



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS ANTONIO DE ARAÚJO MOTA

MANUFATURA DE COMPOSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM LIGAS
NiTi VIA RTM: MODELAGEM E SIMULAÇÃO VIA CFX

Campina Grande, PB

2018

CARLOS ANTONIO DE ARAÚJO MOTA

MANUFATURA DE COMPOSITO POLIMÉRICA REFORÇADO COM LIGAS
NÍTI VIA RTM: MODELAGEM E SIMULAÇÃO VIA CFX

Dissertação apresentada a
Universidade Federal de Campina
Grande, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica do programa de
PÓS-Graduação em Engenharia
Mecânica.

Área de Concentração: Fenômenos
de Transporte e Energia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Gilson
Barbosa de Lima

Campina Grande, PB

2018

M917m Mota, Carlos Antonio de Araújo.
Manufatura de compósito polimérico reforçado por ligas de NiTi via RTM : modelagem e simulação via CFX / Carlos Antonio de Araújo Mota. – Campina Grande, 2018.
95 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.
"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".
Referências.

1. Compósito. 2. Ligas com memória de forma. 3. Fluxo de resina. 4. Simulação. 5. Ansys CFX. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

CDU 620(043)

MANUFATURA DE COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM LIGAS NiTi VIA RTM:
MODELAGEM E SIMULAÇÃO VIA CFX

CARLOS ANTONIO DE ARAUJO MOTA

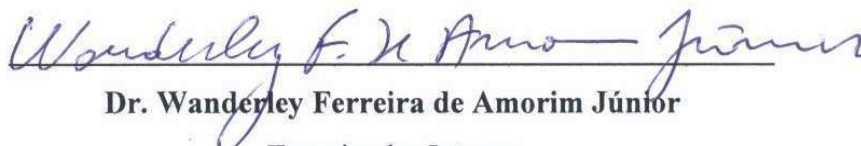
Dissertação Aprovada em 27/08/2018 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes
membros:



Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Orientador

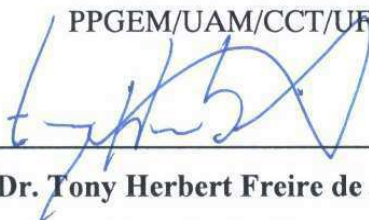
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Examinador Interno

PPGEM/UAM/CCT/UFCG



Dr. Tony Herbert Freire de Andrade

Examinador Externo

UFCG

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

ã Deus, em primeiro lugar.

Aos meus pais, Carlos e Aparecida por todo incentivo e dedica'2o para comigo.

ã Yasmine, minha namorada.

Aos meus irm² os, Moisés e Pedro.

Ao professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, por todo ensinamento e confian' a.

Aos amigos de trabalho, principalmente aos integrantes do Laborat'rio Computacional de Térmica e Fluidos/JAEM/CCT/UFCG.

ã CAPES, CNPQ e FINEP pelo financiamento da pesquisa.

Combati o bom combate [ű]

Paulo.

ARAÚJO MOTA, C.A. Manufatura de compósito polimérico reforçado por ligas de NiTi via RTM: Modelagem e Simulação via CFX. 2018. Dissertação (Mestrado) - Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

RESUMO

Materiais "smart" têm ganhado um grande espaço no ambiente acadêmico e industrial, sendo utilizados no desenvolvimento e estudo de novos produtos tanto no mercado automotivo e aeroespacial, quanto na área médica. Neste contexto, as ligas metálicas com memória de forma têm sido utilizadas para o desenvolvimento de novos materiais, especificamente, os compósitos poliméricos reforçados com memória de forma. Devido as grandes aplicações destes materiais compósitos na indústria de alta precisão, o processo de fabricação torna-se um importante fator que contribui para a qualidade final e desempenho estrutural do produto. O processo de Moldagem por Transferência de Resina (RTM) mostra-se um método que apresenta tais requisitos, como acabamento superficial, qualidade na peça e menor tempo de processamento. Assim, este trabalho tem por objetivo, simular numericamente o processo de manufatura de um compósito polimérico reforçado por fitas de NiTi com memória de forma via RTM, utilizando o modelo de escoamento multifásico Euleriano-Euleriano, em condições transiente e isotérmica. A solução das equações governantes foi realizada utilizando o software CFX. Resultados dos campos de pressão, velocidade e fração volumétrica das fases são apresentados e avaliados. Dos resultados obtidos conclui-se que a vazão, como parâmetro de processo, é um fator que contribui para qualidade final do produto, mostrando uma melhora no acabamento superficial da peça. Consequentemente, uma redução da fração de ar em seu interior foi obtida. Além disso, as propriedades do fluido (densidade e viscosidade) mostram-se como fatores diretamente ligados ao dimensionamento do sistema de injeção. A posição de injeção de resina está ligada tanto a energia utilizada para injeção do fluido no interior do molde, como em relação ao percentual de vazios presentes no interior do molde.

Palavras-chave: Compósito, Ligas com memória de forma. Fluxo de resina. Simulação, Ansys CFX.

ARAÚJO MOTA, C.A. Manufacturing of polymer composite reinforced by NiTi alloys by RTM: Modelling and Simulation by CFX. 2018. Master Theses - Academic Unity of Mechanical Engineering, Federal University of Campina Grande, Campina Grande, 2018.

ABSTRACT

Smart materials had got a big place in industrial and academics environment, and it has been used for development and study of new products in the aerospace and automotive industries and the medical area. In this context, the metallic shape memory alloys has been used to develop new materials, specifically, the polymers composite reinforced by shape memory alloys. Due to application of these composites materials is directed to high precision industry, the manufacturing process is an important factor that contribute to finish quality and structural performance of the product. The Resin Transfer Molding (RTM) process shows itself a method that present this requisites, as finish surface, piece quality and lower process time. Then, the mean of this work is simulate numerically the manufacturing process of a polymer composite reinforced by NiTi ribbons by RTM, using the Eulerian-Eulerian multiphase flow model in unsteady and isothermal conditions. The solution of the governing equations was realized by a CFX software. The results of pressure field, velocity and the phases volume fraction presents and analysed. By the results, concluded that the bulk-flow, as a process parametres, is a fact that contributed for product final quality, shows an improvement on the material surface finish. Consequently, the air fraction reduction was obtained. Futhermore, the fluid properties (density and viscosity) show a factor to injection system project. The resin injection position is connected to the injection energy than percent of void formation.

Key-words: Smart materials. Polymer composite. Shape memory alloys. Resin Transfer Molding. Numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Evolução da fração de martensita com a temperatura	25
Figura 2.2 -	Transformação de fases na LMF	26
Figura 2.3 -	Fases das LMF e estrutura cristalina	27
Figura 2.4 -	Imagem por MEV da superfície fraturada do epóxi (a) fios de LMF descolado e (b) fio de LMF parcialmente colado/descolado	30
Figura 2.5 -	Padrão do descolamento em fios de LMF em matriz polimérica usando (a) ensaio de tração e (b) ensaio de fadiga	31
Figura 2.6 -	Imagem de microscopia óptica de um compósito CFRP/NiTi com elevada fração volumétrica de NiTi fios de NiTi e (b) consequência do efeito da auto contração dos fios de NiTi treinados na matriz CFRP.	32
Figura 2.7 -	Deformações de um compósito elastômero-LMF (a) no plano e (b) fora do plano	32
Figura 2.8 -	Demonstração da variação de rigidez do compósito elastômero-LMF.	33
Figura 2.9 -	Energia absorvida pelo compósito reforçado e não reforçado por LMF	34
Figura 2.10 -	Processo de Moldagem por Transferência de Resina	36
Figura 2.11 -	(a) Efeito race-tracking e (b) fator que o origina	36
Figura 2.12 -	Representação (a) vazios no reforço e (b) processo de formação	37
Figura 2.13 -	Comparativo entre os softwares ANSYS CFX e PAM-RTM com um experimento RTM	39
Figura 2.14 -	Esquema de controle de fluxo para a minimização de vazios	40
Figura 2.15 -	Volume de controle contendo dois fluidos limitados por uma interface	42
Figura 3.1 -	Fluxograma de atividades	45
Figura 3.2 -	Elementos metálicos de NiTi utilizados como reforço para geração da malha numérica (a) vista superior e (b) dimensões da seção transversal da fita	46
Figura 3.3 -	Geometria do molde gerada com as fitas de NiTi presentes com dimensões em milímetros.	46

Figura 3.4 - Critérios de qualidade do CFX-Solver (a) ângulo de ortogonalidade, (b) fator de expansão e (c) razão de aspecto.	48
Figura 3.5 - Malha numérica utilizada no processo de simulação (a) vista isométrica, detalhe para região de (b) entrada e (c) saída e (d) fita.	49
Figura 3.6 - Injeção de resina na região central do molde.	55
Figura 3.7 - Localização da linha de análise do perfil de velocidade no interior do molde, (a) vista isométrica e (b) vista frontal	55
Figura 4.1 - Comparativo entre os perfis de velocidade numérico e analítico	57
Figura 4.2 - Fração volumétrica de resina no instante de 152 s para (a) Caso 01, (b) Caso 02 e Caso 03	59
Figura 4.3 - Avanço da resina na região central do molde para (a) Caso 01, (b) Caso 02 e (c) Caso 03	60
Figura 4.4 - Comportamento transiente da pressão na região de entrada ao longo tempo de processo.	62
Figura 4.5 - Fração volumétrica das fases presentes no escoamento ao longo do tempo de processo (a) Caso 01, (b) Caso 02 e (c) Caso 03	62
Figura 4.6 - Fluxo massico de resina (a) Caso 01, (b) Caso 02 e (c) Caso 03	64
Figura 4.7 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em (a) $t=9s$, (b) $t=11s$, (c) $t=13s$, (d) $t=15s$ e (e) $t=17s$ (Caso 01)	65
Figura 4.8 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em (a) $t=5s$, (b) $t=6s$, (c) $t=7s$, (d) $t=8s$ e (e) $t=9s$ (Caso 02).	65
Figura 4.9 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em (a) $t=2s$, (b) $t=3s$, (c) $t=4s$, (d) $t=5s$ e (e) $t=6s$ (Caso 03).	66
Figura 4.10 - Comportamento da pressão ao longo do eixo x_1	66
Figura 4.11 - Distribuição de (a) pressão (b) velocidade da resina no plano $y=1mm$ em $t=152s$ (Caso 01)	67
Figura 4.12 - Distribuição de (a) pressão (b) velocidade da resina no plano $y=1mm$ em $t=152s$ (Caso 02)	67
Figura 4.13 - Distribuição de (a) pressão (b) velocidade da resina no plano $y=1mm$ em $t=152s$ (Caso 03)	68

Figura 4.14 - Zonas de vazios nas regiões próximas a saída (a) Caso 01, (b) Caso 02 e (c) Caso03	69
Figura 4.15 - Fração volumétrica de resina no instante 152 s para (a) Caso 04, (b) Caso 05 e (c) Caso 06.	70
Figura 4.16 - Avanço da resina na região central do molde para (a) Caso 01, (b) Caso 02 e (c) Caso 03.	71
Figura 4.17 - Comportamento transiente da pressão na região de entrada ao longo do tempo de processo com a variação das propriedades da resina.	72
Figura 4.18 - Fração volumétrica das fases presentes no escoamento ao longo do tempo de processo (a) Caso 04, (b) Caso 05 e (c) Caso 06.	73
Figura 4.19 - Fluxo médio de resina (a) Caso 04, (b) Caso 05 e (c) Caso 06.	74
Figura 4.20 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em (a) $t=5s$, (b) $t=6s$, (c) $t=7s$, (d) $t=8s$ (Caso 04).	75
Figura 4.21 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em (a) $t=5s$, (b) $t=6s$, (c) $t=7s$, (d) $t=8s$ (Caso 05).	76
Figura 4.22 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em (a) $t=2s$, (b) $t=3s$, (c) $t=4s$, (d) $t=5s$ (Caso 06).	76
Figura 4.23 - Distribuição de (a) pressão (b) velocidade da resina no plano $y=1mm$ em $t=152s$ (Caso 04).	76
Figura 4.24 - Distribuição de (a) pressão (b) velocidade da resina no plano $y=1mm$ em $t=152s$ (Caso 05)	76
Figura 4.25 - Distribuição de (a) pressão (b) velocidade no plano $y=1mm$ em $t=152s$ (Caso 06)	76
Figura 4.26 - Zonas de vazios nas regiões próximas a saída (a) Caso 04, (b) Caso 05 e (c) Caso06	77
Figura 4.27 - Fração volumétrica de resina no instante 152 s para (a) Caso 07, (b) Caso 08 e (c) Caso 09	78
Figura 4.28 - Avanço da resina na região central do molde (a) Caso 07, (b) Caso 08 e (c) Caso 09.	79

Figura 4.29 - Comportamento transiente da pressão na região de entrada ao longo tempo de processo, para diferentes posições de injeção.	80
Figura 4.30 - Fração volumétrica das fases presentes no escoamento ao longo do tempo de processo (a) Caso 07, (b) Caso 08 e (c) Caso 09.	81
Figura 4.31 - Fluxo massico de resina (a) Caso 07, (b) Caso 08 e (c) Caso 09.	82
Figura 4.32 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em diferentes tempos de processo (a) t=5s, (b) t=6s, (c) t=7s, (d) t=8s (Caso 07).	82
Figura 4.33 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em diferentes tempos de processo (a) t=5s, (b) t=16s, (c) t=20s, (d) t=25s (Caso 08).	83
Figura 4.34 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em diferentes tempos de processo (a) t=2s, (b) t=3s, (c) t=5s, (d) t=6s (Caso 09)	83
Figura 4.35 - Distribuição de (a) pressão (b) velocidade da resina no plano y=1mm em t=152s (Caso 07)	84
Figura 4.36 - Distribuição de (a) pressão (b) velocidade da resina no plano y=1mm em t=152s (Caso 08)	84
Figura 4.37 - Distribuição de (a) pressão (b) velocidade da resina no plano y=1mm em t=152s (Caso 06)	84
Figura 4.38 - Zonas de vazios nas regiões próximas a saída (a) Caso 07, (b) Caso 08 e (c) Caso 09.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Condições inicial, tempo total e passo-de-tempo do processo de simulação.	51
Tabela 3.2 - Casos analisados variando-se a vazão (velocidade) e resina.	51
Tabela 3.3 - Casos analisados variando-se a pressão de injeção.	52
Tabela 3.4 - Casos com variando-se as posições de entrada e saída de resina e ar no molde.	51
Tabela 4.1 - Relação entre a vazão, tempo e fração volumétrica.	56
Tabela 4.2 - Fração volumétrica de resina (r) e volume de ar (v_{ar}) presente no molde no instante de $t=152s$.	59

LISTA DE SÍGLAS

LCM - Liquid Composite Mold

RTM - Resin Transfer Molding

LMF - Shape memory alloys

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

VOF - Volume of Fluid

FE/CV - Finite Element and Control Volume

CFD - Computational Fluid Dynamics

LISTA DE SÍMBOLOS

r	Fração volumétrica da fase	
V	Volume da fase	[m ³]
V	Volume total	[m ³]
M	Termo fonte de transferência interfacial	[N/m ³]
G_{ab}	Fluxo mássico por unidade de volume	[kg/s.m ³]
\vec{U}_a	Vetor velocidade da fase	[m/s]
a	Altura do molde	[mm]
$\frac{\partial p}{\partial x}$	Gradiente da pressão na direção x	[Pa/m]
\bar{e}_p	Gradiente de pressão	[Pa/m]
$U_{j,entrada}$	Velocidade de injeção na direção y	[m/s]
$P_{saída}$	Pressão na saída do molde	[Pa]
$P_{injeção}$	Pressão de injeção na entrada	[Pa]
$U_{Máx}$	Velocidade máxima do escoamento	[m/s]
\vec{M}_a	Termo fonte de transferência interfacial	
W_m	Espessura do molde	[mm]
W_f	Espessura da fita	[mm]
dx, dy, dz	Intervalo diferencial de comprimento	[m]
\equiv	Massa específica da fase	[kg/m ³]
p	Pressão	[Pa]
S_{MSa}	Termo fonte de massa	
G_{ab}	Fluxo mássico da fase ϕ para	[kg/m ³ .s]
\approx	Viscosidade da fase	[Pa.s]
p	Pressão da fase	[Pa]
\vec{M}_{af}^D	Transferência interfacial devido ao arrasto entre as fases	
$C_{ab}^{(d)}$	Coefficiente de arrasto adimensional	
C_D	Coefficiente de arrasto	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Justificativa	19
1.2	Objetivos	19
1.3	Delimitações	20
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	Materiais SMARTs	21
2.2	Ligas com memória de forma (LMF)	23
2.3	Compositos poliméricos reforçados com ligas de memória de forma	26
2.4	Moldagem Líquida de Compositos (LCM)	32
2.4.1	Fundamentos	32
2.4.2	Moldagem por transferência de resina (RTM)	33
2.4.3	Simulação numérica do processo RTM	34
2.5	Escoamento multifásico	39
2.5.1	Euleriano-Lagrangiano	41
2.5.2	Euleriano-Euleriano	41
3	METODOLOGIA	43
3.1	Geração da malha	44
3.1.1	Definição da geometria	44
3.1.2	Malha numérica	45
3.2	Modelo matemático	48
3.3	Seleção dos casos	51
3.4	Validação do modelo matemático	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	Validação do modelo	55
4.2	Análise de casos	56
4.2.1	Efeito da velocidade de injeção	56
4.2.2	Efeito das propriedades (densidade de viscosidade) da resina	67
4.2.3	Efeito da posição de injeção	75
5	CONCLUSÕES	86

5.1	Conclusões	86
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	87
	REFERÊNCIAS	88

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A aplicação de materiais compósitos no desenvolvimento de produtos apresentou um crescimento nos últimos anos devido as suas características, como por exemplo; leveza e resistência, sendo aplicados nas indústrias aeronáutica, espacial e esportiva. Além disso, outros segmentos industriais, tais como: geração de energia, infraestrutura, arquitetura, automobilístico, naval e biomédica, também desenvolvem produtos que utilizam materiais compósitos (MICHAUD, 2016).

No segmento naval, vem surgindo o interesse de se desenvolver hélices, que são componentes do sistema de propulsão, em materiais compósitos. Fontoura (2009) analisou sistemas de propulsão, onde as hélices confeccionadas de materiais compósitos alcançam maior rotatividade do que as de materiais metálicos tradicionais que são feitas de metal. Além disso, compósitos apresentam uma redução de peso em 18-25% quando comparados aos fabricados em materiais metálicos (PORTO et al., 2012).

As indústrias; naval, automobilística e aeroespacial, por desenvolverem produtos de alta tecnologia, recorrem a métodos de manufatura que apresentem alto desempenho, uma ótima relação custo-benefício e volume de produção (OLIVEIRA, 2014). Dentre os métodos de manufatura, os processos de moldagem líquida, Liquid Composite Moulding (LCM) tem sido aplicado. Dentre estes destaca-se processo de moldagem por transferência de resina (RTM), (CERQUEIRA, 2008).

O processo de moldagem por transferência de resina (RTM) envolve a injeção de uma resina pré-catalizada em um molde contendo uma pré-forma fibrosa, seguida de um processo de cura (OLIVEIRA et al., 2009).

Para se obter uma eficiência do processo RTM, deve-se analisar diversos parâmetros, tais como: pressão de injeção, pontos de entrada e saída, forma do molde, permeabilidade do reforço fibroso e sua disposição no interior do molde, viscosidade da resina e temperatura na qual o processo acontece (SOZER et al., 1999).

Segundo Hattabi et al. (2008), a complexidade das geometrias utilizadas no processo de manufatura de estruturas em compósitos através do RTM, exige que os engenheiros e cientistas utilizem a simulação numérica para definir alguns parâmetros do processo, como por exemplo: os pontos de entrada da resina, saídas de ar e pressão de injeção.

1.1 Justificativa

Ligas metálicas com memória de forma (LMF) encaixam-se na categoria de materiais smart. Esses materiais que possuem a capacidade de alterar suas propriedades físicas através de estímulos externos, tendo aplicação nas indústrias de alta tecnologia, tais como: aeronáutica e aeroespacial, além da biomedicina.

As LMF possuem características intrínsecas, fazendo com que sejam objeto de estudo acadêmico e de aplicação industrial. Atualmente, tais ligas têm sido utilizadas como reforço de materiais poliméricos, abrangendo ainda mais o seu campo de aplicação (Bodaghi et al., 2015). Nesta área de estudo, o comportamento termomecânico do compósito reforçado pelas ligas com efeito memória de forma, tem sido analisados a partir de experimentos e simulações numéricas, sob diferentes estímulos externos.

Por tratar-se de um tipo de material nobre, com aplicações em indústrias de alta tecnologia, torna-se necessário que o processo de manufatura implique em alta qualidade do produto, tanto do ponto de vista dimensional, quanto de suas características físicas e mecânicas. O processo de manufatura RTM oferece características como: qualidade no acabamento final do produto, excelente controle de propriedades do material, baixo custo, etc. Portanto, surgiu a curiosidade de utilizar o RTM na manufatura de materiais poliméricos reforçados por ligas de NiTi.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral estudar numericamente o processo de manufatura de compósitos poliméricos reforçados com ligas de NiTi via RTM.

Como objetivos específicos pode-se citar:

- a) Apresentar a modelagem matemática tridimensional e transiente para descrever o processo de manufatura do compósito polimérico reforçado com liga NiTi via RTM;
- b) Simular numericamente o processo de manufatura por RTM com auxílio do software Ansys CFX Release 15;
- c) Analisar o campo de pressão, velocidade e fração volumétrica do ar e resina durante o processo de injeção de resina;
- d) Analisar o fluxo da resina e ar durante o preenchimento do molde e o seu comportamento em torno das fitas de NiTi;
- e) Verificar a influência da localização dos pontos de entrada e saída no molde sobre o comportamento da resina e ar durante o preenchimento;
- f) Verificar a influência dos parâmetros operacionais (pressão e velocidade) de injeção de resina sobre o tempo e comportamento das fases fluidas durante o preenchimento do molde.

1.3 Delimitações

Neste trabalho, o objeto de estudo é a fluidodinâmica do escoamento de resina no interior do molde durante o processo de manufatura de compósito polimérico reforçado por fitas de NiTi, desprezando os efeitos da variação de temperatura entre o molde e a resina injetada. Além disso, o estudo não foca nas propriedades mecânicas nem na adesão entre a resina e a fita de NiTi. Trata-se de um estudo puramente hidrodinâmico, isotérmico e transiente de resina na cavidade do molde.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Materiais SMARTs

Os materiais smart têm ganhado atenção devido às suas características e propriedades. Alguns autores apresentam definições para esses materiais como segue:

Segundo Ramos (2006):

“Materiais smart são uma classe de materiais que apresentam múltiplas respostas a um estímulo ou que possuem características específicas com a variação de mudanças bruscas ou ainda que reproduzam funções biológicas.”

Para Adguzel (2007):

“Os termos smart ou inteligentes são utilizados para materiais que exibem um aspecto peculiar, como a habilidade de chegar a uma forma desejada de material em diferentes temperaturas.”

Lopez-Walle et al. (2015) definem materiais smart como:

“Tipos de materiais que possuem a capacidade de modificar suas características mecânicas ou propriedades físicas quando submetidos a estímulos (térmicos, elétricos, magnéticos, etc.) e retornam às suas propriedades originais quando o estímulo é retirado.”

Segundo Drossel et al. (2015):

“Materiais smart são designados como materiais que podem apresentar significativa mudança no controle de sua forma através de estímulos externos aplicados, tais como: tensão, temperatura, campo elétrico e magnético.”

A partir destas definições, entende-se uma forma global de definir tais materiais, e verifica-se as diferentes naturezas dos estímulos, proporcionando uma diversificação de aplicação destes materiais.

Drossel et al. (2015) expõem três classificações dentro desta classe de materiais, são elas:

- a) Piezocerâmicos;
- b) Atuadores elastômeros dielétricos (DEA);
- c) Ligas com memória de forma (LMF).

A classificação de Drossel et al. (2015) delimita-se em uma determinada área de concentração, que é a aplicação deste tipo de material para desenvolvimento de atuadores. Os autores classificam esses materiais em convencionais e não convencionais.

Kaushal et al. (2016) apresentam outros materiais "smarts", diferentes daqueles apresentados por Drossel et al (2015), que são:

- a) Fluidos magnéticos;
- b) Fibra óptica.

Outros autores apresentam novos tipos de materiais inteligentes, como os polímeros com memória de forma (SMP), apresentados por El Feninat et al. (2002) e uma derivação deste tipo de material, que é o composto polimérico com memória de forma (SMPC), apresentado por Chen et al. (2014).

Neste contexto, as ligas com memória de forma ganharam visibilidade a partir de estudos realizados na década de 30, especificamente por Landner et al. (1932), apud EL FENINAT et al. (2002) onde começou a se observar o efeito de memória de forma em ligas metálicas Au-Cd. Em 1938, Greninger et al. (1938), apud EL FENINAT et al. (2002) observaram o efeito de memória de forma em ligas Cu-Zn. Foi na década de 60 que Buehler et al. (1968) verificaram o efeito de memória de forma nas ligas de Ni-Ti, também conhecidas como Nitinol.

A partir de 1970, diversos pesquisadores trabalharam com o Nitinol, estudando suas características e buscando aplicações deste material, além daquela proposta por Buehler et al. (1968). Assim, Eckelmeyer (1975) estudaram o efeito da adição de outros elementos metálicos na composição da liga de Nitinol com o objetivo de verificar o efeito desta adição na temperatura de recuperação do material, que é um intervalo da temperatura onde ocorre o efeito de memória de forma.

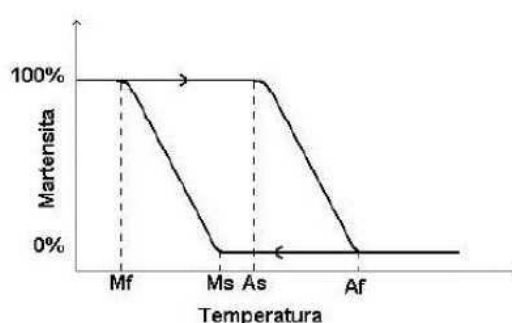
Melton et al. (1980) analisaram as propriedades mecônicas da liga de NiTi, variando sua composição em relação ao percentual de Níquel e Titânio, além de adicionar elementos como Ferro e Cobre em sua composição.

Itin et al. (1994) apresentaram em seu trabalho o estudo das propriedades mecônicas de uma liga porosa de NiTi com efeito de memória de forma, baseados em estudos russos, de ligas com memória de forma aplicadas em medicina.

2.2 Ligas com memória de forma (LMF)

Ligas com memória de forma são materiais metálicos que apresentam duas características únicas, o efeito de memória de forma (Shape memory effect) e o efeito superelástico (Superelasticity) (OTSUKA et al., 1999). Estes efeitos são verificados em determinadas temperaturas; A_s , M_s , A_f e M_f . A Figura 2.1 apresenta o diagrama de fase de uma liga de memória de forma (LMF), indicando essas temperaturas. Nela apresenta-se a fração de martensita em função da temperatura, onde torna-se possível visualizar que existem temperaturas específicas para que ocorra a variação da fase cristalina, neste caso, martensita e austenita. É nesta variação das fases que se dá a mudança na estrutura cristalina da LMF, que está diretamente relacionada com a dissipação de energia, como consequência dos choques de discordâncias e o surgimento de defeitos cristalinos (CASTILHO, 2008).

Figura 2.1 - Evolução da fração de martensita com a temperatura.



Fonte - Castilho (2008)

Torna-se necessário a definição de cada temperatura apresentada na Figura 2.1. Sendo assim, tem-se:

A_s : Início de transformação reversa acima da temperatura de aquecimento ou Austenite start, que é o instante em que se dá início a mudança de fase, da martensita para a austenita;

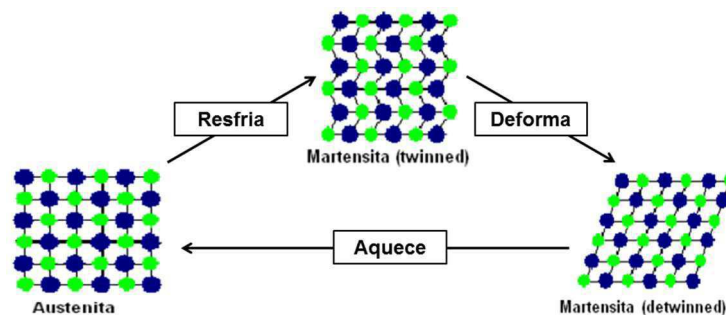
M_s : Início de transformação da martensita abaixo da temperatura de resfriamento ou Martensite start, que é o momento em que ocorre a formação de martensita;

A_f : Final da transformação reversa acima da temperatura de aquecimento Austenite finish, momento em que ocorre a transformação total da martensita em austenita;

M_f : Final da transformação de martensita abaixo da temperatura de resfriamento ou Martensite finish, instante em que ocorre a formação completa de martensita.

Tais fases são representadas por estruturas cristalinas diferentes umas das outras, implicando assim também em características mecânicas diferenciadas. Pode-se citar por exemplo, o módulo de elasticidade das fases, onde a austenita apresenta um módulo de elasticidade bem mais elevado que a fase martensita (VILLAR et al., 2016). A variação destas propriedades está relacionada à estrutura cristalina do material. Delaey et al. (1974), apud CASTILHO (2008) apresentam a variação da estrutura cristalina da martensita e da austenita devido aos efeitos de temperatura e tensão. Estas formas são apresentadas na Figura 2.2.

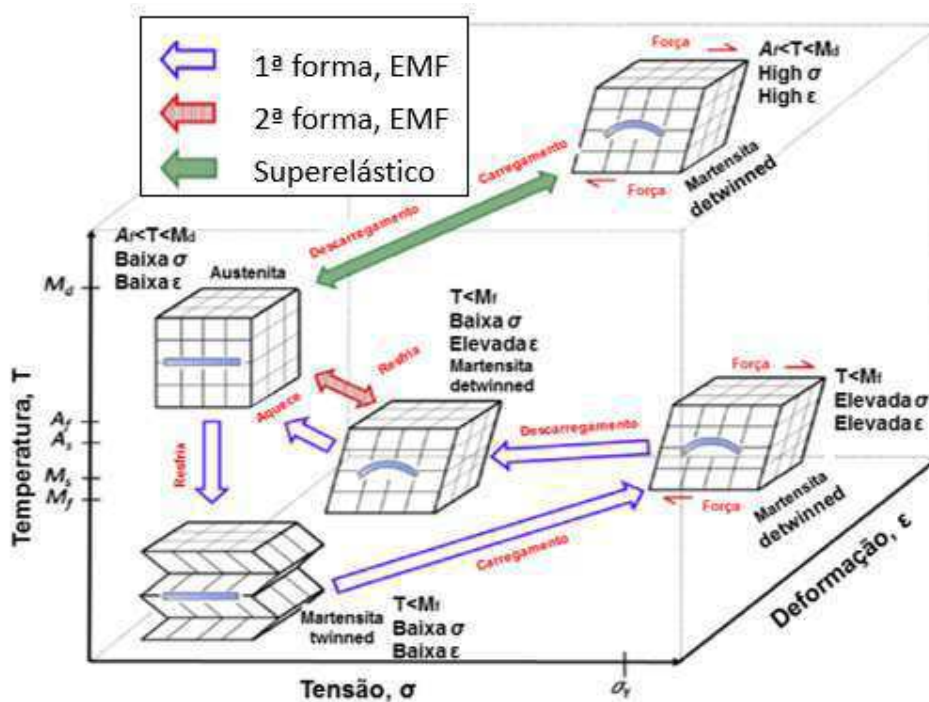
Figura 2.2 - Transformação de fases na LMF



Fonte - Castilho (2008).

A Figura 2.3 apresenta o diagrama de tensão-deformação-temperatura de uma liga de memória de forma, representando os efeitos de memória de forma e superelástico.

Figura 2.3 - Fases das LMF e estrutura cristalina.



Fonte - Jani et al. (2014).

O efeito de memória de forma, observado na Figura 2.3, nomeado como 1ª forma EMF, é caracterizado pela aplicação de calor nas ligas LMF, produzindo a variação da forma da liga. Isto ocorre devido a mudança de fase de martensita não-maclada (detwinned) para a austenita, como consequência do aquecimento acima da temperatura de A_f . Assim, o material retorna a sua forma original.

O efeito superelástico, Figura 2.3, é caracterizado pela indução de transformação de fase através de tensões aplicadas no material, que inicialmente encontra-se na fase austenítica, e torna-se martensita não-maclada (detwinned). Quando é realizado o carregamento do material na fase austenítica, acima da temperatura A_f , ocorre uma reorganização na estrutura cristalina da liga, originando a martensita não-maclada. Durante esse processo, ocorre uma elevada deformação do material. Após o descarregamento da liga, ocorre a transformação reversa da martensita para austenita, retornando ao seu estado original.

2.3 Compósitos poliméricos reforçados com ligas de memória de forma

Com o avanço nos estudos de materiais "smart", especificamente os materiais com memória de forma, surgiu então o interesse de se utilizar reforços de LMF em matrizes poliméricas e em compósitos propriamente ditos, ou seja, reforçados tanto com uma pré-forma fibrosa como com um reforço metálico de LMF.

Diversos autores trabalharam com esse tipo de material, tendo como objetivo tanto o estudo estrutural como o comportamento do material quando submetido a agentes externos, sejam eles temperatura ou forças atuantes. Além disso, alguns autores também utilizaram a modelagem matemática em conjunto com a simulação numérica com o objetivo de prever o comportamento mecânico e térmico do novo material desenvolvido (Lei et al., 2012; Pulla et al., 2016)

Callister Jr. (2002) define compósitos como sendo um material multifásico desenvolvido artificialmente, onde cada fase deve possuir características químicas diferentes e serem separados por uma interface. Embasado nisto, Castilho (2008) desenvolveu um compósito híbrido, com matriz polimérica, reforçado com fio de NiTi onde realizou ensaios mecânicos de tração em conjunto com o aquecimento dos fios de NiTi, com o objetivo de verificar a influência da mudança de fase nas propriedades mecânicas do material e o efeito da temperatura sobre a matriz polimérica. Foi verificado em seu trabalho que o compósito apresentou aumento do módulo de elasticidade, consequência do reforço metálico inserido. Porém, com o aquecimento dos fios de NiTi, foi verificado uma redução do módulo de elasticidade do compósito quando a Nitinol encontrou-se na fase austenítica comparando-o com a liga na fase martensítica. Ele atribuiu essa redução ao amolecimento da matriz polimérica devido a temperatura alcançada para realizar a mudança de fase da liga LMF.

Sendo assim, a temperatura atingida durante o processo de aquecimento das ligas de NiTi contribui não só para o aumento da rigidez do material, no caso a LMF, como também pode influenciar negativamente nas propriedades mecânicas da matriz na qual a liga metálica está inserida.

Mota et al. (2017) verificaram o comportamento térmico de um compósito reforçado por fios de NiTi embebidos em uma matriz polimérica de epóxi. A amostra foi produzida com três fios de NiTi, com diâmetro de 0,5 mm. Os autores perceberam

um aumento significativo da temperatura no interior da amostra chegando aos 60°C, principalmente na região da interface.

Faluhelyi (2013) também utilizou compósitos poliméricos reforçados com ligas de NiTi para a confecção de uma viga, utilizando fibra de vidro e fios de NiTi. O processo utilizado para confecção da amostra foi o VARTM, que será comentado mais adiante. O autor analisou o comportamento estático e dinâmico da viga através de ensaios experimentais e simulações numéricas. As vigas confeccionadas, neste material, apresentaram um aumento da rigidez quando os fios de NiTi foram aquecidos, de modo que ocorresse a mudança de fase, isto é, formação de austenita através da temperatura. Isto implica em uma maior capacidade de amortecimento. Além disso, observou uma dificuldade de se obter as frequências naturais através de experimentos além dos módulos dinâmicos. A esta dificuldade, foi atribuído a aderência entre a interface epóxi/fios, além dos vazios presentes na interface e nas camadas de fibra de vidro e epóxi. Os modelos numérico e analítico utilizados por Faluhelyi (2013) considerou que a aderência entre a matriz e os reforços, neste caso os fios de NiTi e a manta de fibra de vidro fosse perfeita.

Sanusi et al. (2014), em sua revisão da literatura sobre os fenômenos presentes nos compósitos reforçados por ligas de NiTi, citam algumas aplicações destes materiais, vinculadas a mudança de fase (martensita e austenita), efeitos de memória de forma e o efeito superelástico. São eles:

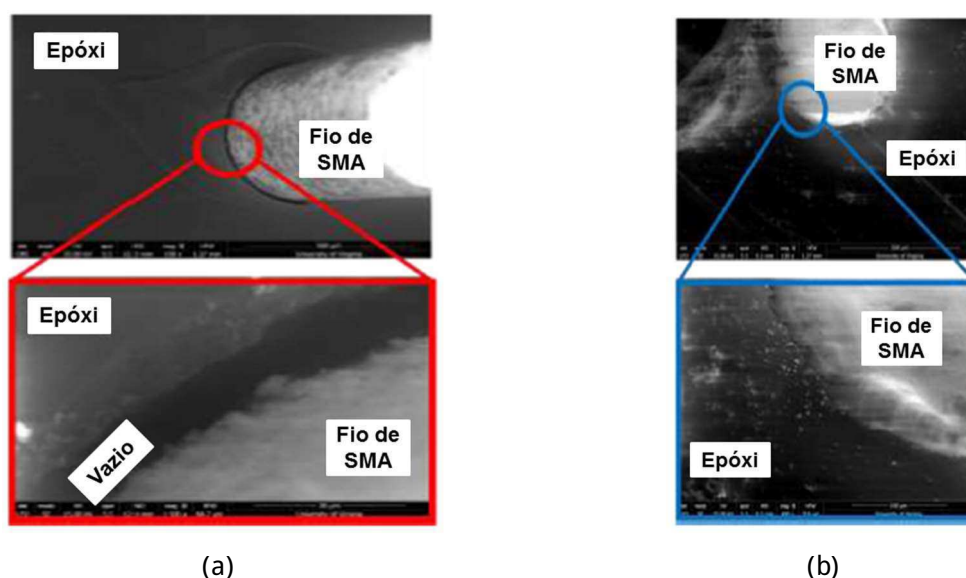
- a) Utilização em controle de vibração e respostas dinâmicas;
- b) Controle de rigidez e resistência a danos por impacto;
- c) Controle de forma e posição.

Baseando-se nas aplicações citadas por Sanusi et al. (2014), selecionou-se alguns autores que estudaram a utilização destes compósitos inteligentes com aplicações para estes tópicos.

Daghash et al. (2016) caracterizaram o comportamento de um compósito reforçado por fios de NiTi, utilizando carregamento cíclico, com o objetivo de verificar a resposta do material quando submetido a ensaios de fadiga. Os ensaios realizados mostraram que o reforço fibroso, assim como os fios de NiTi, auxiliaram no aumento da eficiência de dissipação de energia, possibilitando o aumento das amplitudes de

tensões aplicadas. Também foi realizado um ensaio de MEV (microscopia eletrônica de varredura) para verificar a interface NiTi/Epóxi. A Figura 2.4 apresenta os resultados obtidos.

Figura 2.4 - Imagem por MEV da superfície fraturada do epóxi (a) fios de LMF descolado e (b) fio de LMF parcialmente colado/descolado.



Fonte - Daghash et al. (2016).

Daghash et al. (2016) observaram que ocorreu um descolamento, total e parcial entre os fios de LMF e a matriz polimérica de epóxi. Antes que o ensaio fosse realizado, os fios de LMF encontravam-se na fase austenítica e com total aderência entre os fios e a matriz. Com o início do carregamento, inicialmente tanto a matriz quanto os fios apresentavam o mesmo deslocamento. Como a LMF tem um elevado módulo de Young, quando comparado com a matriz polimérica, as tensões nos fios eram superiores a tensões na matriz, fazendo com que ocorresse a mudança de fase, da austenita para a martensita. Daghash et al. (2016) atribuíram o descolamento entre matriz e reforço como consequência da transformação de fase em conjunto com a variação geométrica dos fios LMF, o diâmetro, devido ao módulo de Young.

Antes, o mesmo efeito verificado por Daghash et al. (2016) foi verificado por Payandeh et al. (2012), quando analisaram a transformação martensítica de um fio NiTi e seu efeito sobre o compósito polimérico de epóxi. A transformação de fase para a martensita apresenta um importante fator responsável pelo descolamento dos fios de NiTi da matriz polimérica. A Figura 2.5 apresenta o descolamento dos fios com a matriz obtido por Payandeh et al. (2012) e Daghash et al. (2016), onde as regiões

cinzas s² o exatamente os locais onde ocorreram o descolamento entre o reforço de NiTi e a matriz. Como consequência, o descolamento entre os fios e matriz, faz com que a tensão exercida durante o ensaio não seja transferida para o reforço. Assim, tem-se a ruptura da matriz, permanecendo os fios intactos. Isto foi obtido por Payandeh et al. (2012) através de ensaios de tração e Daghash et al. (2016) por meio de ensaios de fadiga.

Figura 2.5 - Padrão do descolamento em fios de LMF em matriz polimérica usando (a) ensaio de tração e (b) ensaio de fadiga.



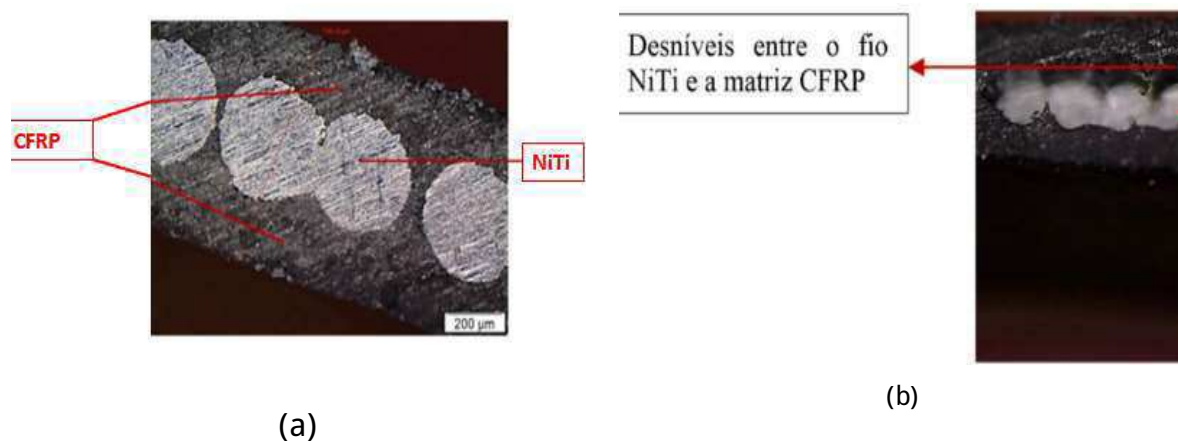
Fonte - (a) Payandeh et al. (2012) e (b) Daghash et al. (2016).

Villar et al. (2016) produziram e ensaiaram um compósito reforçado por fibra de carbono e ligas de NiTi com memória de forma (liga LMF). O material foi produzido a partir da compressão das fibras de carbono e da LMF juntamente com a resina. Após ensaios mecânicos realizados, tração e flexão, utilizou-se a microscopia óptica para verificar o estado da interface fio de NiTi/matriz polimérica. A Figura 2.6 apresenta um comparativo entre o compósito ensaiado e não ensaiado.

Villar et al.(2016) trabalharam com variações de temperatura das ligas de memória de forma de até 80°C, temperatura suficiente para que ocorra a transformação de fase.

Durante os ensaios realizados, ocorreu um descolamento dos fios de NiTi da matriz polimérica, causando o deslaminar entre eles, consequentemente da contração dos fios durante o processo de aquecimento (VILLAR et al., 2016). Além disso, pode-se atribuir o descolamento dos reforços de NiTi a interação na interface do compósito, ou seja, a fraca adesão entre o reforço metálico e a matriz polimérica

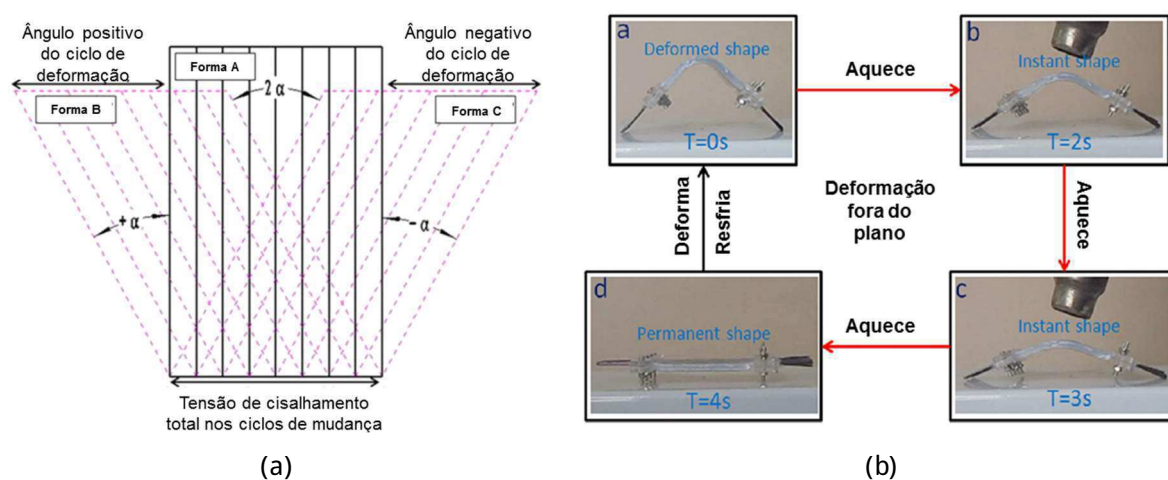
Figura 2.6 - (a) Imagem de microscopia AFM de um compósito CFRP/NiTi com elevada fração volumétrica de NiTi fios de NiTi e (b) consequência do efeito da auto contração dos fios de NiTi treinados na matriz CFRP.



Fonte - Villar et al. (2016).

Com os estudos dos compósitos reforçados por ligas de NiTi, a matriz polimérica, geralmente um polímero mais resistente é utilizado para confecção de um material mais robusto. Porém, alguns trabalhos, como por exemplo Feng et al. (2015), tem usado outro polímero, silicone, como um material matriz, maleável e de baixa resistência, quando comparado à matriz epoxídica. Para o estudo, foi verificado o comportamento do material compósito com deformações no plano e fora do plano. Estas deformações podem ser observadas na Figura 2.7, dando mais clareza ao assunto.

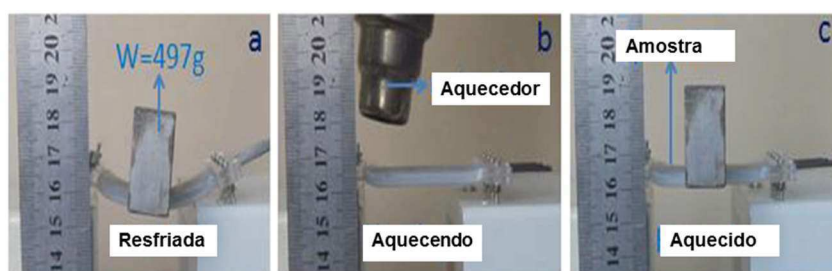
Figura 2.7 - Deformações de um compósito elastômero-LMF (a) no plano e (b) fora do plano.



Fonte - Feng et al. (2015).

Além de Feng et al. (2015), Chen et al. (2014) fabricaram e testaram um compósito também confeccionado em matriz de silicone com tubos SMP (Shape Memory Polymer) e fibra de carbono. A Figura 2.8 apresenta o resultado da utilização dos fios de NiTi como reforço para a matriz de silicone.

Figura 2.8 - Demonstração da variação de rigidez do compósito elastômero-LMF.



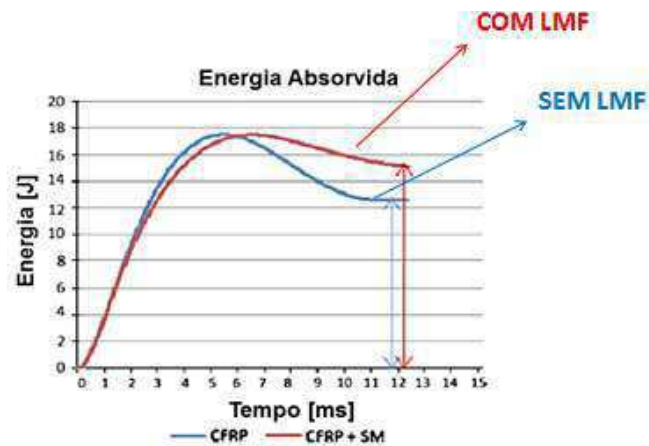
Fonte - Feng et al. (2015).

A partir dos ensaios realizados, verificou-se que, em baixas temperaturas, que o compósito multifuncional facilmente apresentou deformações no plano e fora dele, através de esforços externos aplicados. Em altas temperaturas, o compósito multifuncional apresentou alta resistência e elevada rigidez, após a transformação de fase dos fios de NiTi. Além disso, o retorno a forma original, caracterizando o efeito de memória de forma, ocorreu rapidamente através de estímulos térmicos.

Meo et al. (2013) desenvolveram um estudo numérico e experimental da resposta de materiais compósitos reforçados por LMF - impactos de baixa velocidade. O experimento consistiu em aplicar uma carga em baixa velocidade sobre uma placa de compósito até sua ruptura. O compósito reforçado por LMF apresentou um aumento na resistência ao impacto e na ductilidade, quando comparado com o compósito sem LMF. Também verificou-se uma elevação na rigidez e na absorção de energia antes que ocorresse a falha do compósito. Isto foi associado com o efeito superelástico do material e sua histerese.

A Figura 2.9 apresenta um comparativo entre os compósitos reforçados apenas por fibra de carbono e outro reforçado por fibra de carbono e LMF quando submetidos a teste de impacto. A energia absorvida pelo polímero reforçado por LMF apresenta-se superior ao não-reforçado. Além disso, a absorção de energia durante o impacto em amostra reforçada por LMF representa quase que 100% da energia total do impacto.

Figura 2.9 - Energia absorvida pelo compósito reforçado e não reforçado por LMF.



Fonte - Meo et al. (2013)

2.4 Moldagem Líquida de Compósitos (LCM)

2.4.1 Fundamentos

A moldagem líquida de compósitos é um processo que consiste na injeção de uma resina líquida em um molde fechado, que contém uma pré-forma fibrosa. Após o preenchimento, o molde é deixado em repouso para que ocorra o processo de cura da resina. Em seguida, o produto acabado é desmoldado. O processo de moldagem líquida engloba diversos sub-processos que utilizam o mesmo princípio. São eles:

- VARTM - Moldagem por transferência de resina assistida a vácuo;
- RTM - Moldagem por transferência de resina;
- RTM Light - Moldagem por transferência de resina Light;
- Compression RTM - Moldagem por transferência de resina por compressão.

O processo VARTM consiste em inserir uma pré-forma fibrosa sobre um molde rígido, denominado de macho. Em seguida, posicionar os canais de injeção de resina e de vácuo. Por fim, fechar o molde com uma bolsa de vácuo. Assim, uma bomba de vácuo é acionada, removendo o ar do interior do molde para que a resina comece a fluir pela pré-forma (GOMES, 2010).

O processo RTM consiste em inserir uma pré-forma fibrosa em um molde fechado, onde será injetada uma resina termorrígida para que ocorra todo o preenchimento do reforço. Após o processo de cura, o produto é desmoldado. Este processo será explicado mais detalhadamente adiante.

O processo RTM Light é o processo RTM, com a adição de um canal de vácuo. O processo consiste em uma pré-forma fibrosa inserida em um molde fechado. Inicialmente, uma bomba de vácuo é acionada para retirar todo o ar presente no interior do molde. Posteriormente, a resina é injetada no interior do molde (GARAY, 2010).

O processo Compression RTM consiste em inserir uma pré-forma fibrosa em um molde fechado, que será compactado quando ocorrer a injeção da resina. Com a compactação da pré-forma impregnada pela resina, o excesso é retirado (MASANIA, et al., 2013).

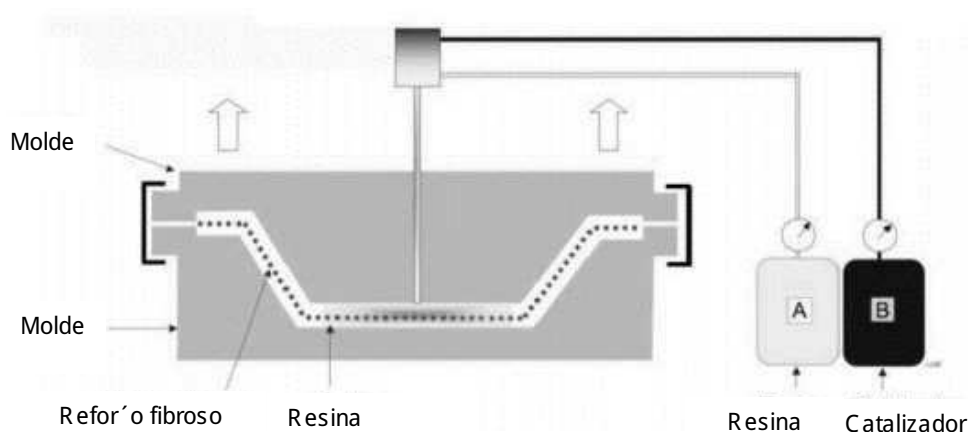
2.4.2 Moldagem por Transferência de Resina (RTM)

O processo de Moldagem por Transferência de Resina tem sido amplamente aplicado na indústria, uma vez que se mostra um processo eficiente na confecção de produtos compostos, apresentando alta qualidade, tanto do ponto de vista visual como mecânico (LUZ, 2011; OLIVEIRA, 2014).

O processo de manufatura de compostos, Moldagem por Transferência de Resina (RTM), apresenta excelentes características finais ao produto acabado, como: qualidade de acabamento, baixo custo, menor tempo de processo e confecção de produtos com geometria complexa (SCHMIDT et al., 2012). Este processo consiste em quatro etapas: (i) preparação da pré-forma; (ii) enclausuramento da pré-forma; (iii) preenchimento do molde e (iv) processo de cura do composto (YANG et al., 2015; WEGH et al., 2015). A Figura 2.10 ilustra o processo RTM.

A primeira etapa consiste na preparação da pré-forma, que engloba desde a etapa de seleção do tipo de reforço e seu ajuste para que seja inserido no molde.

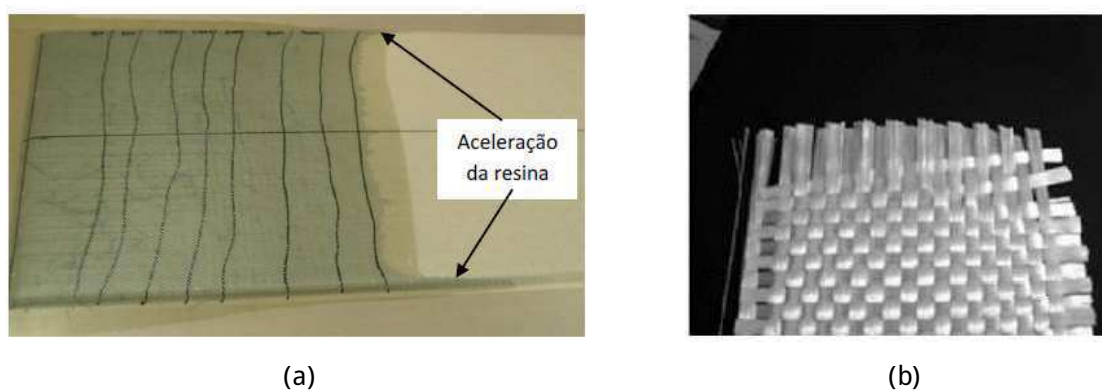
Figura 2.10 - Processo de Moldagem por Transferência de Resina.



Fonte - Oliveira et al. (2009).

A segunda etapa, enclausuramento da pré-forma, é a etapa em que o reforço fibroso é inserido no molde. Nesta fase do processo, deve-se estar atento a regiões da parede do molde que estão em contato com o reforço fibroso. Um problema identificado, que é consequência do erro deste processo, é o race-tracking. O fenômeno race-tracking é o caminho preferencial da resina durante o processo de injeção. Este caminho preferencial é consequência da baixa resistência ao escoamento em determinadas regiões do molde, devido ao aumento da permeabilidade, ou seja, a pré-forma apresenta permeabilidade diferenciada, ou anisotrópica, nas regiões próximas à parede, facilitando o escoamento da resina. Um exemplo da causa deste efeito é um corte não adequado do reforço fibroso, e um mal manuseio do reforço quando este for inserido no interior do molde (KOUTSONAS, 2015). A Figura 2.11 apresenta este fenômeno e um fator que o origina.

Figura 2.11 - (a) Efeito race-tracking e (b) fator que o origina

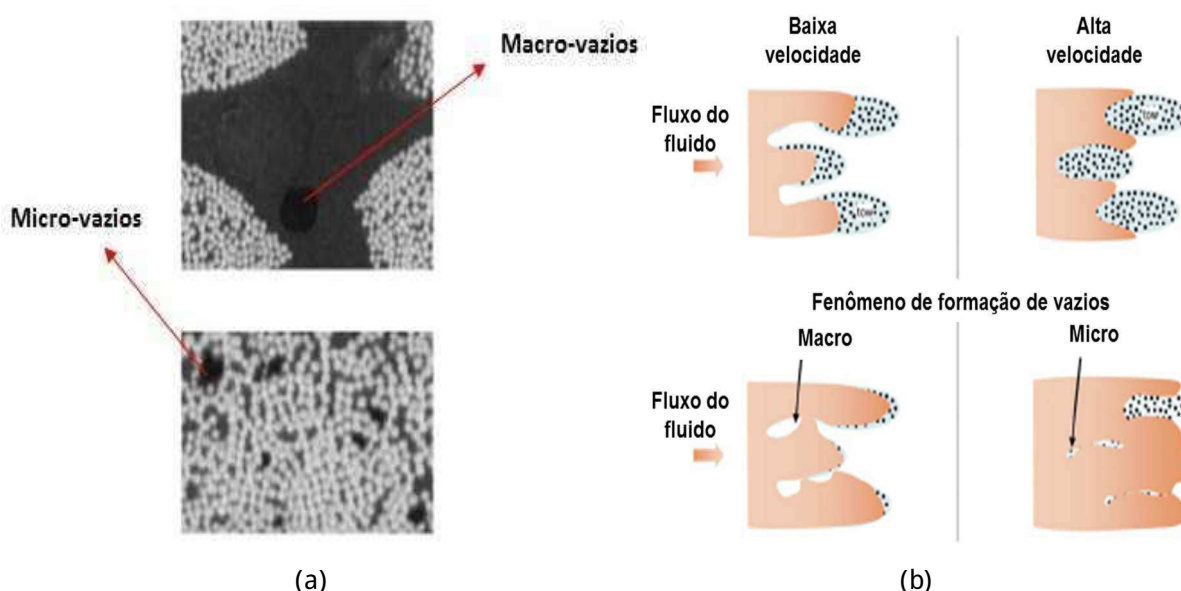


Fonte - Gomes (2010).

A terceira etapa é o preenchimento do molde. Após o processo de conformação do reforço fibroso no molde, uma resina termorrígida é injetada sob pressão para que ocorra todo o preenchimento do reforço. Nesta etapa, há várias variáveis que podem influenciar na qualidade do produto, como por exemplo: a pressão utilizada no processo de injeção.

O problema acarretado nesta etapa é a formação de vazios, ou seja, espaços não preenchidos pela resina. A Figura 2.12 apresenta os vazios formados e como é originado. Os macros-vazios são formados a partir do mal preenchimento da resina no reforço fibroso, especificamente nas tranças/costuras do reforço, que tem ordem milimétrica. Os micro-vazios são do filamento fibroso, que apresentam a ordem micrômetros, como pode ser observado na Fig.2.12 (a). Isso ocorre devido a velocidade em que a resina preenche o molde, como pode ser visto na Fig. 2.12(b). Se em baixas velocidades, a ocorrência de macro-vazios é mais provável, caso contrário, tem o surgimento de micro-vazios (RUIZ et al., 2006; LEE et al., 2006; GANGLOFF et al., 2014).

Figura 2.12 - Representação (a) vazios no reforço e (b) processo de formação.



Fonte - Ruiz et al. (2006).

A quarta etapa é o processo de cura da resina. O tempo de cura de um composto é variável e depende do tipo de resina que é utilizada no processo de moldagem. É durante o processo de cura que ocorre a mudança de fase da resina, ou seja, ela passa de um estado líquido para um estado sólido. Durante este intervalo,

ocorrem reações químicas exotérmicas que liberam calor durante o processo. É nesta etapa que as ligações cruzadas poliméricas ocorrem, solidificando a resina utilizada. Tais ligações provocam um aumento na viscosidade da resina, fazendo com que um fluido viscoso torne-se um gel elástico; neste instante tem-se a temperatura de transição vítrea, T_g (gel point) (HOSS EINI, 2013).

Sendo assim, torna-se importante a verificação da frente de resina durante o processo de injeção, seja através de monitoramento ou por predições do escoamento. Diversos autores, utilizaram a simulação numérica como saída para prever o fluxo de resina, e otimizar o processo de manufatura do componente, que serão abordados a seguir.

2.4.3 Simulação numérica no processo RTM

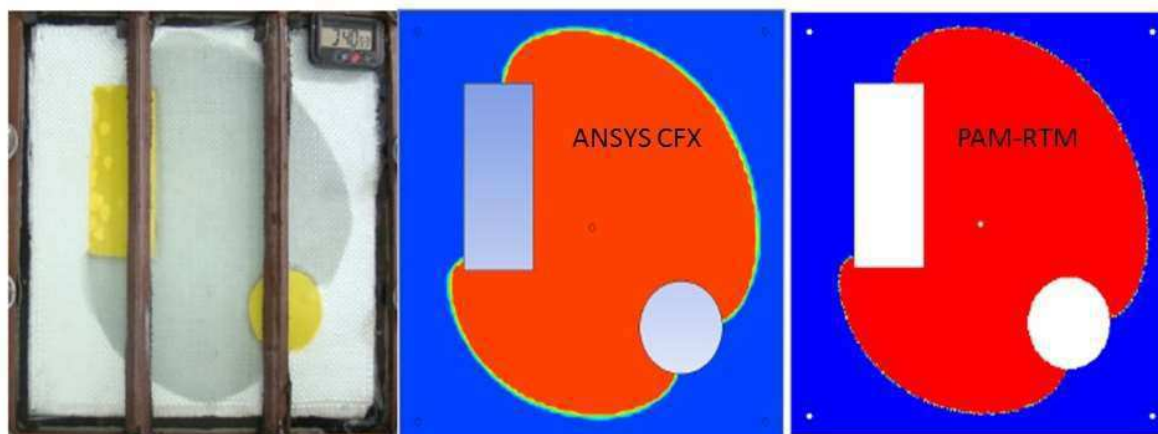
A simulação numérica mostra-se uma importante ferramenta para auxiliar engenheiros e pesquisadores no projeto de moldes e adequação de parâmetros na utilização do RTM para tornar o processo mais eficiente.

Luz (2011) realizou um estudo comparativo entre dois softwares de simulação, sendo um específico; o PAM-RTM, e o outro mais geral, o ANSYS CFX. Foi verificado que o software específico PAM-RTM apresentou um tempo de processamento mais eficiente que o ANSYS CFX, uma vez que este software utiliza um modelo matemático mais simples e uma malha numérica bidimensional, reduzindo assim o tempo de processamento.

Um outro dado importante apresentado por Luz (2011) foi a inserção de inserts no molde, podendo verificar o comportamento da resina quando encontra um obstáculo. A Figura 2.13 apresenta um dos resultados obtidos, mostrando a eficiência da simulação numérica na previsão do comportamento da resina durante o processo de injeção.

Além disso, parâmetros utilizados por Luz (2011), mostraram-se como tornar o processo eficiente através de variações de parâmetros do processo de injeção, tais como: pressão de injeção, volume do reforço fibroso e permeabilidade.

Figura 2.13 – Comparativo entre os softwares ANSYS CFX e PAM-RTM com um experimento RTM.



Fonte – Luz (2011).

Em seu trabalho, Luz (2011) avaliou, além do comportamento da resina no interior do molde com a presença de "inserts", também o instante em que a resina toca as paredes do molde ($t_{filling}$) para algumas condições de trabalho. Neste caso, foi analisado a variação da pressão, porosidade e permeabilidade da fibra, e temperatura de trabalho.

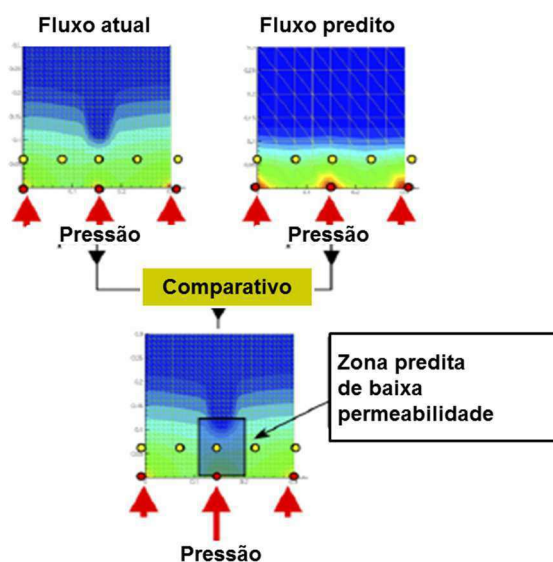
Li et al. (2005) avaliaram a influência das posições de entrada de resina (gates) e saídas de ar (vents) sobre o $t_{filling}$, sendo possível perceber que, para as mesmas condições de entrada, variando a localização dos gates e vents, foi possível obter tempos de preenchimento diferentes.

Oliveira et al. (2013) simularam numericamente o preenchimento de um molde retangular utilizando o software PAM-RTM, com o objetivo de prever o comportamento da resina durante o processo de injeção e o efeito do carbonato de cálcio na resina no comportamento da resina, comparando-o com dados experimentais. Os autores verificaram que a presença do $CaCO_3$ aumenta a viscosidade da resina e o tempo de preenchimento do molde.

Lee et al. (2006) utilizaram um algoritmo que simula e controla em tempo real a frente de avanço da resina, a partir de sensores ópticos instalados no molde. O sistema de controle e simulação podem ser vistos na Figura 2.14. Nesta figura verifica-se que a simulação ocorre paralelamente ao experimento. Através dos sensores localizados no molde, o sinal que indica o avanço da resina no molde é interpretado pelo algoritmo e comparado com o resultado simulado. Se o fluxo de resina não

coincidir com o previsto pela simulação, o algoritmo controla a pressão no ponto de injeção de modo que o fluxo verificado no experimento coincida com o simulado.

Figura 2.14 - Esquema de controle de fluxo para a minimização de vazios.



Fonte - Lee et al. (2006).

Oliveira et al. (2009) analisaram o escoamento multifásico no processo RTM utilizando duas técnicas matemáticas distintas, que são utilizados por softwares de fluidodinâmica computacional, o modelo VOF (Volume of Fluid) e o método FE/CV (Finite Element/Control Volume) comparando os resultados entre eles. O método FE/CV é utilizado pelo software específico, para simular o processo RTM, PAM-RTM. O modelo VOF foi utilizado no FLUENT. Oliveira et al. (2009) observaram a precisão do software FLUENT quando comparado aos resultados analíticos de avanço da resina e aqueles obtidos pelo software PAM-RTM (software dedicado). Concluíram que o modelo VOF, apresenta a melhor precisão para simular processo multifásico de preenchimento de molde.

Outros autores procuraram utilizar a simulação numérica e algoritmos na solução de problemas de vazios no interior do molde, ou otimizar o processo de preenchimento, mostrando a importância de conhecer o escoamento da resina no interior do molde (ARAÚJO et al., 2009; SOUZA et al., 2011; GANCHAROVA et al., 2015; OKABE et al., 2017).

2.5 Escoamento multifásico

As informações apresentadas na seção anterior tratam do processo RTM, levantando algumas dificuldades encontradas na literatura e estratégias de solução de tais problemas. Foi observado que diferentes autores utilizaram simulação numérica como forma de entender o escoamento de resina no interior de molde, e os efeitos das alterações dos parâmetros sobre o escoamento, como por exemplo: a pressão de injeção e a utilização de algoritmos para otimizar o processo RTM, com o objetivo de evitar formação de vazios. Desses estudos, foi possível verificar a existência de uma interação entre os dois fluidos presentes no processo RTM, a resina, que é o fluido injetado e responsável pela formação do componente, e o ar, presente no molde antes do processo se iniciar (quando não se utiliza o vácuo) que é expelido pelas saídas presentes no molde durante o processo de injeção de resina.

O escoamento multifásico é caracterizado pela existência de uma interação entre dois ou mais fluidos (dispersos ou contínuos) e partículas sólidas, através de uma interface, ocorrendo ali transferência de quantidade de movimento, massa e/ou energia.

No processo RTM, pode-se assumir um padrão de escoamento contínuo-contínuo, uma vez que durante o processo de injeção, a resina empurra o ar contido no interior do molde. O deslocamento do ar, ocorre de forma continuada, sendo empurrado pela frente de resina. Isto pode ser verificado na seção anterior, Figs. 2.13 e 2.14. Embora que os defeitos, formação de vazios, no interior do componente exista, e que haja possibilidade de existir o arrasto da bolha de ar durante o processo de injeção de resina (GLANGLOFF et al., 2014), o objetivo deste trabalho é analisar o avanço da resina no interior do molde.

Trabalhos que utilizaram a simulação numérica como ferramenta de estudo para o processo de manufatura de componentes através da técnica RTM, modelam o processo através de escoamentos multifásicos. O escoamento multifásico trabalha com a variação de dois ou mais fluidos em um único volume-de-controle, aplicando as equações de conservação (massa, movimento e energia) de modo que o comportamento das fases seja obtido.

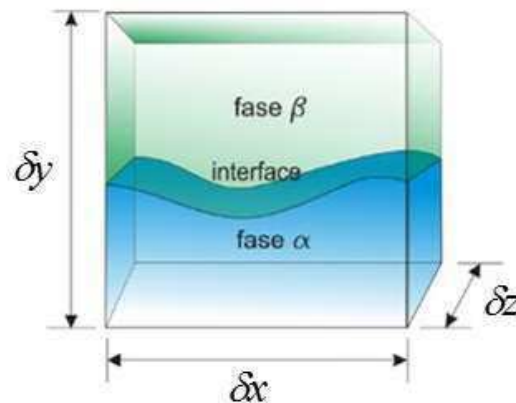
O conceito de fração volumétrica, Eq. (2.1), que é aplicado ao volume de controle analisado, é como segue:

$$r_a = \frac{V_a}{V} \quad (2.1)$$

onde, r_a é a fração volumétrica das fases, V_a é o volume da fase presente no volume de controle analisado e V é o volume total, definido por $V = \delta x \delta y \delta z$.

A Figura 2.15 apresenta um volume de controle contendo duas fases, onde pode ser visualizada a definição de fração volumétrica em um volume de controle.

Figura 2.15 - Volume de controle contendo dois fluidos limitados por uma interface.



Fonte: Rezende (2008).

A Equação 2.1 pode ser aplicada tanto para a fase a , quanto para as fases b , g , etc., sejam quantas forem as fases fluidas presentes no volume de controle analisado.

A dificuldade em se modelar tais tipos de escoamentos encontra-se na definição da interface entre os fluidos, uma vez que o tratamento da interface é dado de forma empírica, não possuindo um modelo analítico que o defina. A partir desta consideração, a interface entre os fluidos é deslocada no interior do volume de controle a cada instante de tempo, movendo-se com uma velocidade específica. Sendo assim, a grande dificuldade em se modelar tais escoamentos está relacionada a interface (ENWALD et al., 1996).

Para Rezende (2008), a modelagem da interface nestes escoamentos torna-se impraticável, uma vez que esta assume um comportamento aleatório. Sendo assim, a definição da interface torna-se possível através da utilização de um comportamento médio no interior do volume de controle.

Os modelos matemáticos disponíveis no Ansys CFX para escoamentos multifásicos são dois: o modelo Euleriano-Lagrangeano e o Euleriano-Euleriano.

2.5.1 Euleriano-Lagrangeano

O modelo Euleriano-Lagrangeano utiliza um acoplamento entre as fases contínua e dispersa, onde tem-se como objetivo descrever a trajetória de partículas no meio contínuo, no caso, o fluido. O modelo Lagrangeano trabalha com soluções das equações Newtonianas para cada partícula presente no meio contínuo. Necessita de um processamento robusto e alto poder computacional. O modelo Lagrangeano pode ser utilizado para descrever movimento de bolhas ou partículas sólidas em um meio contínuo (WACHEM e ALMSTEDT, 2003).

A fase dispersa é representada por uma corrente de partículas, onde as equações de transporte (quantidade de movimento, massa, energia) são solucionadas para cada corrente de partícula (PATEL, 2010).

O modelo Lagrangeano pode ser utilizado, por exemplo, na simulação de transporte de partículas sólidas, escoamento tipo spray e combustão de partículas ou fluido.

2.5.2 Euleriano-Euleriano

O modelo multifásico Euleriano, também conhecido como modelo de dois fluidos, trata as fases presentes no domínio de estudo como fases contínuas, independente da característica da fase, sejam elas; partícula sólida ou fluida (bolhas). Sendo assim, não é possível visualizar o comportamento da partícula individualmente, mas torna-se possível obter o comportamento do conjunto de partículas (fase dispersa).

O modelo Euleriano utiliza duas condições para determinar o comportamento da interface no interior do volume-de-controle. Partindo do princípio de que a interface comporta-se de forma randômica, este modelo trabalha com o comportamento médio

da interface (promediado). A outra ferramenta utilizada é a condição de salto, que trata-se da condição de conservação de fluxo na interface.

A promediado utilizada para auxiliar na definição da interface, é dada como uma média de um conjunto de valores. Esta ferramenta também é utilizada na definição de modelos de turbulência e, uma vez que a variável sofre oscilações no tempo (instabilidade), utiliza-se este artifício para modelar matematicamente o fenômeno (VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995; REZENDE, 2008).

Estas médias são aplicadas às equações de balanço (massa, quantidade de movimento e energia) tornando-se possível obter uma interface fluido/fluido definida dentro de um volume-de-controle. Enwald et al. (1996) apresentam três modelos de promediado: volumétrico, temporal e de conjunto.

A condição de salto mencionada anteriormente é utilizada em conjunto com o operador de promediado para se obter um comportamento aproximado da interface, uma vez que se trabalha com média. Essa condição é necessária pois, as equações conservativas são aplicadas às fases presentes no escoamento e não entre elas. Assim, assumi-se que a interface é uma fina superfície presente entre as fases e aplica-se as equações de balanço. Este método é a condição de salto (ROSA, 2012).

Com as condições de salto e a utilização do método da promediado, torna-se possível obter a localização da interface entre as fases no interior do volume de controle, e assim determinar o seu comportamento ao longo do tempo e do espaço.

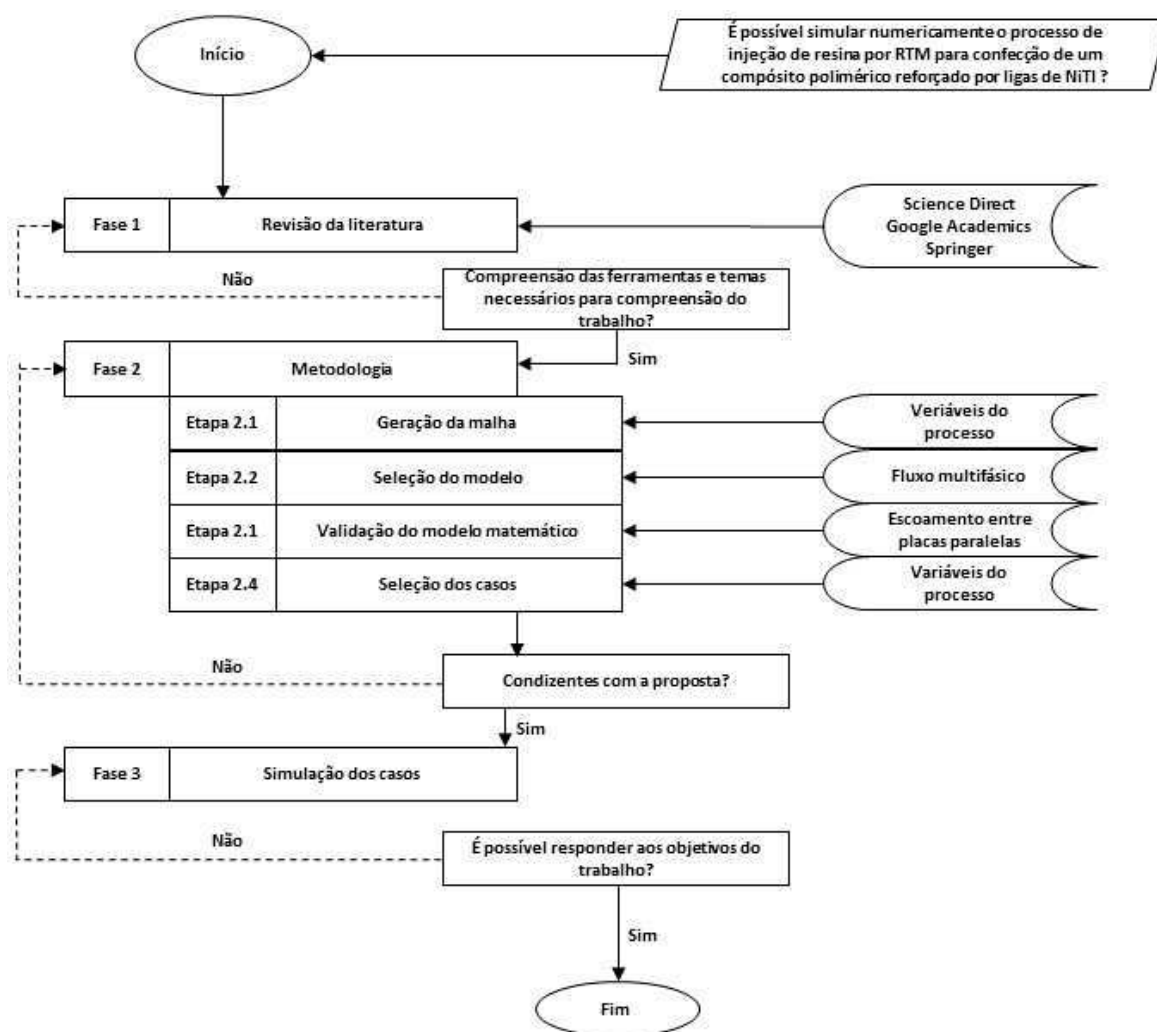
CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

A metodologia utilizada para se estudar teoricamente o processo de manufatura de um componente através do método RTM (Resin Transfer Molding) consiste em utilizar as equações diferenciais parciais de fenômenos de transporte, com o objetivo de compreender o processo de injeção de resina em um molde fechado. Para isto, o primeiro passo que deve ser dado é confeccionar uma geometria e desenvolver uma malha numérica no domínio de estudo.

A Figura 3.1 apresenta o fluxograma utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 3.1 - Fluxograma de atividades

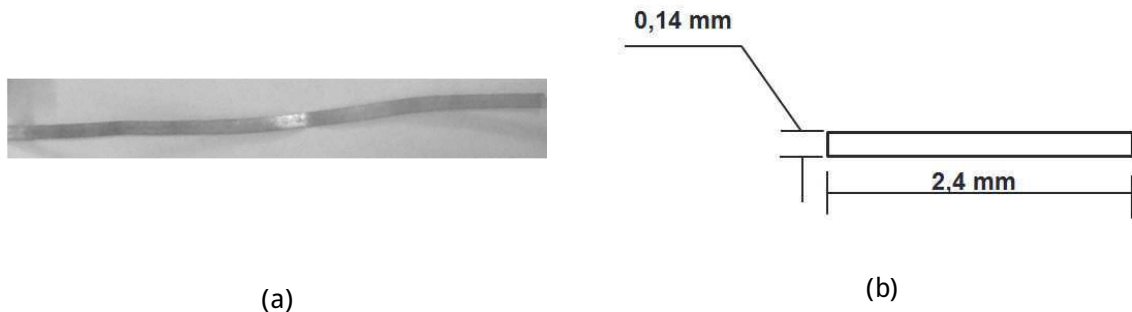


3.1 Gera o da malha

3.1.1 Defini o da geometria

A geometria desenvolvida consiste em um molde quadrado, com 10 (dez) fitas de NiTi com efeito LMF inseridas em seu interior. A Figura 3.2(a) apresenta a fita de NiTi utilizada no desenvolvimento deste componente e a Figura 3.2(b) exibe as dimensões da fita de NiTi utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

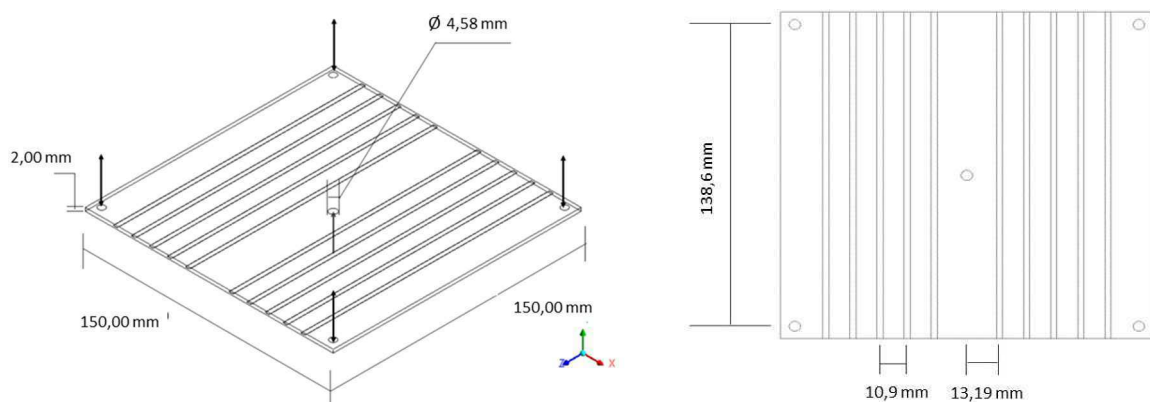
Figura 3.2 - Elementos metálicos de NiTi utilizados como reforço para gera o da malha numérica (a) vista superior e (b) dimensões da se o transversal da fita



Fonte: Autoria própria (2018).

A Figura 3.3 apresenta a geometria gerada com as fitas de NiTi inseridas em seu interior e suas respectivas dimensões em milímetros. A geometria apresentada foi gerada no software ICEM CFD, disponibilizado pela Ansys.

Figura 3.3 - Geometria do molde gerada com as fitas de NiTi presentes com dimensões em milímetros.



Fonte: Autoria própria (2018).

3.1.2 Malha numérica

Como observado no tópico anterior, a espessura da fita de NiTi é da ordem de mili (0,14 mm). A consequência disto foi o surgimento de problemas de convergência da malha, uma vez que os elementos gerados em sua confecção, especificamente na região central do molde, apresentaram espessuras bem menores que a própria fita. O que se deseja é um refino mais adequado nesta região, com o objetivo de visualizar o fluido (resina) contornado os reforços.

Um refino na direção perpendicular as fitas irá afetar todos os elementos presentes no molde, varrendo todo o corpo da malha. Com isso tem-se um aumento significativo na quantidade de nós e consequentemente de elementos. Vale salientar, que a quantidade de elementos está diretamente relacionada com o tempo de processamento da simulação numérica, ou seja, o tempo computacional. Além disto, tratando-se de um escoamento multifásico, tem-se um problema mais complexo, que irá aumentar ainda mais o esforço computacional.

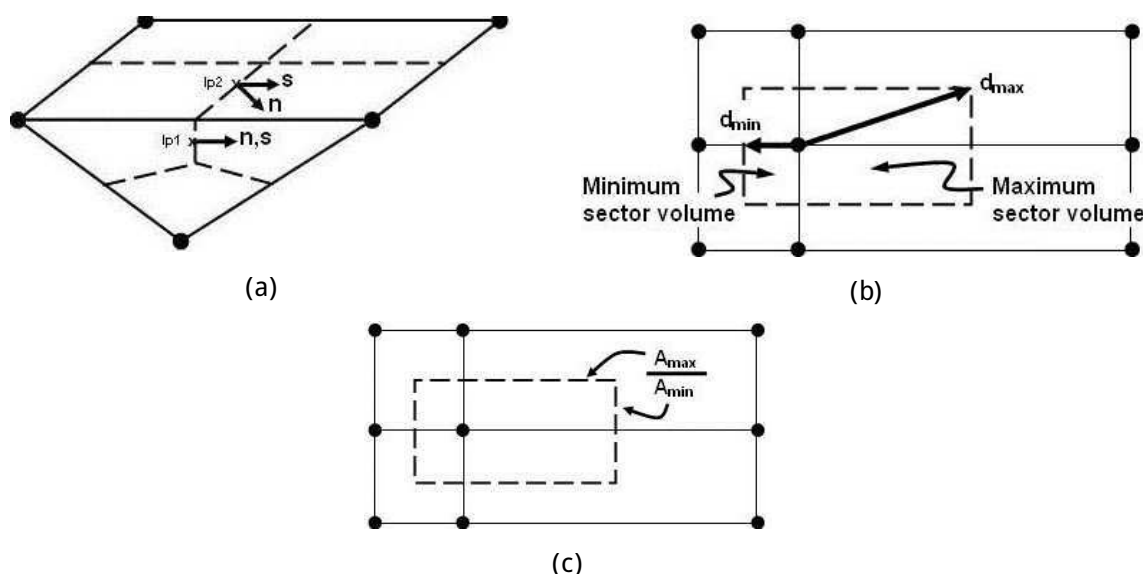
No Ansys CFX são realizadas três análises nos elementos de malha pelo próprio CFX Solver, antes de se iniciar a simulação. Esta análise expõe a qualidade da malha utilizada na simulação. Estes três parâmetros são: ortogonalidade dos elementos, fator de expansão e razão de aspecto. Estes três elementos são essenciais para garantir a convergência da simulação (Ansys Theory Guide, 2014).

O ângulo de ortogonalidade é definido como sendo o ângulo gerado entre a direção do vetor que une dois nós de uma malha e o vetor normal à superfície da malha associada a aresta. A Figura 3.4 (a) exhibe esta definição (Ansys Theory Guide, 2014).

O fator de expansão de uma malha está relacionado a mudança do tamanho, área ou volume, de um elemento com relação a outro elemento adjacente. Esta relação é exemplificada na Figura 3.4 (b), onde é possível verificar a forma que o CFX Solver realiza o cálculo do fator de expansão (Ansys Theory Guide, 2014).

A razão de aspecto de uma malha está relacionada com o grau de estreitamento de um elemento. Isto é, a medida que a razão entre o comprimento e a espessura de um elemento aumenta, maior será sua razão de aspecto. A Figura 3.4(c) representa este critério de qualidade (Ansys Theory Guide, 2014).

Figura 3.4 - Critérios de qualidade do CFX-Solver (a)  ngulo de ortogonalidade, (b) fator de expansão e (c) razão de aspecto.



Fonte: Ansys CFX-Solver (2018).

Durante o processo de gera o de malha deste trabalho, dois problemas específicos de malha citados foram encontrados. A malha numérica utilizada na simula o estava apresentando tanto um fator de expansão como uma razão de aspecto elevadas.

Devido ao refinamento na região central das fitas de NiTi, os elementos ao longo do eixo z apresentavam um elevado comprimento, aumentando tanto a razão de aspecto quanto o fator de expansão. A consequência disto foi a divergência durante o processo de soluço das equa es. Adotando a estratégia de refinamento da malha por inteiro, com o objetivo de diminuir os fatores que servem de critérios de qualidade, aumentou-se exponencialmente o número de elementos e não solucionou as dificuldades mencionadas acima. Caso o refinamento persistisse, o elevado número de elementos iria tornar o processo de simula o inviável.

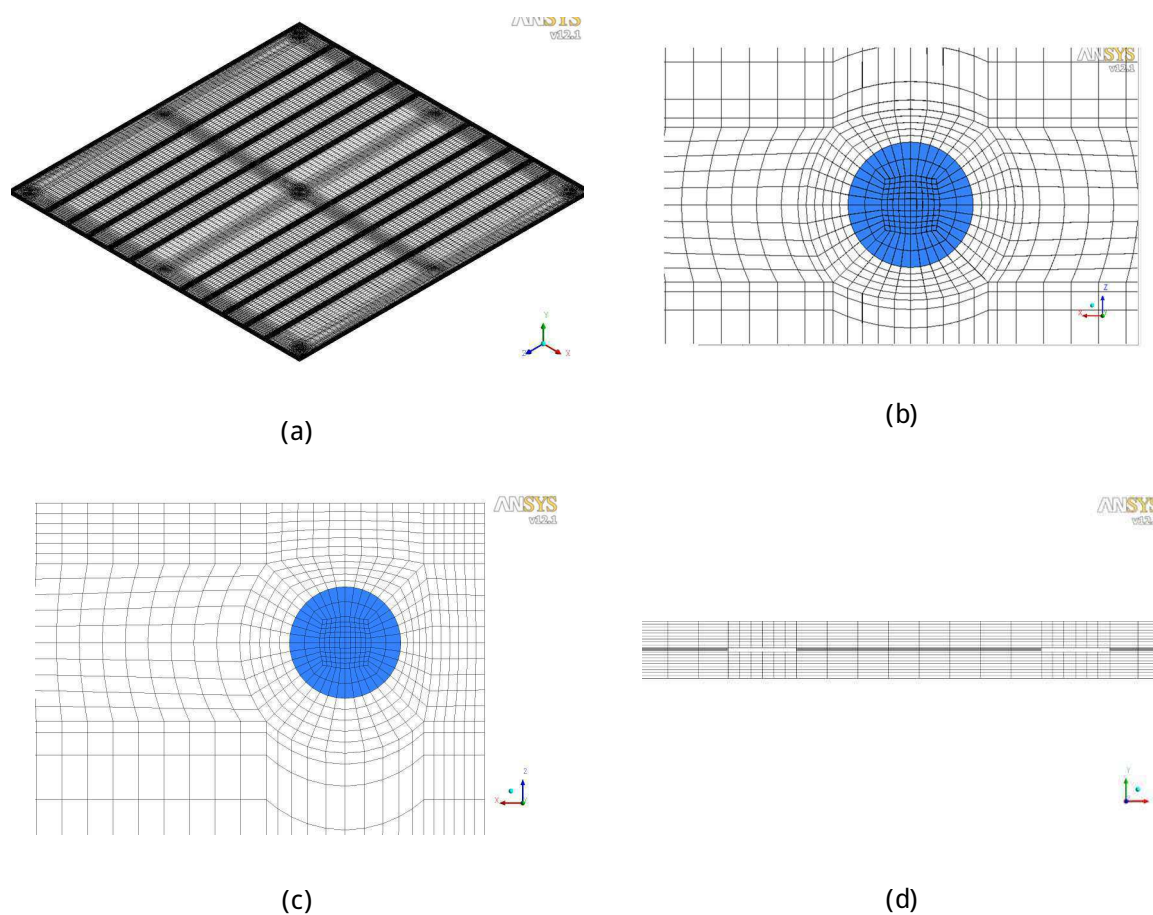
A segunda estratégia adotada foi utilizar uma malha com dimensões menores para uma quantidade de elementos semelhante a malha com as dimensões originais. Assim, a densidade de malha iria aumentar e um refino maior poderia ser obtido.

Para quantificar as dificuldades apresentadas neste trabalho no que tange a gera o da malha numérica, informa-se que a geometria inicial apresentava dimensões de 300x300x5 mm e uma quantidade de elementos aproximadamente de 2×10^6 de elementos, enquanto, que a malha utilizada neste processo apresenta

aproximadamente $5,5 \times 10^5$ elementos. Sendo o objetivo verificar o processo de preenchimento do molde, o volume da geometria n^2 o η considerado como um diferencial, uma vez que aquilo que foi alterado foi exatamente a distância entre os fios, deixando-os mais próximos.

A Figura 3.5 apresenta a malha numérica obtida e detalhes das regiões de entrada e saída assim como das fitas inseridas no interior do molde. Tendo em vistas que tais zonas são as mais críticas durante o processo de simulação. Em essência das fitas, tornando possível perceber o fluxo de resina em seu redor.

Figura 3.5 - Malha numérica utilizada no processo de simulação (a) vista isométrica, detalhe para região de (b) entrada e (c) saída e (d) fita.



Fonte: Autoria própria (2018)

A malha hexaédrica utilizada na simulação contém 556.625 elementos, e apresentou resultados coerentes com a metodologia adotada neste trabalho.

3.2 Modelo matemático

A abordagem utilizada nesta pesquisa é baseada no modelo de escoamento multifásico, Euleriano-Euleriano, tendo em vista a análise da frente de avanço da resina durante o preenchimento do molde. Na abordagem Euleriana-Euleriana, o Ansys CFX utiliza dois modelos distintos: Homogêneo e Não-homogêneo.

No sub-modelo heterogêneo ou não-homogêneo, tem-se o caso mais complexo dos modelos apresentados pelo software CFX, uma vez que a transferência na interface das fases torna-se importante e considerável no comportamento do escoamento de cada fase. Neste modelo, o termo de transferência de momento na interface, calculado com base na velocidade de cada fase na interface, é considerado. Gera-se assim, uma série de modelos de interface.

No modelo de interface há um compartilhamento do campo de pressão entre as fases. Porém, o campo de velocidade é independente. Isto é, cada fase presente no escoamento apresenta seu próprio campo de velocidade específico.

No modelo heterogêneo, o processo é mais delicado, uma vez que os modelos matemáticos utilizados pelo software são obtidos em geral a partir de dados experimentais. A diferença no equacionamento matemático proposto pelos modelos é a presença do termo fonte de transferência interfacial (\dot{M}_a) na equação da quantidade de movimento, uma vez que este trabalho está voltado para aplicação em um processo isotérmico, puramente hidrodinâmico. Segundo Rezende (2008), o fato da interface não apresentar um modelo matemático acurado para a modelagem das transferências interfaciais, existe uma instabilidade numérica ocasionada pelo termo de transferência interfacial (\dot{M}_a).

Sendo assim, o modelo matemático proposto neste trabalho é o heterogêneo, onde assume-se o compartilhamento dos campos de pressão, sendo o campo de velocidade independente. Este modelo é composto pela equação da conservação de massa, quantidade de movimento e energia. A equação (3.1) representa a equação de conservação de massa.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_a r_a) + \nabla \cdot (\rho_a r_a \mathbf{U}_a) = S_{MSa} + \sum_{b=1}^N G_{ab} \quad (3.1)$$

onde, \dot{S}_{MSa} é o termo fonte de massa e G_{ab} é o fluxo massico por unidade de volume da fase b para a fase a , r_a é a fração volumétrica das fases, \dot{U}_a é o vetor velocidade de cada fase.

Combinado a equação da continuidade, equação (3.1), com a equação de balanço volumétrico, dada pela equação (3.2), obtém-se a equação da conservação volumétrica, equação (3.3), com refere:

$$\sum_{a=1}^{N_p} r_a = 1 \quad (3.2)$$

$$\sum_a \frac{1}{r_a} \frac{\partial}{\partial t} (r_a r_a \dot{U}_a) + \bar{e} \sum_a (r_a r_a U_a) = \sum_a \frac{1}{r_a} \dot{S}_{MSa} + \sum_{b=1}^N G_{ab} \quad (3.3)$$

A equação (3.4) apresenta a conservação da quantidade de movimento, como segue:

$$\frac{\partial}{\partial t} (r_a r_a \dot{U}_a) + \bar{e} \sum_a (r_a (r_a U_a \cdot \dot{U}_a)) = -r_a \bar{e} p_a + \bar{e} \sum_a (r_a m_a (\bar{e} U_a + (\bar{e} U_a)^T)) + \sum_{b=1}^{N_p} (G_{ab}^+ U_b - G_{ba}^+ U_a) + S_{Ma} + M_a \quad (3.4)$$

onde, r_a representa a fração volumétrica de cada fase, neste caso: ar e resina, \dot{S}_{Ma} forças externas atuantes, \dot{M}_a são as forças atuantes na interface das fases, $\sum_{b=1}^{N_p} (G_{ab}^+ U_b - G_{ba}^+ U_a)$ é a transferência de momento linear quando existe transferência de massa entre as fases, \dot{S}_{MSa} é o termo fonte de massa, e $\sum_{b=1}^{N_p} G_{ab}$ é o fluxo de massico entre as fases. Neste trabalho, o termo fonte \dot{S}_{Ma} é devido a atuação da gravidade \dot{g} , representado pela equação (3.5).

$$\dot{S}_{Ma} = (r_a - r_{ref}) \dot{g} \quad (3.5)$$

O modelo matemático utilizado para a modelagem da transferência de quantidade de movimento através da interface é o modelo de mistura.

Tratando-se do termo de transferência interfacial (\dot{M}_a), ele é obtido como sendo um somatório das forças que atuam na interface. Sendo definido como segue na equação (3.6).

$$\dot{M}_a = \sum_{a \neq b} \dot{M}_{ab} = \dot{M}_{af}^D \quad (3.6)$$

onde, \dot{M}_{af}^D é a transferência interfacial devido ao arrasto entre as fases. Sendo o arrasto definido na equação (3.7), como segue:

$$\dot{M}_{af}^D = c_{ab}^{(d)} (\dot{U}_b - \dot{U}_a) \quad (3.7)$$

onde, $c_{ab}^{(d)}$ é um coeficiente de arrasto adimensional, \dot{U}_b é o vetor velocidade da fase ϕ e \dot{U}_a é o vetor velocidade da fase ψ . O coeficiente de arrasto adimensional é implementado no CFX através da equação (3.8).

$$c_{ab}^{(d)} = \frac{C_D}{8} A_{ab} r_a \left| \dot{U}_b - \dot{U}_a \right| \quad (3.8)$$

sendo, C_D o coeficiente de arrasto (no caso em estudo utilizou-se o default que é de 0,44), A_{ab} a área de densidade interfacial e r_a a densidade da fase ψ . A área de densidade interfacial é então definida pela relação entre as frações volumétricas e o comprimento interfacial apresentado na equação (3.9).

$$A_{ab} = \frac{r_a r_b}{d_{ab}} \quad (3.9)$$

onde, d_{ab} é o comprimento de escala interfacial e, r_a e r_b são as frações volumétricas das fases ψ e ϕ , respectivamente. O comprimento de escala interfacial utilizado é da ordem de 10^{-6} , pois foi nesse valor que se conseguiu atingir a convergência.

3.3 Seleção dos casos

Neste trabalho, tendo como objetivo otimizar o processo de manufatura destes compósitos, serão analisados os parâmetros de processo correspondentes a vazão de resina, pressão de injeção, tipo de resina que irá escoar pelo molde (densidade e viscosidade serão os parâmetros analisados) e posições de entrada e saída do fluido no molde.

As condições iniciais utilizadas no processo de simulação, assim como o passo de tempo (Δt) estão apresentadas na Tabela 3.1. O tempo total foi estabelecido baseado nas condições iniciais, onde verificou-se que em 152 s o molde encontra-se com quase 100% da sua capacidade.

Tabela 3.1 - Condição inicial, tempo total e passo-de-tempo do processo de simulação.

Δt (s)	Tempo total (s)	Condição inicial
0,05	152 s	$r_{\text{resina}} = 0,0$; $r_{\text{ar}} = 1,0$; $U(x,y,z) = 0,0$ m/s

Fonte: Autoria própria (2018).

O passo de tempo, Δt , foi atribuído baseando-se no trabalho realizado por Luz (2011), onde se apresentou algumas malhas e os respectivos passos de tempo indicando a convergência do processo de simulação. Baseado nesta tabela, reportado por Luz, selecionou-se o Δt de 0,05 s.

A Tabela 3.2 apresenta os casos que estão relacionados aos parâmetros de processo, neste caso: vazão (velocidade de entrada) e tipo de resina.

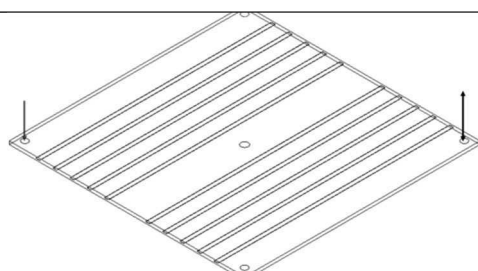
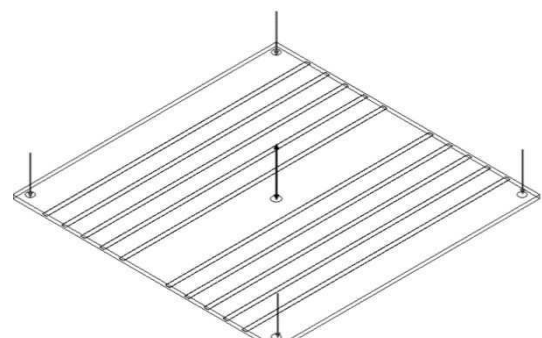
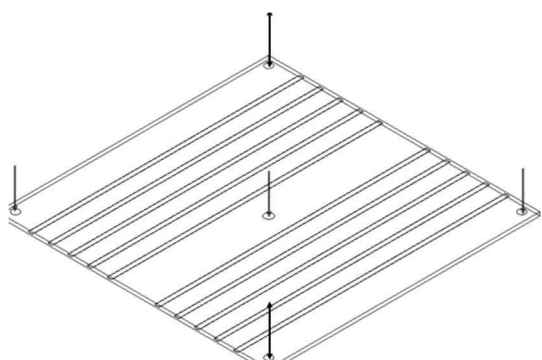
Tabela 3.2 - Casos analisados variando-se a vazão (velocidade) de resina na entrada.

Caso	U_{entrada} (m/s)	$P_{\text{saída}}$ (kPa)	Parede (m/s)	r_{resina} (-)	r (kg/m ³)	η (Pa.s)
01	0,05	101,325	$U(x,y,z)=0$	1,0	1470	7,00
02	0,10	101,325	$U(x,y,z)=0$	1,0	1470	7,00
03	0,20	101,325	$U(x,y,z)=0$	1,0	1470	7,00
04	0,10	101,325	$U(x,y,z)=0$	1,0	1180	0,33
05	0,10	101,325	$U(x,y,z)=0$	1,0	1240	0,962
06	0,10	101,325	$U(x,y,z)=0$	1,0	1054	0,75

Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 3.3 apresenta os casos em que se analisou a variação das posições de entrada e saída de resina e ar, respectivamente. Nestes casos, como a área da seção é constante, a velocidade será dividida pela quantidade de entradas.

Tabela 3.3 - Casos analisados variando-se as posições de entrada e saída de resina e ar no molde.

Caso	$U_{j,entrada}$ (m/s)	$P_{saída}$ (kPa)	Parede (m/s)	r_{resina} (-)	Posições (↕ Saída; ↓ Entrada)
07	(0,10)	101,325	$U(x,y,z)=0$	1,0	
08	(0,10)/4	101,325	$U(x,y,z)=0$	1,0	
09	(0,10)/3	101,325	$U(x,y,z)=0$	1,0	

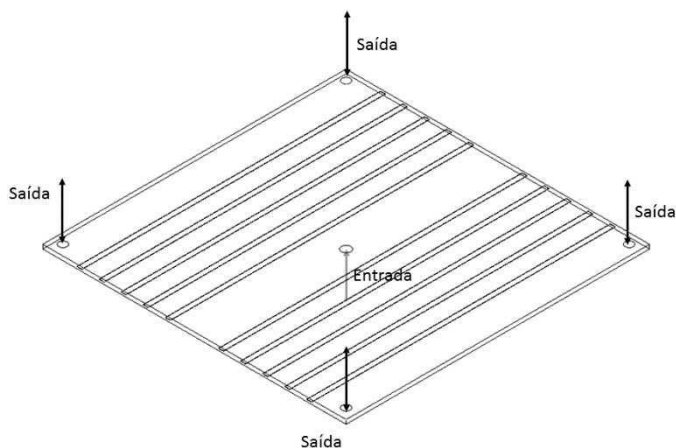
Fonte: Autoria própria (2018).

3.4 Validação do modelo matemático

Para verificar a veracidade dos resultados obtidos, aproximou-se o escoamento no interior do molde como sendo um escoamento entre placas paralelas, uma vez que a razão de aspecto do molde é elevada. Trabalhando nesta linha, verificou-se o perfil de velocidade em duas regiões no interior do molde, especificamente na sua linha de centro.

A avaliação do modelo matemático foi feita a partir da injeção de resina no centro do molde e as saídas de ar nas extremidades. Este caso específico de localização do ponto de injeção será utilizado nos casos de 01 - 06. Isto pode ser observado na Figura 3.6.

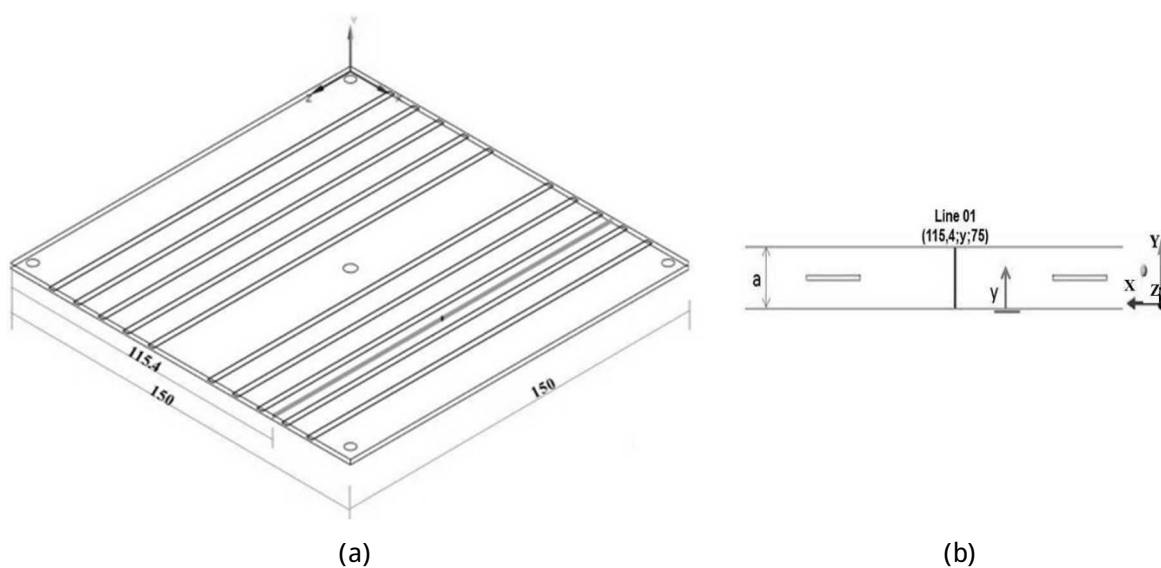
Figura 3.6 - Injeção de resina na região central do molde.



Fonte: Autoria própria (2018)

Para análise dos perfis de velocidade entre as paredes superior e inferior do molde, foi necessário gerar uma linha na localização. A Figura 3.7 apresenta a localização dessa linha.

Figura 3.7 - Localização da linha de análise do perfil de velocidade no interior do molde, (a) vista isométrica e (b) vista frontal.



Fonte: Autoria própria (2018).

Na literatura, Fox et al. (2006), a expressão matemática que define o perfil de velocidade de um fluido entre placas paralelas é apresentado na equação (3.10).

$$u = \frac{a^2}{2\mu} \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{y}{a} \quad (3.10)$$

A velocidade máxima entre as placas, U_{Max} , é definida na equação (3.11), como segue:

$$U_{Max} = - \frac{1}{8\mu} \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} a^2 \quad (3.11)$$

Logo, substituindo a equação (3.11) na equação (3.10), tem-se a expressão do perfil de velocidade em função do U_{Max} e da distância y na direção x nas placas. Esta expressão é apresentada na equação (3.12).

$$u = -4U_{Max} \frac{y}{a} - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{y}{a} \quad (3.12)$$

Onde a é a espessura do molde, representada na Fig.3.5 (b); $\frac{\partial p}{\partial x}$ é o gradiente de pressão na direção x e μ a viscosidade do fluido.

CAPÍTULO 4

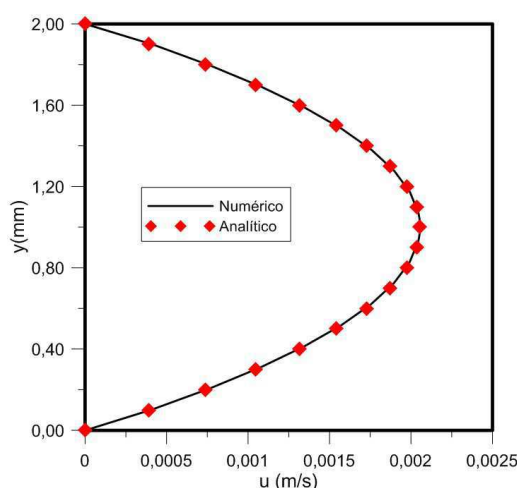
RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Validação do modelo

Avaliando o comportamento do fluido nas condições descritas no capítulo 3, a Figura 4.1 apresenta os perfis de velocidades traçados baseado na metodologia citada, comparando o escoamento da resina no interior do molde com aquele obtido para o escoamento entre duas placas planas e paralelas.

É possível perceber que os perfis de velocidade são praticamente idênticos. Verifica-se que o comportamento do fluido no interior do molde, para estas condições, se assemelha ao de um fluido escoando entre placas paralelas. A razão disto pode ser atribuída aos seguintes fatores: o fluido utilizado na simulação apresenta viscosidade elevada, a região por onde o fluido escoa é estreita, apresentando 2 mm de espessura, e a velocidade de injeção do fluido é da ordem de 10^{-2} , especificamente 5×10^{-2} m/s. O número de Reynolds, neste caso, apresenta-se bem pequeno ($Re=0,05$), caracterizando um escoamento laminar no interior do molde. Além disto, o fluido reduz a velocidade de escoamento depois que é injetado, devido as forças viscosas atuantes e a área de escoamento que aumenta consideravelmente em relação ao bocal de entrada. No interior do molde, a velocidade é bem menor quando comparada a da entrada, $0,002$ a $0,0025$ m/s, apresentando um número de Reynolds ainda menor.

Figura 4.1 - Comparativo entre os perfis de velocidade numérico e analítico (Caso 01).



Essa proposta para validar o caso simulado, abre uma vertente para se analisar a hidrodinâmica do escoamento de fluido em moldes rígidos fechados.

4.2 Análise dos casos selecionados

4.2.1 Efeito da velocidade de injeção

O comportamento da resina no interior do molde será avaliado de acordo com a vazão volumétrica de resina (velocidade de entrada), tendo como objetivo verificar o tempo de preenchimento do molde e a qualidade do produto acabado em termos de vazão volumétrica de resina.

A Tabela 4.1 apresenta a relação entre o tempo (t_{filling}), vazão volumétrica (r_{resina}) de resina e velocidade de entrada ($U_{j,\text{entrada}}$). O t_{filling} é apresentado por Luz (2011), sendo o instante em que a resina toca as paredes do molde. Sendo assim, para o caso 01, este instante é 50 s. Com o objetivo de se comparar a vazão volumétrica, este instante é utilizado para análise do caso 02. Esse quadro comparativo é apresentado na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 - Relação entre tempo e vazão volumétrica para os Casos 01, 02 e 03.

Caso	r_{resina} (-)	t_{filling} (s)
01	0,9130	50
02	0,9884	50
03	0,9968	50

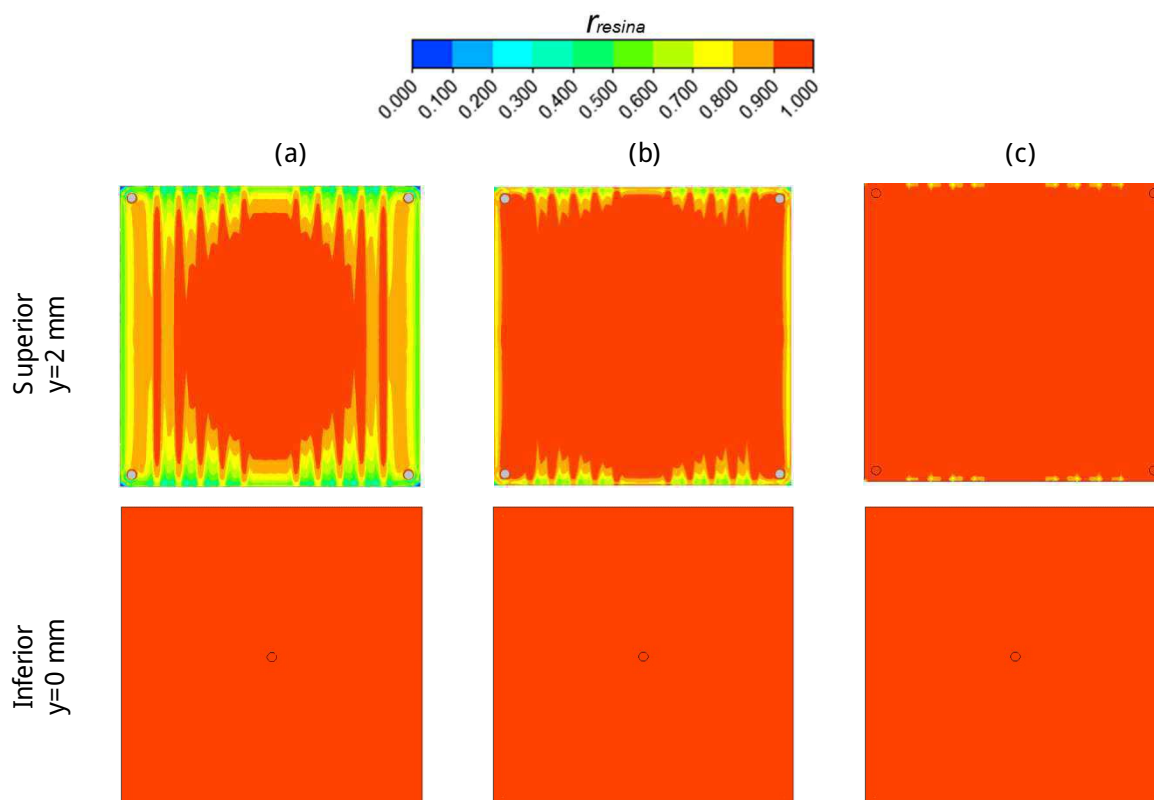
Fonte: Autoria própria (2017).

Percebe-se que a velocidade de injeção de resina contribui positivamente para o preenchimento do molde e, conseqüentemente, ocorre uma redução do tempo de preenchimento (t_{filling}). Isto é esperado, uma vez que quando a vazão aumenta, mais resina é injetada no interior do molde. Mais adiante, essa redução do t_{filling} poderá ser visualizada.

Tratando-se da qualidade do produto acabado, que está relacionado ao acabamento final e a presença de vazios no interior do produto, torna-se necessário a visualização do avanço da resina no interior do molde. Através da simulação, é possível analisar o acabamento final do produto, no instante de 152 s, assim como a região mais crítica do molde, que é exatamente a região central, onde se encontram

as fitas de NiTi. Nesse sentido, a Figura 4.2 apresenta o acabamento final do produto no instante de 152 s, obtido através da análise da fração volumétrica de resina próximas paredes no molde (região superior e inferior), tornando possível perceber a qualidade final do composto polimérico que será obtido.

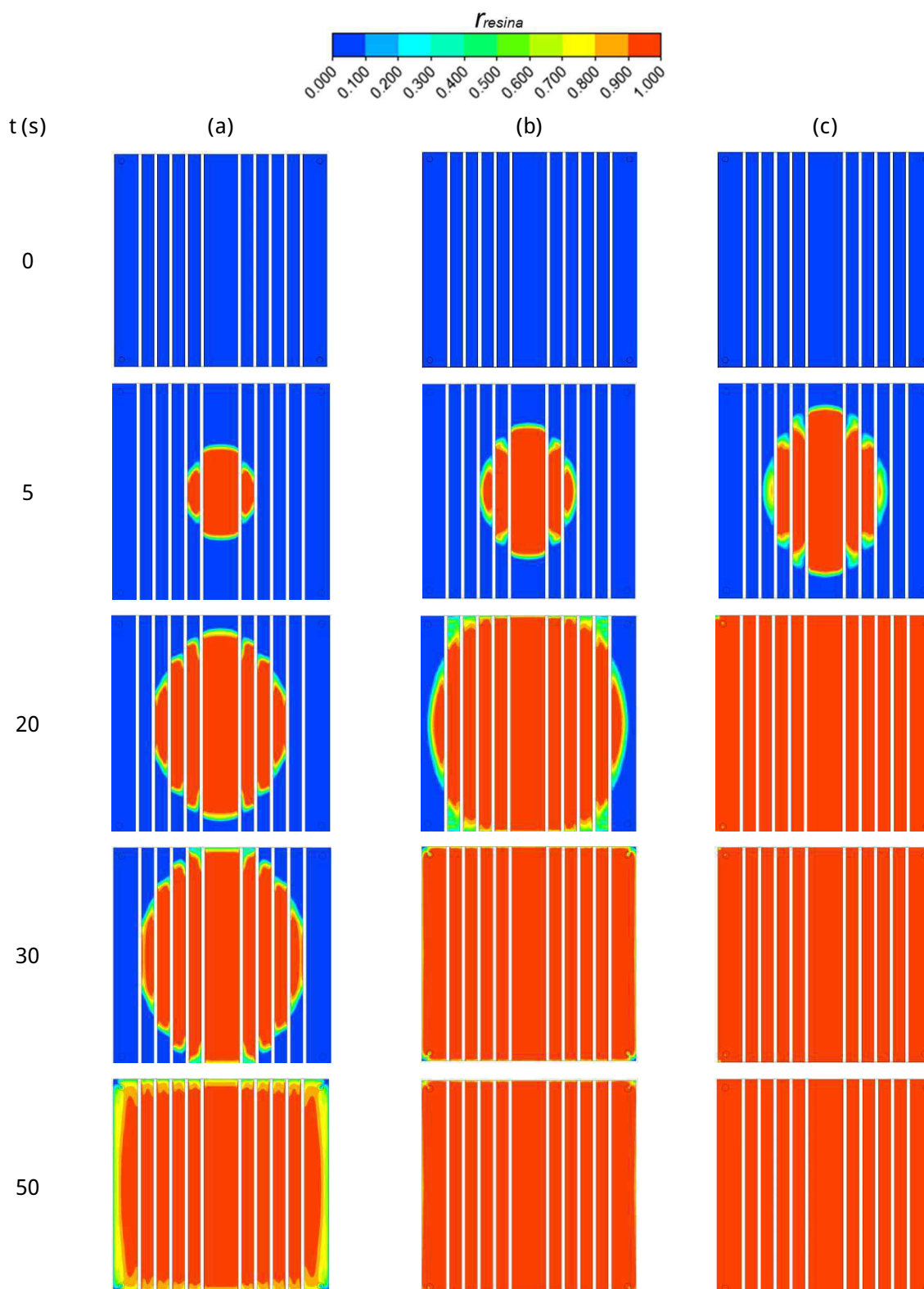
Figura 4.2 - Fração volumétrica de resina no instante de 152 s. (a) Caso 01, (b) Caso 02 e (c) Caso 03.



Pode-se verificar que o acabamento na superfície superior é diferente da inferior em todos os casos. Isto pode ser atribuído ao fato do fluxo de resina em direção à saída não apresentar uniformidade, além da presença das fitas contribuírem negativamente para o preenchimento adequado da região superior do molde. Com relação ao aumento da vazão volumétrica, o preenchimento mais adequado da região superior ocorreu em valores mais elevados deste parâmetro.

A Figura 4.3 apresenta um comparativo entre os três casos analisados em diferentes instantes de tempo. Nesta análise, um plano é traçado na região central, localizado em $y = 1$ mm. As regiões vazadas são exatamente os locais onde as fitas estão inseridas.

Figura 4.3 - Avanço da resina na região central do molde. (a) Caso 01, (b) Caso 02 e (c) Caso 03.



Verifica-se a influência da vazão volumétrica de resina sobre o preenchimento do molde. Com um aumento da vazão volumétrica, o tempo em que a resina alcança

as paredes do molde reduz-se quando comparado com os casos analisados com menor vazão.

A partir do instante $t = 5s$, percebe-se que a frente de resina assume um comportamento elástico, apresentando um avanço maior na região vertical central. Assim, a resina irá alcançar a parede no molde inicialmente nesta região, para então fluir no sentido horizontal alcançando as saídas do molde.

Para o tempo $t = 20s$, comparando os três casos, verifica-se que nesse instante em que, para o Caso 03, a resina já tem que alcançado as paredes do molde como consequência de uma vazão maior. Isto pode ser visto sob dois pontos de vista: O primeiro deles é que o molde será preenchido mais rapidamente, e apresenta uma qualidade de acabamento maior que nos demais casos, como observado na Figura 4.2, onde a presença de vazios é menor. Por outro lado, a perda de resina pelas saídas irá iniciar mais rapidamente. Essa quantidade de resina perdida, conseqüentemente, será maior que nos demais casos, aumentando o custo de processo, o que não é desejável.

No instante $t = 152s$, o molde encontra-se quase que 100% da sua capacidade preenchida por resina. Além disso, verifica-se que a região contendo os vazios encontra-se na região superior do molde. Para preencher essa quantidade de vazios será necessário aumentar o tempo de processamento e verificar se vai existir uma redução desse percentual de ar ainda presente no interior do molde. A Tabela 4.2 apresenta um comparativo da fração volumétrica no instante de $t = 152s$ para os três casos analisados.

Tabela 4.2 - Fração volumétrica de resina (r) e volume de ar (v_{ar}) presente no molde no instante de $t=152s$.

Caso	r_{resina} (-)	v_{ar} (m ³)
01	0,9960	$1,74 \times 10^{-7}$
02	0,9986	$2,28 \times 10^{-10}$
03	0,9997	$4,84 \times 10^{-14}$

As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam o comportamento da pressão de injeção de resina, a fração volumétrica de ar e resina e um comparativo entre a quantidade

de resina que entra no molde e a quantidade que é perdida nas saídas, respectivamente, para os três casos analisados.

Figura 4.4 - Comportamento transiente da pressão na região de entrada ao longo do tempo de processo.

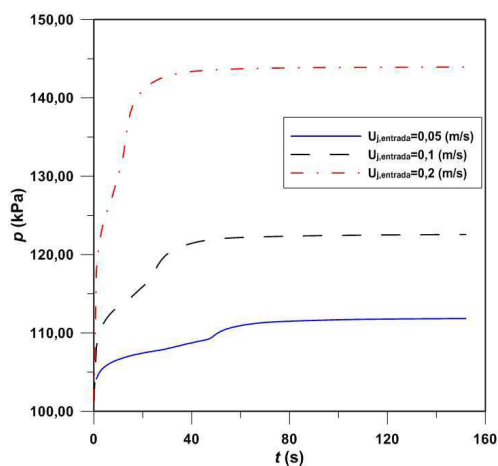
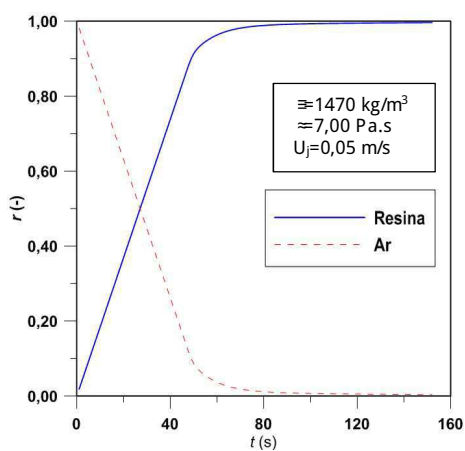
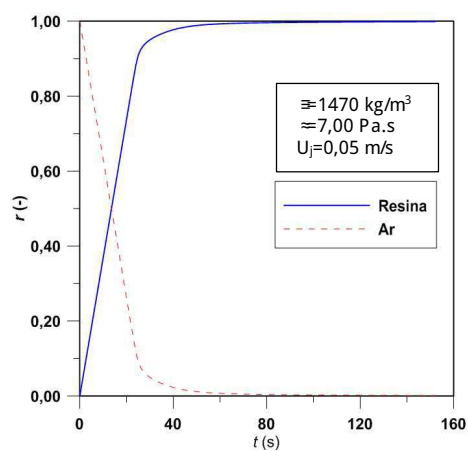


Figura 4.5 - Fração volumétrica das fases presentes no escoamento ao longo do tempo de processo

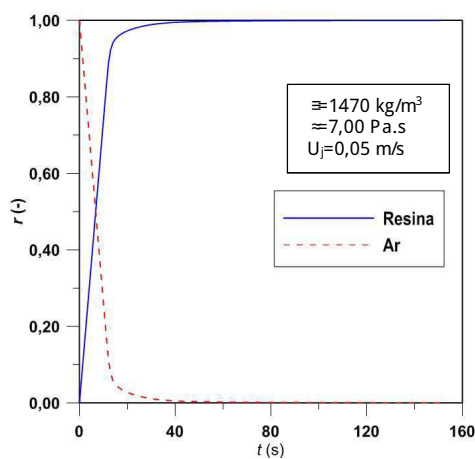
(a) Caso 01, (b) Caso 02 e (c) Caso 03.



(a)



(b)



(c)

Analisando o comportamento da pressão de injeção, Figura 4.4, verifica-se uma variação de pressão de 10,728 kPa entre os casos 01 e 02 e de 32,095 entre os casos 01 e 03, no instante final $t = 152$ s. Este resultado é esperado, uma vez que a pressão e a vazão de fluido são grandezas proporcionais. Além da elevada diferença de pressão quando comparado os casos tempo a tempo, tem-se a mudança no comportamento da curva de pressão.

No Caso 01, $U_{j,entrada} = 0,05$ m/s, o momento em que a resina atinge todas as paredes do molde, ocorre no instante de aproximadamente 50 s. Já no Caso 02, $U_{j,entrada} = 0,1$ m/s, ocorre entre 20 e 30 s. No Caso 03, esse instante é bem menor, aproximadamente 10 s. Posteriormente, um aumento de pressão ocorre, forçando a resina a se deslocar no sentido das saídas. Fazendo um comparativo entre as alterações sofridas pela pressão nas Figs. 4.3 e 4.4, a mudança no comportamento ocorre exatamente quando a resina alcança as paredes do molde.

Na prática, quando a resina toca todas as paredes do molde, o esforço do compressor para transportar a resina no interior do molde até as saídas é ainda maior, Luz (2011), quando realizou o seu trabalho numérico e experimental, obteve o comportamento da pressão até esse instante, não informando como a pressão se comportaria nos instantes seguintes. O resultado verificado é um parâmetro para o dimensionamento do sistema de injeção de resina em um trabalho experimental.

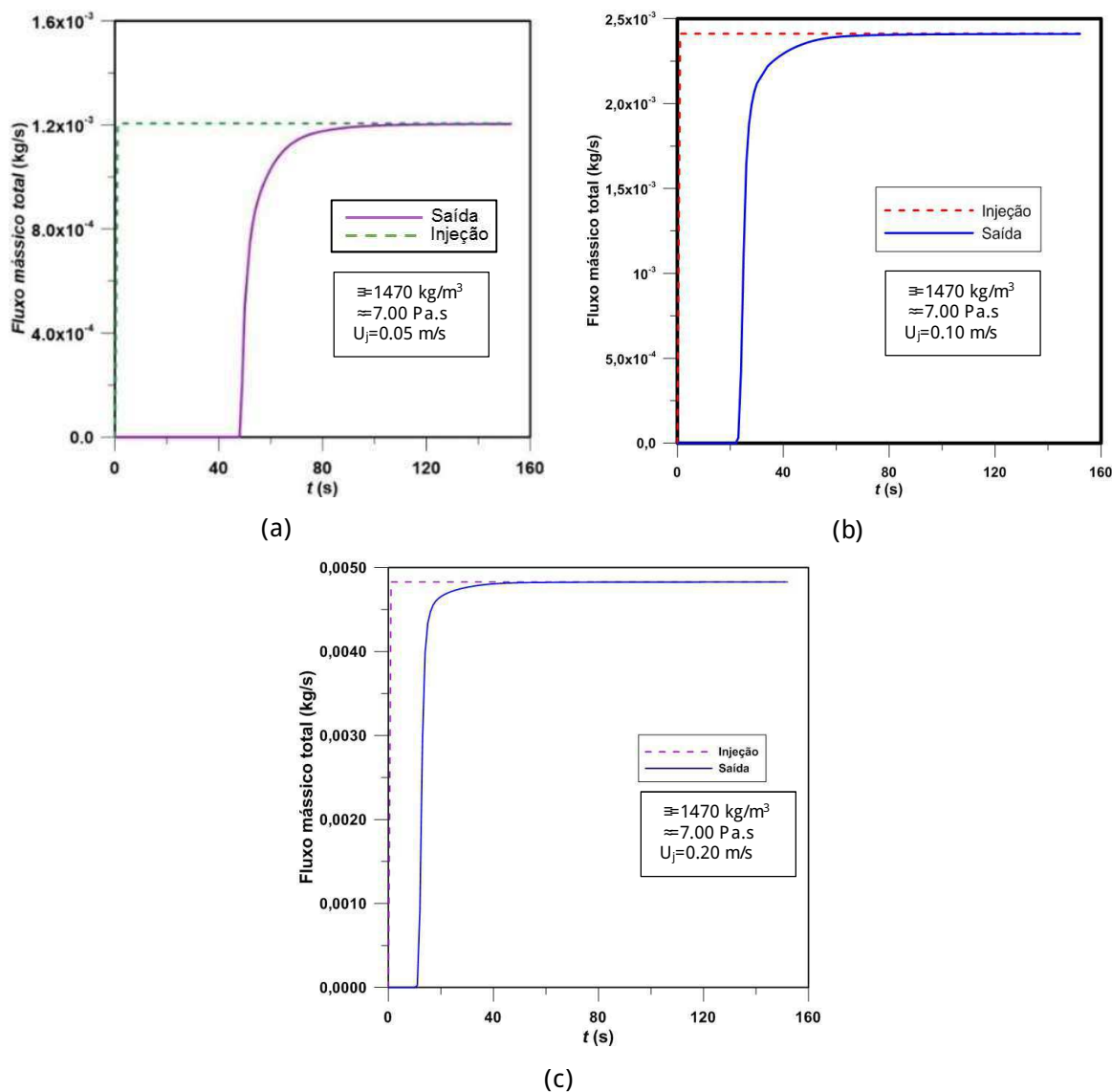
A Figura 4.6 apresenta um comparativo entre o fluxo mássico de resina (kg/s) entre a entrada e saída para os três casos de velocidades analisados.

Comparando a fração volumétrica das fases, Figura 4.5, observa-se um aumento na fração de resina e a diminuição da fração de ar nos casos analisados. Entretanto, a inclinação das curvas nos Caso 02 e 03 quando comparado com o Caso 01 aumenta na medida em que a vazão é elevada. Esse aumento indica que o molde é preenchido por resina mais rápido.

O fluxo mássico de resina na entrada e nas saídas do molde, Figura 4.6, indica a perda de resina. Verifica-se que nos instantes entre 40 e 60s, para o Caso 01, e 20 e 40 s para o Caso 02; e 10 e 20 s para o Caso 03, o molde começa a perder ar e resina. Observa-se que o fluxo mássico de resina quando o escoamento atinge o

regime permanente, quantidade de resina que entra \dot{m}_i a mesma da que sai, \dot{m}_e duas vezes maior, indicando uma perda mais elevada.

Figura 4.6 - Fluxo mássico de resina ao longo do tempo. (a) Caso 01, (b) Caso 02 e (c) Caso 03.



Observa-se que, com o aumento da velocidade de injeção, o instante em que se inicia a perda de resina é menor e a quantidade perdida no regime permanente é mais elevada quando se compara ao caso com velocidades menores.

As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam o avanço da resina sobre as fitas em diferentes instantes de tempo, para os casos em que a velocidade de entrada $U_{j,entrada} = 0,05$ m/s, $0,10$ m/s e $0,20$ m/s. É possível perceber que o fluxo de resina não apresenta uniformidade, o que foi citado anteriormente. A consequência deste fluxo não uniforme é a presença de vazios na região superior do molde, como apresentado na Figura 4.2.

Analisando essas Figuras, verifica-se que a resina alcança as regiões com fitas com mais rapidez, quando maiores velocidades são usadas. Isso é visualizado quando se observa os instantes de tempo analisados.

Figura 4.7 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em (a) $t=9s$, (b) $t=11s$, (c) $t=13s$, (d) $t=15s$ e (e) $t=17s$ (Caso 01)

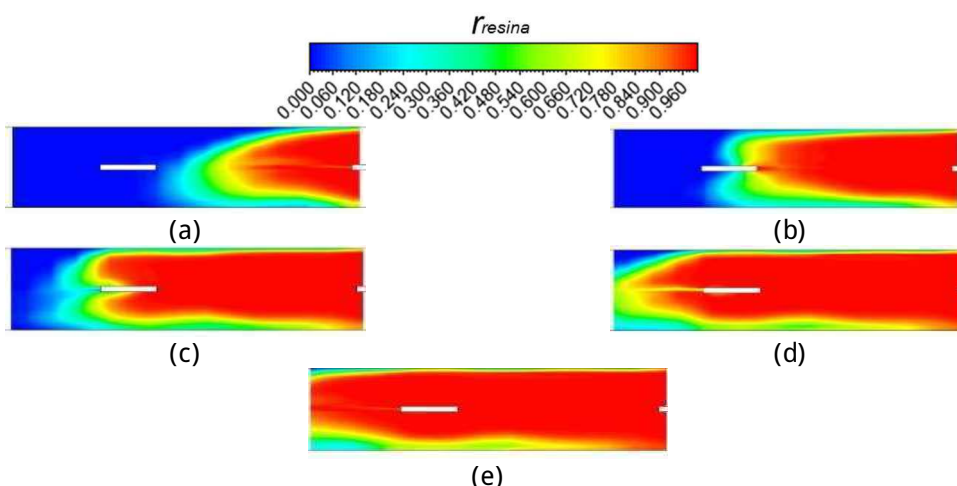
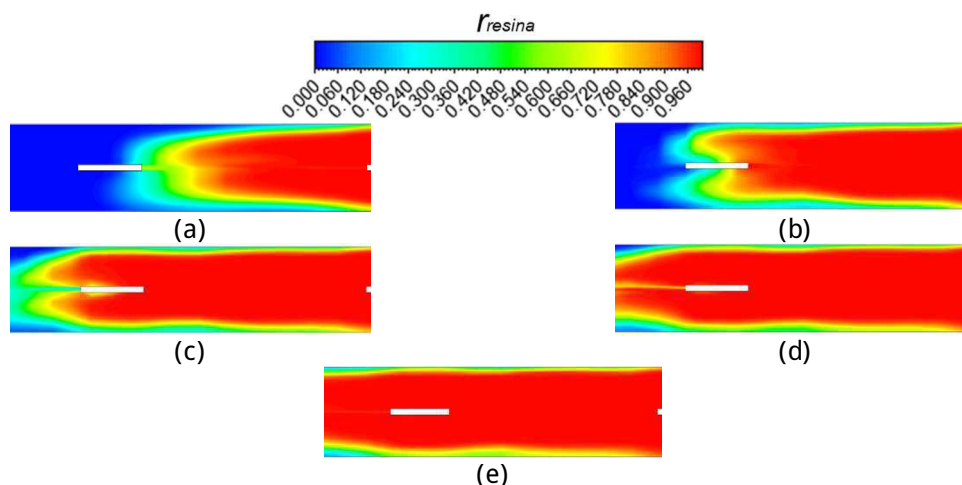
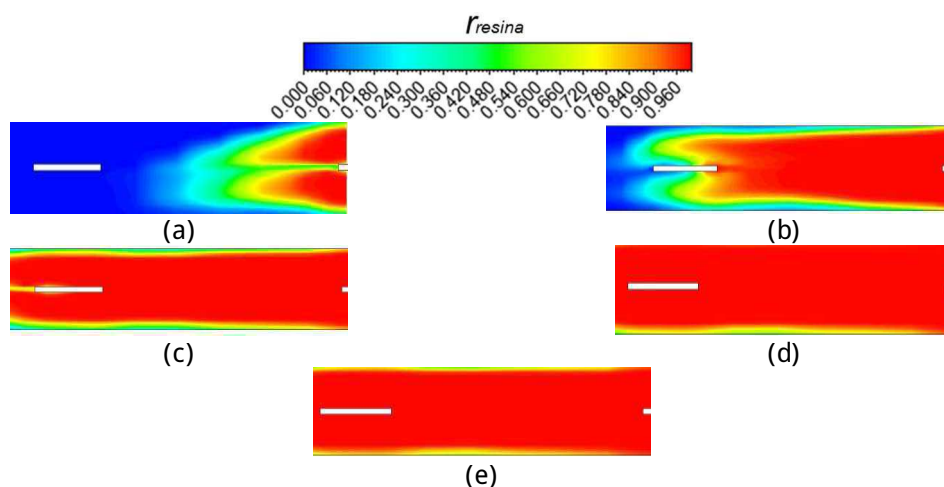


Figura 4.8 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em (a) $t=5s$, (b) $t=6s$, (c) $t=7s$, (d) $t=8s$ e (e) $t=9s$ (Caso 02).



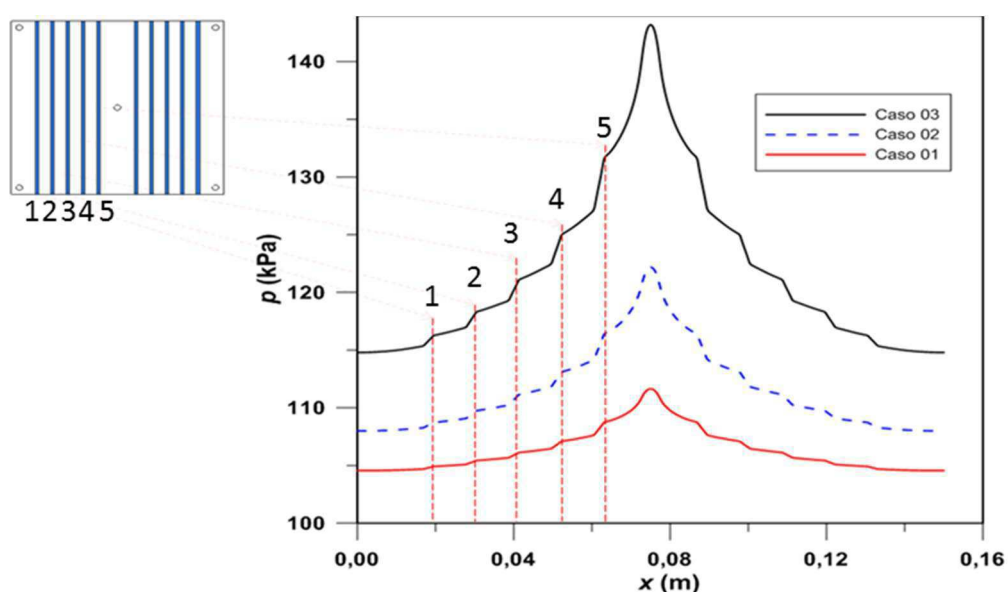
Comparando as Figuras 4.7 e 4.8 percebem que o avanço sobre as fitas permanece o mesmo, ou seja, o perfil da frente de resina apresenta variações. Portanto, a velocidade e, conseqüentemente, o tempo em que a resina alcança a região de análise são diferentes. O mesmo comportamento pode ser verificado na Figura 4.9, onde a velocidade de injeção é de 0,2 m/s.

Figura 4.9 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em (a) $t=2s$, (b) $t=3s$, (c) $t=4s$, (d) $t=5s$ e (e) $t=6s$ (Caso 03).



Além do avanço da resina sobre as fitas, percebe-se também alterações significativas na hidrodinâmica da resina devido a presença das fitas, e embora a relação de $\frac{w_m}{w_f}$ seja igual a 70, onde w_m é a espessura do molde e w_f é a espessura da fita. Isso pode ser percebido através do comportamento da pressão ao longo da direção x do molde. O comportamento esperado da pressão é que seja máxima no centro do molde, $x=0,075$ m e mínima nas extremidades, $x=0$ e $x=0,150$ m. Nesse intervalo, ocorre o decaimento da pressão. A Figura 4.10 evidencia esse comportamento.

Figura 4.10 - Comportamento da pressão ao longo do eixo x .



A mudança no comportamento da pressão e U verificada através das variações indicadas na Fig. 4.10, onde cada pico U referente z localiza o de uma das fitas.

As Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 apresentam a distribuição de pressão e velocidade na região central do molde em $y=1$ mm, local onde as fitas de NiTi estão inseridas, para os três casos analisados, no tempo $t=152$ s.

Percebe-se que a região de maior pressão, em ambos os casos, está localizada no centro do molde, local onde ocorre a entrada de resina, e as zonas de baixa pressão estão localizadas nas regiões da saída. Este comportamento é o esperado, uma vez que a diferença de pressão faz com que o fluxo de resina ocorra na direção deste gradiente de pressão.

Figura 4.11 - Distribuição de (a) pressão e (b) velocidade da resina no plano $y=1$ mm em $t=152$ s (Caso 01).

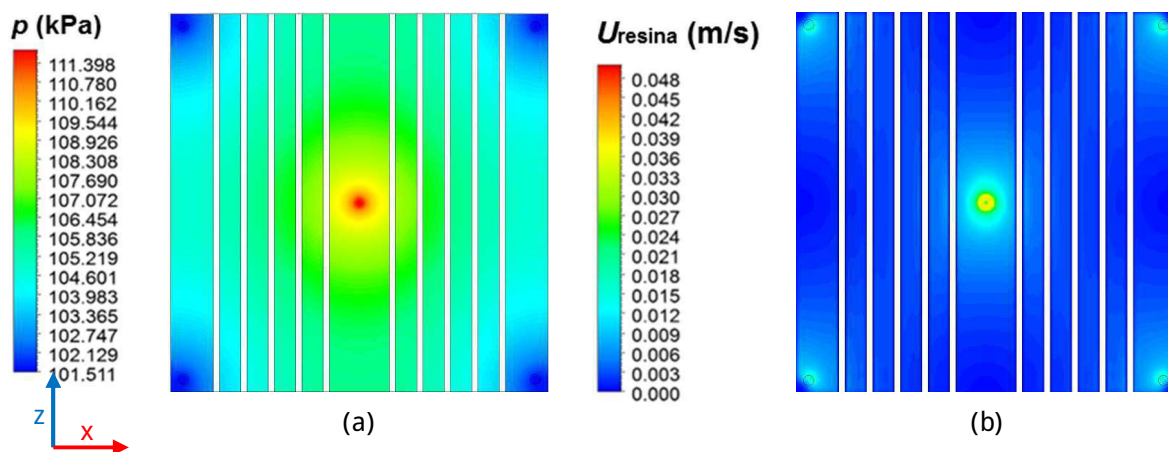


Figura 4.12 - Distribuição de (a) pressão e (b) velocidade de resina no plano $y=1$ mm em $t=152$ s (Caso 02)

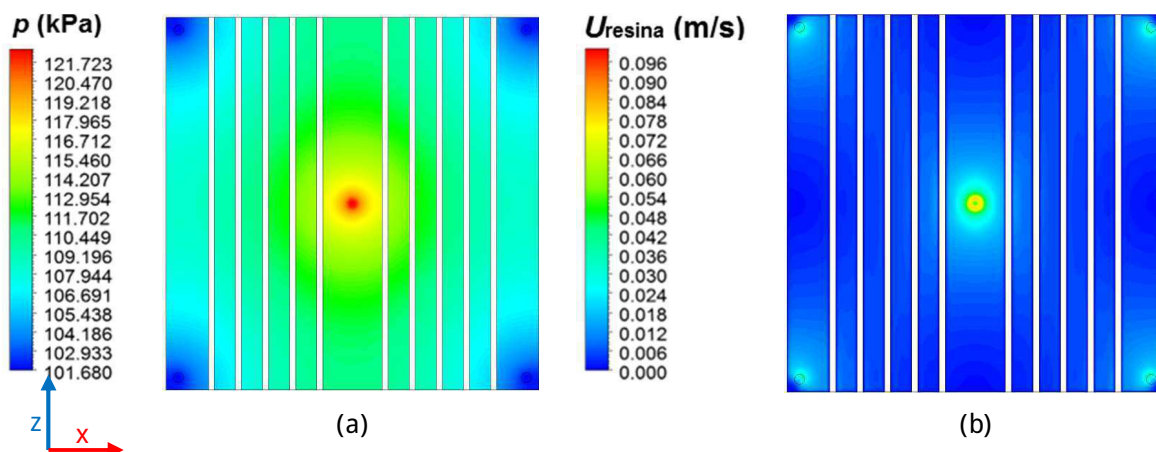
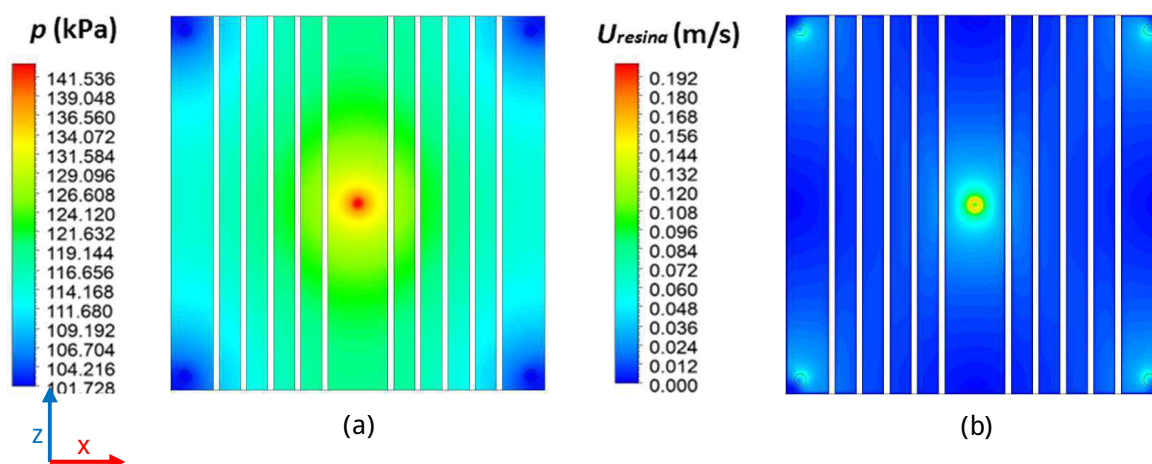


Figura 4.13 - Distribuição de (a) pressão e (b) velocidade de resina no plano $y=1\text{mm}$ em $t=152\text{s}$ (Caso 03)

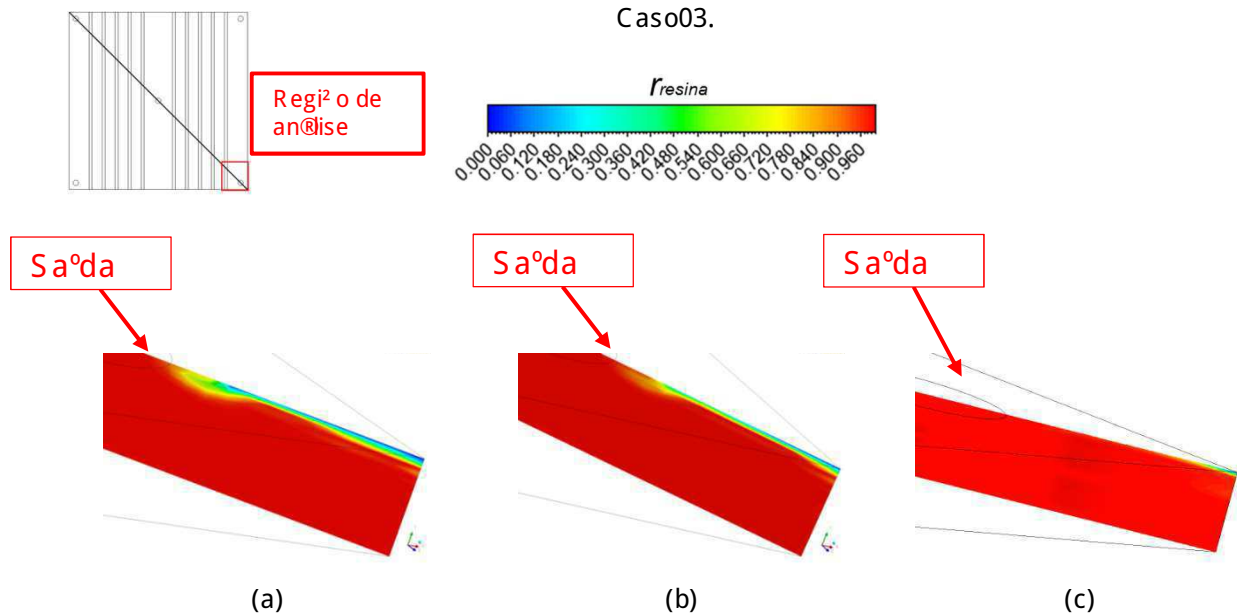


A distribuição de velocidade, Figuras 4.11 (b), 12 (b) e 13(b), na região central do molde apresentaram um perfil óptico, indicando uma dificuldade da resina fluir na direção horizontal (x). A presença das fitas gera esta dificuldade. Além disso, verifica-se que nas paredes laterais, existe um acúmulo de resina ($U=0,00\text{ m/s}$), assim como nas quinas do molde. Isto significa que, quando o escoamento de resina encontra-se em regime permanente, o fluxo de resina ocorre na direção dos pontos de saída, renovando a massa de resina localizada nestas regiões.

O fato da resina permanecer estagnada nestes locais, aumenta a possibilidade de solidificação da mesma e surgimento de vazios que reduz a qualidade do material. Lee et al. (2006), em seu trabalho experimental, mostram que, nas regiões próximas às saídas, o surgimento de bolhas de ar é mais provável, e que só foi possível evitá-las com utilização de pontos de injeção de resina em zonas próximas a estas regiões. Os vazios são percebidos analisando a Figura 4.14.

Na região superior do molde, próximo às regiões de saída, como indicado na Fig. 4.14, para os três casos analisados, e presença de ar ainda é percebida mesmo que se aumente a vazão de resina em até 04 (quatro) vezes quando comparado ao Caso 01. Percebe-se que durante o processo de injeção de resina, as zonas próximas à saída do molde, especificamente nas quinas, tem-se uma dificuldade maior de preenchimento.

Figura 4.14 - Zonas de vazios nas regiões próximas a saída de fluido (a) Caso 01, (b) Caso 02 e (c) Caso 03.



Fonte: Autoria própria (2017).

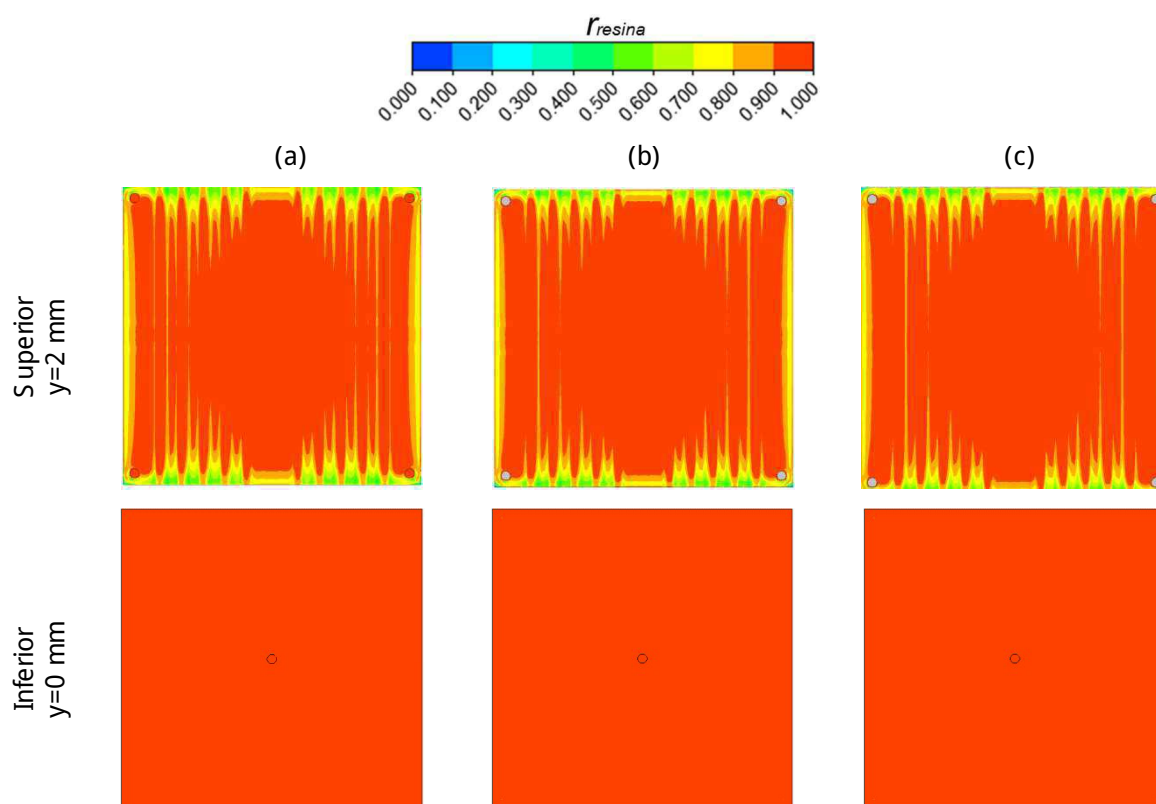
4.2.2 Efeito das propriedades (densidade e viscosidade) da resina

Na seção anterior foi analisado o avanço da resina sob a ação da vazão, ou velocidade, de injeção de resina no molde. Nesta seção, o efeito das propriedades fluidodinâmicas (densidade e viscosidade) da resina utilizada no processo será considerado. Como visto na Tab. 3.2, três tipos de resina foram analisados com o objetivo de otimizar o processo de injeção.

Inicialmente, o acabamento do produto foi analisado através da presença de vazios nas paredes do molde. A Figura 4.15 apresenta a fração volumétrica de resina no instante final, $t = 152$ s, na parede do molde para os três casos estudados, e a Figura 4.16 apresenta o avanço da resina no plano central.

Verifica-se que, para as três resinas selecionadas, não existiu variação no perfil do avanço de resina quando comparado os casos. Além disso, embora a viscosidade e densidade da resina para estes três casos estudados, sejam menores que as utilizadas no Caso 02, o perfil de avanço e a fração volumétrica da resina nas paredes do molde e no plano central, não apresentaram mudanças significativas.

Figura 4.15 - Fração volumétrica de resina no instante $t=152$ s para (a) Caso 04, (b) Caso 05 e (c) Caso 06.

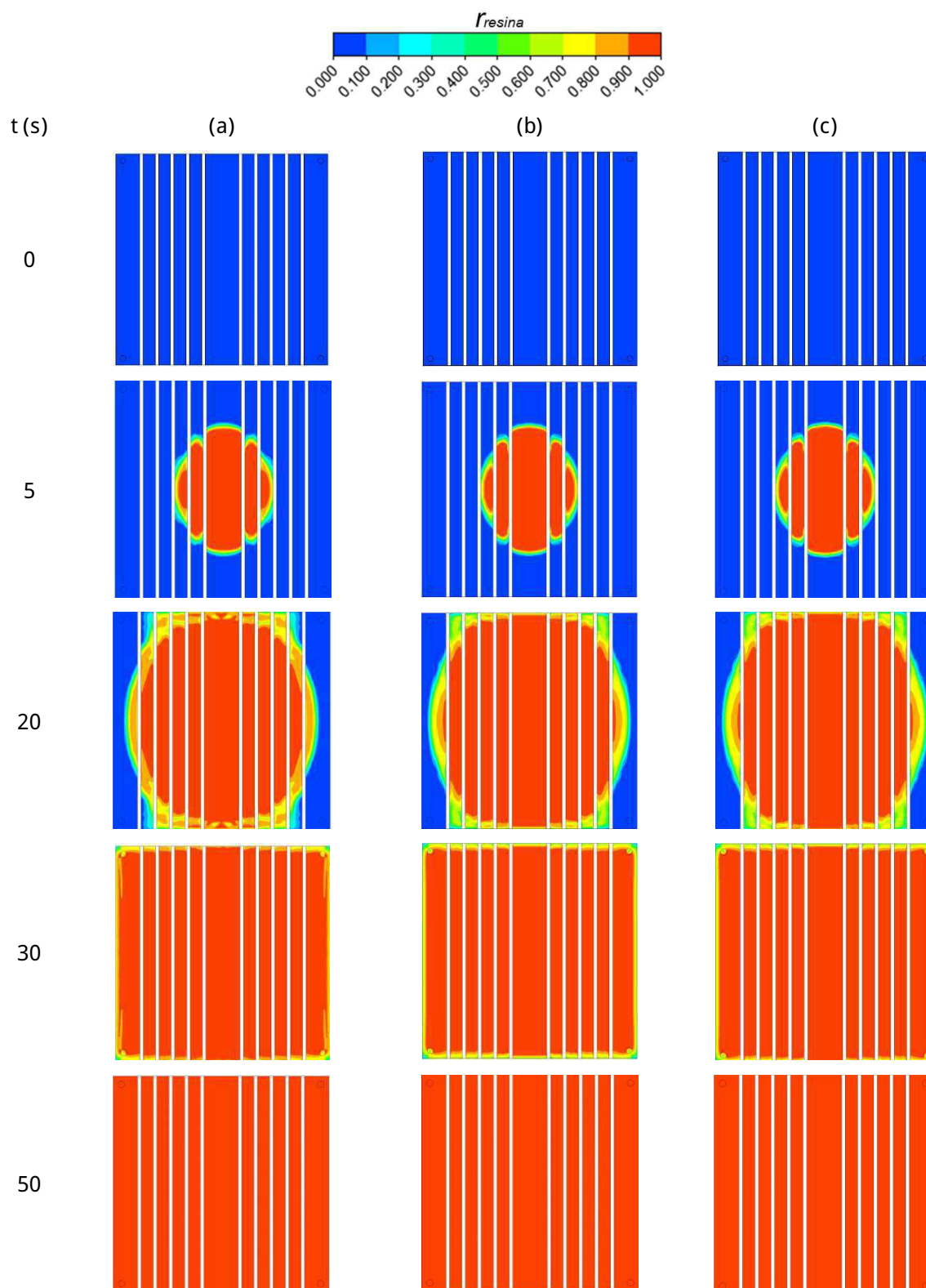


Verificado que o acabamento superficial do produto se apresenta quase que igual para os três casos, isto significa que embora se varie a propriedade da resina, mantendo sua velocidade de entrada constante, o acabamento superficial da peça se manterá inalterado. Neste caso, não foi possível reduzir e muito menos extinguir a presença de ar na região superior do molde, com a variação das propriedades do fluido.

Essa dificuldade de otimização do processo de manufatura do material através das propriedades do fluido utilizado é novamente visualizada na Figura 4.16, onde apresenta-se a frente de entrada da resina. É possível perceber que o avanço da resina permanece constante.

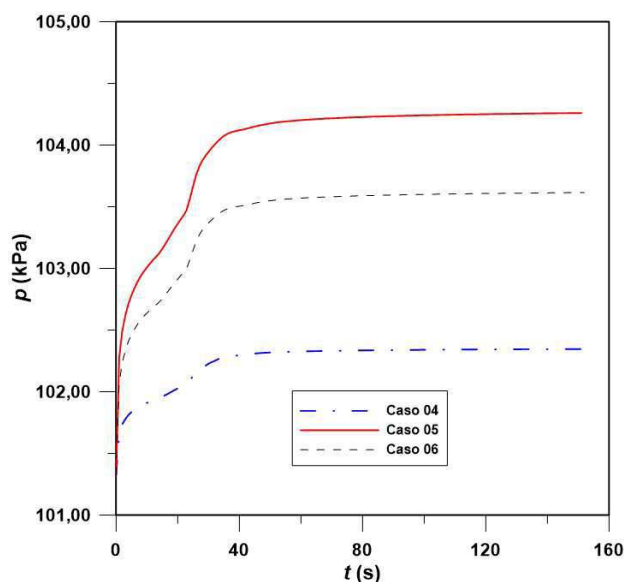
No processo de RTM, onde o componente apresenta o reforço fibroso, a viscosidade e densidade do fluido, e permeabilidade do meio fibroso, influenciam na resistência do fluxo. Como nos casos em estudo, o reforço fibroso não é utilizado, ou seja, é constante, tais propriedades irão atuar como resistências viscosas.

Figura 4.16 - Avanço da resina na região central do molde para (a) Caso 01, (b) Caso 02 e (c) Caso 03.



A Figura 4.17 apresenta o comportamento da pressão de injeção em função do tempo para os três casos analisados.

Figura 4.17 – Comportamento transiente da pressão na região de entrada ao longo do tempo de processo para diferentes propriedades da resina.



Fonte: Autoria própria (2017).

Verifica-se que o comportamento da pressão é semelhante aos apresentados na seção anterior, uma vez que a curva apresenta um ponto de inflexão resultante do esforço necessário para garantir o fluxo de resina até que se atinja o regime permanente ($t > 40s$).

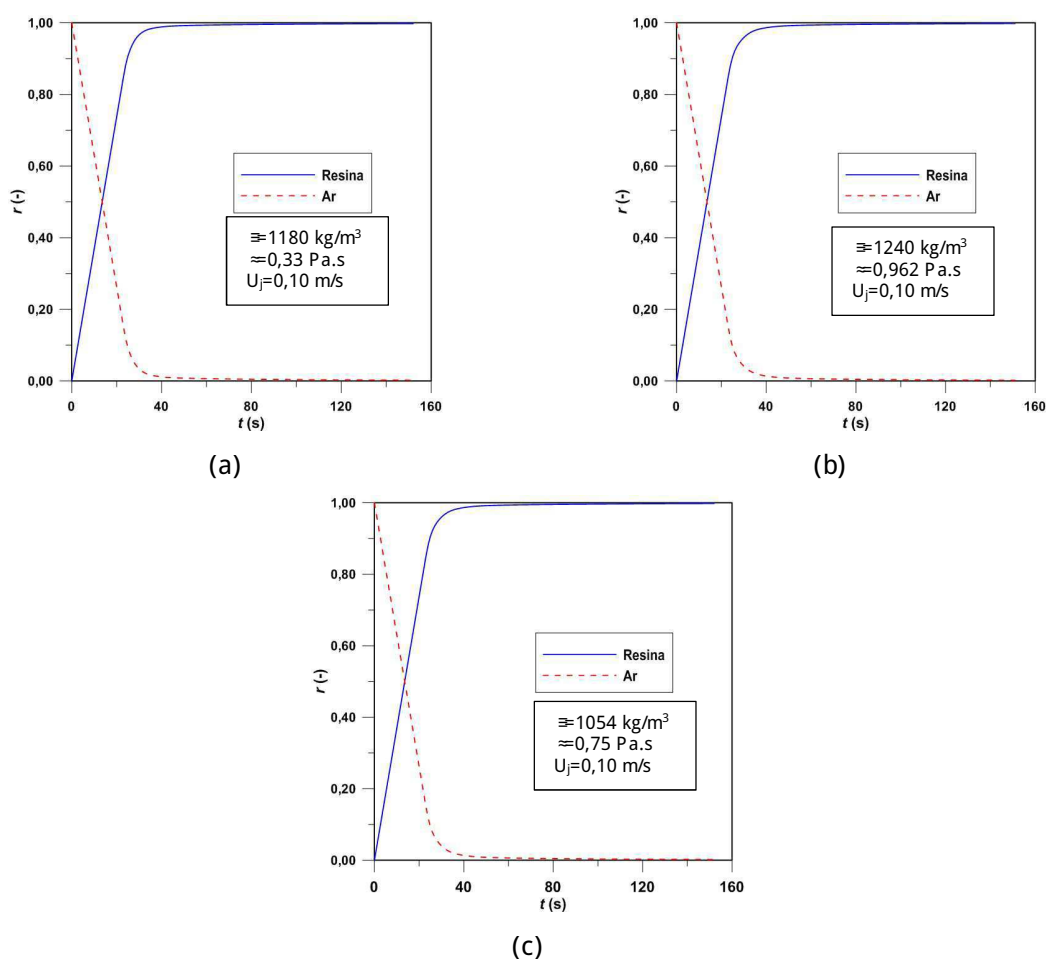
Analisando a Fig.4.17, percebe-se que a pressão para estes três casos atinge níveis bem menores que o Caso 02, uma vez que utilizou-se a mesma velocidade de entrada ($U_{j,entrada}=0,10$ m/s). Como dito anteriormente, a viscosidade contribui para a intensidade das tensões viscosas no escoamento. Logo, a intensidade da pressão de entrada quantifica esta afirmação. Percebe-se que, para os casos onde a resina apresenta viscosidades mais baixas (Caso 04 e 06), a inflexão da curva de pressão é mais suave, assim como sua intensidade. Portanto, para o Caso 05, em que a viscosidade é aproximadamente $1,0$ Pa.s, o escoamento de resina necessita de mais energia para vencer a resistência viscosa e preencher todo o molde. Verifica-se também, que em todos os casos, a região em que ocorre o ponto de inflexão não se altera. Embora a suavidade da curva varie de acordo com as propriedades fluidodinâmicas, o tempo em que a resina atinge a parede do molde, e consequentemente gerando o aumento da pressão de entrada, é o mesmo. O avanço

da resina nestes casos apresenta comportamento semelhante. Isso pode ser percebido na Figura 4.18

A Figura 4.18 apresenta a fração volumétrica, para os três casos apresentados, em função do tempo.

Figura 4.18 - Fração volumétrica das fases presentes no escoamento ao longo do tempo de processo

(a) Caso 04, (b) Caso 05 e (c) Caso 06.



Fonte: Autoria própria (2017).

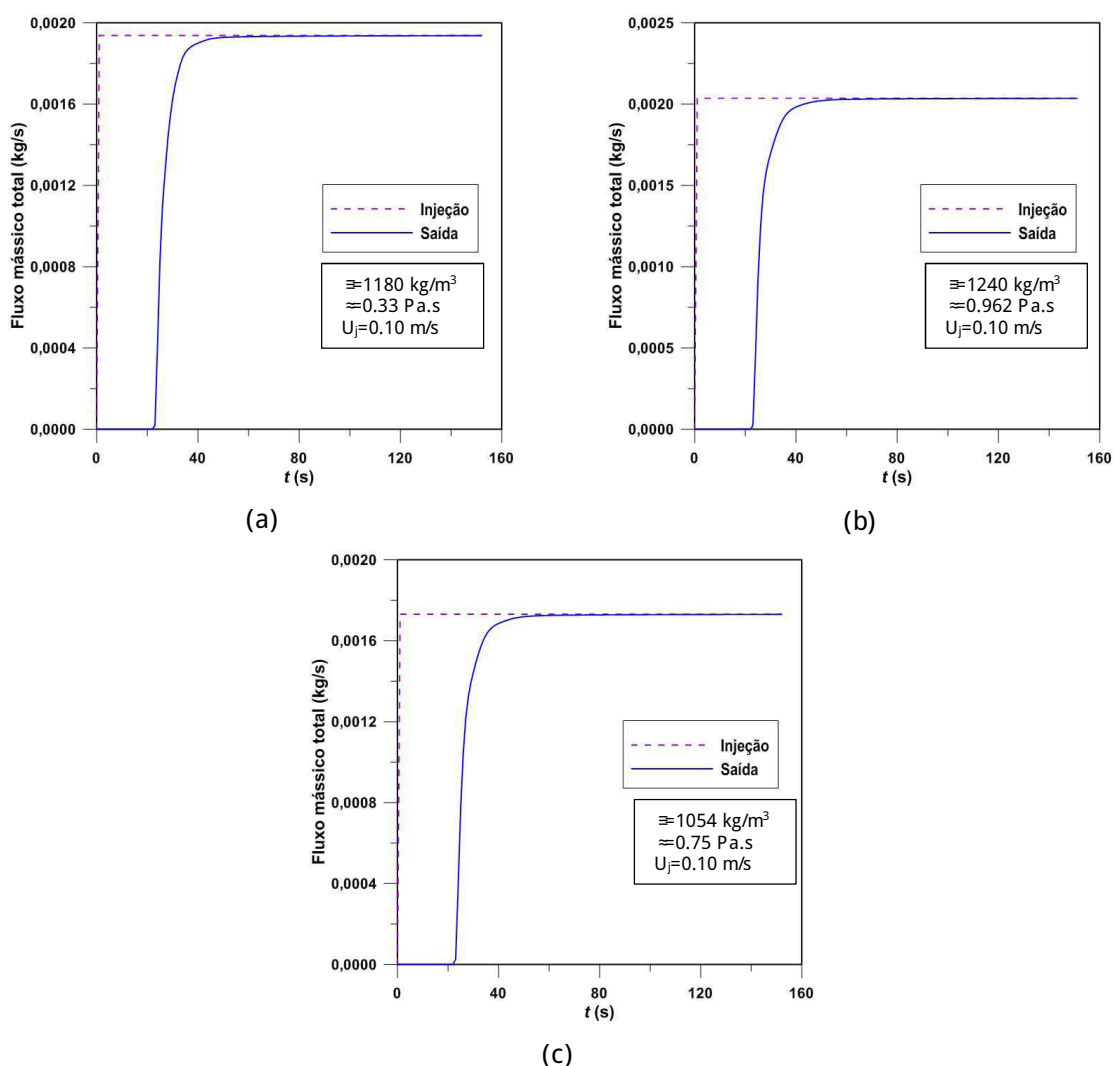
A Figura 4.19 apresenta o fluxo mássico total de resina nas saídas e na entrada do molde para os casos 4, 5 e 6. Verifica-se, que embora a velocidade de entrada seja a mesma, assim como as características geométricas do molde, o fluxo de resina varia, uma vez que a densidade do fluido não é constante.

Através da Fig. 4.19, certifica-se que a equação da continuidade é obedecida, onde a quantidade de massa que é injetada no interior do molde, quando o

escoamento acontece em regime permanente ou estacionário, \dot{m} equivalente ao fluxo mássico na saída do molde.

Além da validade do processo, com relação a equação da continuidade, verifica-se também que a quantidade de massa perdida \dot{m} maior no Caso 06, uma vez que a massa específica ρ maior quando comparada aos outros casos em questão. No mais, percebe-se que o comportamento do fluxo de resina na saída \dot{m} o mesmo em todos os casos, ou seja, a viscosidade e densidade do fluido não influencia no comportamento do fluxo de resina na saída do molde, apenas na quantidade de massa perdida.

Figura 4.19 - Fluxo mássico de resina (a) Caso 04, (b) Caso 05 e (c) Caso 06.



As Figuras 4.20 a 4.22 apresentam o fluxo de resina sobre as fitas de NiTi em cinco instantes de tempo, que coincidem com o apresentado no Caso 02, uma vez que a velocidade de injeção U_j a mesma. Conforme verificado na seção anterior, a

presença da fita altera o fluxo de resina, embora sua espessura seja aproximadamente 70 vezes menor que a espessura do molde. Além disso, comparando com a Figura 4.8, nos instantes (b) e (c), é possível perceber que a deformação no fluxo de resina causada pelas fitas nos casos em que a viscosidade e densidade do fluido utilizado são menores é maior. A consequência disso é que o avanço de resina não é uniforme.

Figura 4.20 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em (a) $t=5s$, (b) $t=6s$, (c) $t=7s$, (d) $t=8s$ (Caso 04).

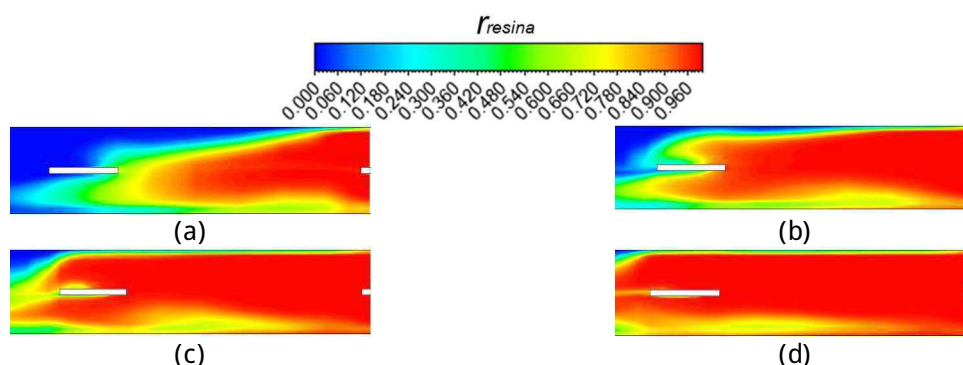


Figura 4.21 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em (a) $t=5s$, (b) $t=6s$, (c) $t=7s$, (d) $t=8s$ (Caso 05).

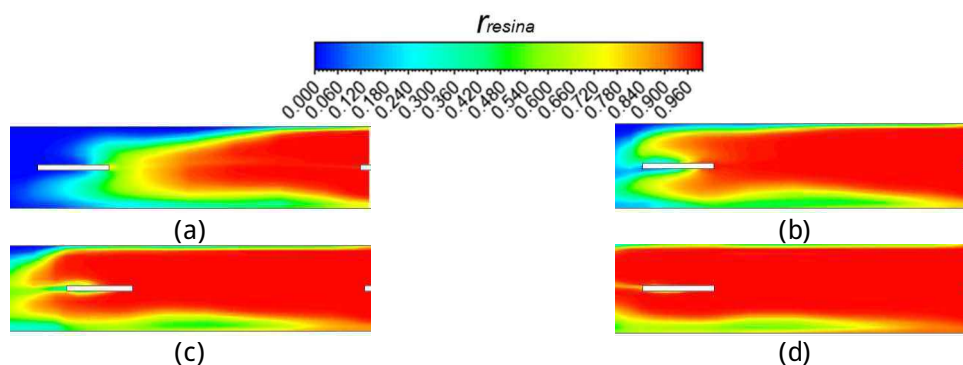
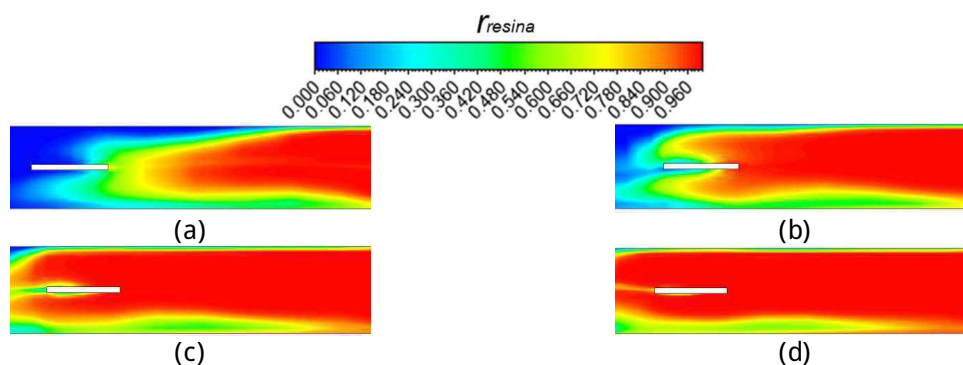


Figura 4.22 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em (a) $t=2s$, (b) $t=3s$, (c) $t=4s$, (d) $t=5s$ (Caso 06).



As Figuras 4.23 a 4.25 apresentam os campos de velocidade e pressão para os três casos analisados nesta seção.

Figura 4.23 - Distribuição de (a) pressão (b) velocidade da resina no plano $y=1\text{mm}$ em $t=152\text{s}$ (Caso 04).

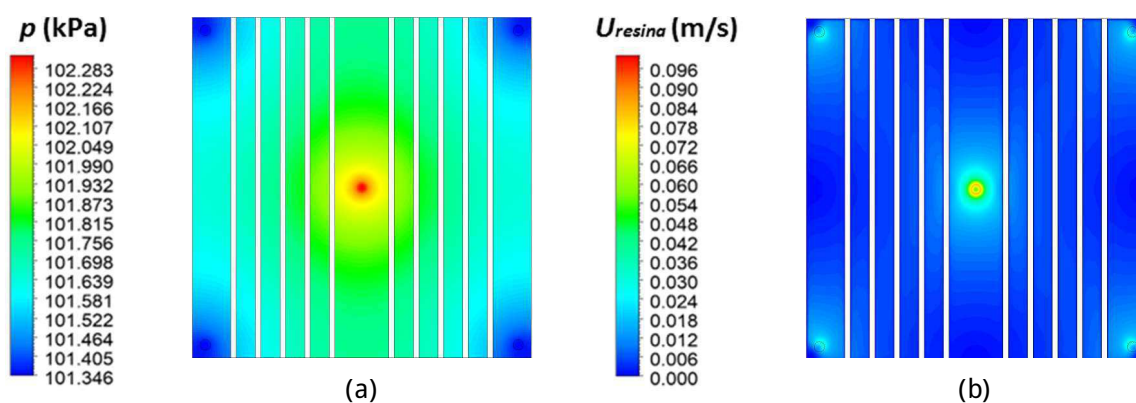


Figura 4.24 - Distribuição de (a) pressão (b) velocidade da resina no plano $y=1\text{mm}$ em $t=152\text{s}$ (Caso 05)

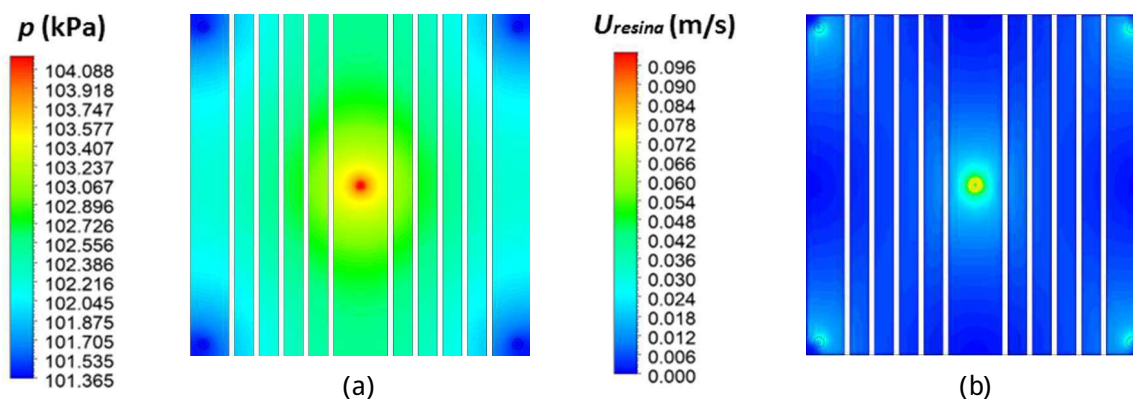
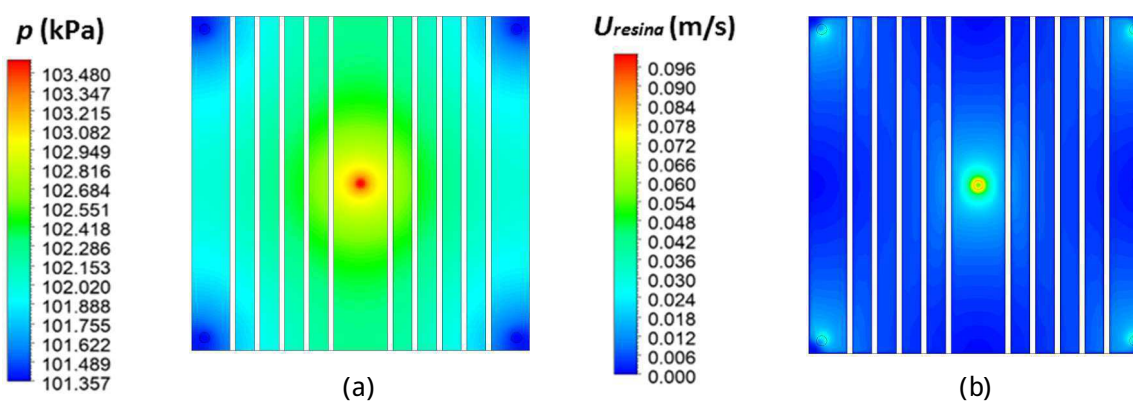


Figura 4.25 - Distribuição de (a) pressão (b) velocidade da resina no plano $y=1\text{mm}$ em $t=152\text{s}$ (Caso 06)

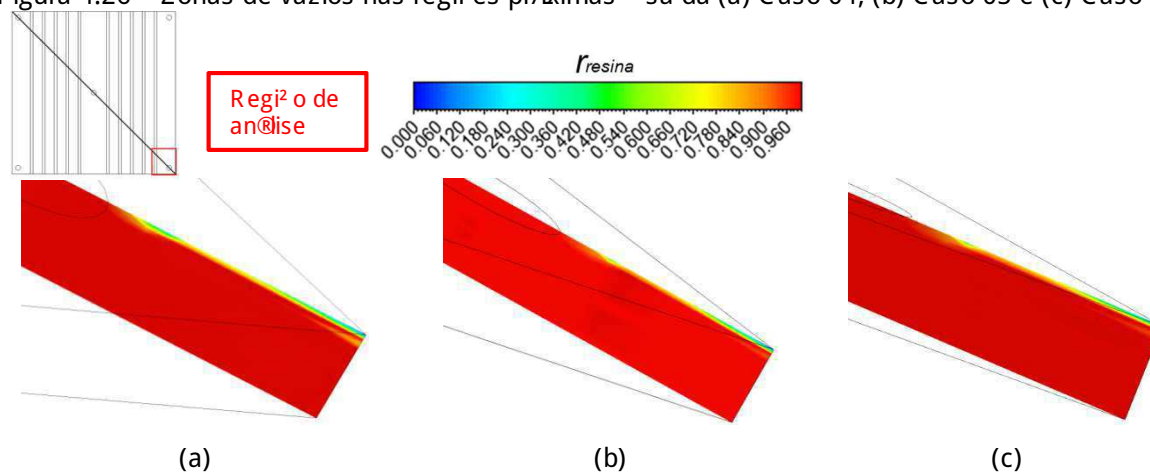


É esperado que a distribuição de pressão se mantenha, tendo pressões mais elevadas na região central, próximo ao local de injeção e a redução acontece ao longo da distância radial do molde, atingindo pressões mínimas nas saídas, caracterizando o fluxo de resina. Como observado na Figura 4.17, a pressão não apresentou valores tão diferenciados como nos casos estudados na seção anterior. Assim, a variação da pressão para os três casos analisados é pequena, da ordem de aproximadamente 2 kPa. Com relação ao campo de velocidade do processo, têm-se as mesmas condições, uma vez que a velocidade do fluido permanece praticamente inalterada. De acordo com a equação do perfil de velocidade apresentada no capítulo 3, a variação que irá ocorrer no campo de velocidade está diretamente relacionada ao campo de pressão, e viscosidade do fluido. Como se tem valores pequenos e a diferença entre eles é baixa, não é possível perceber variação no campo de velocidade.

Sabendo que, além da área superior do molde, que apresenta uma maior concentração de vazios, as regiões próximas às saídas também se mostram zonas críticas apresentando concentração de ar, ou vazios, nas extremidades do molde. A Figura 4.26 apresenta a fração volumétrica de resina nestas regiões.

Embora as propriedades do fluido variem, a dificuldade do preenchimento do molde nesta região permanece, mostrando que é um ponto crítico no processamento de tais materiais conforme analisado por Lee et al. (2006).

Figura 4.26 - Zonas de vazios nas regiões próximas à saída (a) Caso 04, (b) Caso 05 e (c) Caso 06.



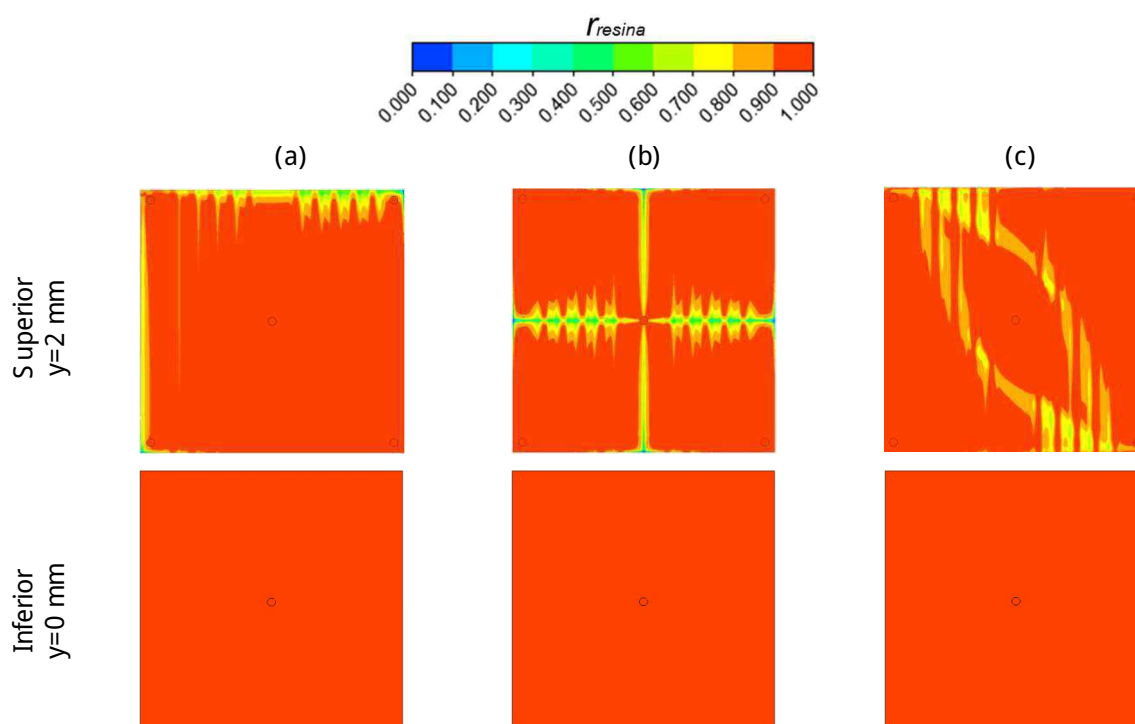
4.2.3 Efeito da posição de injeção

Tendo em vista que as regiões críticas com presença de vazios estão localizadas nas extremidades do molde, que o aumento da vazão volumétrica de resina está ligada a redução da presença de vazios e que as propriedades do fluido não mostraram influência nessa redução, optou-se por utilizar o método descrito por Lee et al.(2006) utilizando diferentes pontos de injeção, com o objetivo de reduzir os vazios deixados nas extremidades do molde.

A Tabela 3.3 apresentou três casos em que se optou por mudar a localização do ponto de injeção de resina. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.27, onde é mostrado o acabamento superficial do molde no regime permanente ($t=152s$).

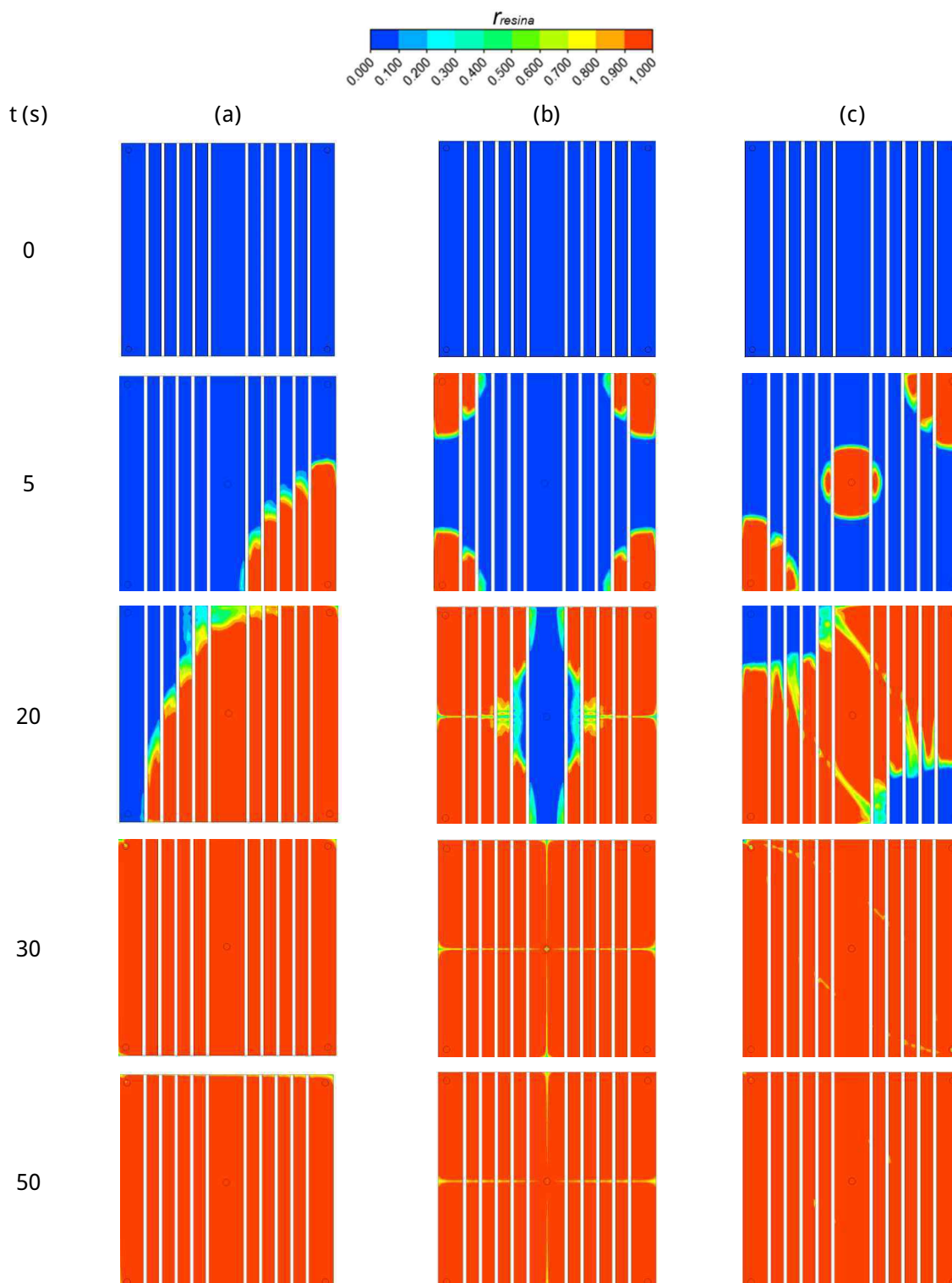
Percebe-se, pela Fig. 4.27, que mesmo alterando a forma de se injetar a resina, os elementos contidos na superfície do molde não são completamente preenchidos, tendo praticamente, na situação mais crítica, elementos com no mínimo 40% do seu volume preenchidos de resina. Para os casos da Fig.4.27 (a) e (b) tomou-se a situação mais crítica dos resultados, onde se percebe os maiores percentuais de vazios na região superficial superior do molde

Figura 4.27 - Fração volumétrica de resina no instante de 152 s. (a) Caso 07, (b) Caso 08 e (c) Caso 09.



Porém, para o caso da Fig.4.27 (c), os melhores resultados do ponto de vista de acabamento foram obtidos, com os elementos na superfície do molde com no mínimo 70% de seu volume preenchido de resina. O avanço da resina no plano central do molde é apresentado na Figura 4.28.

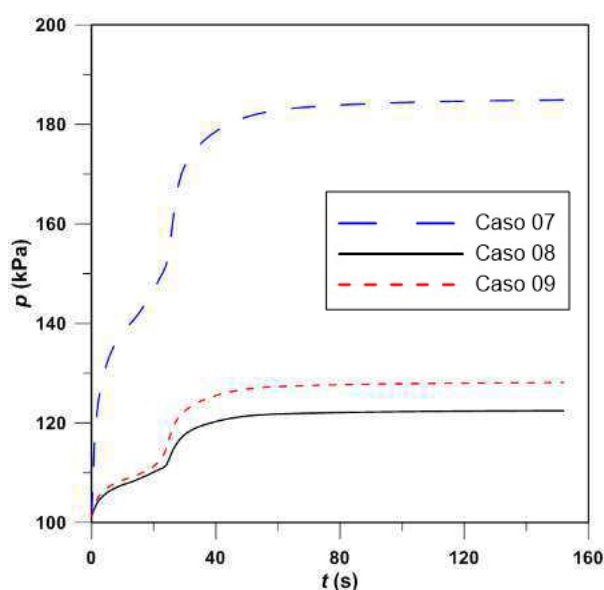
Figura 4.28 - Avanço da resina na região central do molde. (a) Caso 07, (b) Caso 08 e (c) Caso 09.



A partir da Fig. 4.28, instante $t=30$ s, percebe-se que o molde se encontra praticamente preenchido por resina em sua totalidade, como nos casos em que $U_{j,entrada} = 0,10$ m/s. Portanto, comparando os casos com relação a presença de vazios, é mais perceptível que, para situação com quatro pontos de injeção, os elementos na região central estão completamente preenchidos, existindo linhas de vazios presentes no encontro das frentes de resina. O mesmo ocorre na Fig. 4.28 (c), portanto, tais linhas de vazios são rapidamente dissipadas e, em $t=50$ s são praticamente imperceptíveis. Okabe et al. (2017) definem esse encontro de frentes de resina como weld line, e que tal encontro proporciona a presença de vazios. Isso pode ser verificado na Fig. 4.28, nos casos em que tal encontro ocorre. Para Okabe et al. (2017), as weld line estão mais presentes em um processo de injeção de resina com quatro pontos. Das opções apresentadas em seu trabalho, a posição de injeção que apresentou a menor fração de weld line, resina perdida e vazios foi utilizando quatro pontos de injeção ao longo da diagonal do molde. No caso em que se estudou, optou-se por utilizar três pontos, o central e dois nas extremidades.

Com relação ao comportamento da pressão ao longo do tempo para os casos de mudança na posição de injeção, a Figura 4.29 apresenta um comparativo desse comportamento.

Figura 4.29 - Comportamento transiente da pressão na região de entrada ao longo tempo de processo, para diferentes posições de injeção.



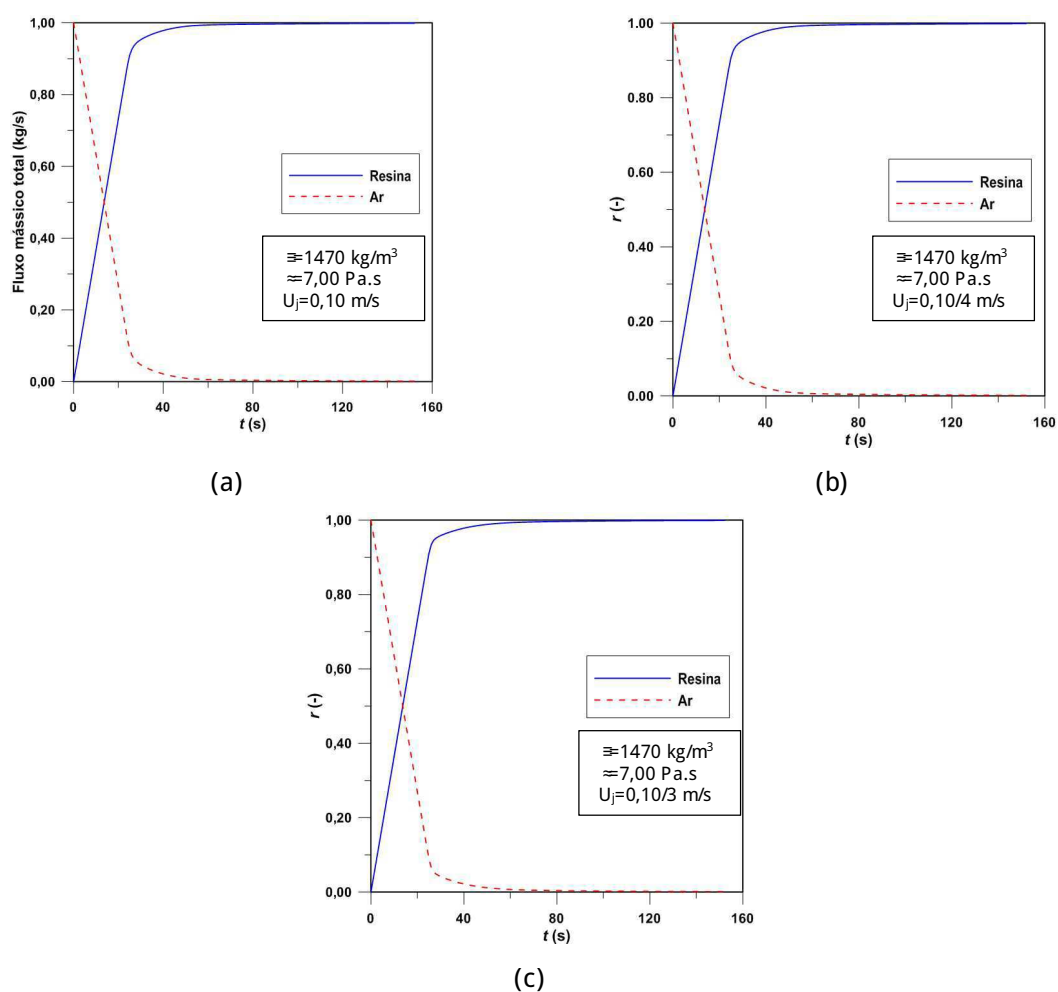
Percebe-se que as menores pressões são obtidas nos casos com múltiplos pontos de injeção, menores até mesmo que a pressão do Caso 02, onde a injeção

est^o localizada no centro do molde. Al^{em} disso, no Caso 07, ocorreu um aumento consider^ovel da press^o de inje^ço, de aproximadamente 120 kPa para 180 kPa.

A partir dos dados obtidos, embora a forma de inje^ço seja diferente para os tr^s casos, as curvas de fra^ço volum^{et}rica de resina e ar s^o praticamente as mesma. Ou seja, a velocidade de inje^ço U_j o f^otor que determina o tempo de preenchimento do molde, como pode ser observado na Fig. 4.30.

Figura 4.30 - Fra^ço volum^{et}rica das fases presentes no escoamento ao longo do tempo de processo

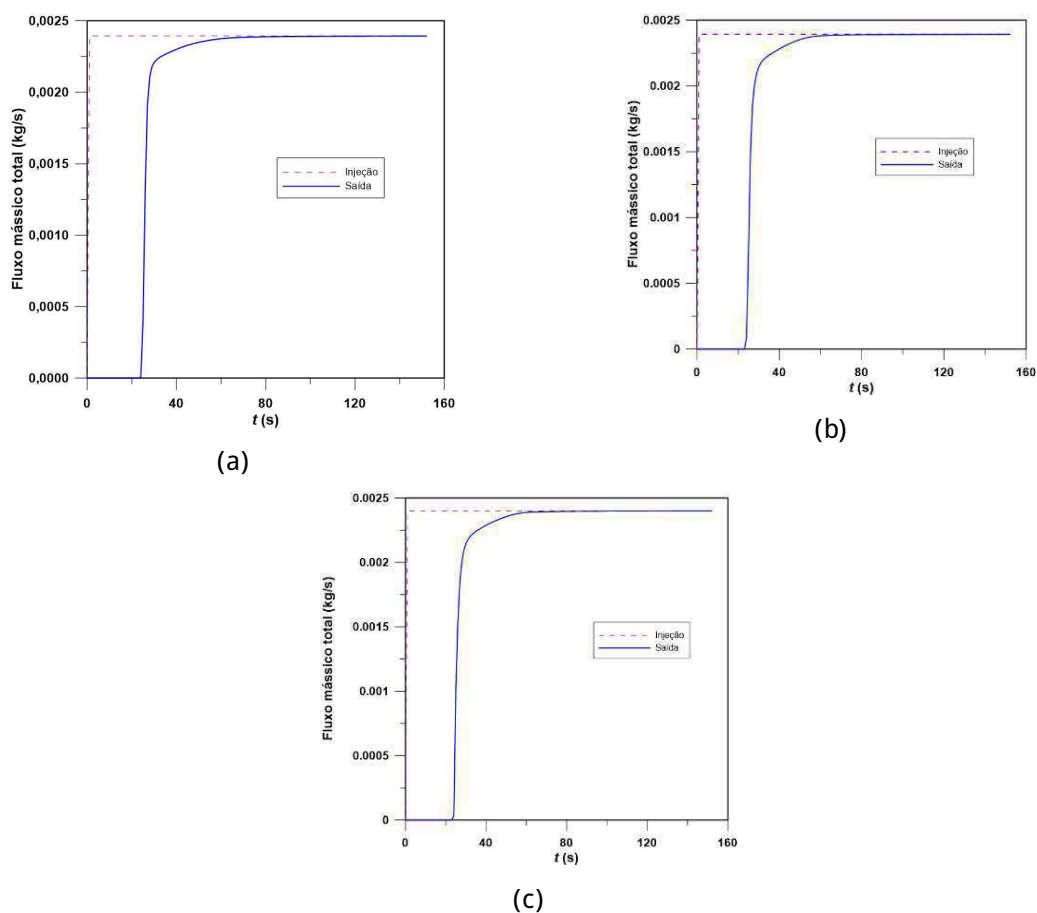
(a) Caso 07, (b) Caso 08 e (c) Caso 09.



Sabendo que a fra^ço volum^{et}rica de resina permanece a mesma para os tr^s casos, mostrando que a posi^ço de inje^ço praticamente n^o altera seu comportamento, que a presen^a de vazios deixados na regi^o superior do molde ou ao longo do avan^o da resina com weld lines, indica que tanto a fra^ço volum^{et}rica de resina, quanto a de ar n^o apresenta grande varia^ço ao se adicionar mais pontos de inje^ço ou sa^oda e at^o mesmo mudar a posi^ço do ponte de inje^ço de resina.

A Figura 4.31 apresenta o fluxo mássico de resina (entrada e saída) para os três casos analisados. A partir da análise dessa figura verifica-se que o comportamento da quantidade de resina perdida durante o processo é a mesma, não tendo nenhuma variação visível ao longo do tempo. Ou seja, o momento em que se inicia a perda de resina é o mesmo em todos os casos, aproximadamente $t = 20$ s. Também não se verifica nenhuma modificação quando o escoamento está próximo a entrar em regime permanente (quantidade de resina perdida é a mesma que a injetada).

Figura 4.31 - Fluxo mássico de resina em função do tempo de processo (a) Caso 07, (b) Caso 08 e (c) Caso 09.



As Figuras 4.32 - 4.34 apresentam o avanço da resina no plano central do molde sobre as fitas de NiTi. Nestes três casos especificamente, a frente de resina sobre as fitas apresenta variação, tendo em vista que a forma de injeção é diferenciada.

Figura 4.32 Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em diferentes tempos de processo. (a) $t=5s$, (b) $t=6s$, (c) $t=7s$, (d) $t=8s$ (Caso 07).

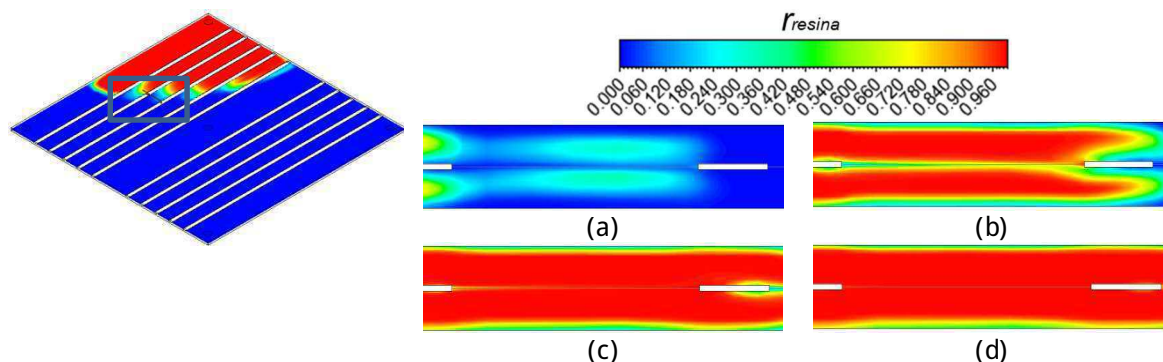


Figura 4.33 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em diferentes tempos de processo. (a) $t=5s$, (b) $t=16s$, (c) $t=20s$, (d) $t=25s$ (Caso 08).

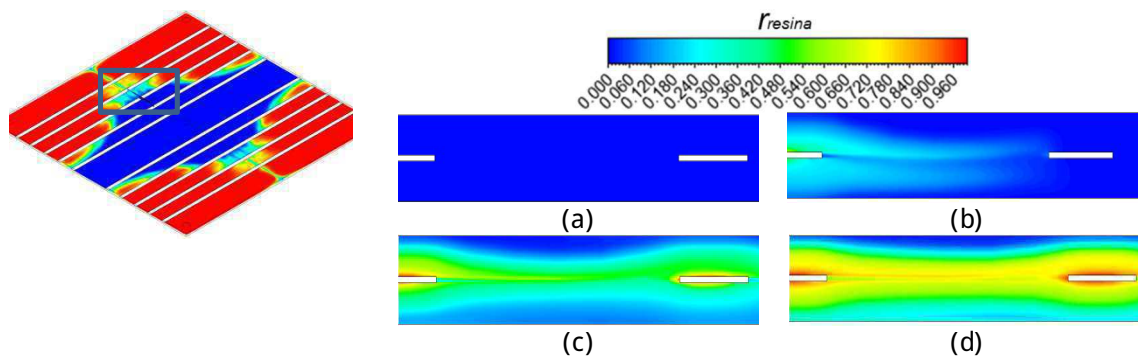
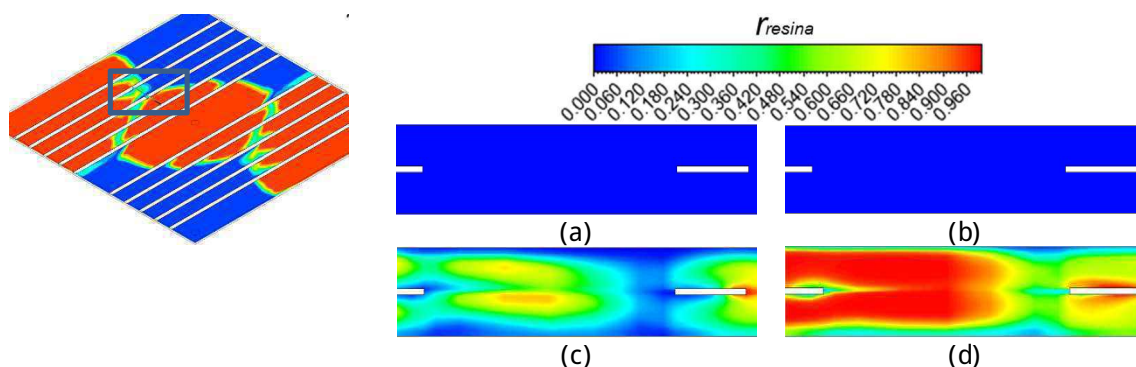


Figura 4.34 - Avanço da resina sobre as fitas de NiTi em diferentes tempos de processo (a) $t=2s$, (b) $t=3s$, (c) $t=5s$, (d) $t=6s$ (Caso 06).



Verifica-se que para a localização do plano em que se está analisando o escoamento de resina em instantes de tempo específicos (Fig. 4.36), não se tem a uniformidade da frente de resina quando comparado com os casos de injeção central (01 - 03) e propriedades (04 - 06). Vale salientar, que para os casos em que a injeção

de resina realizada por diversos pontos (Caso 08 e 09), a resina demora a alcançar a região de análise do escoamento da Fig. 4.36. Quando comparado ao caso com apenas uma entrada (Caso 06), as fitas de NiTi são alcançadas mais rapidamente pela resina. Além disso, tem-se o surgimento de pontos em que a resina alcança simultaneamente a região de análise, esse fato pode ser visto mais nitidamente na Fig.4.33 e 34 (c).

As Figuras 4.35 a 4.37 apresentam o campo de velocidade de pressão dos três casos analisados.

Figura 4.35 - Distribuição de (a) pressão e (b) velocidade da resina no plano $y=1\text{mm}$ em $t=152\text{s}$ (Caso 07).

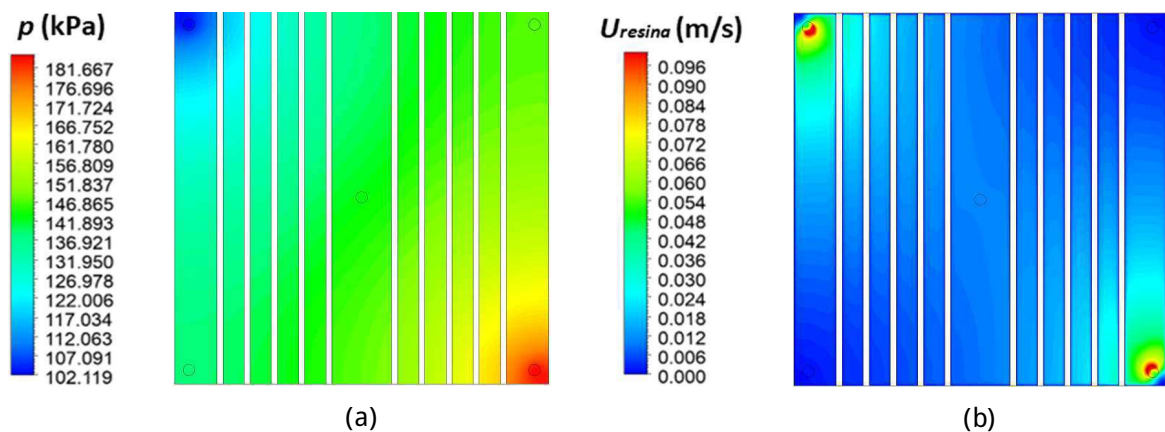


Figura 4.36 - Distribuição de (a) pressão e (b) velocidade da resina no plano $y=1\text{mm}$ em $t=152\text{s}$ (Caso 08)

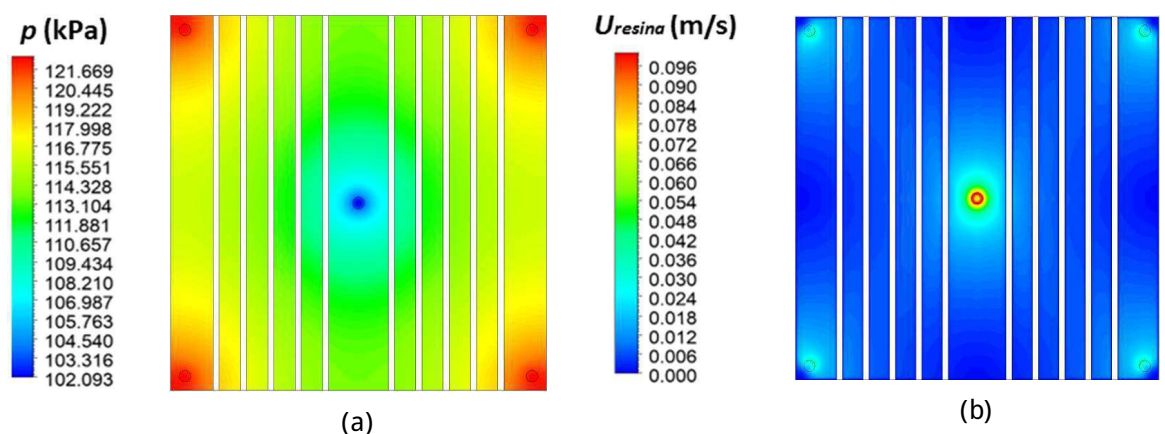
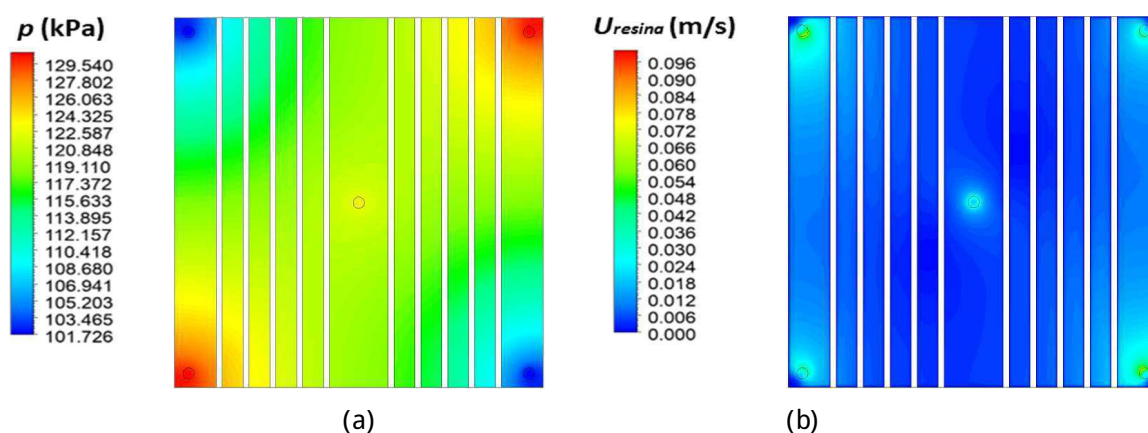


Figura 4.37 - Distribuição de (a) pressão e (b) velocidade da resina no plano $y=1\text{mm}$ em $t=152\text{s}$ (Caso 06)



Pelo campo de pressão, percebe-se o sentido do fluxo de resina no processo de preenchimento. As zonas de alta e baixa pressão no interior do molde mostram os pontos de injeção e de saída de resina. Analisando as Figs. 4.36 e 4.37, tem-se que o campo de pressão permanece praticamente inalterado, apresentando uma variação de 7,871 kPa entre as pressões máximas e 0,367 kPa entre as pressões mínimas.

As maiores diferenças estão entre a distribuição de pressão no plano central, uma vez que na Fig.4.36 (a) tem-se os pontos de maior pressão nas extremidades do molde, reduzindo gradualmente até a região central, onde se tem a saída de ar do molde. Na Fig. 4.37 (a) tem-se as maiores zonas de pressão nas duas extremidades, da ordem de 129 kPa e na região central, de 124 kPa. Sendo assim, a partir de um determinado instante de tempo, as injeções realizadas nas extremidades do molde necessitam de mais energia para deslocar o fluido até as regiões de saída.

A Figura 4.35 j) apresenta tanto a distribuição de pressão como a sua intensidade diferentes das apresentadas. O campo de pressão está relacionado com a posição de injeção da resina no molde, logo, a zona de maior pressão está localizada em uma das extremidades, enquanto a zona de menor pressão está localizada na extremidade oposta, formando assim o gradiente de pressão.

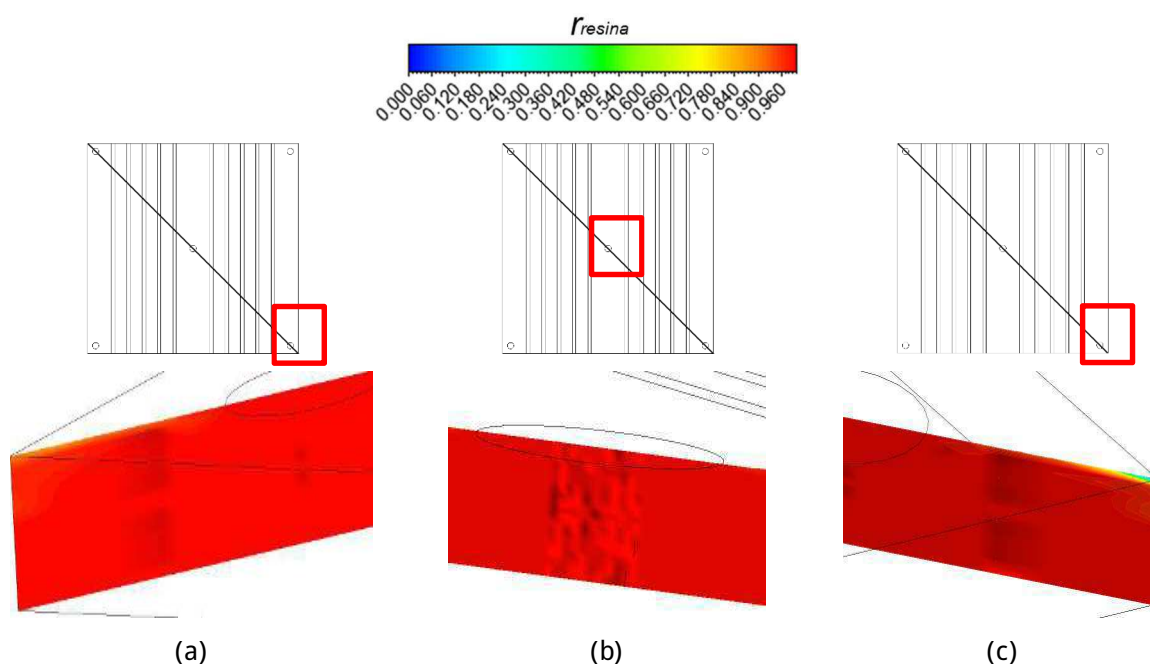
Com relação à intensidade da pressão, tem-se que diferente dos demais casos em que o fluxo de resina necessita vencer apenas a resistência de 5 fitas, para chegar

ao seu ponto de saída, nesse caso, tem-se a resistência de todas as fitas presentes no molde. Além disso, quando a resina alcança a parede do molde (Fig.4.28 a, $t=20s$), é necessário uma energia maior para deslocar a massa de resina até a saída do molde, localizada na extremidade oposta.

Com relação ao campo de velocidade obtido, um detalhe deve ser levantado: Na Fig.4.35 (b) tem-se a diminuição da velocidade a medida que a resina alcança a região central do molde. Posteriormente, tem-se um aumento da velocidade até que se atinge a velocidade máxima na extremidade oposta a injeção, no caso, a saída do molde. Este comportamento pode ser reflexo da compressão da resina nessa região do molde, resultando no aumento da velocidade de injeção.

Com relação aos vazios nas regiões próximas às saídas, a Figura 4.38 apresenta as zonas de saídas para os três casos (07, 08 e 09) e a fração volumétrica de resina para os três casos em questão.

Figura 4.38 - Zonas de vazios nas regiões próximas a saída (a) Caso 07, (b) Caso 08 e (c) Caso 09.



Na Fig.4.38 (a), não se visualiza elementos com fração volumétrica de resina menor que 90%. Ou seja, o modo com que a resina foi injetada contribuiu para mitigar o aprisionamento de ar nas extremidades do molde. O mesmo se repete para o caso em que se teve injeção de resina em quatro pontos. Porém, a Fig.4.38 (c) apresenta

elementos que não se encontram totalmente preenchidos por resina, tendo até elementos com 100% de ar.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a) O modelo matemático proposto neste trabalho (modelagem multifísica acoplado ao modelo interfacial de mistura) apresentou precisão em seus resultados, sendo possível identificar a interface resina/ar durante o processo de preenchimento do molde;
- b) A malha numérica gerada para simulação do caso mostrou-se diretamente influenciada pela relação entre a espessura do molde e a espessura da fita, onde o critério de qualidade pré-estabelecido pelo software, razão de aspecto, mostrou-se um fator determinante para a convergência da simulação;
- c) A aproximação feita, comparando o escoamento no interior de um molde ao escoamento entre placas paralelas, mostrou-se eficiente, dando credibilidade aos resultados obtidos. Além disto, tornou-se uma vertente para se estudar escoamentos no interior de moldes rígidos;
- d) A vazão volumétrica da resina mostrou-se um parâmetro que influencia fortemente na qualidade final do produto manufaturado, apresentando uma melhora no acabamento da peça produzida pelo processo RTM;
- e) As propriedades do fluido (densidade e viscosidade) não influenciaram na variação da frente de resina, porém, mostram-se importantes no dimensionamento do sistema de injeção a ser utilizado;
- f) A variação da posição do local injeção de resina no molde mostra-se uma variável importante a ser considerada quando se trata de pressão de injeção e acabamento superficial.
- g) A posição do local de injeção mostrou-se eficiente na mitigação de vazios presentes na superfície do molde e nas regiões de saída, porém, quando se utiliza a injeção em um único ponto na extremidade do molde e um ponto de saída, a pressão de injeção é mais elevada que utilizando um ponto de injeção na região central, significando um maior custo no processo.

5.2 Sugestões para futuros trabalhos

Analisar experimentalmente o processo de injeção de resina em um molde fechado reforçado por fitas NiTi com o objetivo de analisar o processo do ponto de vista experimental.

Verificar experimentalmente o fluxo de resina no interior de moldes com injeção radial, buscando analisar o perfil de velocidade do escoamento e utilizar a metodologia de validação deste trabalho.

Simular numericamente o processo RTM para manufatura de um componente polimérico reforçado por fitas de NiTi em um processo transiente e não-isotérmico, acoplado ao processo de mudança de fase (processo de cura da resina).

Simular numericamente o fluxo de resina no interior de um molde reforçado por fibras e fitas NiTi, com o objetivo de verificar se as fitas comportam-se com inserts.

REFERNCIAS

ARAÚJO, B.J., TEIXEIRA, J.C.F., CUNHA, A.M., GROTH, C.P.T. Parallel three-dimensional simulation of the injection molding process. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 59, p.801-815, 2009.

ADZUGEL, O. SMA materials and the influence of atom sizes on martensite microstructures in copper-based shape memory alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 185, nº1-3, p. 120-124, 2007.

BODAGHI, M., SHAKERI, M., AGHDAM, M.M. Thermo-mechanical behavior of shape adaptive composite plates with surface-bonded shape memory alloy ribbons. *Composite Structures*, vol.119, p.115-133, 2015.

BUEHLER, W.J., WANG, F.E. A summary of recent research on the Nitinol alloys and their potential application in ocean engineering. *Ocean Engineering*, vol.01, p.105-120, 1968.

CALLISTER Jr, W.D. Ciência e Engenharia dos materiais: Uma introdução. 5ª edição, Editora LTC, 2006.

CASTILHO, W.S. 2008. Caracterização termomecânica de compósitos híbridos com memória de forma. 100p. Dissertação de mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

CERQUEIRA, J.C.M. 2008. Monitorização do fluxo no processo de moldagem por transferência de resina (RTM). 2008. 53f. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008.

CHEN, S., CHEN, Y., ZHANG, Z., LIU, Y., LENG, J. Experiment and analysis of morphing skin embedded with shape memory polymer composite tube. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 25, nº16, p. 2052-2059, 2014.

DAGHASH, S.M., OZBULUT, O.E. Characterization of superelastic shape memory alloy fiber-reinforced polymer composites under tensile cyclic-loading. *Materials and Design*. vol.111, p.504-512, 2016.

DROSSEL, W.G., KUNZE, H., BUCHT, A., WEISHEIT, L., PAGEL, K. SmartE- smart materials for LMFrt applications. *Procedia CIRP*, vol. 36, p. 211-216, 2015.

ECKELMEYER, K.H. The effect of alloying on the shape memory phenomenon in Nitinol. *Scripta Metallurgica*. vol.10, p.667-672, 1976.

EL FENINAT, F., LAROCHE, G., FISET, M., MONTOVANI, D. Shape memory materials for biomedical applications. *Advanced Engineering Materials*. vol.04, nº3, p.91-104, 2002.

ENWALD, H., PEIRANO, E., ALMSTEDT, A.E. Eulerian two-phase flow theory applied to fluidization. *International Journal of Multiphase Flow*. vol.22, p.21-66, 1996.

FALUHELYI, P. 2013. Fabricação e comportamento termomecânico de compósitos estruturais adaptativos com filamentos de liga NiTi. 219p. Tese de doutorado em Ciência Mecânicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

FENG, N., LIU, L., LIU, Y., LENG, J. Characteristics of multi-functional composites using elastomer embed with shape memory alloy wires. *Materials and Design*. vol.88, p.75-81, 2015.

FONTOURA, C.M. 2009. Desenvolvimento de molde de material compósito polimérico utilizando a moldagem por transferência de resina 2009.83f. Dissertação de Mestrado em Engenharia - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

FOX, R.W., MCDONALD, A.T., PRITCHARD, P.J. 2006. Introdução a Mecânica dos Fluidos. 6ed, LTC. Rio de Janeiro, 2006.

GANCHAROVA, G., COSSON, B., LAGARDIERE, M.D. Analytical modeling of composite manufacturing by vacuum assisted infusion with minimal experimental characterization of random fabrics. *Journal of Materials Processing Technology*. vol.219. p. 173-180, 2015.

GANGLOFF Jr, J.J., DANIEL, C., ADVANI, S.G. A model of two-phase resin and void flow during composites processing. *International Journal of Multiphase Flow*. vol.65, p. 51-60, 2014.

GARAY, A.C. 2010. Efeito da adição de carbonato de cálcio em compostos poliméricos moldados por RTM e RTM Light. Dissertação de Mestrado. 92p. Porto Alegre, 2010.

GOMES, P.P. 2010. Caracterização e simulação do fluxo de resina do processo de VARTM na obtenção de compostos carbon/epóxi. Dissertação de Mestrado. 120p. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2010.

GRENINGER, A.B., MOORADIAN, V.G. Strain transformation in metastable beta copper-zinc and beta copper-tin alloy. *Transactions of Metallurgical Society of AIM.*, vol. 128, p.337-338, 1938.

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

HOSSEINI, A.H. 2013. Numerical Simulation of Curing Process of Fiber Reinforced Polymer Composites. Master's thesis, 91p. University of Alberta, Karlskrona, 2013.

ITIN, V.I., GYUNTER, V.E., SHABALOVSKAYA, S.A., SACHDEVA, R.L.C. Mechanical properties and shape memory of porous Nitinol. *Materials characterization*. vol.32, p.179-187, 1994.

JANI, J.M., LEARY, M., SUBIC, A., GIBSON, M.A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design*.vol. 56, p.1078-1113, 2014.

KAUSHAL, A., VARDHAN, A., RAWAT, RSS. Intelligent material for modern age: a review. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. vol.13, nº 3, p.10-15, 2016.

KOUTSONAS, S. 2015. Race-track modelling and variability in RTM for advanced composites structures. PhD Thesis, 382p, University of Nottingham. 2015.

LEI, H., WANG, Z., ZHOU, B., TONG, L., WANG, X. Simulation and analysis of shape memory alloy fiber reinforced composite based on cohesive zone model. *Materials and Design*. vol.40, p.138-147, 2012.

LEE, D.H., LEE, W.I., KANG, M.K. Analysis and minimization of void formation during resin transfer molding process. *Composites Science and Technology*. vol.66, p.3281-3289, 2006.

LI, J., ZHANG, C., LIANG, R., WANG, B. Statistical characterization and robust design of RTM processes. *Composites: Part A*. vol.36, p.564-580, 2005.

LÓPEZ-WALLE, B., LÓPEZ-CUELLAR, E., REYES-MELO, E., LOMAS-GONZÁLEZ, O., CASTRO, W.B. A Smart polymer composite based on a NiTi ribbon and a magnetic hybrid material for actuators with multiphysic transduction, *Actuators*, vol.4, p. 301-313, 2015.

LUZ, F.F. 2011. Análise comparativa do escoamento de fluido em experimentos RTM utilizando aplicativos comerciais. Dissertação de mestrado, p.100f, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MASANIA, K., BACHMAN, B., DRANSFELD, C. The compression resin transfer moulding process for efficient composite manufacture. In:International Conference on

Composite Materials, 19, 2013, Montreal. Anais do 19th International Conference on Composite Materials, 2013.

MELTON, K.N., MERCIER, O. The mechanical proprieties of NiTi-based shape memory alloys. Acta Metallurgica. vol.29, p.393-398, 1980.

MEO, M., MARULO, F., GUIDA, M., RUSSO, S. Shape memory composites for improved impact properties for aeronautical applications. Composite Structures. vol.95, p.756-766, 2013.

MICHAUD, V. A review of non-saturated resin flow in liquid composite moulding processes. Transport in Porous Media. vol. 115, n. 1, p.1-21, 2016.

MOTA, C.A.A, LEAL, A.S.C., ARAÚJO, C.J., LIMA, A.G.B., SILVA, S.K.B.M. Thermal behaviour of polymer composite reinforced with NiTi shape memory alloys. Diffusion Foundations. vol.10, p.39-54, 2017.

OKABE, T., OYA, Y., YAMAMATO, G., SATO, J., MATSUMIYA, T., MATSUZAKI, R., YASHIRO, S., OBAYASHI, S. Multi-objective optimization for resin transfer molding process. Composite: Part A. vol.92, p.1-9, 2017.

^a LANDER, A. An Electromechanical Investigation of solid cadmium-gold alloys. Journal of American Chemical Society. vol.54, nº10, p.3819-3833, 1932.

OLIVEIRA, P.O., SOUZA, J.A., AMICO, S.C., ISOLDI, L.A., SILVA, R.D.S. Comparação dos métodos VOF e FE/CV aplicados à solução de problemas de RTM. Vetor. Vol.21, nº2, p.22-33, 2012.

OLIVEIRA, I.R., AMICO, S.C., J. A.S., LUZ, F.F., BARCELLA, R., LIMA, A.G.B. Resin transfer molding process: a numerical investigation. Defect and Diffusion Forum. vol.334-335, p.193-198, 2013.

OLIVEIRA, I.R. 2014. Infiltração de fluidos carregados em meios porosos via processo RTM: análise teórica e experimental. 2014. 169f. Tese de doutorado em

Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

OLIVEIRA, C.P., SOUZA, J.A., ISOLDI, L.A., ROCHA, L. A.O. Computational modelling of the resin transfer molding process. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL, 20, 2009. Gramado. Anais: 20th International Congress of Mechanical, 2009.

OTSUKA, K., REN, X. Recent developments in the research of shape memory alloys. *Intermetallics*. vol.7, p.511-528, 1999.

PAYANDEH, Y., MERAGHNI, F., PATOOR, E., EBERHARDT, A. Study of the martensitic transformation in NiTi-epoxy smart composite and its effect on the overall behavior. *Materials Design*. vol.39, p.104-110, 2012.

PATEL, G.N. 2010. CFD simulation of two-phase and three-phase flows in internal-loop airlift reactors. Master Thesis. 73f. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 2010.

PORTO, J.S.P., LETZOW, M., dos SANTOS, E.D., SOUZA, J.A., ISOLDI, L.A. Application of the computational modeling in the resin transfer molding (RTM) process: A case study of marine propeller. In: CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING, 14, 2012, Rio de Janeiro. Anais: 14th Congress of Thermal Science and Engineering, 2012.

PULLA, S.S., KARACA, H.E., LU, Y.C. Numerical design of shape memory polymer composites with temperature-responsive SMA fillers. *Composites: Part B*, vol.96, p.287-294, 2016.

RAMOS, C.A.X. *Materiais compostos inteligentes*. 2006. 304f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia). Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2006.

REZENDE, R.C.P. 2008. Modelagem matemática e desenvolvimento de metodologia computacional para a simulação numérica do escoamento

bifásico de ar e ferro-gusa em canal de corrida de alto-forno. 192f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

ROSA, E.S. Escoamento multifásico isotérmico: modelos de multfluidos e de mistura. Editora Bookman, Porto Alegre, 2012.

RUIZ, E., ACHIM, A., SOUKANE, S., TROCHU, F., BRÉARD, J. Optimization of injection flow rate to minimize micro/macro-voids formation in the resin molded composites. *Composites Science and Technology*. vol.66, p.475-486, 2006.

SANUSI, K.O., AYODELE, O.L., KHAN, M.T.E. A concise review of the application of NiTi shape-memory alloys in composite materials. *South African Journal of Science*. vol.110, p.1-5, nº 7/8, 2014.

SCHIMIDT, T.M., GOSS, T.M., AMICO, S.C. Permeability of hybrid reinforcement and mechanical properties of their composites molded by resin transfer molding. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. vol.28, p.2839-2850, 2009.

SOUZA, J.F., ROCHA, L.A.O., AMICO, S.C., VARGAS, J.V.C. A numerical investigation of the resin flow front tracking applied to the RTM Process. *Materials Research*. vol.14, nº3, p.345-354, 2011.

SOZER, E.M., BICKERTON, S., ADVANI, S.G. Modeling and control of liquid composite mold filling process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. vol. 30, p. 109-124, 1999.

VERSTEEG, H.K., MALALASEKERA, W. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. Editora Longman Group Ltd, 1995.

VILLAR, Z.T., DE ARAÚJO, C.J., SANTOS, A.G. Estudo de propriedades dinâmico-mecânicas de um componente aeronáutico de CFRP com fios de ligas com memória de forma. *Revista Polímeros*. vol.26, nº Especial, p.16-24, 2016.

WEGH, N., BACHSCHUSTER, S., GAUDLITZ, D., KLEIN, M. Three-dimensional simulation of impregnation stage of the RTM process considering the local structure of fiber layup. WIT Transaction on Engineering Sciences. vol.89, p.487-499, 2015.

WACHEM, B.G.M., ALMSTEDT, A.E. Methods for multiphase computational fluid dynamics. Chemical Engineering Journal. Vol.96. p.81-98. 2003.

YANG, B., JIN, T., LI, J., BI, F. Three-dimensional numerical simulation of molding filling process in compression resin transfer molding. Applied Composite Materials. vol.22, p.209-230, 2015.