.

Com os dados retirados desta linha, construíram-se os gráficos mostrados na Figura 18(a) e (b). Observa-se que nos dois gráficos, as malhas M2 e M3 estão com seus pontos muito próximos, o que sugere uma convergência. Para se ter certeza dessa convergência, fez-

se o cálculo do erro relativo das variáveis grau de cura e temperatura das malhas M2 e M3 em termos percentuais, através da Equação 30.

$$Erro\ Relativo(\%) = \left| \frac{(variável\ M2 - variável\ M3)}{variável\ M3} \right| * 100 \quad (30)$$

A Tabela 9 compila os valores resultantes da Equação 30 para cada ponto coletado nos gráficos da Figura 18(a) e (b), de onde se conclui que houve convergência da malha, já que o erro relativo percentual é inferior a 0,05% para o grau de cura, e inferior a 1,55% para a temperatura e, portanto, estão dentro de um limite de tolerância aceitável de erro relativo de 5%. Logo, a malha M2 foi a escolhida para ser usada em simulações posteriores deste trabalho, pois o tempo computacional é menor que o da malha M3 (mais refinada) e os resultados obtidos através desta malha fornecem níveis de erro de convergência relativamente baixos.

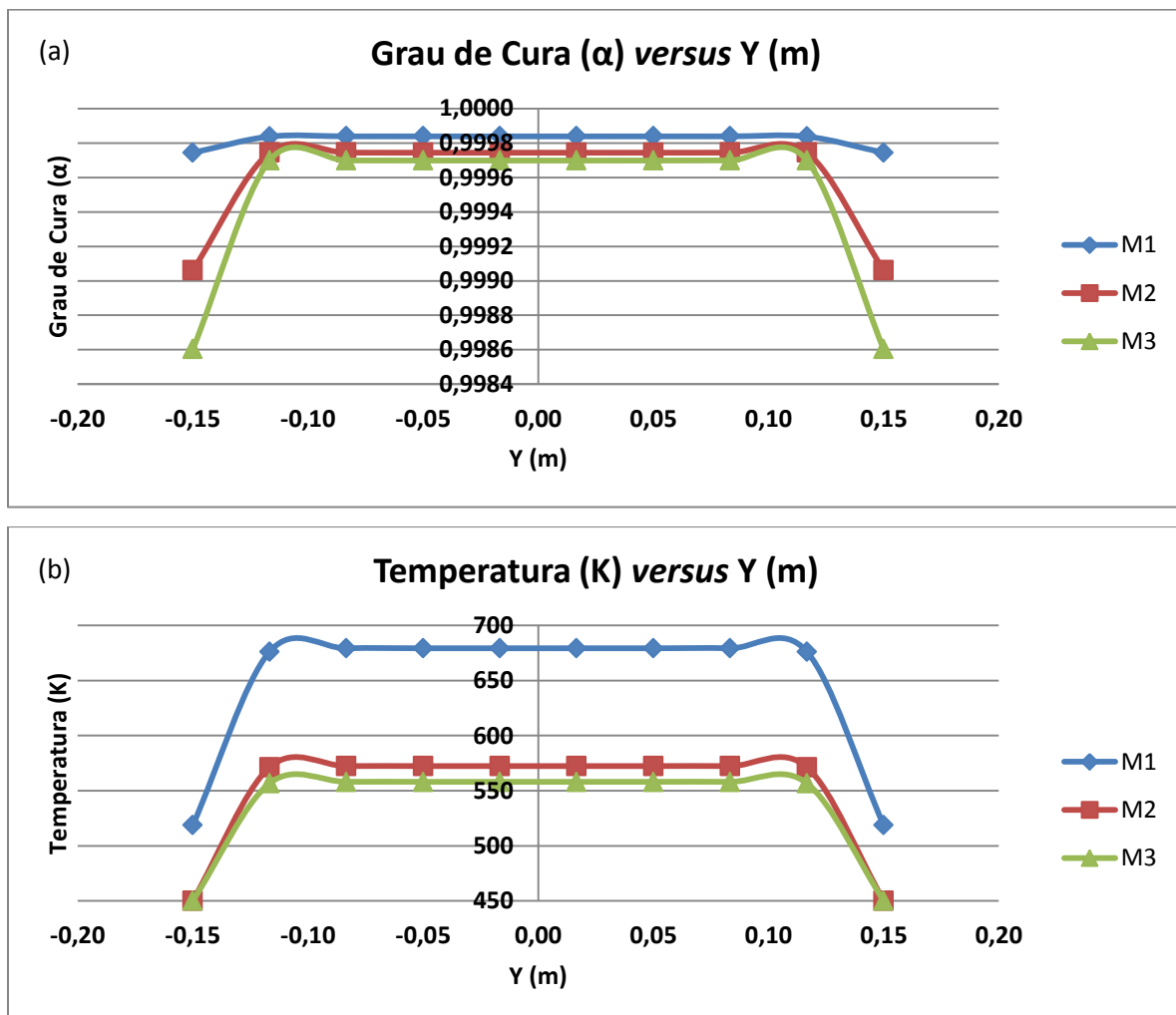


Figura 18: (a) Comparação das malhas M1, M2 e M3 em termos do Grau de Cura. (b) Comparação das malhas M1, M2 e M3 em termos de Temperatura.

Tabela 9: Erros relativos da Temperatura e do Grau de Cura entre as malhas M2 e M3.

| Erro Relativo da Temperatura (%) | Erro Relativo do Grau de Cura (%) |
|---|--|
| 0,006 | 0,0459 |
| 1,550 | 0,0046 |
| 1,538 | 0,0046 |
| 1,537 | 0,0045 |
| 1,537 | 0,0046 |
| 1,536 | 0,0046 |
| 1,537 | 0,0045 |
| 1,538 | 0,0045 |
| 1,550 | 0,0046 |
| 0,006 | 0,0460 |

4.2. Análises Preliminares

Com o intuito de estudar a física do processo RTM e os principais parâmetros que influenciam o escoamento e a taxa de cura, como por exemplo, a temperatura e a porosidade do meio, foram feitas diversas simulações 2D. Além disso, os resultados preliminares obtidos serão usados como uma configuração inicial ideal para os estudos de otimização de injeção de resina na geometria mostrada na Figura 16.

As simulações de escoamento e de reação de cura tanto em 2D quanto em 3D foram transientes. Para as de escoamento, o passo de tempo foi adaptativo baseado no número de Courant e todos os resultados obtidos apresentaram $0,5 < Co < 1,0$. As simulações da cura tiveram um passo de tempo da ordem de 10^{-2} s.

4.2.1. Influência da Temperatura na Taxa de Cura

O aquecimento do molde acelera o processo de cura, reduzindo o ciclo total e o custo do RTM. Porém, deve-se ressaltar que se não for feito de maneira adequada, a temperaturas muito altas, por exemplo, haverá uma altadiferença de temperatura (medida do centro da peça até sua extremidade), contribuindo para formação de stress residual acumulado na peça.

As simulações 2D feitas na geometria simples (Figura 15b), com valores de temperatura na faixa de 25°C a 200°C na parede do molde, resultaram em um tempo de cura que variou de 8 minutos até 1 hora. A tabela 10 mostra a faixa de temperatura usada no molde (temperatura inicial), o tempo gasto para atingir o estado estacionário, a diferença de temperatura (ΔT) no respectivo molde e o grau de cura (α) atingido. É importante ressaltar que nesta etapa não houve injeção de resina; toda a resina necessária para a reação de cura do processo foi injetada anteriormente e só há o molde cheio de resina fibra reagindo entre si.

Tabela 10: As diferentes temperaturas aplicadas à parede do molde simples e sua influência no grau de cura (α).

| Simulação | Temperatura do molde (°C) | Tempo total (min) | ΔT(°C) | α |
|------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| 1 | 25 | 60 | 9 | 0,05 |
| 2 | 50 | 56 | 22 | 0,99 |
| 3 | 70 | 30 | 275 | 0,99 |
| 4 | 90 | 28 | 172 | 0,99 |
| 5 | 100 | 26 | 169 | 0,99 |
| 6 | 120 | 19 | 169 | 0,99 |
| 7 | 150 | 15 | 127 | 0,99 |
| 8 | 177 | 12 | 99 | 0,99 |
| 9 | 200 | 8 | 87 | 0,99 |

Observa-se que em temperaturas baixas, o grau de cura máximo (~1,00) não é atingido, ou seja, o estado estacionário não é alcançado em um tempo de até 1h, como por exemplo, na simulação de 25°C, em que o tempo de 1 hora de cura não foi suficiente para atingir 5% de cura no molde. Outro fator a ser considerado é a diferença de temperatura (ΔT), calculado pela diferença de temperatura no meio da peça e na borda da mesma. A Figura 19 ilustra o perfil de temperatura do molde da simulação número 8 e as linhas pretas indicam os eixos longitudinal e latitudinal usados para calcular o ΔT .

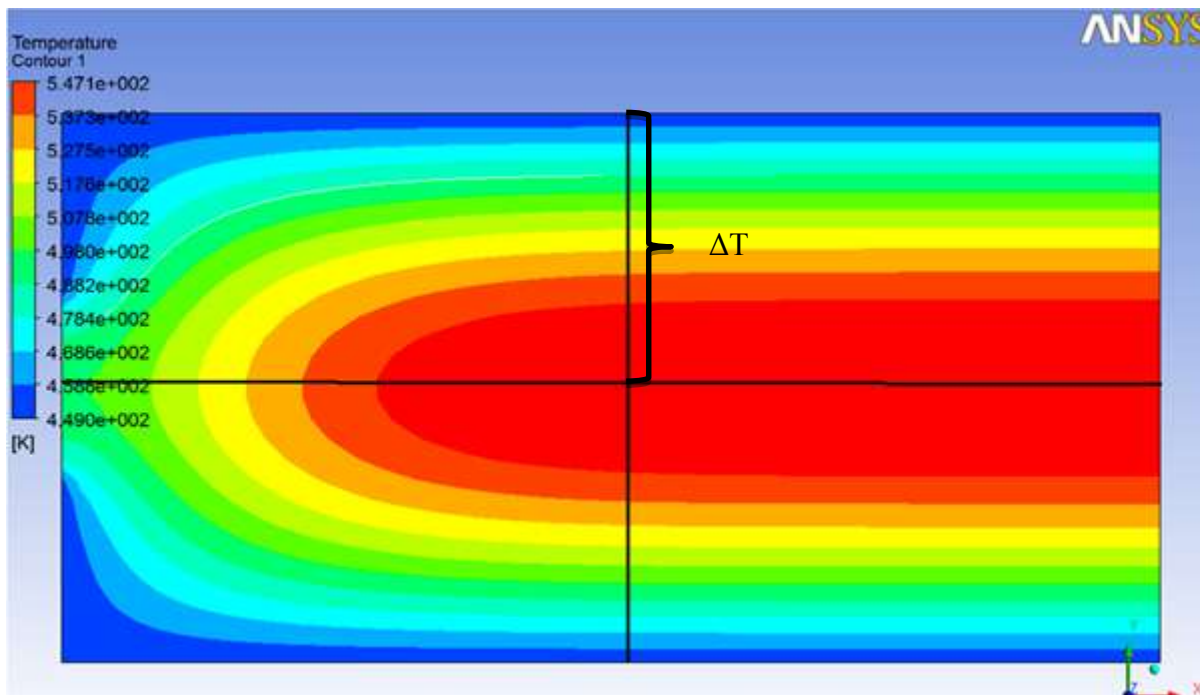


Figura 19: Perfil de Temperatura do molde com aquecimento de 177°C com linhas latitude e longitudinal para cálculo do ΔT .

Esta diferença de temperatura, como foi explicado anteriormente, não deve ter um valor muito alto para não afetar negativamente na estrutura física e nas propriedades da peça produzida. A Tabela 9 mostra uma tendência no aumento do ΔT com o aumento da temperatura até um valor máximo na faixa de temperatura de 100-120°C. Após esta faixa, o ΔT começa a decair com o aumento da temperatura. Já o tempo total de reação de cura é inversamente proporcional ao aumento da temperatura, isto é, quanto maior o aquecimento do molde, mais rápida é a cura. A preocupação com um gradiente de temperatura relativamente baixo e um grau de cura de aproximadamente 1, indica que a temperatura ideal para ser usada na parede do molde seja a de 200°C. Porém, usar esta temperatura na parede do molde seria mais custoso em termos econômicos e de energia. Levando todos os fatores comentados anteriormente e a recomendação do Brent, a temperatura de 177°C seria a melhor opção. A Figura 20 ilustra o perfil do grau de cura para a referida simulação ao longo do tempo, até quando o sistema atinge o estado estacionário. Nas Figuras 20(a) e 20(b), observa-se que, conforme o tempo passa, a região que apresenta cura de 0,99 aumenta. Já nas figuras 20(c) e 20(d), a peça está toda curada, porém as diversas cores representam diferenças na terceira casa decimal do valor do grau de cura.

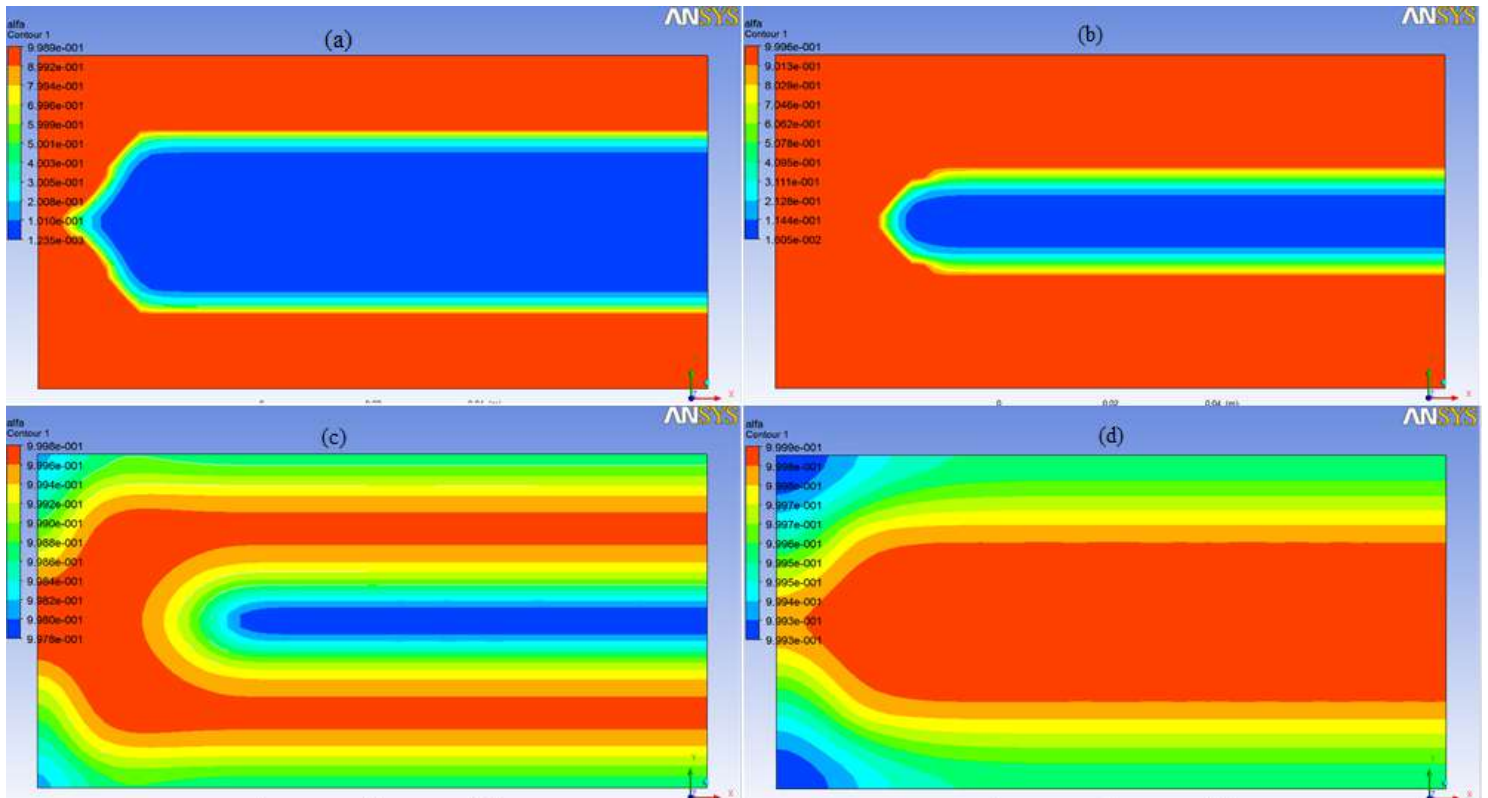


Figura 20: Tempo de (a) 112 s, (b) 180s, (c) 240s, (d) 12 min.

4.2.2. Análise do Enchimento

No processo RTM, o compósito é fabricado injetando a resina polimérica em uma pré-forma de fibra posicionada no interior do molde. Após a infiltração da resina nos espaços vazios no interior do molde, o processo de fabricação é caracterizado pela reação de cura [20].

No entanto, a reação de reticulação é um processo que pode se desenvolver até mesmo em temperatura ambiente, fornecendo valores para o grau de cura relativamente elevados, o que fatalmente provocaria um aumento significativo na viscosidade, prejudicando o escoamento da resina através do molde. Por isso, apesar do enchimento do molde ser muito rápido e ocorrer em um tempo pequeno, é importante avaliar a influência desta etapa na reação de cura. Na etapa de enchimento, o fluxo de resina e o padrão de escoamento podem ser modelados e controlados pela porosidade e permeabilidade do meio e viscosidade da resina [24].

Para esta análise, foram realizadas simulações de escoamento multifásico homogêneo pela abordagem *Volume of Fluid* (VOF), com velocidades de entrada de 1,36 m/s e 0,68 m/s, em que a primeira foi calculada de modo a se obter um escoamento darcyano ($Re = 1$) para o

fluido em questão, a resina. A Figura 21 mostra o grau de cura atingido em cada região do molde durante a etapa de enchimento, para cada uma das velocidades utilizadas.

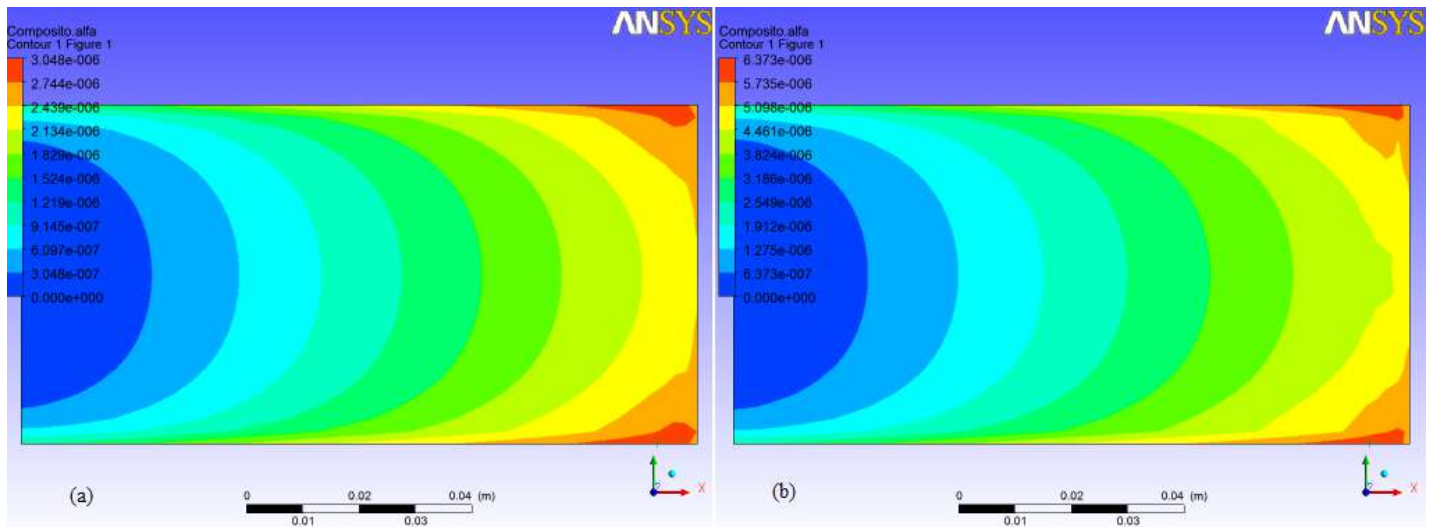


Figura 21: Grau de cura atingido durante o enchimento do molde para velocidade de (a) 1,36 m/s e (b) 0,68 m/s.

De acordo com a Figura 21, é possível observar que os valores alcançados do grau de cura não são significativos, concordando com o fato de que o enchimento de praticamente todo o molde dura aproximadamente 0,2493 s e 0,4875 s, respectivamente.

Este resultado mostra que a dinâmica é muito rápida e que, portanto, não influencia de forma efetiva na etapa posterior, que é a reação de reticulação da resina. Desta forma, é possível desacoplar as etapas de enchimento e cura, estudando-as separadamente.

Através destas informações, observa-se que é possível estudar a influência da porosidade no escoamento sem considerar a reação de reticulação. De acordo com a literatura, o valor de porosidade do meio comumente utilizado é de 0,50 [24, 25]. Para estudar a influência deste parâmetro no padrão de escoamento da etapa de enchimento do molde, foram realizadas simulações de enchimento monofásico no meio poroso com valores de porosidade de 0,4, 0,5 e 0,6.

A Figura 22(a) mostra o perfil de velocidade para o escoamento da resina em um molde com uma pré-forma de fibra de porosidade 0,50 e a Figura 22(b) mostra a linha utilizada para a retirada de dados da velocidade ao longo do eixo x.

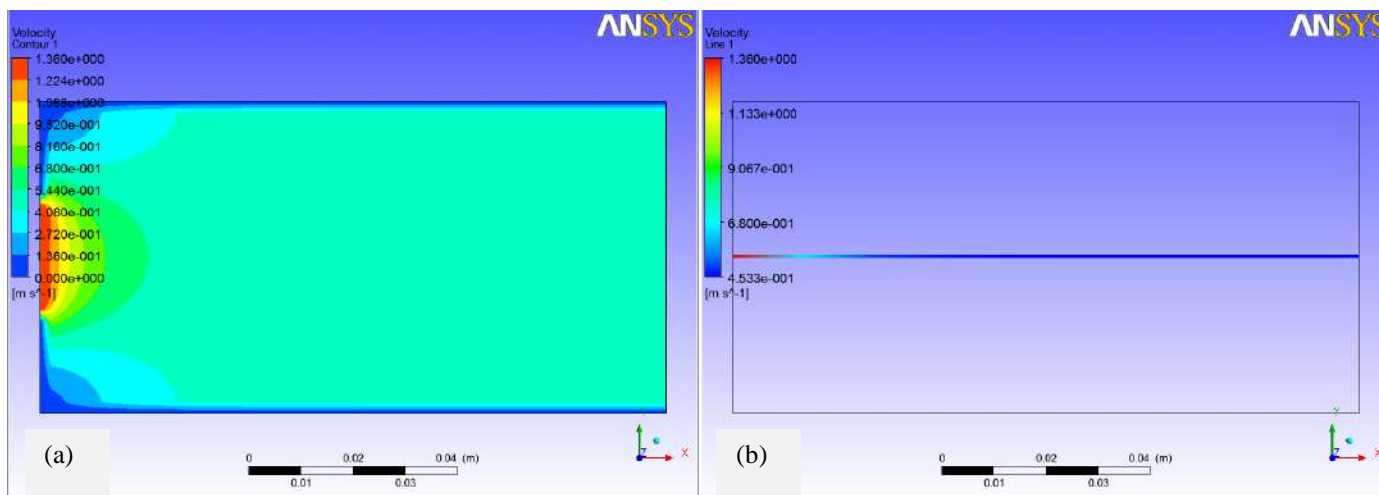


Figura 22: (a) Perfil de velocidade para o escoamento da resina durante o enchimento do molde; e (b) Retirada de dados de velocidade ao longo do eixo x.

Os resultados obtidos nas três simulações foram muito parecidos e entende-se que estas pequenas variações na porosidade em torno do valor comumente utilizado não possuem grandes efeitos no tempo de enchimento do molde, uma vez que as velocidades não variam de forma significativa. A Figura 23 apresenta os gráficos de velocidade ao longo da coordenada x para cada um dos valores de porosidade utilizados e mostra que a resina escoando através do molde possui o mesmo comportamento em todos os casos.

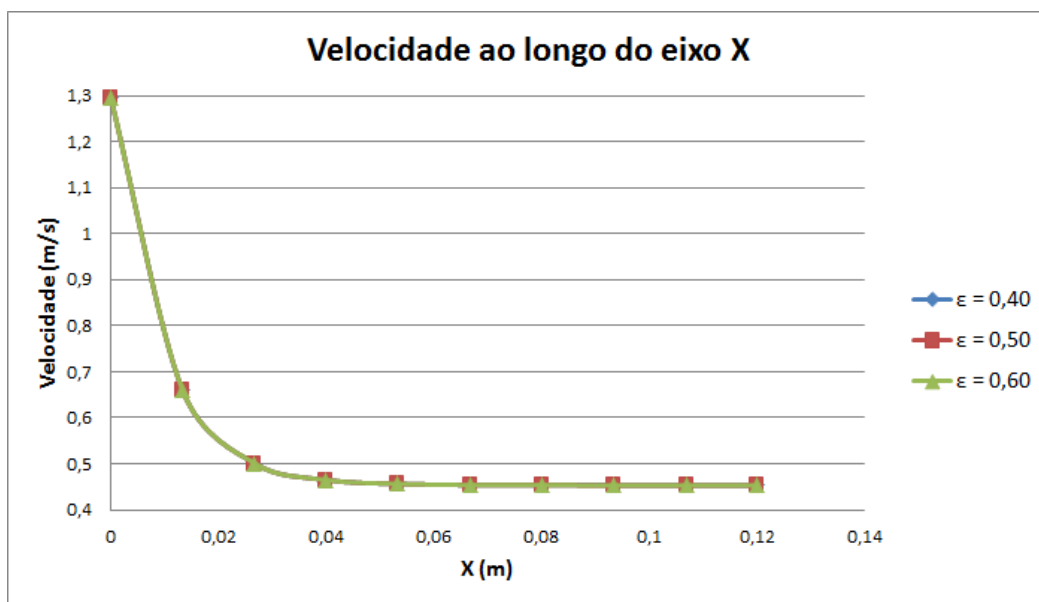


Figura 23: Gráfico de Velocidade ao longo do eixo X para diferentes porosidades ($\epsilon = 0,4, 0,5$ e $0,6$).

4.3. Análise da Injeção

Baseado nos resultados do tópico anterior, mostrados na Figura 21, realizou-se simulações 3D de enchimento multifásico desconsiderando a ocorrência da reação de reticulação da resina durante o escoamento, uma vez que os valores de grau de cura atingidos eram desprezíveis. Para estas simulações, utilizaram-se duas geometrias, A e B, conforme são apresentadas na Figura 24, com diferentes pontos de entrada.

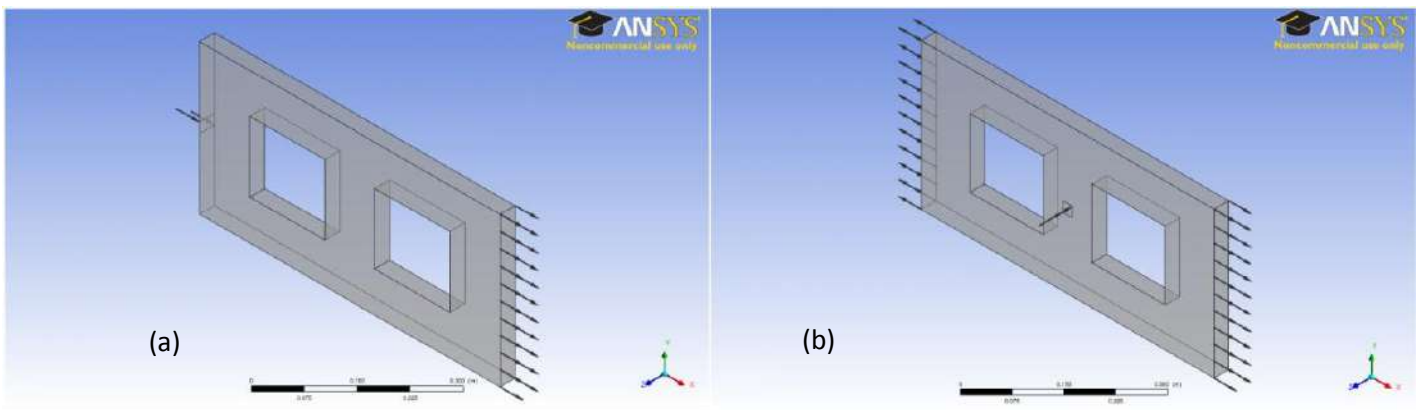


Figura 24: (a) Geometria A com entrada lateral e (b) Geometria B entrada superior central.

As geometrias da Figura 24 forneceram resultados similares para o tempo total de enchimento do molde. A geometria A com entrada lateral precisou de um tempo de 17,75 s para que a fração volumétrica de compósito fosse de pelo menos 0,99 em todo o molde, enquanto a geometria com entrada central precisou de um tempo de 21,50 s para se atingir a mesma condição.

No entanto, o tempo computacional gasto para a primeira geometria foi muito superior. Isso pode ser explicado devido ao fato de que o fluxo de resina na geometria A precisa superar de forma subsequente dois obstáculos, enquanto que na geometria B, o fluxo de resina se divide, superando simultaneamente os dois obstáculos. A presença dos obstáculos provoca como consequência a redução do número de Courant abaixo do valor máximo escolhido (um).

Na geometria da Figura 24(b), como o fluxo de resina é dividido, sendo espalhado igualmente para ambos os lados, podemos dizer que a frente livre do fluido encontra simultaneamente os dois obstáculos. Isso acarreta na diminuição do número de Courant, que se reestabelece logo após a superação dos obstáculos. Enquanto que, na geometria da Figura 24(a), o número de Courant é afetado em dois momentos. Quando a resina entra no molde, logo após o estabelecimento do fluxo, ela encontra o primeiro obstáculo, acarretando na

diminuição do Courant. O fluxo de resina, então, supera o primeiro obstáculo, e quando seu fluxo é reestabelecido, ela encontra um segundo obstáculo, causando novamente a diminuição do Courant, o que provoca um esforço computacional muito superior.

Tabela 11: Valores de tempo computacional para as simulações de enchimento em geometrias com entrada lateral e entrada central.

| Geometria | Tempo Computacional |
|----------------------|---|
| Com entrada superior | $1,817 \times 10^4$ s (5h 2min 49s) |
| Com entrada lateral | $1,558 \times 10^5$ s (1 dia 19h 17min 25s) |

Devido a isso, para o estudo dos pontos de injeção e da distribuição deste, utilizaram-se geometrias com pontos de entrada na região superior central do molde, de forma a facilitar o escoamento da resina e reduzir o tempo computacional.

4.3.1. Análise dos Pontos de Injeção

O posicionamento dos pontos de injeção da resina no molde é de extrema importância para a etapa de enchimento. O estudo deste parâmetro permite otimizá-lo de forma a se obter um escoamento que permita que todos os espaços vazios entre os filamentos de fibra sejam ocupados, minimizando a presença de pontos secos. Isto pode ser alcançado aumentando o número de pontos de entrada.

Para as simulações de moldes com entrada distribuída, utilizaram-se as duas geometrias apresentadas na Figura 24. Para estas novas geometrias substituíram-se as saídas de fluidos por *vents*, que são utilizados como pequenos escapamentos para a saída de ar, permitindo que a resina escoe através do meio poroso.

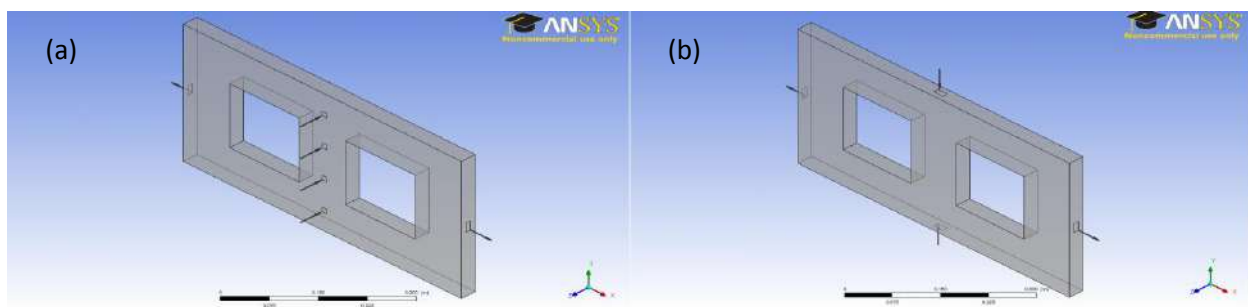


Figura 25: Geometrias com pontos de injeção distribuídos (a) na região central superior e (b) e na região central lateral.

O tempo necessário para que a fração volumétrica de compósito atingisse o valor de pelo menos 0,99 em toda a geometria da Figura 25(a) foi de 26,45 s. Este tempo foi maior do que para o enchimento da geometria apresentada na Figura 24(b), pois a área da saída de ar foi reduzida de forma a ser igual à área de injeção de resina. No entanto, esta diferença no tempo não foi significativa, o que mostra que a distribuição dos pontos de injeção de resina facilita e agiliza o enchimento do molde.

Entretanto, as simulações de enchimento do molde da Figura 25(b) fornecem resultados que mostram que esta geometria não permite o escoamento de resina por todo o domínio do molde, devido à ocorrência de uma bolha de ar na região entre os obstáculos. A Figura 26 apresenta o resultado obtido para a fração volumétrica de compósito ao final do enchimento interrompido do molde em questão.

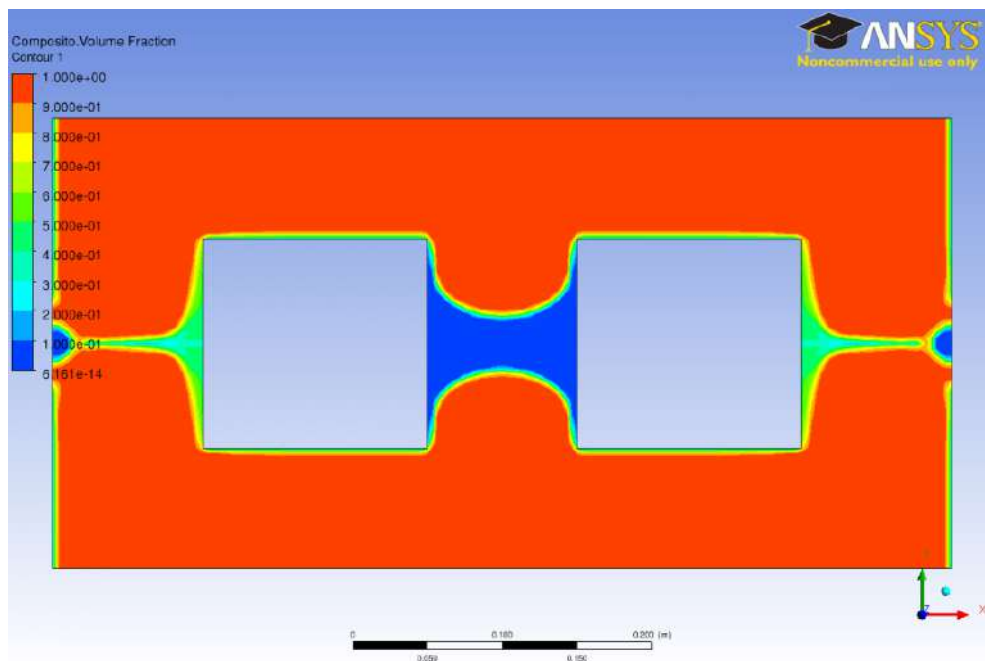


Figura 26: Fração volumétrica de compósito para enchimento do molde com pontos de injeção de resina na região central lateral.

A partir deste resultado, é possível concluir que para o enchimento completo do molde da Figura 25(b), seria necessária pelo menos a adição de mais dois *vents*, posicionados nas paredes dos obstáculos onde ocorreu a formação da bolha de ar.

4.4. Análise da Reação de Cura

Com intuito de otimizar a etapa de reação de cura, foram feitas duas simulações no molde da Figura 16, onde na primeira simulação, as paredes externas do molde foram aquecidas a 177°C durante o processo, enquanto que, na segunda, além das paredes externas, também estavam sob aquecimento de 177°C as paredes internas dos obstáculos. Apesar de ambas terem apresentado um valor de grau de cura igual ou maior que 0,99 em todo o molde no tempo de 142,5 s, a propagação da reação de cura foi mais rápida na segunda simulação, i.e., o valor de alfa aumentou mais rapidamente no molde inteiro, como mostram as Figuras 24 a 27.

Na Figura 27, observa-se que a cura ainda está no início, porque mesmo que a borda do molde tenha atingido um grau de cura maior que 0,99, grande parte dele ainda está com um valor de alfa de 0,2. A diferença é que na Figura 27(b), a região do entorno dos obstáculos também atingiu um grau de cura de 0,99, indicando que a propagação do aumento da taxa de cura será muito mais rápida para o molde aquecido em todas as paredes, incluindo as dos obstáculos.

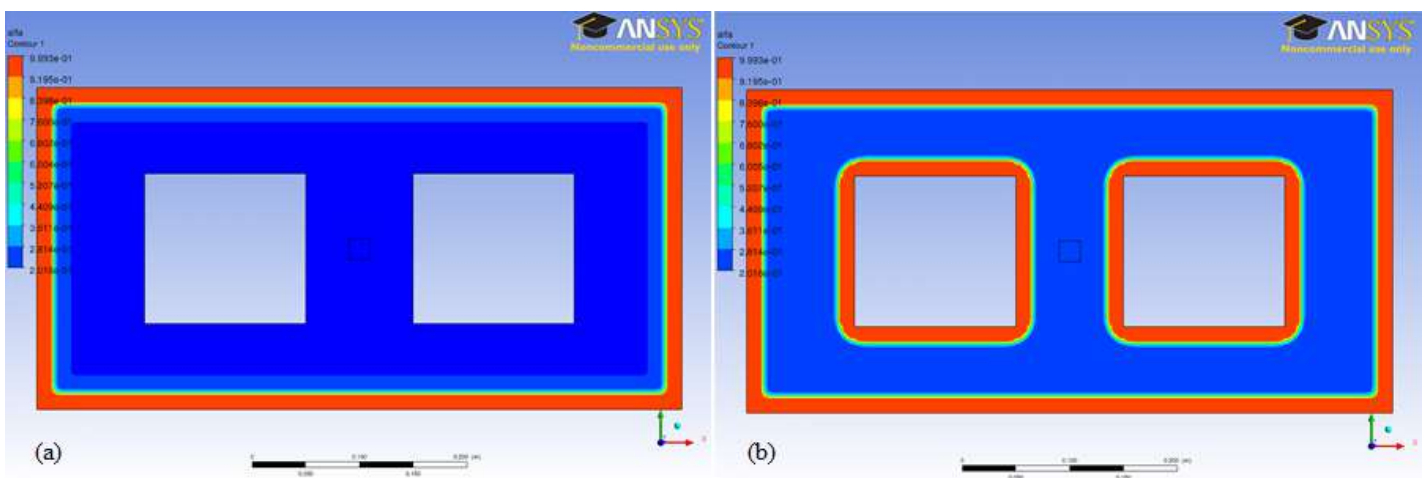


Figura 27: Perfil de alfa no tempo de 120 s na simulação de aquecimento de 177°C (a) na parede externa do molde (b) na parede externa do molde e na parede dos obstáculos.

Na Figura 28, o molde inteiro já tem um valor de alfa igual ou maior que 0,99 em ambos os casos (a) e (b).

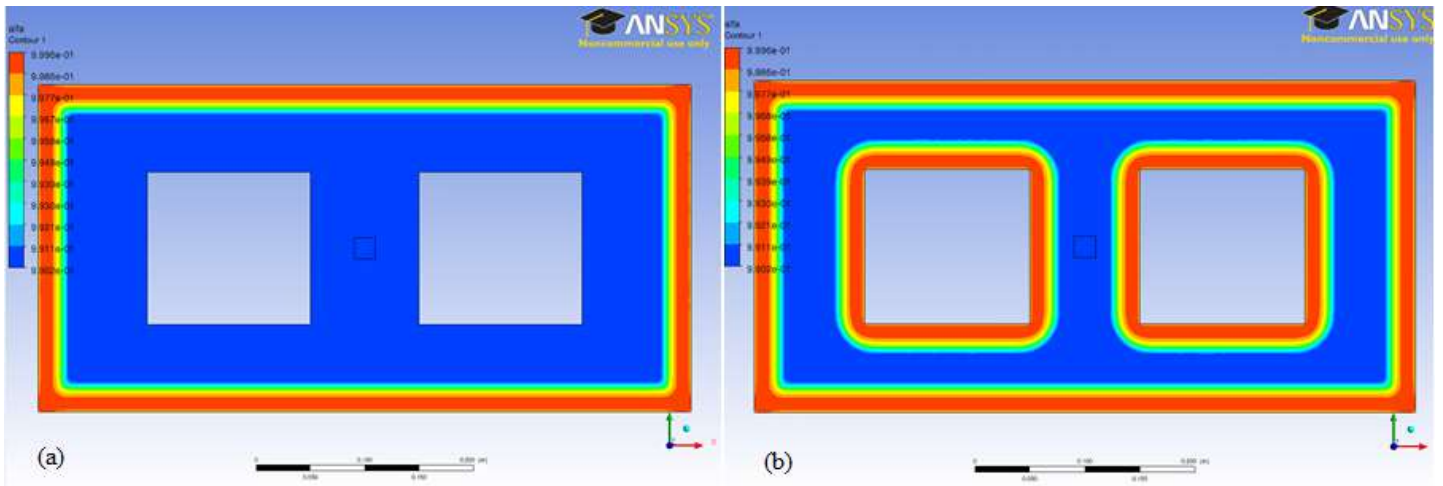


Figura 28: Perfil de alfa no tempo de 142,5 s na simulação de aquecimento de 177°C (a) na parede externa do molde (b) na parede externa do molde e na parede dos obstáculos.

Nas figuras 29 e 30, observa-se que o grau de cura tende ao valor unitário em todo o molde, sendo que para o molde com aquecimento nas paredes externas e nas paredes dos obstáculos, a região com alfa 0,9997 (máximo) é maior.

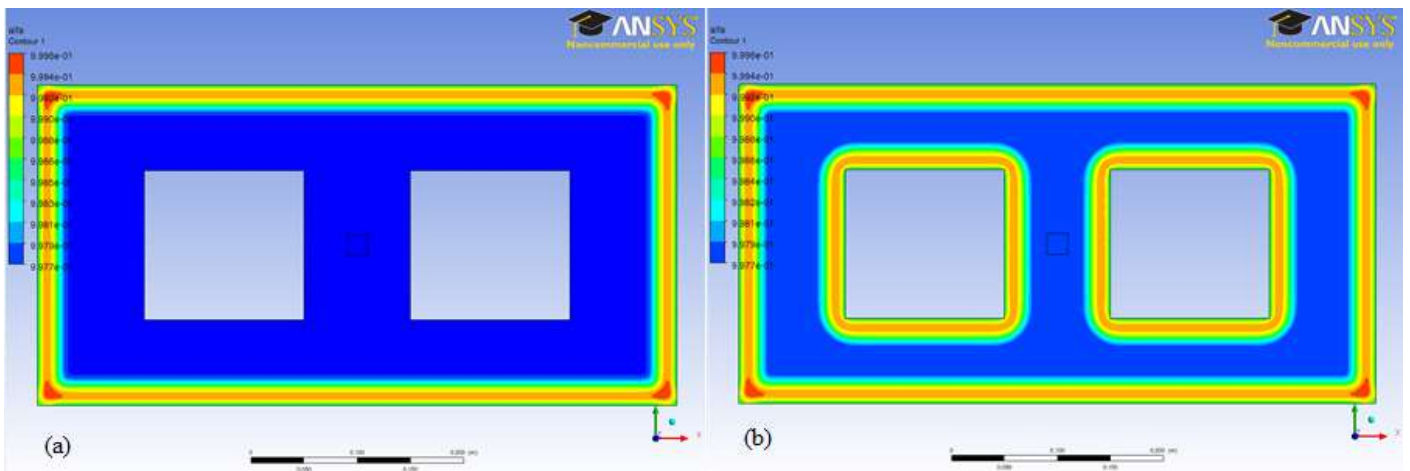


Figura 29: Perfil de alfa no tempo de 170 s na simulação de aquecimento de 177°C (a) na parede externa do molde (b) na parede externa do molde e na parede dos obstáculos.

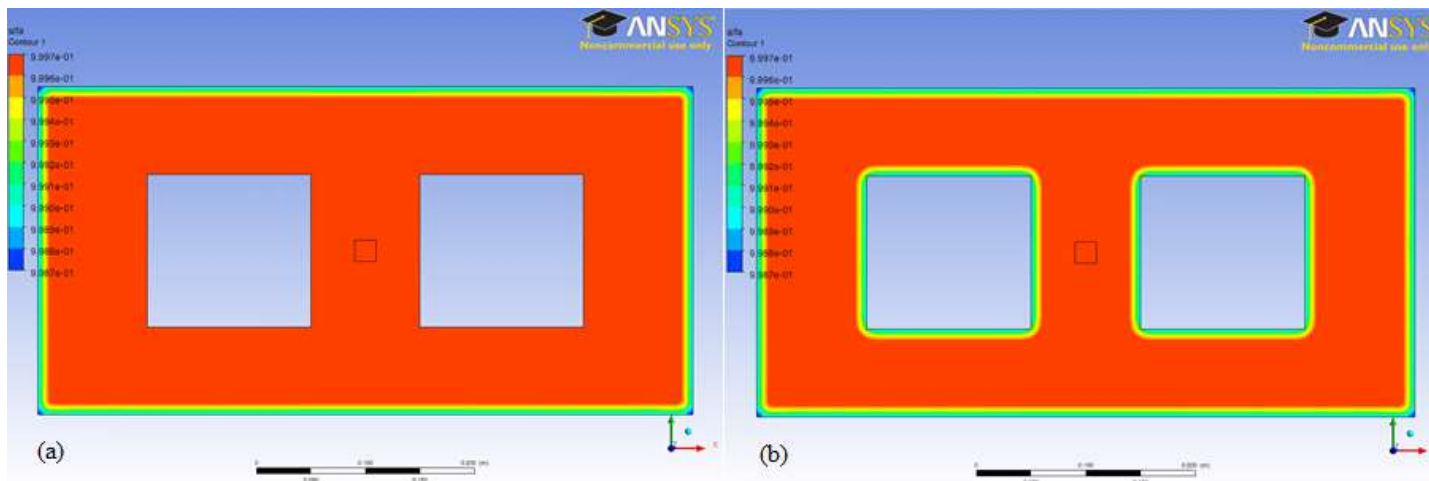


Figura 30: Perfil de alfa no tempo de 185 s na simulação de aquecimento de 177°C (a) na parede externa do molde (b) na parede externa do molde e na parede dos obstáculos.

Capítulo 5: Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros

5.1. Conclusões

No presente trabalho, foram utilizadas técnicas de CFD para solução numérica do escoamento multifásico da resina através de um meio poroso e o processo de cura da mesma. As simulações numéricas foram realizadas através do software ANSYS CFX[®].

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) mostrou-se uma importante ferramenta na análise do escoamento multifásico e da cura, possibilitando o estudo da influência de variáveis como temperatura, porosidade do meio, quantidade e posição de pontos de entrada e velocidade de injeção da resina.

A partir das simulações numéricas realizadas neste trabalho, referentes às análises citadas acima, pode-se destacar as seguintes conclusões:

- É de grande importância a realização do teste de malha, de forma que se obtenha a malha com o grau de refinamento necessário para que não haja um esforço computacional desnecessário, uma vez que simulações de escoamento multifásico, em especial, demandam um tempo computacional demasiadamente grande.
- O aquecimento do molde é um fator que influencia diretamente na cura. Quando utilizado corretamente, pode reduzir o tempo total do processo e, conseqüentemente, o custo do mesmo. A utilização de temperaturas demasiadamente altas pode afetar negativamente nas propriedades físicas do produto final, devido à formação de stress residual na peça. O resultado das simulações mostrou que a temperatura ideal de aquecimento é de 177°C porque além de combinar um menor ΔT com um menor tempo total de reação de cura, i.e., menor tempo para atingir o estado estacionário ($\alpha = 0,99$), não demanda energia para aquecer a parede do molde (custo reduzido), comprova a recomendação descrita por Brent.
- Embora o enchimento tenha grandes efeitos nas propriedades mecânicas do compósito, os valores de grau de cura atingidos durante esta etapa não são significativos. Isto mostra que o enchimento não afeta a cura da resina, o que permite o desacoplamento destes fenômenos para estudos em CFD.
- Pequenas variações em torno da porosidade comumente utilizada fornecem resultados muito semelhantes, que não afetam a velocidade e, portanto, não alteram o tempo de enchimento do molde.

- A simulação do enchimento variando as posições de entrada de resina comprova a importância de ferramentas de simulação como o ANSYS CFX[®], que permitem a previsão do comportamento de escoamento do fluido durante o enchimento de moldes e peças em geral. O estudo desses escoamentos de forma experimental demandaria muito tempo, além de ser muito custoso. Por isso, o uso de softwares de simulação, conforme os oferecidos pela ANSYS, têm se propagado rapidamente, permitindo ao usuário a obtenção de resultados de forma mais rápida, prática e com menores custos.
- O posicionamento e a distribuição dos pontos de injeção são determinantes para que a resina molhe toda a fibra e não haja formação de pontos secos. Uma boa distribuição das entradas de resina também é capaz de reduzir os custos do processo, uma vez que permite um enchimento mais rápido e mais eficiente. Para as geometrias utilizadas nas simulações, pode-se observar que moldes com entradas superiores são mais eficazes porque fornecem simulações mais rápidas, uma vez que submetem o fluxo de resina aos obstáculos simultaneamente, forçando a redução do número de Courant uma única vez. Além disso, o molde com entrada lateral superior não se mostrou tão eficiente, pois necessitaria de um número maior de *vents*, podendo acarretar em maior perda de resina.
- O aquecimento de todas as paredes presentes em um molde não necessariamente diminui o tempo total da reação de reticulação. No entanto, aumenta a propagação da cura, permitindo maiores valores de alfa em uma área mais ampla do molde.

5.2. *Propostas para Trabalhos Futuros*

Com relação aos trabalhos futuros sobre o processo RTM utilizando a abordagem CFD, propõem-se as seguintes sugestões:

- Variação do tipo de resina e de fibra, bem como, suas respectivas frações volumétricas.
- Simulações em moldes mais complexos, que representem peças utilizadas no cotidiano ou peças mais sofisticadas, como por exemplo, carcaça de carro e de avião.
- Utilização de malhas mais finas para maior precisão dos resultados.
- Acompanhamento da formação de compósito e atualização de suas propriedades físicas ao longo da reação de cura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SHOOK, G. **Reinforced Plastics for Commercial Composites Source Book**, 1986, ASM, Metals Park, Ohio, EUA.
- [2] U.S. Department of Agriculture Forest Service. **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**, 1987, Agricultural Handbook No. 72, Washington DC, EUA.
- [3] **Introduction to Composites**. 1998, 4th Edition, Composites Institute, Society of the Plastics Industry, New York, NY, EUA.
- [4] ROSATO, D. V. **Designing with Reinforced Plastics**, 1997 Hanser/Gardner, Cincinnati, Ohio, EUA.
- [5] AMERICAN COMPOSITES MANUFACTURERS ASSOCIATION, **Composites Manufacturing Process**.
Disponível em : <<http://www.abiquim.org.br/resinastermoplasticas/principais.asp>>.
Acesso em 22/12/11 às 17 horas.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA, **Principais Resinas**.
Disponível em : <<http://www.abiquim.org.br/resinastermoplasticas/principais.asp>>.
Acesso em 22/12/11 às 17 horas.
- [7] BRENT, A. **Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications**, 2008, 2nd Edition, EUA.
- [8] SILAEX. **Resina Epóxi**.
Disponível em: <<http://www.silaex.com.br/epoxi.htm>>.
Acesso em 22/12/11 às 17 horas.
- [9] SEGANTE, E. J. **Compósitos**.
Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/38474870/COMPOSITOS>>.
Acesso em 22/12/11 às 17 horas.

[10] PAMPLONA, E. **Técnicas da Fibra de vidro.**

Disponível em: <<http://autosom.net/artigos/fibra.htm>>.

Acesso em 22/12/11 às 17 horas.

[11] COSTA, M., REZENDE, M., PARDINI, LUIZ. **Métodos de Estudo da Cinética de Cura de Resinas Epóxi.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, Abril/Junho 1999, SP.

[12] CALADO, V., ADVANI, S. **Thermoset Cure Kinetics and Rheology**

[13] SHOJAEI, A.; GHAFFARIAN S. R.; KARIMIAN, S. M. H. **Numerical Simulation of three-dimensional molding filling process in resin transfer molding using quasi-steady state and partial saturation formulation.** Composites Science and Technology, vol. 62, pp. 861-879, 2002.

[14] TROCHU, F., RUIZ, E., ACHIM, V., SOUKANE, S. **Advanced Numerical simulation of liquid composite molding for process analysis and optimization.** Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005.

[15] BEAR, J., BACHMAT, Y. **Introduction to modeling of transport phenomena in porous media.** Kluwer Academic Publishers, 1990.

[16] BASTIAN, P. **Numerical computation of multiphase flows in porous media,** 1999.

[17] CHUNG, T. **Applied Continuum Mechanics.** Cambridge University Press, 1996.

[18] JOACHIM KEIM GmbH. **RTM Process.**

Disponível em: <<http://www.keim-fasertechnik.de/rtm-process.html>>.

Acesso em 22/12/11 às 17 horas.

[19] NASCIMENTO, J. T. **Uso de CFD na Otimização das Proporções Geométricas de um Hidrociclone para a Separação de Dispersões Óleo/Água Provenientes de Refinarias.** 2008. 50 f. Monografia (Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

[20] ANSYS CFX (2009): **ANSYS CFX Reference Guide**. Release 12.0. ANSYS, Inc. April 2009. Southpointe. 275 Technology Drive.

[21] BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHTFOOT, Y. **Transport Phenomena**. 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc, 2002.

[22] LIU, X. L., CROUCH, I. G., LAM, Y. C. **Simulation of heat transfer and cure pultrusion with a general-purpose finite element package**. Composites Science and Technology 60, 2000.

[23] ANTONUCCI, V.; GIORDANO, M.; HSIAO K.; ADVANI, S. G. **A methodology to reduce thermal gradients due to the exothermic reactions in composites processing**. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 45, pp. 1675–1684, 2002.

[24] HISAO, K., LITTLE, R., RESTREPO, O., MINAIE, B. **A study of direct cure kinetics characterization during liquid composite molding**. Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005.

[25] LIN, M. Y.; MURPHY, M. J.; HAHN, H. T. **Resin Transfer Molding Process Optimization**. Composites, vol. 31, pp. 361–371, 2000.

[26] SANTOS, M. M., “**Simulação Numérica do Escoamento Bifásico Óleo-Água em Tubos**”, Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, Minas Gerais, 2010.

[27] ANZAI, T. K. **Fluidodinâmica Computacional e equações empíricas para a estimativa da queda de pressão em ciclones**. 2010. 67 f. Monografia (Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.