



ESTUDO NUMÉRICO TERMO FLUIDODINÂMICO DA MOLDAGEM DE COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM LIGA NiTi VIA TECNICA RTM

Túlio Rafael Nascimento Porto¹, Tony Herbert Freire de Andrade²

RESUMO

O desenvolvimento de materiais com propriedades específicas, e não usuais, é uma pertinente necessidade no âmbito da engenharia. Os compósitos híbridos com memória de forma são materiais intensamente utilizados nos sistemas mecânicos, exercendo funções essenciais, como o controle de forma de estruturas e de vibrações. Dentre os processos de fabricação destes compósitos, a moldagem por transferência de resina (*resin transfer molding*-RTM) apresenta vantagens significativas, como produzir peças acabadas em ambos os lados, com formas complicadas, em elevada produtividade, baixo custo e pouco desperdício. Este, consiste na injeção de uma resina, termicamente ativa, em um molde fechado, no qual fibras de reforço estão pré-alocadas. Durante o enchimento do molde, o ar que antes ocupava todo o volume, é expelido por saídas, estrategicamente projetadas, para evitar a formação de vazios e promover o máximo de qualidade ao produto acabado. Para tanto, faz-se necessário, o adequado controle de propriedades do processo, como o padrão de escoamento e a distribuição de pressão ao longo do molde, no decorrer do tempo. Neste sentido, este trabalho apresenta um estudo numérico dos aspectos fluidodinâmicos do processo de moldagem por transferência de resina, de um compósito com matriz polimérica epoxídica e reforço de fios de liga NiTi. As simulações numéricas realizadas, através do *software* Ansys FLUENT[®], possibilitam a descrição das frentes de escoamento multifásico, a partir dos resultados relativos às frações volumétricas de resina e ar, pressão média na entrada do molde e linhas de corrente, medidas ao longo do processo. Observou-se a presença de frações de vazios nas arestas laterais do molde, caracterizadas pela pressão na entrada e linhas de fluxo, que entram em regime permanente em um dado momento do processo, limitando a retirada do ar à frações insignificantes, mesmo com períodos de enchimento relativamente longos.

Palavras-chave: escoamento, resina, fluent[®].

¹Aluno do curso de Engenharia Mecânica, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: trnporto@gmail.com.

²Dr. em Engenharia de Processos-UFCG. Professor, Unidade Acadêmica de engenharia de Petróleo, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: tonyherbert2000@gmail.com.

A NUMERICAL THERMO FLUID DYNAMIC STUDY OF POLYMERIC COMPOSITE MOLDING REINFORCED BY NiTi ALLOYS VIA RTM TECHNIQUE

ABSTRACT

The development of materials with specific and non usual properties, is a pertinent need of the engineering environment. The hybrid composites with shape memory are materials which are intensely used in the mechanical systems, exerting essential functions, such as the shape control of structures and vibrations. Among the fabrication processes of these composites, the Resin Transfer Molding – RTM – presents significant advantages, like producing finished pieces in both sides, with complicated shape, in increased productivity, low cost and waste. This consists in the injection of a resin, thermally activated, in a closed mold, in which reinforcing fibers are pre-allocated. During the mold filling, the air that occupied all the volume, is expelled by through the outlets, which are strategically projected, to avoid the formation of voids and promote the maximum of quality to the finished product. For such, the adequate control of the process' properties is necessary, such as the flow pattern and the pressure distribution along the mold, through time. In this sense, this work presents a numerical study of the fluid dynamic aspects of the resin transfer molding process, of a composite with a polymeric epoxy matrix and reinforced by NiTi threads. The numerical simulations, performed through the software Ansys FLUENT[®], enable the description of the multiphase front flows, from the results relative to the volumetric fractions of resin and air, average pressure in the mold inlet and streamlines, measured along the process. It was observed that the presence of void fractions in the lateral edges of the mold, characterized by the inlet pressure and streamlines, which enter steady state in a certain moment of the process, limiting the withdrawal of air to insignificant fractions, even at relatively long filling periods.

Keywords: flow, resin, fluent[®].

¹Aluno do curso de Engenharia Mecânica, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: trnporto@gmail.com.

²Dr. em Engenharia de Processos-UFCG. Professor, Unidade Acadêmica de engenharia de Petróleo, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: tonyherbert2000@gmail.com.

INTRODUÇÃO

Os processos que tem por finalidade, combinar dois ou mais materiais para se obter um compósito que apresenta propriedades não encontradas nas fases constituintes, agindo separadamente, são intensamente aplicados na produção industrial. Estes materiais devem ser combinados em proporções significativas das fases constituintes, para que, quando o material for solicitado, o princípio de ação combinada seja observado (CALLISTER e RETHWISCH, 2012).

Os compósitos, em grande parte, são constituídos pela fase matriz e a fase dispersa ou reforço. A matriz, é contínua e tem as funções de unir a fase dispersa, transferir-lhe os esforços, quando a peça é posta em operação, definir o formato da peça e determinar os parâmetros de processamento, como o tempo máximo de injeção e as temperaturas de cura e injeção, sendo estas, dependentes das propriedades térmicas e mecânicas da mesma (VASILIE e MOROZOV, 2001).

O tipo de reforço, classifica o material compósito em reforçados com fibras (contínuas ou descontínuas, alinhadas ou orientadas aleatoriamente), com partículas (grandes ou por dispersão) e com estruturas (laminados ou painéis sanduiches). Os reforçados com fibras são os mais importantes, sendo estes capazes de combinar propriedades de alta rigidez e resistência mecânica, através das características das fibras e da adesão existente entre estas e a matriz (CALLISTER e RETHWISCH, 2012).

Matrizes poliméricas são as mais utilizadas na constituição de matérias compósitos (VASILIE e MOROZOV, 2001). A resina epóxi é um polímero termorrígido, o que significa dizer que, após a cura, este material apresenta uma estrutura molecular que não permite a reversibilidade do processo, por meio do qual a mesma foi obtida. Estas possuem elevadas propriedades térmicas, elétricas e mecânicas em relação as demais matrizes poliméricas, trabalhando na faixa de -60 a 180°C (TSANZALIS et al, 2007).

As ligas de memória de forma (*Shape Memory Alloys – SMA*) são materiais metálicos que, quando sofrem deformação, aparentemente plástica, e são submetidos a um aumento de temperatura, apresentam a capacidade de recuperar sua forma original ou desenvolver forças de restituição consideráveis, quando sua movimentação é restringida (OTSUKA e WAYMAN, 1998).

Um grande avanço nas pesquisas em SMA foi alcançado por (BUEHLER et al, 1963), ao analisarem o efeito memória de forma, nas ligas Níquel-Titânio (NiTi), as quais, apresentam elevada resistência mecânica, boa resistência a corrosão e biocompatibilidade elevada. Promovendo a sua aplicação na forma de atuadores termomecânicos, em vários segmentos, como a indústria de petróleo e gás, aeroespacial, automotiva e biomédica.

Os compósitos híbridos com memória de forma (*Shape Memory Alloy Hybrid Composites-SMAHC*) são intensamente utilizados, no controle de forma de estruturas e no controle de vibrações. Ao serem aquecidas, ligas de memória de forma, pré-deformadas, tendem a recuperar sua forma original, deformando a estrutura da peça, a qual pertencem. O controle de vibrações, utiliza a capacidade da SMHC, de alterar a rigidez do compósito e promover uma elevação no grau de amortecimento de estruturas de sustentação, o que permite a atenuação das vibrações, através de uma faixa de frequência desejada (CASTILHO, 2008).

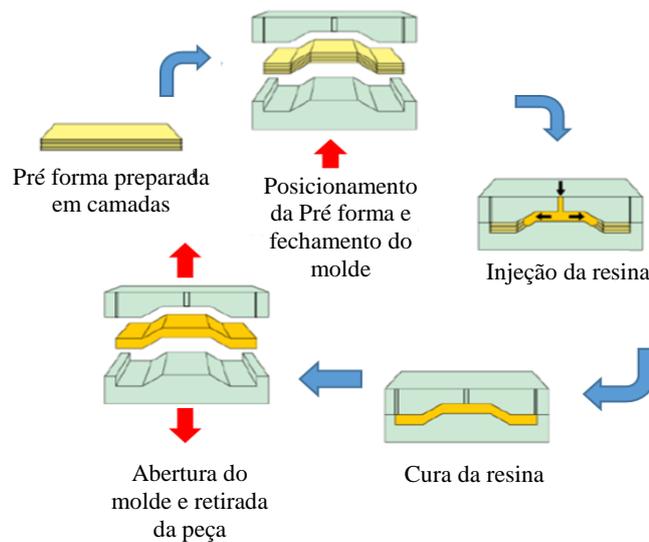
O processo de moldagem por transferência de resina (*Resin Molding Transfer -RTM*), consiste na injeção de uma resina, termicamente ativa, em um molde fechado, no qual fibras de reforço estão pré-alocadas, através de uma ou mais entradas. Durante o enchimento do molde, o ar é expelido por saídas, estrategicamente projetadas, para evitar a formação de vazios e promover o máximo de qualidade ao produto acabado. O processo químico de cura, pode ocorrer após o molde estar totalmente preenchido ou durante o enchimento do mesmo. Quando o nível de solidificação desejado é alcançado, a peça é retirada do molde e destinada ao acabamento, quando necessário (SHOJAEI et al, 2003). A figura 1 ilustra a sequência de etapas do processamento.

O RTM apresenta vantagens significativas, como produzir peças acabadas em ambos os lados e com formas complicadas, necessitar de pouca mão de obra em relação à outros processos, como a moldagem manual, possibilitar a fabricação no mesmo local onde a peça será utilizada, possuir elevada produtividade, baixo desperdício, emissão mínima de vapores de estireno e baixo custo (CERQUEIRA,2008).

O padrão de escoamento e a distribuição de pressão, são os fatores mais importantes no que diz respeito ao design mecânico dos moldes, configuração das saídas de ar e controle de qualidade das peças. Estes parâmetros são dependentes da geometria do molde, da disposição das fibras, da pressão de injeção e da

distribuição de injetores (SHOJAEI et al, 2003). Ao adentrar o molde, com pressão, temperatura e velocidades específicas, a resina líquida, com viscosidade e densidade adequadas, preenche a cavidade proposta, ao passo que também impregna as fibras dispostas no molde, escoando em regimes de escoamento interno, em relação as paredes, e externo, em relação aos fios de reforço. Um perfil de velocidades é desenvolvido ao longo da região limitada pelo molde e uma camada limite viscosa se estende, contornando da superfície das fibras pré-alocadas.

Figura 1- Etapas do Processo de Moldagem por Transferência de Resina



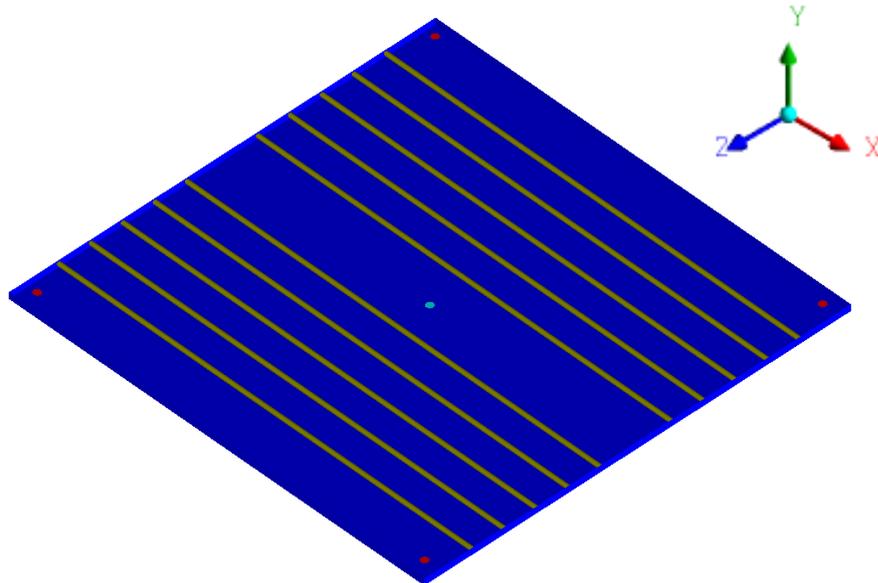
Fonte: Long (2008)

A utilização de simuladores numéricos computacionais, na busca de encontrar condições ótimas de operação dos processos industriais, é de extrema importância. A correta validação do modelo numérico, permite que o mesmo, norteie o desenvolvimento de novos produtos, metodologias e técnicas operacionais. Neste sentido, o presente trabalho tem por finalidade, o estudo numérico dos aspectos fluidodinâmico e térmico do processo de moldagem por transferência de resina, de um compósito com matriz polimérica epoxídica e reforço de fios de liga NiTi. As simulações numéricas realizadas, através do *software* Ansys FLUENT®, permitem a descrição das frentes de escoamento multifásico, da distribuição da fração volumétrica de resina, ao longo da espessura do molde, indicando regiões com falta de preenchimento, da pressão média, na entrada do molde, no decorrer do tempo, das linhas de fluxo e velocidades.

METODOLOGIA

O Problema Físico

Figura 2-Vista Isométrica do Molde com os Fios de Reforço Posicionados.



Como ilustrado na figura 2. A proposta física de estudo, consiste no enchimento, por injeção de resina, de um molde prismático fechado, de base quadrada, com 300 mm de lado e espessura de 5mm; quatro saídas de ar, com diâmetro de 5mm, dispostas simetricamente nos quatro cantos da superfície superior do molde, distando entre si 280mm; uma entrada centralizada na superfície inferior do molde com 5mm de diâmetro e 10 fios de liga NiTi com 3mm de diâmetro, centralizados na espessura do molde e dispostos entre as entradas e saídas.

Malha Numérica

Para solução das equações de conservação e conseqüente simulação do processo RTM, faz-se necessária a discretização do problema. A malha numérica aplicada nos fenômenos dos transportes, consiste basicamente na partição, tridimensional, de um domínio geométrico, em elementos denominados células, compostas por arestas e nós, onde as equações, derivadas parciais, que tratavam de limites infinitesimais, podem ser resolvidas em limites finitos, reduzindo-as à forma algébrica. Esta modelagem acarreta erros, que diminuem à medida que a malha é acrescida de elementos, e devem ser trabalhados de forma a atingirem valores aceitáveis aos projetos de engenharia.

Figura 3- Vista isométrica da malha utilizada para as saídas de ar

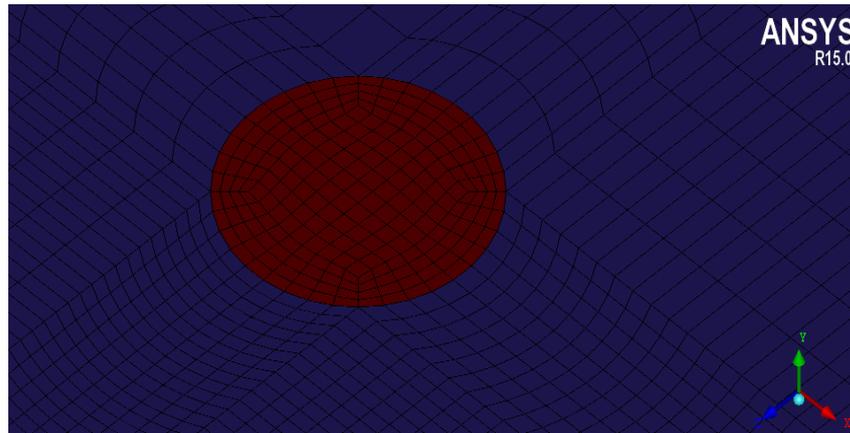


Figura 4- Vista superior da malha utilizada na entrada de resina

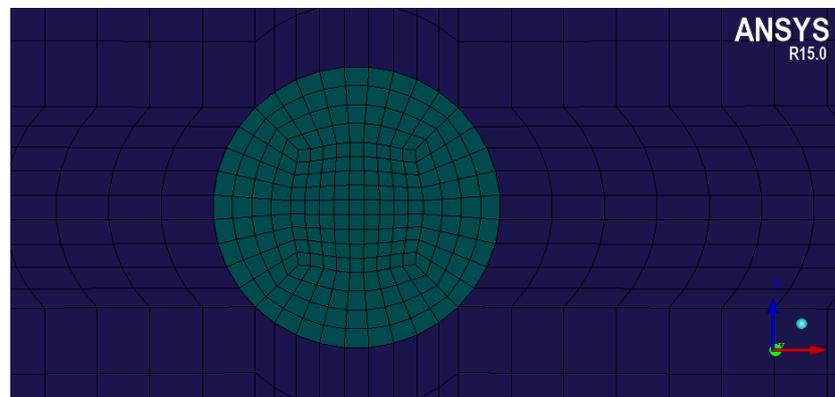
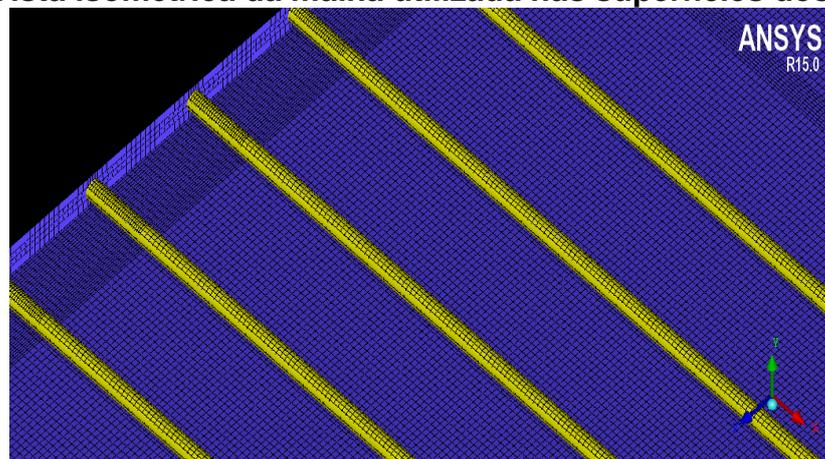


Figura 5- Vista isométrica da malha utilizada nas superfícies dos fios



O molde foi descrito em uma malha com 2282732 elementos, a qual se mostrou suficiente para descrever o processo, com considerável precisão e coerência física. Dando-se ênfase a regiões críticas, a saber, as superfícies dos fios de reforço, bem como, as saídas de ar e entrada de resina. Esse critério, permitiu que fosse definida uma condição adequada de operação, tendo em vista os limites computacionais encontrados em laboratório e a precisão dos resultados obtidos. As figuras 3, 4 e 5 mostram as regiões críticas e suas respectivas malhas.

MODELAGEM MATEMÁTICA

O Modelo de Escoamento Multifásico *Volume of Fluid -VOF*

O Modelo VOF utilizado pelo solver ANSYS FLUENT®, é capaz de modelar dois ou mais fluidos imiscíveis através da solução das equações de conservação do momento e de rastreo da fração volumétrica, de cada um dos fluidos, ao longo do domínio (ANSYS, 2015).

A formulação do modelo VOF, parte do fato de que dois ou mais fluidos não são interpenetráveis. Para cada fase adicionada ao modelo, uma variável é introduzida, a saber, a fração volumétrica desta fase, na célula computacional.

Em cada volume de controle, a soma das frações volumétricas das fases é igual a um. Os campos correspondentes as variáveis e propriedades dos fluidos, são compartilhados pelas fases e representam a média, ponderada pela fração volumétrica de cada fase, nas células que compõem o domínio físico. Desta forma, as variáveis e propriedades, em qualquer célula, tanto podem representar uma das fases, como uma mistura de fases, dependendo dos valores das frações volumétricas.

Se a fração volumétrica de um determinado fluido (q) em uma célula é denotada por α_q , segue-se três possibilidades:

$\alpha_q = 1$: A célula está totalmente preenchida pelo fluido q .

$\alpha_q = 0$: A célula não tem nenhuma região preenchida pelo fluido q .

$0 < \alpha_q < 1$: A célula possui uma interface entre o fluido q e um ou mais fluidos.

Baseado no valor local de α_q , as propriedades e as variáveis adequadas são assumidas para cada volume de controle do domínio.

Equação de Fração Volumétrica

O rastreo das interfaces entre as fases é realizado pela solução da equação da continuidade, para a fração volumétrica de uma ou mais fases, como descrito na equação 1 para a fase q e p :

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

onde, \dot{m}_{qp} é o fluxo mássico da fase q para a fase p e \dot{m}_{pq} é a transferência de massa da fase p para a fase q , t é a variável de tempo, ρ_q , a massa específica e v_q , a velocidade da fase q . No modo padrão, o termo fonte no lado direito da equação $S_{\alpha q}$ é zero, mas é possível especificar uma constante pré-definida para cada fase.

A equação de fração volumétrica não é resolvida para a fase primária. Esta, é computada baseada na condição descrita pela equação 2:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

Desta forma, conhecendo-se os valores das frações volumétricas da fases secundárias, é possível definir o valor da fase primária.

Propriedades dos Materiais.

As propriedades que aparecem nas equações de transporte são determinadas pela presença das fases componentes em cada volume de controle. Em um sistema bifásico, composto pelas fases 1 e 2, a massa específica do volume de controle é calculada pela equação 3.

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (3)$$

As demais propriedades são calculadas da mesma forma.

Modelo de lei de potência para viscosidade variável com a temperatura

A modelagem da viscosidade da resina, dependente da temperatura, aplicada nos processos simulados, não isotérmicos, foi baseada no modelo de lei de potência (*power law*), considerando a resina como um fluido Newtoniano. Neste modelo a viscosidade é calculada a partir da equação 4:

$$\mu = \mu_0 e^{\frac{E_\mu}{RT}} \quad (4)$$

onde μ_0 é a viscosidade característica do fluido, E_μ é a energia de ativação R é a constante universal dos gases e T a temperatura. Este modelo é similar aos apresentados na literatura por Shi e Dong (2010) e por SHOJAEI et al (2003) para descrição do processo RTM não isotérmico.

Equação da Energia

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (5)$$

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \quad (6)$$

A equação 5 descreve a equação da conservação de energia para a mistura. O modelo VOF trata, a energia E , e a temperatura, T , como uma variável média em relação a massa do volume de controle, o que é apresentado na equação 6. E_q é a energia da fase q , baseada no calor específico da fase, na temperatura compartilhada por todas as fases, no dado tempo de processo. A massa específica (ρ) e a

condutividade térmica efetiva (k_{eff}) também são compartilhadas pelas fases presentes. O termo fonte S_h , computa contribuições da radiação e outras fontes de energia volumétrica que podem ocorrer no sistema.

Estas equações são utilizadas pelo *solver* para descrever os aspectos fluidodinâmico e térmico do escoamento multifásico (resina-ar), durante o processo de moldagem por transferência de resina.

Condições de contorno e Propriedades dos Fluidos

Para solução dos casos apresentados na tabela 1, foram aplicadas as seguintes condições de contorno:

Velocidade de entrada da resina: $0,5m/s$ (normal a entrada)

Pressão de saída do ar: $101325 Pa$;

Fração volumétrica de resina na entrada: 1;

Fração volumétrica de resina nas saídas: 0;

Aceleração gravitacional Local: $9.81m/s^2$;

Condição de parede para os fios e todas as superfícies do molde;

As propriedades dos fluidos que compõe o escoamento multifásico são descritas na tabela 2:

Tabela 1- Casos Simulados

	Nº de Elementos	Tamanho do passo de Tempo (s)	Nº de Passos de Tempo	Critério de Convergência	Temperatura		
					Resina na Entrada	Superfície dos Fios	Molde
Caso 1	2282732	0,05	6000	10^{-4}	27°C	27°C	27°C
Caso 2	2282732	0,05	6000	10^{-4}	27°C	100°C	100°C

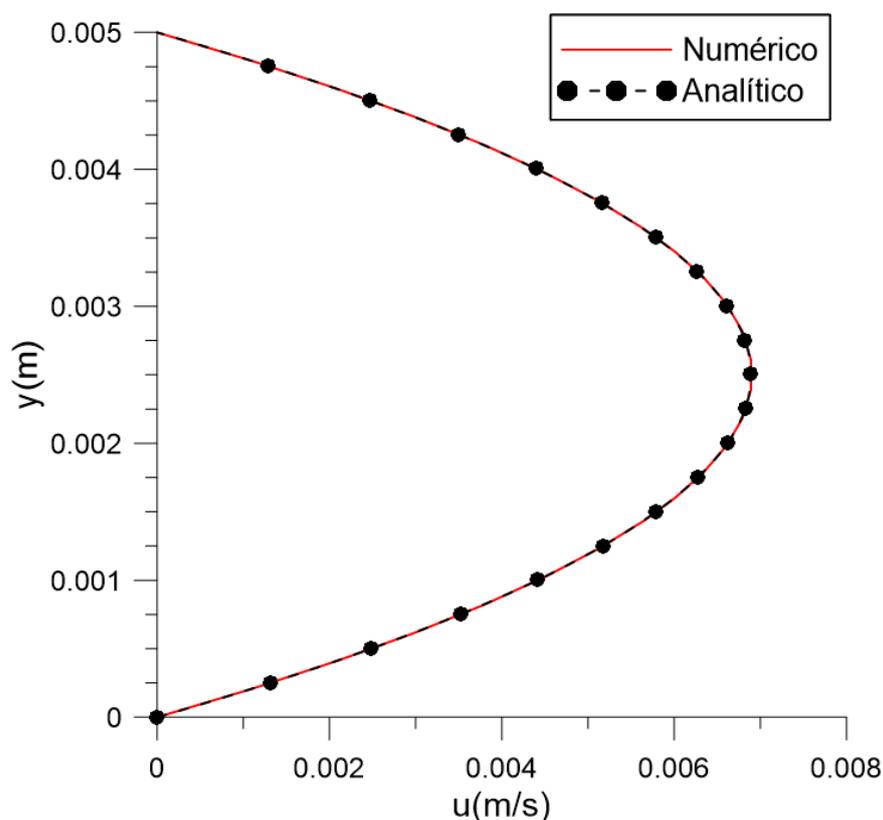
Tabela 2- Propriedades físicas dos na temperatura de 25°C e Pressão de 1 atm.

Propriedades	Ar	Resina
Viscosidade (Pa.s)	1,7984e-05	5.77
Densidade (Kg/m³)	1,225	1200
Energia de Ativação (J/mol)	-	18000
Calor específico (KJ/kgK)	1006,43	1680
Condutividade Térmica (W/mK)	0,0242	0,2
Entalpia Padrão (J/Kg)	0	53820
Viscosidade característica (Pa.s)	-	0.0043

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Validação da Simulação Numérica via Comparação com Modelo Analítico

Figura 6- Comparação entres os perfis de velocidade numérico e analítico.



Pode-se validar fisicamente um modelo numérico, comparando seus resultados com resultados experimentais ou com resultados obtidos de equações analíticas. Desta forma, aplicando a equação 7 (FOX et al, 2014), do perfil de velocidade entre placas planas paralelas obtém-se a curva analítica apresentada na figura 6, em comparação com os resultados obtidos numericamente, para velocidades ao longo da espessura do molde. Os maiores erros entre os dois resultados, encontram-se na ordem de $10e-7$, o que indica uma boa aproximação entre os mesmos. Desta forma, valida-se os resultados numéricos obtidos.

$$u_{analítico} = \frac{e^2}{2\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) \left[\left(\frac{y}{e} \right)^2 - \frac{y}{e} \right] \quad (7)$$

sendo

$$u_{max} = -\frac{e^2}{8\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (8)$$

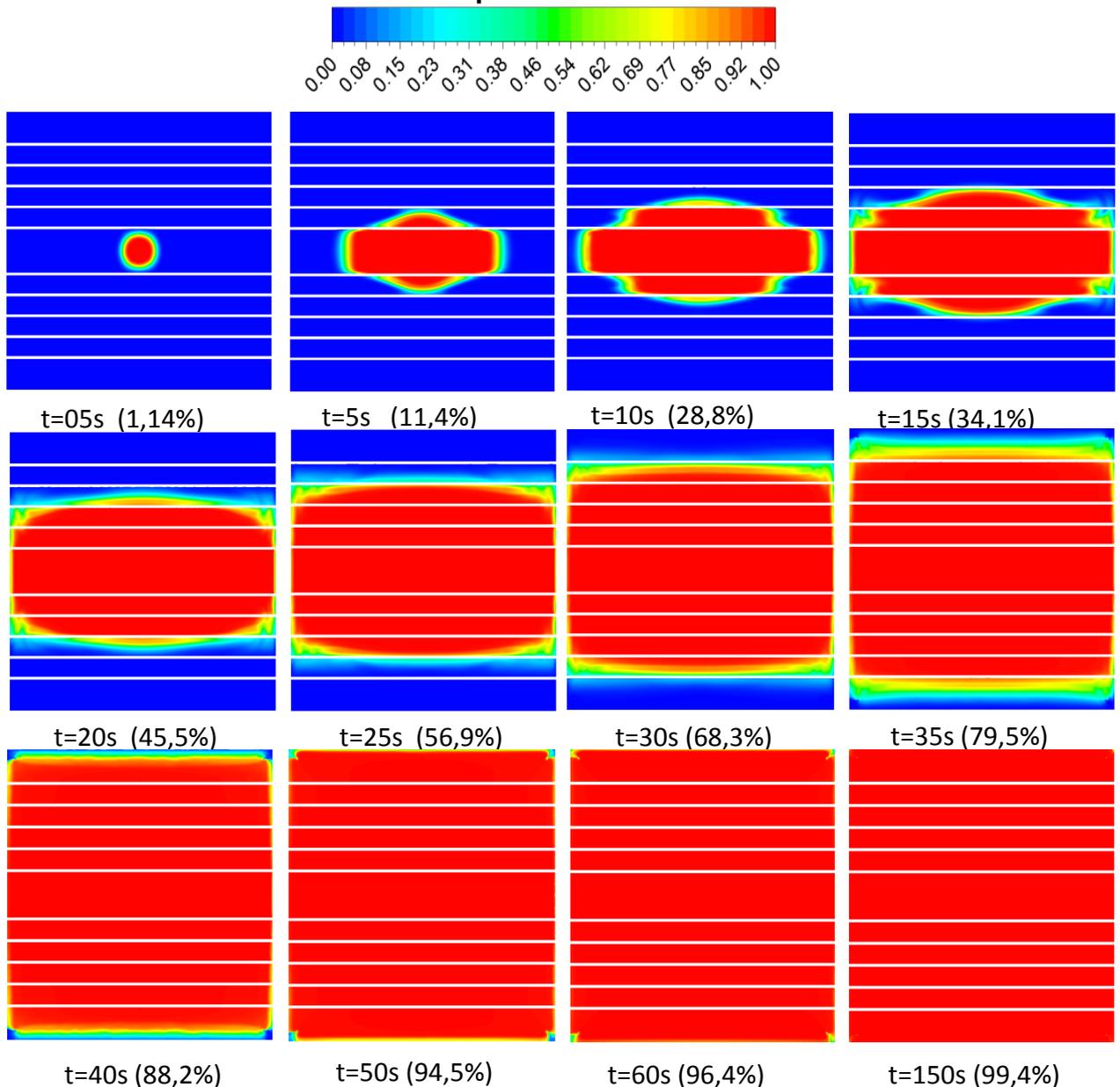
inserindo a equação 8 em 7, tem-se:

$$u_{analítico} = -(4u_{max}) \left[\left(\frac{y}{e} \right)^2 - \left(\frac{y}{e} \right) \right] \quad (9)$$

onde e é a espessura do molde, u_{max} é a velocidade máxima do perfil, obtida dos resultados numéricos, e y é a posição ao longo da espessura do molde.

A frente de avanço da resina no molde, para $y=2,5\text{mm}$

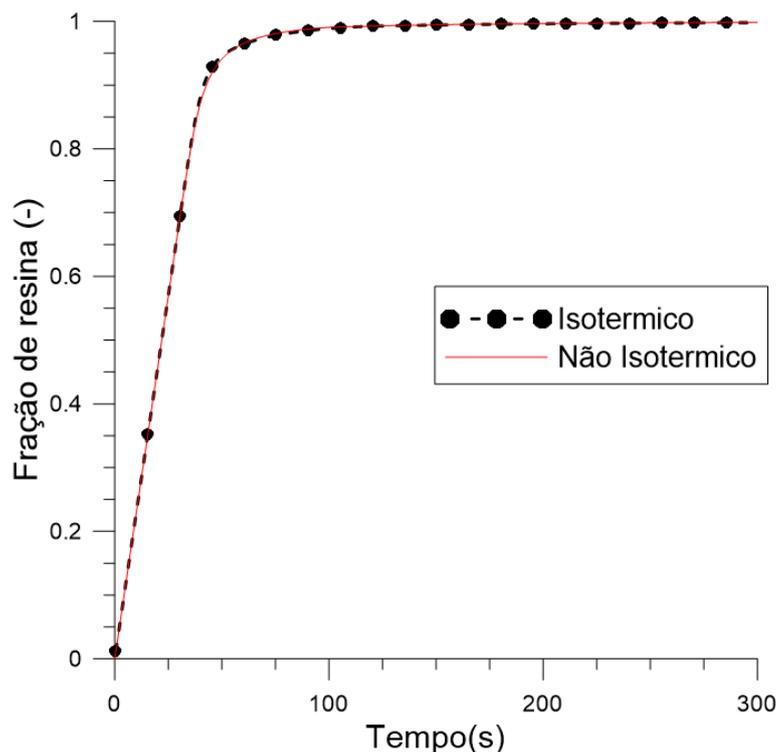
Figura 7-Frente de avanço da resina, em $y = 2,5\text{mm}$, para vários instantes do processo.



O avanço da resina apresentado na vista superior (Figura 7) caracteriza o escoamento da mesma, ao longo do preenchimento do molde. Observa-se a influência dos fios, restringindo o escoamento a ocorrer, de forma mais acentuada, apenas na direção paralela aos fios, preenchendo inicialmente, as cavidades ao longo da

espessura do molde, que estão alocadas entre as fibras de reforço. Na sequência, a resina passa a avançar também para as saídas, na direção perpendicular aos fios, até alcançar às regiões próximas as laterais do molde, onde, em determinados locais, uma camada de ar, cada vez mais estreita, impede o contato da resina com a lateral do molde, correspondendo as frações de vazios que devem ser evitadas, devido as mesmas reduzirem as propriedades dos materiais, quando encontrados após o processo de solidificação. Como as saídas são alcançadas pela resina, antes do ar ser totalmente retirado, esta passa a ser lançada fora do molde, junto com frações cada vez menores de ar. Observa-se que, dentro de 1 minuto o molde está com mais de 90% de sua capacidade preenchida por resina. Após esse período, a resina alcança as saídas de ar e passa a ser expelida do molde, carregando lentamente as frações presas de ar.

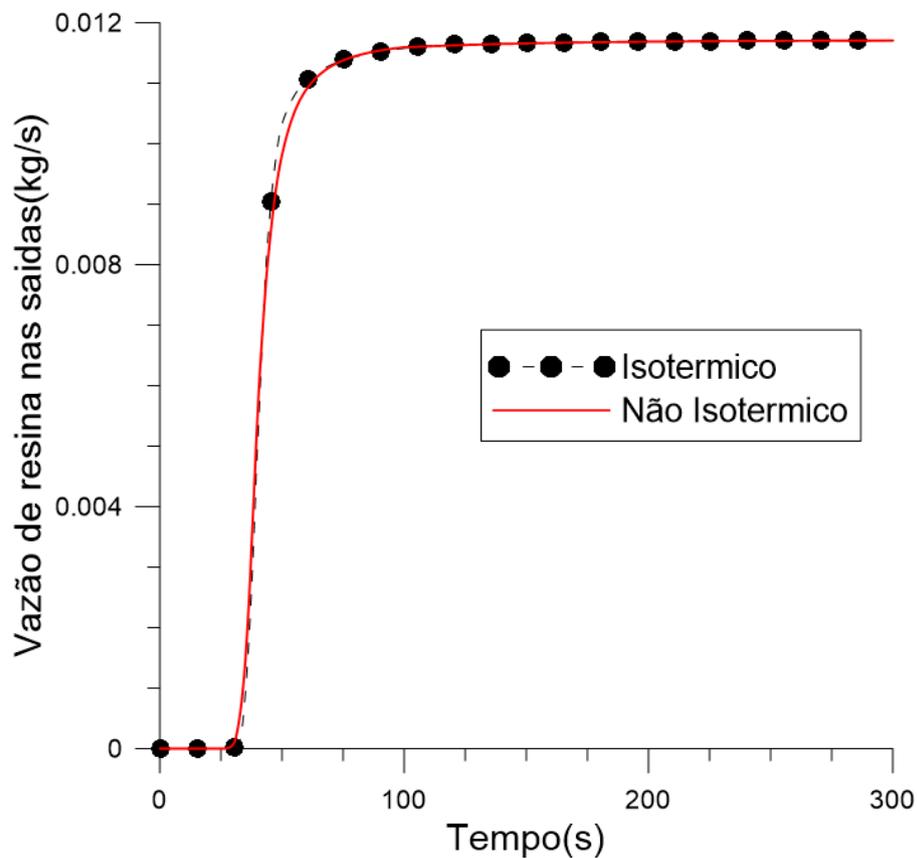
Figura 8-Fração Volumétrica de resina ao longo do tempo de preenchimento



A Figura 8 expressa o perfil de preenchimento do molde, para os casos isotérmicos e não isotérmicos. Pode-se observar a elevada velocidade de preenchimento nos instantes iniciais, caracterizada pelo elevado coeficiente angular, que uma reta tangente a curva, nos instantes que a resina leva para alcançar as saídas do molde, apresenta. Na sequência essa velocidade de preenchimento tende a zero, quando as quantidades de resina entrando e saindo do molde tendem a se igualar. Em até 30 segundos de processamento os perfis de avanço dos casos com o

molde quente e na temperatura ambiente produzem a mesma quantidade de resina dentro do molde. A partir deste instante, tem-se um pequeno aumento no volume de resina no caso isotérmico em relação ao caso com o molde aquecido. Isto se deve à o alcance das saídas do molde nesse momento, o que é indicado na figura 9, que mostra a vazão de resina nas saídas ao logo do tempo. O molde esquenta a resina, reduzindo sua viscosidade, permitindo que a mesma seja retirada do molde pelas saídas mais facilmente. Esta diferença só ocorre até 60 segundos do processo, quando as frações de ar se encontram aprisionadas, e encontram mais resistência para que sejam liberadas, estando o molde preenchido com resina mais viscosa.

Figura 9-Vazão de resina nas saídas do molde

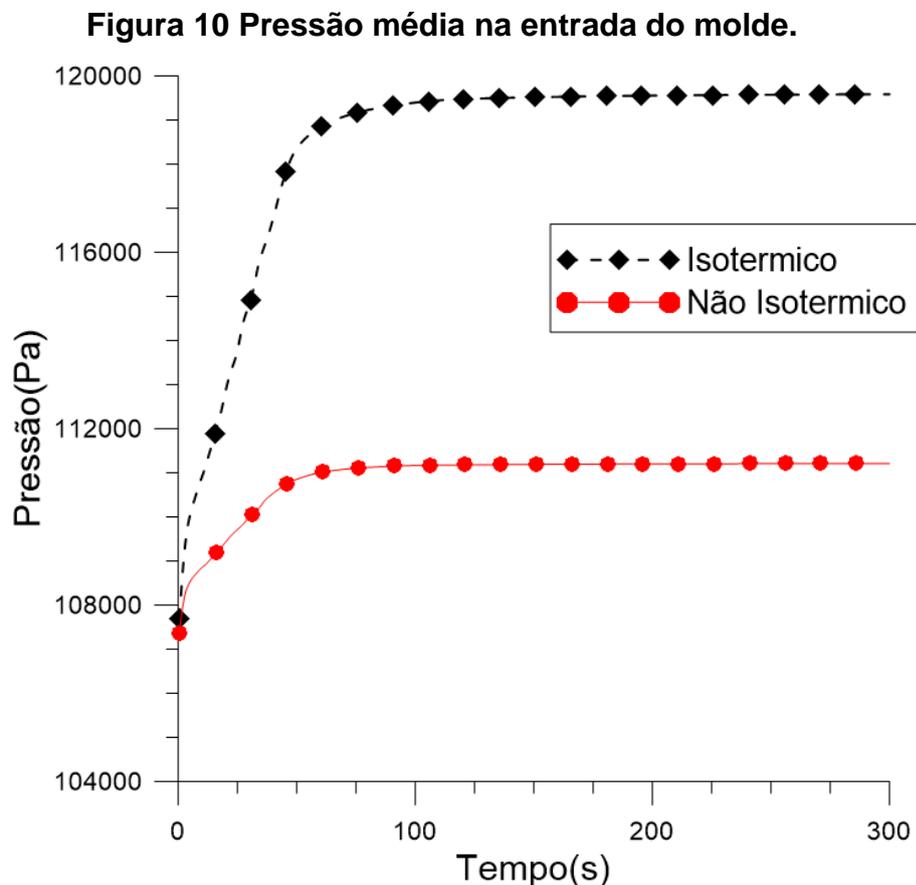


Pressão Média na Entrada

A Injeção da resina no molde, com velocidade constante, promove o aumento da pressão na entrada, a qual é necessária para deslocar um volume de resina cada vez maior, à medida que o molde vai sendo cheio. Por apresentar uma baixa viscosidade e densidade, o ar não oferece uma elevada resistência a injeção, e por isso a pressão na entrada do molde, nos primeiros segundos, é relativamente baixa.

No entanto, esta cresce consideravelmente ao longo do tempo, como mostrado na figura 10.

A medida que a resina preenche o molde, a mesma passa a resistir, de forma acentuada, a injeção subsequente, devido a elevada quantidade de resina já presente, a qual apresenta viscosidade e densidade correspondentes a essa resistência. A pressão deve ser suficiente para promover o avanço da resina no molde e manter a velocidade constante na entrada do mesmo. Esse acréscimo ocorre, até ser atingido o regime permanente, em torno 60s, quando a quantidade de resina presente no molde varia muito pouco e conseqüentemente, a partir de então, não é necessário um aumento considerável de pressão para deslocar, praticamente, o mesmo volume de resina.

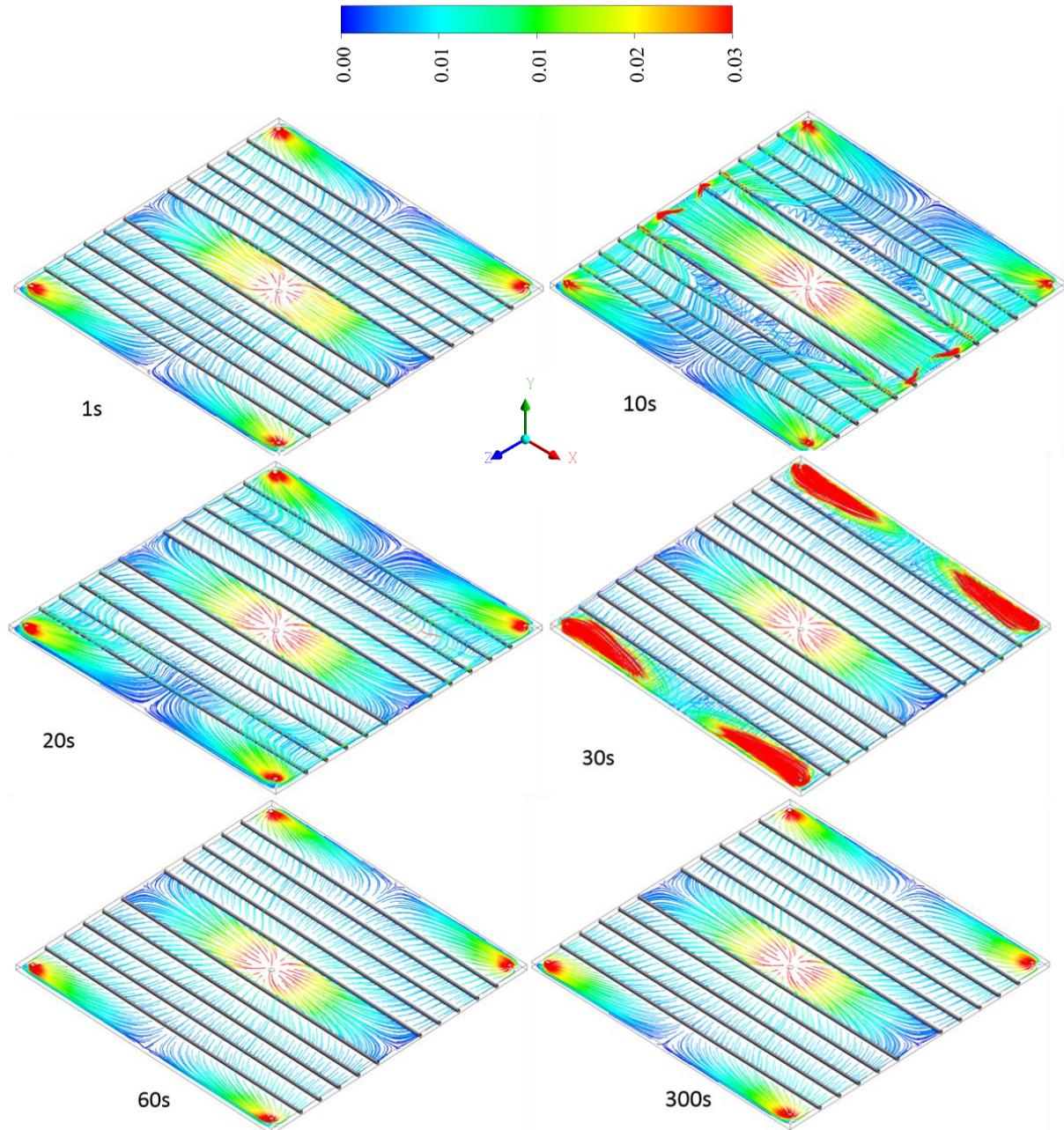


O efeito mais considerável da aplicação do molde quente, é observada na manutenção da pressão ao longo do tempo do processo. A figura 10 indica que, para os casos isotérmicos, a pressão na entrada do molde alcança seu valor máximo em 119000 Pa enquanto que nos casos não isotérmicos, a mesma alcança seu maior valor por volta de 111000 Pa, uma redução de aproximadamente 7%. Por isso, nos casos em que os equipamentos utilizados no processo RTM, forem limitados quanto

ao fornecimento de pressão, o aquecimento do molde, indica-se como uma possível solução.

Linhas de Fluxo em diferentes tempos de Preenchimento

Figura 11 – Linhas de fluxo ao longo do processo de preenchimento do molde para diferentes instantes de tempo



As linhas de corrente são tangenciais a trajetória do fluido. Desta forma, estas linhas, descrevem a direção, o sentido e a intensidade do escoamento. A figura 11 mostra as linhas de fluxo para o escoamento multifásico do caso isotérmico. Poucas mudanças foram observadas nestes resultados, em relação ao caso com

aquecimento do molde. Estas se limitaram maior suavidade das linhas de fluxo e menores variações na direção das linhas de fluxo para o molde quente, o que se dá, na redução da pressão na entrada do molde.

As linhas de fluxo, além de mostrar qualitativamente o trajeto do fluido no interior do molde, também apresentam as regiões por intensidade de velocidade. Comparativamente a velocidade de entrada (0,5 m/s) as velocidades no interior do molde estão dentro de uma escala de velocidades que corresponde a apenas 6% da mesma. No entanto as diferenças de velocidade entre as regiões do molde informam características físicas importantes quanto ao escoamento. Em um segundo de processo, observa-se uma estrutura de linhas que se intensificam nas saídas e na região da cavidade do molde, localizada entre os primeiros fios que encontram a resina. Esse escoamento, no entanto, é proveniente da reação do ar à injeção da resina na entrada, pois ainda não se tem uma quantidade considerável de resina dentro do molde nesse instante. Em seguida, em dez segundos, observa-se um aumento de velocidade nas regiões próximas a laterais, perpendiculares aos primeiros fios, isto ocorre devido ao avanço da resina se dá de forma mais acentuada na direção paralela aos fios, levando o ar que ocupava esta região a ser retirado mais rapidamente. Ainda neste tempo, verifica-se a formação de uma camada com linhas de trajetórias consideravelmente caóticas, essa região é correspondente à interface resina-ar dentro do molde. Em 20 segundos, observa-se que na região próximas das laterais, onde havia aumento na velocidade, encontra-se um desvio na trajetória do fluido (resina), antes que o mesmo toque a lateral o molde, indicando pontos de estagnação de ar que dificultam o preenchimento do molde com resina. Em 30 segundos, verifica-se a intensificação de velocidade nas proximidades das saídas, o que indica a retirada do ar que agora se concentra nestas regiões, o que também se observa pelo desaparecimento das estrutura caótica nas regiões centrais do molde. Em 60 segundos, verifica-se uma estabilização do escoamento, que indica o preenchimento do molde em mais de 90% e a pouca variação na fração volumétrica de resina no molde, a partir de então, verifica a forma inalterada do perfil de linhas, em 300s de processamento.

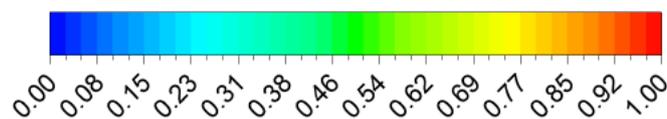
Distribuição da fração volumétrica de resina ao longo da espessura do molde

Ao se fazer a análise da Figura 12, observa-se que a forma como o preenchimento se dá, promove regiões com frações de ar aprisionado ao final do

processo. Estas regiões se identificam com as regiões de estagnação e desvio de escoamento, descritas na seção anterior. Verifica-se que o aprisionamento de ar nestas regiões se dá de forma mais intensa na direção das superfícies superior e inferior do molde. Isto ocorre devido ao ar ter o seu movimento mais restringido a medida que ele se aproxima das superfícies que o delimitam, haja visto as condições de não deslizamento que devem ser obedecidas nestas regiões. Por outro lado, na região central da espessura da peça, observa-se uma impregnação com resina de aproximadamente 100%, o que é importante quanto a interação que deve existir entre a matriz e o reforço para aplicações mecânicas do compósito.

No caso em que o molde se encontra aquecido, observa-se pequenas reduções nas frações volumétricas de ar estagnadas. Estando o fluido menos viscoso, o mesmo é capaz de preencher regiões mais restritas do molde com maior facilidade. Desta forma, o escoamento é favorecido, evitando o aprisionamento de ar no molde. Pode-se verificar, que as frações de resina são maiores ao longo de toda a espessura, nos casos não isotérmicos, comparando as figuras 13 e 12.

Figura 12-Distribuição da fração volumétrica de resina nos planos $y_1=0$ mm, $y_2=1$ mm, $y_3=2,5$ mm, $y_4=4$ mm e $y_5=5$ mm, todos em $t=300$ s- caso isotérmico



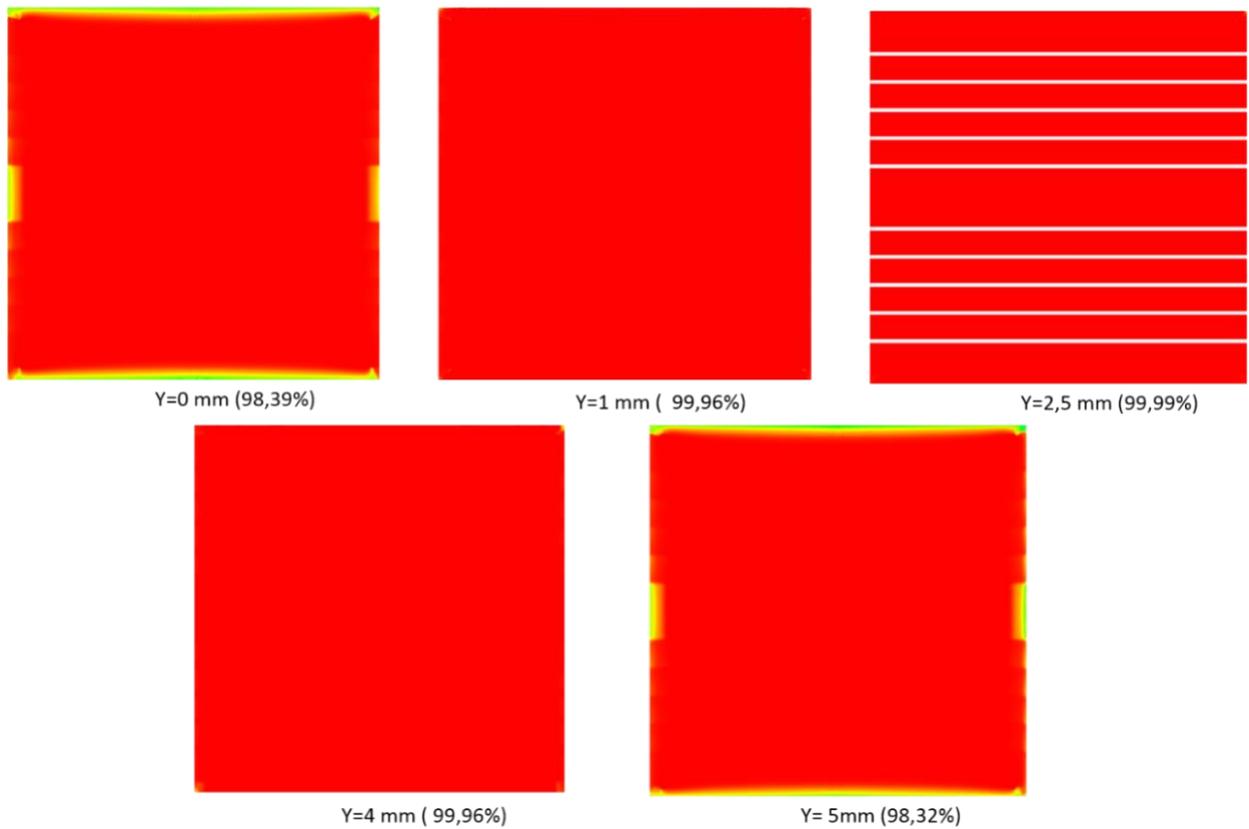
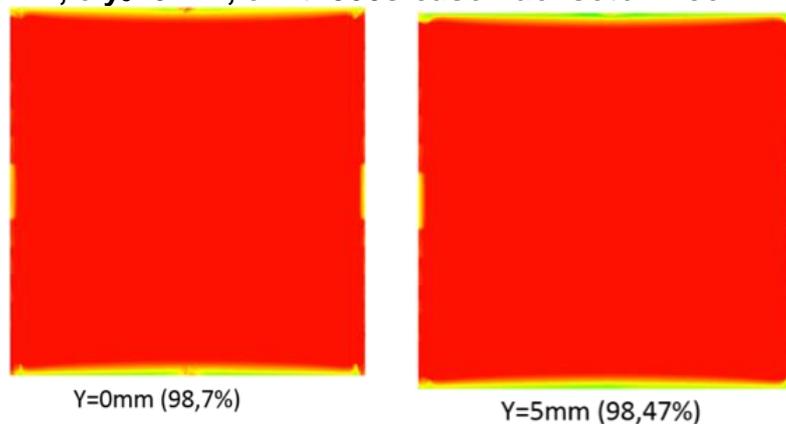


Figura 12-Distribuição da fração volumétrica de resina nos planos: $y_1=0$ mm, e $y_5=5$ mm, em $t=300$ s-caso não isotérmico



CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados, pode-se concluir que:

O modelo multifásico VOF, utilizado pelo *software* Ansys FLUENT® se adéqua ao processo RTM. Este modelo, foi capaz de resolver, de forma transiente e tridimensional, as equações de conservação e representar de forma fisicamente coerente e numericamente aplicável, o enchimento do molde, em todos os seus aspectos fluidodinâmicos e térmicos.

Nos casos simulados, o número de passos de tempo foi 6000, o que corresponde ao tempo de 300 segundos, foi suficiente para preencher mais que 99% do molde com resina. Este resultado, comparado com o de 150 segundos apresenta uma diferença de 0.49%, o que aparentemente é muito pouco para compensar a duplicação do tempo de processo.

Os resultados das frentes de avanço da resina no decorrer do tempo, bem como da distribuição de fração volumétrica ao longo da espessura, mostram a influência da geometria dos fios de NiTi nas características do escoamento bifásico resina-ar do processo. A presença destes fios faz com que o preenchimento do molde ocorra, preponderantemente, por meio da espessura e na direção paralela aos mesmos. Isso faz com que as frações de vazios se concentre na região próxima as arestas laterais do molde.

A aplicação do molde quente, promove uma redução de aproximadamente 7% na pressão de entrada de resina ao longo do processo. O que implica dizer que o aquecimento do molde, bem como do reforço é um meio de reduzir a pressão necessária para o adequado preenchimento do molde. O que pode permitir que o RTM seja realizado a partir de equipamentos com potência reduzida.

REFERENCIAS

ANSYS, FLUENT -Theory Manual, 2015.

BUEHLER, W. J., GILFRICH, J.V., WILEY, R. C. Effect of Low-Temperature Phase Changes on the Mechanical Properties of Alloys near Composition TiNi, *Journal of Applied, Physics*, vol. 34, n.5, pp- 1474-1477, 1963.

BROCKS, T. Compósito estrutural carbono/epóxi via RTM para aplicação aeronáutica: processamento e caracterização, *Dissertação-(Mestrado) Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de engenharia de Guaratinguetá*, 2011.

CALLISTER, W. D. Jr, RETHWISCH, D. G., *Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução*, 8. ed., Rio de Janeiro, LTC, 2012.

CASTILHO, W. S. Caracterização Termomecânica de Compositos Híbridos com Memória de Forma, *Dissertação (Mestrado)-Engenharia mecânica, Universidade de Brasília*, 2008.

CERQUEIRA, J. C. M., Monitorização do fluxo no processo de moldação por transferência de resina (RTM), *Dissertação (Mestrado) - Engenharia mecânica, Universidade do Porto*, 2008.

FOX, R. W., PRITCHARD, P. J., MCDONALD A. T. Introdução a Mecânica dos Fluidos, 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

LONG A. C. Design and manufacture of textile composites. CRC Press, 1º ed., 2006.
OTSUKA, K., WAYMAN C., M., Shape Memory Materials, Cambridge University Press, ISBN: 0-521-44487 X hardback, 1998.

OTSUKA, K., WAYMAN C., M., Shape Memory Materials, Cambridge University Press, ISBN: 0-521-44487 X hardback, 1998.

SHI, F. e DONG, X., 3D Numerical Simulation of Non-Isothermal Resin Transfer Molding Filing Process Using Unstructured Tetrahedron Mesh, Journal of Shanghai Jiaotong University, vol. 15, n. 6, p. 684-689, 2010.

SHOJAEI, A., GHAFFARIAN S. R., KARIMIAN S. M. H Modeling and Simulation Approaches in the Resin Transfer Molding Process: A Review, Polymer Composites, vol. 24, n.4.,2003.

VASILIE, V. V., MOROZOV E.V., Mechanics and Analysis of Composite Materials, 1.. ed.,Inglaterra, Editora Elsevier, 2001.

TSANZALIS, S., KARAPAPPAS P, VAVOULIOTIS, A., TSOTRA, P., PAIPETIS, A., KOSTOPOULOS, V., FRIEDRICH, K. Enhancement of the mechanical performance of an epoxy resin and fiber reinforced epoxy resin composites by the introduction of CNF and PZT particles at the microscale , Composites: Part A, vol. 38, pp 1076-1081, 2007.