

MODELAGEM NUMÉRICA DA INFUSÃO DE RESINA EM UM MEIO POROSO

Laísa L. Soares¹; Jeferson A. Souza²; Liércio A. Isoldi³; Elizaldo D. Dos Santos⁴; Sandro C. Amico⁵; Rafael S. Trindade⁶

Resumo

Compósitos fabricados pelo processo de RTM (Resin Transfer Molding) têm sido largamente utilizados em diversos segmentos industriais (naval, automotivo, etc.). Este processo combina, geralmente, os custos reduzidos de produção com boas propriedades mecânicas para a peça fabricada. Além disso, o processo de RTM produz pequenas quantidades de resíduos e é adequado para a produção de peças com geometrias, tanto simples como complexas. O reforço fibroso utilizado dentro do molde para a fabricação dos compósitos é, na verdade, uma pilha de tecidos fibrosos ou mantas fibrosas, cortados no tamanho e forma da peça e posicionados dentro da cavidade do molde. A fim de investigar os padrões de escoamento da resina no interior do molde, este trabalho apresenta a simulação numérica do processo de RTM, utilizando o software OpenFOAM. Foi investigado o tempo de cura da resina e o tempo total de preenchimento do molde. A viscosidade não foi considerada constante e, uma equação que relaciona a sua variação em função do tempo, foi utilizada para prever esta mudança. Os resultados mostraram que o controle das variáveis do processo, no caso pressão de injeção e permeabilidade do meio, são de fundamental importância para uma injeção bem-sucedida. Além disso, destaca-se que a modelagem numérica do RTM pode auxiliar na determinação dessas variáveis.

Palavras-chave: RTM, simulação numérica, tempo de injeção.

Abstract

Composites manufactured by the RTM process (Resin Transfer Molding) have been used in several industries such as naval, automotive, etc. This process combines small cost production with good mechanical properties of the manufactured pieces. In addition, the RTM process produces small quantities of waste material and may be used for production of pieces with simple or complex geometries. In the RTM process a fibrous reinforcement is cut with the piece geometry (form) and positioned inside the mold cavity. In order to investigate the patterns of resin flow inside the mold, this study presents a numerical simulation of the RTM process using OpenFOAM software. It was studied resin gel time and total mold filling time. Viscosity was not considered constant and an equation which relates its variation as a function of time was used to predict its behavior inside the mold cavity. Results have shown that controlling process variables such as injection pressure and medium permeability, is of

¹ Mestranda em Modelagem Computacional pela Universidade Federal do Rio Grande - FURG. E-mail: laisaluiz.ls@gmail.com.

² Professor permanente do programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande – FURG. E-mail: jasouza1974@gmail.com.

³ Professor permanente do programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande – FURG. E-mail: liercioisoldi@gmail.com.

⁴ Professor permanente do programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande – FURG. E-mail: elizaldodossantos@gmail.com.

⁵ Professor permanente do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande Sul - UFRGS. E-mail: amico@ufrgs.br.

⁶ Doutorando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. E-mail: rafastrindade@gmail.com.

fundamental importance for a successful fabrication. Besides, numerical simulation of RTM process may help in determining this variables.

Keywords: RTM, Numerical simulation, Injection time.

Introdução

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

Os compósitos são materiais formados por duas ou mais fases (multifásico), sendo que uma de suas fases é chamada de matriz ou fase contínua, e a outra de reforço ou fase descontínua. A união destas fases, a partir de algum processo de fabricação, resulta em um material com propriedades melhoradas, se comparado a peças produzidas com as fases originais separadas (CALLISTER JR; WILLIAM D; SOARES, 2008).

O processo de RTM (Resin Transfer Molding) é um dos diversos tipos de processos de fabricação de materiais compósitos. O RTM é um processo de fabricação de peças, cuja matéria prima é a resina e o reforço fibroso, dando origem a um material compósito. Este processo consiste, basicamente, da injeção de resina dentro de um molde fechado, onde neste está presente um reforço fibroso, que será impregnado pela resina. Após sua impregnação total, a peça é curada e, então, retirada do molde.

Segundo Saouab et al., (2001), as principais condições para uma fabricação bem-sucedida, é a perfeita impregnação do reforço fibroso e o enchimento completo do molde, com o menor tempo de ciclo possível, entre o início da injeção e a conclusão do preenchimento.

Durante o processo de moldagem, conforme a resina avança dentro do molde (onde está presente o reforço fibroso), uma resistência ao escoamento aumenta à medida que crescem os avanços da frente de fluxo, diminuindo, assim, a velocidade do fluxo de injeção, o que torna ainda mais difícil o preenchimento do molde. Um dos fatores que influenciam fortemente no escoamento da resina no interior do molde é a permeabilidade do reforço fibroso. O valor desta permeabilidade prevê se o reforço será mais permeável (altos valores de permeabilidade) ou menos permeável (baixos valores de permeabilidade), indicando, assim, o nível de facilidade que a resina terá em escoar entre as fibras do reforço. Logo, quanto menor

for o valor desta propriedade, maior será a dificuldade da resina impregnar o reforço (ADVANI; SOZER, 2011).

Outra preocupação na fabricação de materiais compósitos via RTM é para que a resina não entre em estado de gel antes da total impregnação do reforço fibroso. Se isto acontecer, o processo é interrompido e, certamente, ainda restarão reforços secos. Para evitar esta situação, uma pressão maior de injeção poderá ser utilizada como recurso para facilitar e apurar o escoamento da resina, auxiliando, assim, na impregnação do reforço fibroso e, conseqüentemente, reduzindo tempos de ciclo.

Alguns autores apresentaram estudos que explicam o processo de cura da resina e quais os possíveis fatores que influenciam para a vitrificação da mesma, tais como: o tempo de moldagem e a temperatura da resina.

Em Fontana, (1998), o estudo aponta para as principais dificuldades de certos modelos, bastante utilizados em códigos, que modelam os processos de fabricação de compósitos e que preveem o grau de cura da resina considerando a viscosidade dependente da temperatura.

Kiuna et al., (2002), baseado no estudo de Fontana, (1998), apresentou um modelo matemático que pode ser aplicado na modelagem do processo de RTM e que determina a viscosidade da resina em função do tempo. Este modelo leva em consideração diferentes temperaturas constantes de injeção. Os autores dizem ser, quase exponencial, o aumento da viscosidade em função do tempo e mostram que, variando a temperatura da resina dentro do molde, a velocidade de cura aumenta com a elevação da temperatura.

Abbassi; Shahnazari, (2004) também diz existir uma distribuição de temperaturas atuando na cura da resina durante o preenchimento do molde. Assim, os autores afirmam que, o campo de temperaturas desempenha um papel importante no processo de RTM e pode fortemente afetar o fluxo através da sua influência sobre a viscosidade da resina.

O estudo de Zhou et al., (2014) é concordante com Fontana, (1998), Kiuna et al., (2002) e Abbassi; Shahnazari, (2004) quando diz que os fatores de temperatura e tempo influenciam no processo de cura da resina. Neste estudo, foram apresentados dois modelos de viscosidade que são capazes de prever a cura de uma determinada resina levando em consideração a temperatura e o tempo.

No presente trabalho, o objetivo foi analisar o comportamento da resina, no interior de um molde de RTM, considerando que a mudança na viscosidade da resina é uma função do

tempo de injeção. A dependência da viscosidade, em função do tempo, foi experimentalmente obtida no Lapol/UFRGS.

Para alcançar o objetivo e desenvolver este estudo, foi utilizado o software de geração de malha GMSH, no qual é o responsável pela geração da geometria e malha do molde utilizado, e o software de simulação numérica OpenFOAM, que é o responsável pela solução do problema.

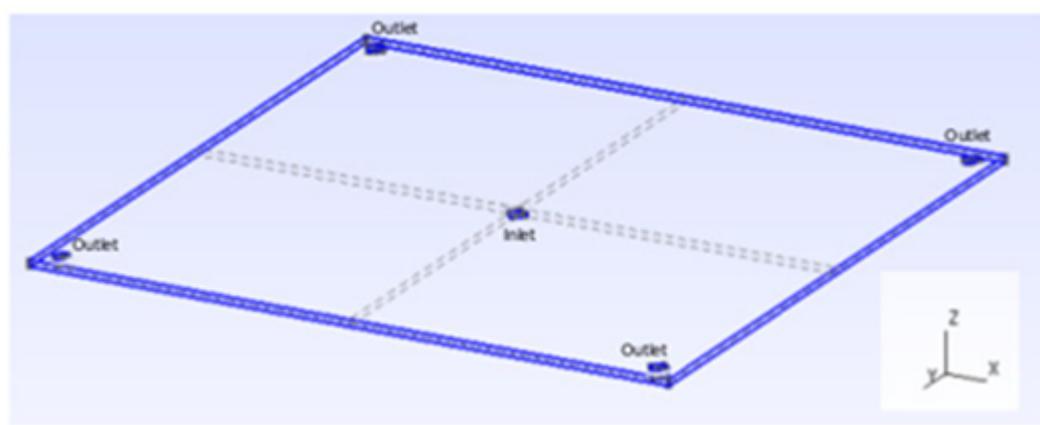
1 Descrição do problema

O presente trabalho consiste na simulação numérica da injeção de resina em um meio poroso, reproduzindo, assim, a fabricação de peças compósitas pelo processo de RTM.

Levando em consideração a ocorrência de mudanças na viscosidade da resina em função do tempo, o principal objetivo foi o de obter um preenchimento total do molde em um tempo razoável, antes da gelificação da resina.

Para a solução deste problema, foram utilizados os softwares GMSH (gerador de geometria e malha) e OpenFOAM (solução), que é um código livre de CFD (Computational Fluid Dynamics). A geometria utilizada é apresentada na figura 1.

Figura 1 - Geometria do molde



Fonte: Elaborada pelos autores.

Neste modelo o fluxo da resina escoava de forma radial e as dimensões do molde são as seguintes: largura e comprimento de 0,3 m, espessura de 0,003 m e diâmetro dos furos de 0,0083 m.

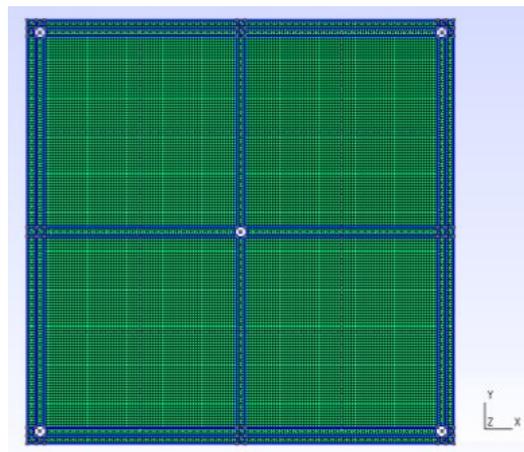
A geometria foi gerada a partir do centro com coordenadas (0, 0, 0) e ampliado 0,15 m para cada lado do centro, resultando em um molde quadrado com 0,3 m de lado. A entrada de resina está posicionada no centro da face inferior do molde e, as saídas de ar, estão

posicionadas nos quatro cantos da face superior do molde. As demais faces são consideradas paredes.

As condições de contorno para o problema são as seguintes: *inlet*, pressão prescrita (P_0) e fração volumétrica igual a 1; *outlet*, pressão prescrita igual a zero (atmosférica) e derivada nula da fração volumétrica na direção do fluxo; *wall*, condição de não deslizamento (velocidade nula na parede) e derivada nula da fração volumétrica na direção normal a parede. O software OpenFOAM não trabalha com domínios bidimensionais, mas simula esta condição em domínios que tenham apenas um volume na direção normal ao escoamento. Para tanto, é necessário ainda definir uma condição de contorno específica, chamada de *empty*, nas paredes superior e inferior da geometria mostrada na Fig. 1. Esta última condição permite que o OpenFOAM interprete as fronteiras que possuem a condição de *empty* como “vazias”, assim a simulação ocorre desprezando a terceira dimensão, ou seja, ocorre em duas dimensões.

A malha utilizada para a solução do problema foi composta por 49.768 elementos quadrangulares e é mostrada na figura 2.

Figura 2 – Malha



Fonte: Elaborada pelos autores.

A escolha da malha foi baseada em um teste de independência de malha, bem como analisada a mesma no software GMSH, utilizando o parâmetro “Rho”. Este parâmetro considera que os melhores elementos da malha são aqueles, cujo a razão entre a menor aresta e a maior aresta estejam próximos ou iguais a 1. Para esta malha, a razão ficou entre 0,75 e 1.

Os parâmetros utilizados para a simulação deste problema são mostrados no quadro 1.

Quadro 1 - Parâmetros da simulação

Parâmetro	Valor
Fração do volume de fibra [%]	50
Massa específica da resina [Kg/m ³]	1109
Viscosidade da resina [Pa.s]	0,3
Pressão de injeção [bar]	0,5; 1; 1,5
Permeabilidade no plano $K_x = K_y$ [m ²]	3×10^{-10} ; 3×10^{-11} ; 3×10^{-12}

Fonte: Elaborada pelos autores.

1.1 Modelagem numérica do RTM

Para prever o avanço da resina no interior de um molde no processo de RTM, o modelo numérico é obtido a partir da aplicação da Lei de Darcy. Assim, considerando que o fluxo da resina se dá em meio poroso, a Lei de Darcy diz que: "a velocidade média de um fluido através de um meio poroso é proporcional ao gradiente de pressões estabelecido ao longo deste meio". Logo, a Lei de Darcy pode ser expressa matematicamente segundo Advani; Sozer (2011), como:

$$\vec{V} = \frac{\bar{K}}{\mu} \nabla P \quad (1)$$

onde \vec{V} é o vetor velocidade [m/s], P a pressão [Pa], μ a viscosidade absoluta [Pa s] e \bar{K} é o tensor permeabilidade do meio poroso [m²].

A abordagem numérica utilizada para a determinação do avanço da resina, no interior do molde, foi o VOF (*Volume of Fluid*), este é implementado no *solver porousInterFoam*, do pacote OpenFOAM

1.2 Solução do problema

Para solucionar problemas que envolvam escoamentos incompressíveis de duas fases, o software OpenFOAM utiliza o *solver porousInterFoam*. Este, faz uma discretização por volumes finitos para resolver as equações de cada fase dos escoamentos.

Definindo a fração volumétrica f como uma função da posição e do tempo, o valor de f poderá variar entre 0 e 1 para qualquer posição e tempo. Assim, o *solver PorousInterFoam* utiliza o método VOF (*Volume of Fluid*) proposto por Hirt; Nichols, (1981) para representar cada fase no interior de cada célula da malha. O VOF utiliza os valores da função f como um indicador para mostrar qual porção de fase está ocupando determinada célula. Assim,

integrando a função indicadora, f , sobre uma célula computacional, e considerando que as fases são resina e ar, a fração volumétrica pode ser definida como: $f = 1$, a célula está preenchida com resina, $f = 0$, a célula está preenchida com ar e $0 < f < 1$ a célula contém a interface entre resina e ar.

O método VOF resolve um único conjunto de equações da continuidade e da quantidade de movimento para todos os fluidos (neste caso resina e ar) e cria uma equação de transporte adicional para a fração volumétrica de cada fase. Este método só é aplicado a fluidos invíscidos.

A formulação para um fluido incompressível, que é o caso deste problema, é dada pela equação da continuidade Eq. (1), da fração volumétrica da resina Eq. (2) e da quantidade de movimento Eq. (3).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2)$$

onde ρ é a massa específica [Kg/m³] e t é o tempo [s].

$$\frac{\partial(\rho f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho f V) = 0 \quad (3)$$

onde, f é a fração volumétrica da resina.

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho g + F \quad (4)$$

onde g é a aceleração da gravidade [m/s²], $\bar{\tau}$ é o tensor de tensões [N/m²] e F é um termo de força atuando sobre o fluido por unidade de volume [N/m³].

Na Equação (4) o efeito do meio poroso é incluído no modelo matemático pela inserção de uma força resistiva ao escoamento. Logo, com o auxílio da Eq. (1), é possível equacionar o termo F na Eq. (4) da seguinte forma:

$$F = -\nabla P = -\frac{\mu}{K V} \quad (5)$$

A partir da definição de fração volumétrica, a densidade e a viscosidade local em uma célula computacional pode ser calculada segundo Srinivasan; Salazar; Saito, (2011), como:

$$\rho = f \rho_{\text{resina}} + (1 - f) \rho_{\text{ar}} \quad (6)$$

$$\mu = f \mu_{\text{resina}} + (1 - f) \mu_{\text{ar}} \quad (7)$$

Para este trabalho, a viscosidade da resina é uma função do tempo de injeção, assim, a viscosidade dependente do tempo foi obtida experimentalmente no Lapol / UFRGS e os resultados foram compilados em uma função de regressão dada pela Eq. (8).

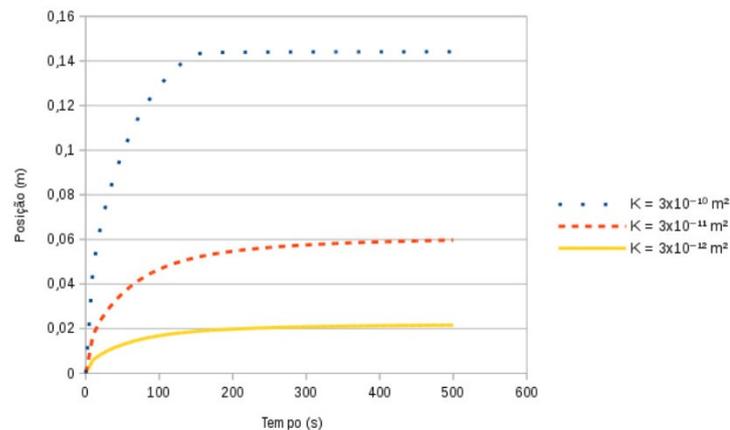
$$\mu_{\text{resina}} = 0,03553983777t^2 - 2,0391785789t + 326,2930547713 \quad (8)$$

2 Resultados

Para alcançar o objetivo deste trabalho, primeiramente foi observado o quanto a permeabilidade do reforço fibroso tem influência no que diz respeito ao preenchimento total do molde. A importância deste primeiro parâmetro ser analisado, é pelo fato da permeabilidade ter uma grande interferência no fator tempo de preenchimento do molde, fator este que está sendo analisado neste artigo. A Fig. 3 mostra o gráfico da posição da resina (no eixo x) em função do tempo, para diferentes valores de permeabilidade. A pressão de injeção utilizada neste caso é de 1,5 bar.

Vale lembrar que todas as simulações foram realizadas considerando que a viscosidade da resina muda em função do tempo. Também, é importante ressaltar que, neste modelo, o escoamento da resina se dá de forma radial, representando um círculo perfeito (reforço fibroso é isotrópico). Assim, como a resina escoar a partir do centro, sua posição máxima para cada lado do molde será de 0,15 m.

Figura 3 - Gráfico da permeabilidade



Fonte: Elaborada pelos autores.

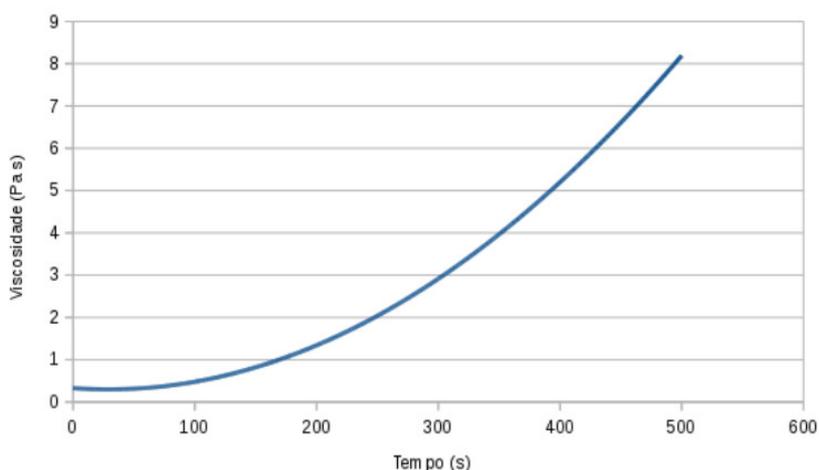
Foi possível observar que, quanto menor for a permeabilidade, maior será a dificuldade da resina escoar através do reforço fibroso. Como mostrado na Fig. 3, a permeabilidade mais alta ($K = 3 \times 10^{-10} \text{ m}^2$) percorreu uma distância maior no molde, aproximadamente 0,14 m. No entanto, para os outros dois casos, com permeabilidade menor, pode-se observar que a resina tem um menor avanço, ficando entre 0,06 m para a permeabilidade de $3 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, e 0,02 m para a permeabilidade de $3 \times 10^{-12} \text{ m}^2$.

Com base neste resultado, e com o intuito de utilizar valores de permeabilidade que auxiliem no avanço da resina dentro do molde, as próximas simulações foram realizadas utilizando a permeabilidade de $3 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, visto que, com esta permeabilidade, o molde é rapidamente impregnado em sua plenitude.

Com relação à viscosidade da resina, foi observado que, conforme o tempo de infusão aumenta, aumenta também a viscosidade e, em um certo momento, a resina começa a entrar em fase de gel, o que dificulta ainda mais o avanço da mesma. Este resultado é concordante com o que diz Kiuna *et al.*, (2002), ao falar que o aumento da viscosidade em função do tempo é quase exponencial.

O gráfico da viscosidade em função do tempo, foi gerado a partir da solução da Eq. (8), pelo OpenFOAM, e é mostrado na Fig. 4.

Figura 4 - Gráfico da viscosidade em função do tempo



Fonte: Elaborada pelos autores.

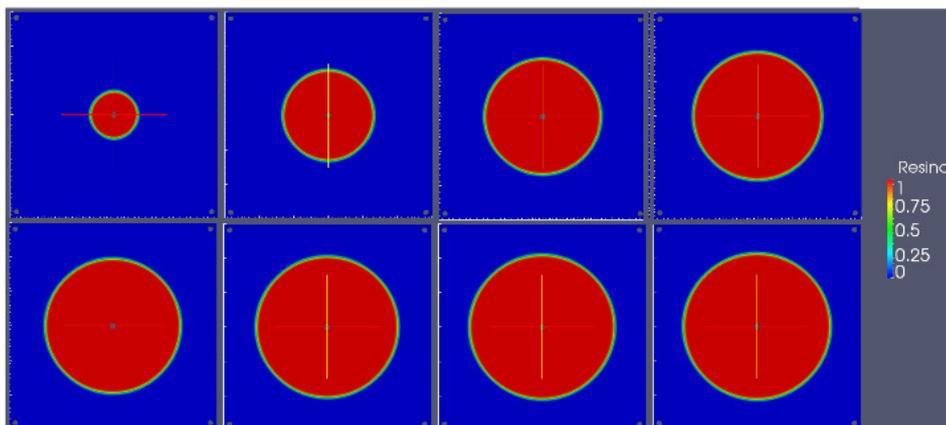
A Figura 4 mostra que, no início da injeção, a viscosidade da resina é baixa, cerca de 0,3 Pa.s. No entanto, com o passar do tempo, a viscosidade tende a aumentar e a resina começa a entrar em estado de gel em torno de 200 s, onde a viscosidade já alcançou um valor de 1,34 Pa.s. Deste modo, a partir de 200 s a resina começa a diminuir seu escoamento devido ao aumento da sua viscosidade, assim, a mesma poderá não conseguir preencher por total o molde, como é mostrado na Fig. 5.

As capturas do avanço da resina, dentro do molde, foram geradas a partir da simulação que utilizou os dados de permeabilidade de $3 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ e pressão de 0,5 bar.

As imagens mostradas na Fig. 5 correspondem aos tempos de 10 s, 50 s, 100 s, 150 s, 200 s, 300 s, 400 s e 500 s, respectivamente.

É possível observar na Fig. 5 que, a partir dos 200 s, a resina começa a escoar de forma mais lenta faltando, ainda, uma boa parte do molde a ser preenchido. Quando isso ocorre é provável que a resina não consiga preencher por total o molde antes da sua gelificação.

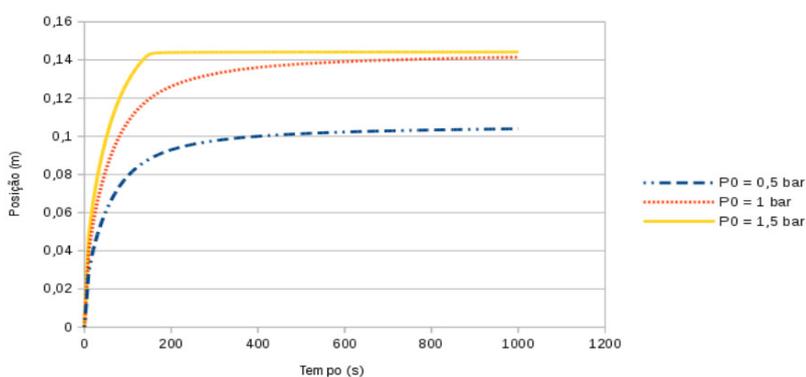
Figura 1 - Avanço da resina em função do tempo



Fonte: Elaborada pelos autores.

Assim, com o objetivo de auxiliar no escoamento da resina e diminuir o tempo de injeção, foram realizadas mais duas simulações utilizando a mesma permeabilidade, mas com pressões de 1 e 1,5 bar. Este resultado é mostrado na Fig. 6.

Figura 2 - Avanço da resina para diferentes pressões

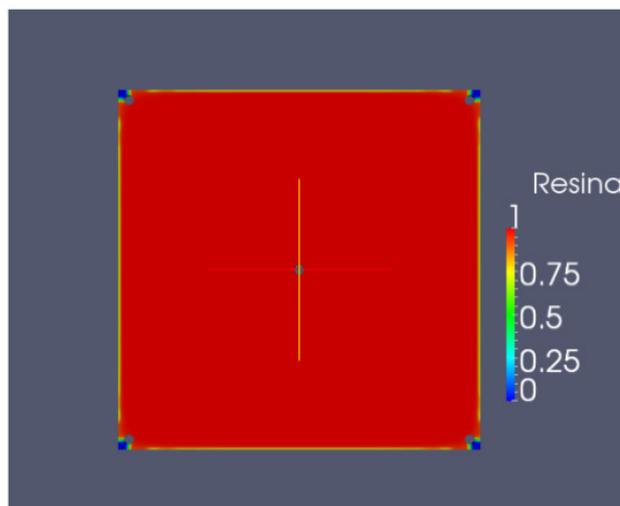


Fonte: Elaborada pelos autores.

Lembrando que o molde, a partir do centro, tem posição máxima para os dois lados de 0,15 m e, com base nos resultados mostrados na Fig. 6, é possível afirmar que o aumento na pressão de injeção poderá auxiliar no total preenchimento do molde, bem como na diminuição do tempo de injeção. Este resultado ocorre pelo fato de uma força maior estar sendo exercida sobre a resina e fazendo com que esta escoe mais rapidamente a uma distância maior. Sendo assim, o molde é logo preenchido.

O tempo que a resina levou para atingir as paredes do molde foi 200 s Fig. 6. Após, a resina continuou preenchendo o restante do molde, assim o tempo total de preenchimento para este caso, onde, a permeabilidade é de $3 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ e a pressão é 1,5 bar, foi de 600 s Fig. 7.

Figura 3 - Preenchimento do molde em 600 s



Fonte: Elaborada pelos autores.

Mesmo que a resina tenha começado a aumentar a sua viscosidade no tempo de 200 s, como foi aplicada uma maior pressão sobre a mesma, esta é empurrada (forçada a escoar) e isso faz com que a resina avance mais do que para pressões menores.

Os quatro cantos do molde não totalmente preenchidos, ainda poderão ser preenchidos. Contudo, para que isso aconteça, a simulação deverá ser continuada, havendo, assim, uma maior perda de resina, já que a mesma alcançou os furos de saídas de ar.

Dando continuidade à simulação, com o intuito de preencher os espaços vazios nos cantos, o tempo total de preenchimento aumentará de 600 s para 1000 s. Ou seja, durante 400 s ocorrerá perda de resina. Esse é um problema a ser discutido utilizando outros métodos de preenchimento do molde. O presente trabalho não dará ênfase sobre este fato.

3 Conclusão

Este trabalho apresentou a simulação numérica do processo de RTM levando em consideração o aumento na viscosidade da resina em função do tempo.

A grande relevância deste estudo está em considerar que a viscosidade da resina não é constante, ou seja, neste caso, o valor da viscosidade muda em função do tempo.

Para simular este processo de mudança, dados experimentais foram utilizados, dando um ar mais realístico ao problema.

Com a viscosidade da resina mudando no decorrer do tempo, surge então a necessidade de que a moldagem seja realizada com o menor ciclo de tempo possível, entre a injeção da resina e o preenchimento total do molde, para que a resina não entre em estado de gel antes da total impregnação do reforço fibroso.

Uma forma de diminuir o tempo de injeção, foi aumentar os valores de pressão inicial. O aumento na pressão de injeção fez com que a resina tivesse um escoamento mais fácil, auxiliando, assim, em seu avanço no interior do molde e na impregnação do reforço fibroso. Por outro lado, é importante ressaltar que, a pressão de injeção é uma variável importante no processo de RTM, podendo interferir diretamente na qualidade final da peça fabricada, ou seja, dependendo do valor da pressão e da geometria que está sendo moldada, o surgimento de vazios, e/ou o empenamento da peça poderá ocorrer.

As simulações numéricas para este estudo foram realizadas com o auxílio dos softwares GMSH e OpenFOAM.

4 Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro

Referências

- ABBASSI, A.; SHAHNAZARI, M. . Numerical modeling of mold filling and curing in non-isothermal rtm process. **Applied thermal engineering**, nov. 2004. v. 24, n. 16, p. 2453–2465.
- ADVANI, S. G.; SOZER, E. M. **Process modeling in composites manufacturing**. 2nd ed ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011.
- CALLISTER JR; WILLIAM D; SOARES, S. M. S. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008.
- FONTANA, Q. P. V. Viscosity: thermal history treatment in resin transfer moulding process modelling. **Composites part a: applied science and manufacturing**, jan. 1998. v. 29, n. 1–2, p. 153–158.
- HIRT, C. .; NICHOLS, B. . Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of computational physics**, jan. 1981. v. 39, n. 1, p. 201–225.
- KIUNA, N. et al. A model for resin viscosity during cure in the resin transfer moulding process. **Composites part a: applied science and manufacturing**, nov. 2002. v. 33, n. 11, p. 1497–1503.

SAOUAB, A. et al. Injection simulations of thick composite parts manufactured by the rtm process. **Composites science and technology**, fev. 2001. v. 61, n. 3, p. 445–451.

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

ZHOU, Z. et al. Rheological behavior and process prediction of low viscosity epoxy resin for rtm. **Journal of wuhan university of technology-mater. sci.** ed., out. 2014. v. 29, n. 5, p. 1078–1082.