

## MOLDAGEM DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM LIGAS METÁLICAS NiTi VIA TÉCNICA RTM: SIMULAÇÃO VIA CFX

S.K.B.M. Silva<sup>1\*</sup>, R.Q.C. Melo<sup>1</sup>, C.J. Araújo<sup>2</sup>, A.G.B. Lima<sup>2</sup>, T.H.F. Andrade<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia de Materiais, Av. Aprígio Veloso, 882, Bairro Bodocongó, CEP: 58429-900, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Aprígio Veloso, 882, Bairro Bodocongó, CEP: 58429-900, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

\*katherine.b.moura@gmail.com

### RESUMO

*A gradativa necessidade de substituição de materiais tradicionais por materiais de alta performance que apresentem elevada resistência e propriedades mecânicas adequadas, tem impulsionado o desenvolvimento de materiais compósitos. Compósitos são materiais com ampla aplicabilidade em diversos setores industriais. Os compósitos poliméricos reforçados com ligas metálicas têm despertado grande interesse devido às suas elevadas propriedades mecânicas. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo estudar numericamente o processo de moldagem de compósitos poliméricos reforçados com ligas metálicas NiTi via técnica RTM com o auxílio do software Ansys CFX. A modelagem matemática constitui-se das equações de conservação de massa e quantidade de movimento, aplicadas a um molde metálico tridimensional contendo dez fios de liga NiTi. Resultados da posição de frente de avanço da resina, linhas de fluxo, campos de pressão e de velocidade ao longo do processo, são apresentados e analisados.*

**Palavras-chave:** compósitos, ligas metálicas, RTM, CFX, simulação.

### INTRODUÇÃO

A crescente exigência de materiais que combinem propriedades que não podem ser obtidas por materiais comuns estimula a engenharia a adaptar-se ao novo cenário de tecnologias industriais, impulsionando o desenvolvimento de materiais compósitos. O uso de compósitos cada vez mais vem aumentando e, principalmente, a sua utilização em indústrias como a aeronáutica e a automotiva, devido às suas propriedades estruturais (1,2).

Caracteriza-se compósitos, de maneira geral, como materiais formados por dois mais materiais distintos, combinados em uma unidade macroscópica. Os compósitos são obtidos de combinações entre materiais distintos, visando à

obtenção de propriedades superiores às dos seus componentes, tais como módulo de elasticidade alto, baixa densidade, resistência à corrosão, desempenho em altas temperaturas, dureza ou condutividade (3,4). Muitos materiais compósitos são compostos apenas por duas fases; uma é chamada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada frequentemente de reforço (5).

Atualmente os materiais compósitos com propriedades específicas permitem produzir componentes de peso reduzido com elevados valores de rigidez e resistência mecânica. Acompanhando a melhoria desses materiais, é natural que os processos de manufatura dos compósitos também tenham evoluído, promovendo a otimização de suas propriedades (6).

Dentre os diversos processos de manufatura de um compósito, o processo de moldagem por transferência de resina (RTM) vem ganhando destaque no setor industrial em relação aos outros processos de fabricação (7). Trata-se de um processo de conformação relativamente novo, atrativo e com elevado potencial para aplicações em automação, aeronáutica e indústrias aeroespaciais, bem como trata-se de um processo que vem ganhando bastante espaço no mercado devido ao seu menor custo de produção, bom acabamento das peças obtidas e uniformidade das características mecânicas (6,8,9). Esse processo de moldagem por transferência de resina consiste na injeção de uma resina termofixa em um molde fechado onde uma pré-forma foi previamente colocada. Este molde, deve conter pelo menos uma entrada, para que ocorra a injeção da resina, e uma saída, para permitir durante o processo de injeção da resina, a saída do ar existente no interior do molde (10,11).

Concomitantemente com os materiais compósitos que nas últimas décadas ganharam muita visibilidade, alguns materiais metálicos, como no caso das ligas com memória de forma, também vêm ganhando espaço e despertando interesse da indústria devido às suas propriedades provenientes das transformações de fase que ocorrem na liga. As ligas com memória de forma são uma classe de materiais especiais que têm a capacidade de recuperar-se de uma deformação, retornando à sua forma original quando aquecidas acima de uma temperatura crítica (12). Este fenômeno, chamado de Efeito de Memória de Forma (EMF), ocorre devido à existência de transformações de fase induzidas no material (13). Na liga, têm-se a fase

austenita (mais rígida) em altas temperaturas enquanto que, resfriando-se o material, a fase martensita (menos rígida) aparece gradualmente (14).

A união entre materiais poliméricos e ligas com memória de forma produzem o que se pode chamar de materiais inteligentes. O desenvolvimento de compósitos inteligentes com ligas de memória de forma embebidos surgiu a partir do intenso uso de compósitos convencionais de matriz polimérica nas últimas décadas. À medida que a fabricação e comercialização de fios com ligas com memória de forma foram estabelecidas, a sua combinação com compósitos tornou-se possível (15,16). A obtenção desses materiais inteligentes permite um conjunto de novas oportunidades e de inovação tecnológica, uma vez que a necessidade de materiais mais resistentes, mais leves e, sobretudo, com algum grau de funcionalidade controlada por parâmetros ambientais, pode se tornar uma realidade industrial em um futuro próximo (17).

Acompanhando este conjunto de novas oportunidades e de inovação tecnológica, cada vez mais pesquisas que visam a otimização do processo RTM vêm sendo realizadas. Neste cenário, o presente trabalho tem como objetivo estudar numericamente o processo de moldagem mecânica de compósitos poliméricos reforçados com ligas metálicas NiTi através da técnica RTM com o auxílio do software comercial Ansys CFX®.

## **METODOLOGIA**

### Problema Físico

O domínio estudado consiste em um molde metálico tridimensional ( $0,3 \times 0,3 \times 0,002 \text{ m}^3$ ), onde dez fios da liga metálica NiTi, com 0,005 m de diâmetro, foram embebidos, divididos em dois grupos de cinco fios posicionados à direita e à esquerda da entrada do molde. A entrada para injeção localiza-se no centro da face inferior do molde enquanto na face superior, localizam-se as quatro saídas cada qual com diâmetro de 0,004567 m. As Fig. 1 e Fig. 2 ilustram a vista tridimensional do molde metálico bem como a disposição dos fios ao longo do molde e detalhes de uma das saídas.

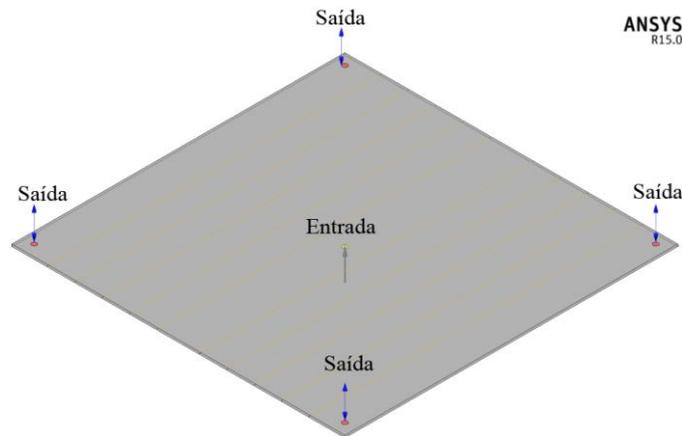


Figura 1: Vista tridimensional do molde metálico com os fios da liga metálica NiTi dispostos.

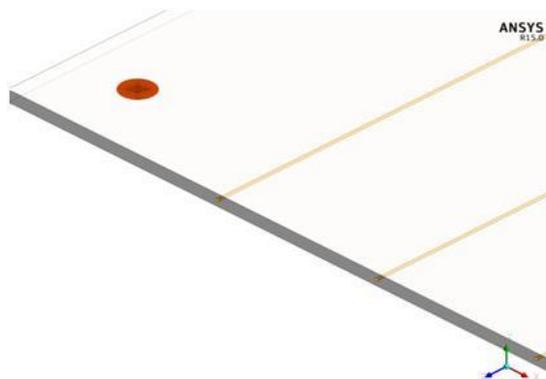


Figura 2: Detalhes da disposição dos fios NiTi ao longo do molde e de uma das saídas.

### Malha Numérica

Para realizar uma análise numérica do processo de injeção da resina no molde, é necessário que o domínio estudado seja transformado em um conjunto de elementos. Esse número de elementos pode ser chamado malha numérica (18). Na presente pesquisa, a malha numérica foi desenvolvida a partir da geometria do molde metálico já obtida no software comercial Ansys CFX, onde utilizou-se o método de blocagem. Para se obter resultados numéricos mais exatos possíveis é necessário que haja um refinamento na malha numérica, ou seja, aumento de elementos na área desejada. A malha gerada foi refinada nas regiões de interesse que são: a entrada, as saídas e próximo as paredes dos fios. A malha final, após o refinamento, possui 590265 elementos e 672832 nós. A Fig. 3 apresenta o refinamento realizado na entrada e em uma das saídas do molde.

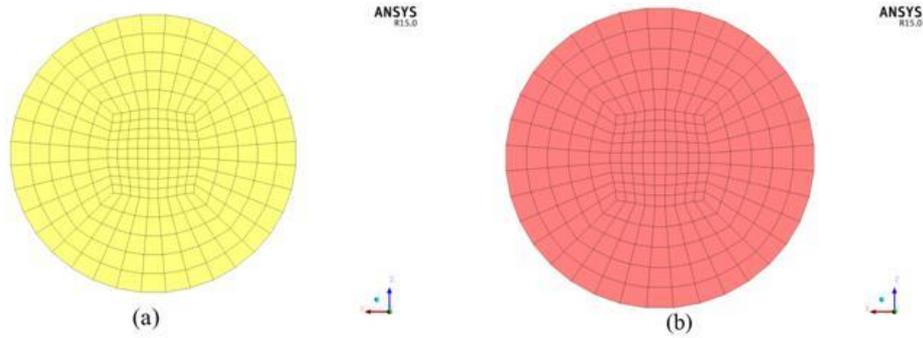


Figura 3: Detalhes do refinamento realizado na (a) entrada do molde e (b) saída do molde.

### Modelagem Matemática

As equações básicas que descrevem os fenômenos relacionados com escoamento de fluidos são definidas pelas leis físicas de conservação de massa (A) e quantidade de movimento (B). Para modelar o escoamento multifásico em três dimensões, as seguintes equações são fundamentais:

- Equação da Continuidade

$$\frac{\partial}{\partial t} (r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = \vec{S}_{mS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (A)$$

- Equação de Quantidade de Movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (r_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) + \nabla \cdot [r_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] = -r_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \cdot \{r_\alpha \mu_\alpha [\nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)]\} + \sum (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U}_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \vec{U}_\alpha) + \vec{S}_{m\alpha} + \vec{M}_\alpha \quad (B)$$

Onde, o subíndice  $\alpha$  é o indicador de fase no escoamento bifásico resina-ar,  $f$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  e  $\vec{U}$  são respectivamente, fração volumétrica, densidade, viscosidade dinâmica e o vetor velocidade, e  $p$  é pressão,  $\vec{S}_{m\alpha}$  representa o termo das forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume. No termo referente a transferência de momento induzida pela transferência de massa interfacial (terceiro termo do lado direito da igualdade), os subíndices  $\alpha$  e  $\beta$  correspondem as fases envolvidas.  $\Gamma^+$  corresponde à taxa de fluxo mássico por unidade de volume da fase  $\beta$  para a fase  $\alpha$  vice-versa,  $\vec{M}_\alpha$  descreve a força total por unidade de volume (força de arraste interfacial, força de sustentação,

força de lubrificação de parede, força de massa virtual e força de dispersão turbulenta) sobre a fase  $\alpha$  devido à interação com a fase  $\beta$  (19).

### Condições de Contorno

O molde encontrava-se preenchido com ar antes de iniciar o processo de injeção da resina. A injeção da resina polimérica será realizada na entrada do molde; nas quatro saídas localizadas na face superior do molde, haverá o escoamento do ar presente no interior do molde à medida que a resina escoar em seu interior até preenchê-lo completamente. Com o intuito de completar o modelo matemático, foram adotadas as seguintes condições de contorno:

- Na seção de entrada do molde, admitiu-se velocidade superficial de 0,5 m/s e fração volumétrica igual à 1,0 para a resina polimérica, e 0,0 para o ar;
- Adotou-se a condição de parede para as partes laterais, superior e inferior do molde (não incluindo a entrada e saídas do molde);
- Os fios da liga metálica foram estudados como um domínio sólido presente no interior do molde, sendo a cavidade do molde considerado um domínio de fluido contínuo devido ao volume residual entre o volume total do molde e o volume ocupado pelos fios não ser pequeno suficiente para caracterizar um volume poroso.

### Caso Estudado

O estudo consistiu na avaliação da frente de avanço da resina no molde, de modo que o mesmo seja preenchido completamente. Com este intuito, estudou-se uma resina poliéster cujas propriedades físicas utilizadas na simulação são apresentadas na Tab. (1).

Tabela 1: Parâmetros físicos da resina poliéster (20).

<b>Propriedades da Resina</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidades</b>
Densidade	1,19	g/cm <sup>3</sup>
Temperatura	25	°C
Viscosidade	330	cP

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### Velocidade de avanço da resina

Um dos importantes parâmetros para a realização da conformação de um compósito via técnica RTM é a velocidade de avanço da resina. É possível permitir a saída do ar completamente do interior do molde e a produção de peças isentas de defeitos utilizando um processo de injeção com baixa velocidade

As linhas de fluxo que indicam o caminho percorrido pelas partículas do fluido são o método de avaliação da velocidade de avanço da resina no interior do molde (21). As linhas de fluxo em diferentes tempos do processo de injeção são exibidas na Fig.4. Observa-se que, em  $t=5$  s (primeiro frame), a resina ainda não havia encontrado as paredes do molde, por isso, é possível observar a região de fluxo laminar da resina e a região de fluxo de ar. Depois de 10 segundos (segundo frame), com o avanço da resina para dentro do molde, ela adota um comportamento radial e linear, o que provoca a saída do ar. Em 35 segundos (terceiro frame), a resina já tocou as paredes do molde e é possível observar que as linhas de fluxo começam encontrar as saídas. Já no quarto frame, a resina já preencheu o molde e as linhas de fluxo adotaram o seu comportamento final (estado estacionário), nascendo na entrada do molde e finalizando nas suas saídas de forma simétrica, é possível observar na parte central e próxima a parede do molde, região sem movimento de fluido. Esta região é propícia para o acúmulo de ar e geração de defeitos pós-cura.

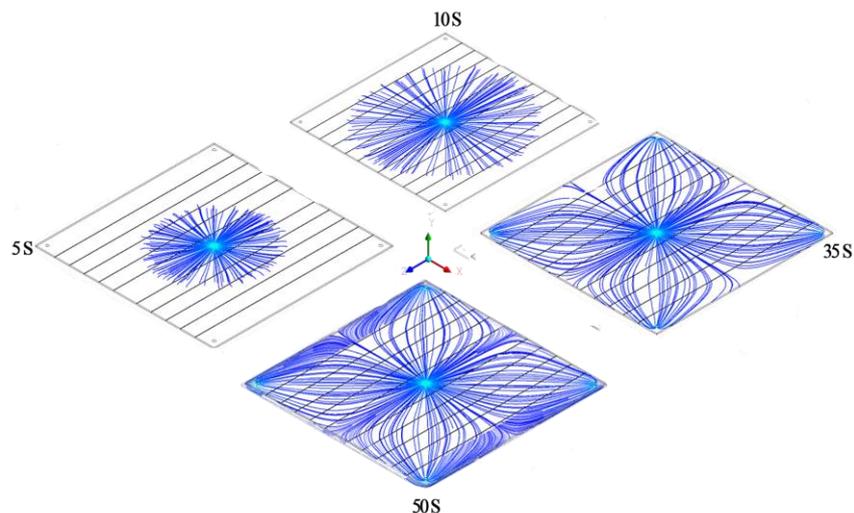


Figura 4: Linhas de fluxo em diferentes tempos de preenchimento.

#### Campos de Fração Volumétrica

Através da avaliação dos campos de fração volumétrica torna-se possível a identificação do completo preenchimento do molde pela resina e, conseqüentemente, a possível ocorrência de bolhas de ar ou formação indesejada do compósito em estudo. É possível avaliar, ao se trabalhar com regime transiente, a forma como a resina avança no interior do molde, o que pode auxiliar tanto na conformação do molde, como num possível ajuste volumétrico, a fim de otimizar o processo de moldagem. A Fig. 5 exibe o avanço da resina no interior do molde no plano  $Y = 0,001$  m. No caso estudado, registra-se um frame a cada 5 segundos do preenchimento. Devido ao sistema de injeção, o escoamento da resina no interior do molde apresenta um comportamento radial. A resina escoava no molde até encontrar as paredes laterais onde escoava em direção às saídas. Observa-se que entre 25 e 30 segundos, a resina quase preenche o molde completamente. A presença de fios afeta o comportamento da frente de avanço da resina, gerando pequenas ondulações na mesma.

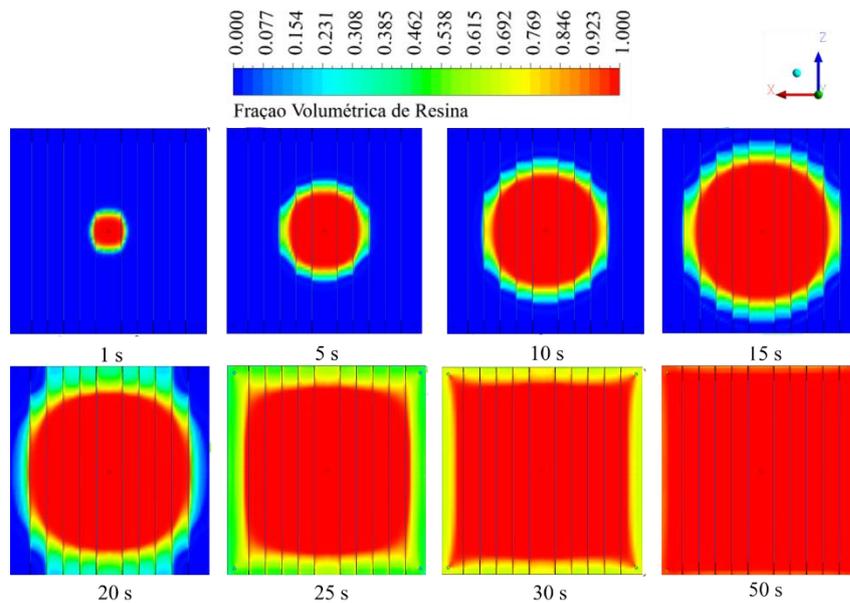


Figura 5: Avanço da resina no molde durante o processo de injeção no plano  $Y=0,001$  m.

A presença dos fios embebidos provoca uma dificuldade adicional ao escoamento da resina, o que pode ocasionar aprisionamento de ar no interior do molde, gerando bolhas de ar no compósito. A presença dessas bolhas no compósito pós-cura gera defeitos que reduzem as propriedades mecânicas do

material. Em um estudo bidimensional não é possível observar estes resultados.

### Variação da Pressão de Injeção

Outro parâmetro essencial durante a moldagem por transferência de resina, é a pressão. Embora a pressão seja um parâmetro de entrada comum no processo de RTM, no presente estudo optou-se por adotar uma velocidade de entrada como condição de contorno. A avaliação da pressão de entrada, permite a obtenção de uma curva deste parâmetro ao longo do tempo, onde é possível determinar a pressão de injeção em uma situação real. A curva de pressão na entrada do molde como uma função do tempo de enchimento do mesmo pela resina é apresentada na Fig. 6.

A partir da análise da pressão ao longo do tempo, nota-se um aumento contínuo neste parâmetro provocado pela quantidade de resina dentro do molde, que aumenta com o tempo, o que dificulta o avanço da resina. O processo alcançou sua condição de estado estacionário após 50 segundos ( $P=104,400$  kPa).

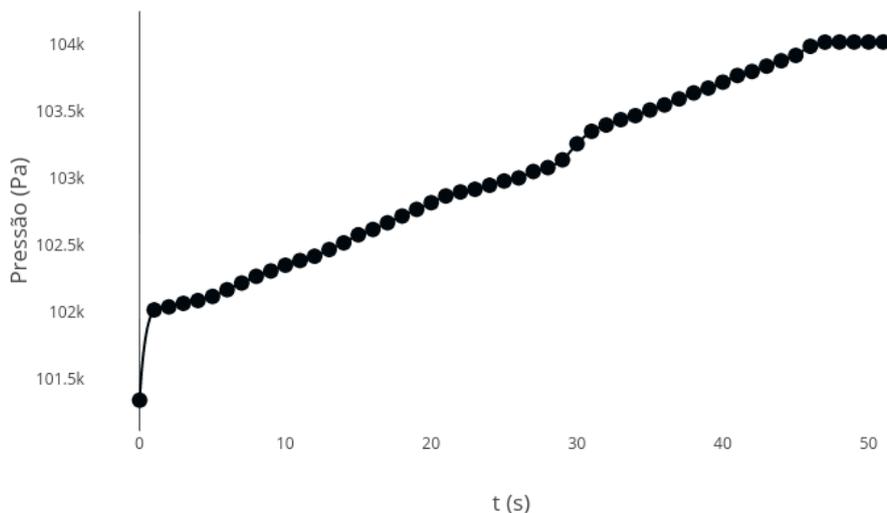


Figura 6: Pressão de entrada do molde em função do tempo de preenchimento.

## **CONCLUSÕES**

Diante da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a) O caso estudado apresentou um comportamento fluido dinâmico particular. O escoamento da resina durante o preenchimento do molde resultou num comportamento radial;
- b) A resina levou 50 segundos para preencher completamente o molde e, houve interação da resina com o ar presente no interior do molde durante o processo de injeção. Esta interação resina-ar pode resultar em uma baixa qualidade do compósito;
- c) Em função da viscosidade da resina, o processo de injeção levou 50 segundos, atingindo altas pressões na entrada do molde. A pressão aumentou com o tempo de injeção.
- d) Para validar os resultados numericamente é necessário que haja uma avaliação experimental do caso estudado, adotando os mais altos valores de pressão de injeção obtidos na entrada do molde.

### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, FINEP e INCT pelo apoio financeiro, bem como aos pesquisadores citados neste trabalho que com suas pesquisas contribuíram para o desenvolvimento da presente pesquisa.

### **REFERÊNCIAS**

- (1) MOTA, C. A. A. Análise térmica de um compósito híbrido com fios NiTi com memória de forma. 2013, 20 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, UFCG/PB, Campina Grande.
- (2) NARESH, K.; SHANKAR, K.; RAO, B. S.; VELMURUGAN, R. Effect of high strain rate on glass/carbon/hybrid fiber reinforced epoxy laminated composites. *Composites Part B*, v. 100, p. 125-135, 2016.
- (3) SANDOVAL C. D. Desenvolvimento de uma metodologia para a fabricação de compósitos híbridos com memória de forma. 2010, 118 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos - Mecânica) - Universidade de Brasília, UnB/DF, Brasília.
- (4) ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. *Ciência e Engenharia dos Materiais*. São Paulo: Ed. Cengage Learning, 2008.
- (5) CALLISTER, W. D. *Materials Science and Engineering: Na Introduction*. New York: LTC, 2002.
- (6) BROCKS, T. Compósito estrutural carbono/epóxi via RTM para aplicação aeronáutica: processamento e caracterização. 2011, 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Unesp/SP, Guaratinguetá.

- (7) MORREN G.; BOTTIGLIERI, M.; BOSSUYT, S.; SOL, H.; LECOMPTE, D.; VERLEYE, B.; LOMOV, S. V. A reference specimen for permeability measurements of fibrous reinforcements for RTM. *Composites Part A*, v. 40, p. 244, 2009.
- (8) FONTOURA, C. M. Desenvolvimento de hélice de material compósito polimérico utilizando a moldagem por transferência de resina. 2005, 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Ciência e Tecnologia dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS/RS, Porto Alegre.
- (9) AMORIM, W. F. J. Processamento de placa espessa de compósito através de moldagem por transferência de resina. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/RJ, Rio de Janeiro.
- (10) FLAMÍNIO, L. N.; PARDINI, L. C. *Structural Composites: Science and Technology*. São Paulo: Edgar Blucher, 2006.
- (11) LUZ, F. F. Análise comparativa do escoamento de fluido em experimentos RTM utilizando aplicativos comerciais. 2011, 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia - Ciência e Tecnologia dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS/RS, Porto Alegre.
- (12) DAVIS, B. A. Investigation of the thermomechanical response of shape memory alloy hybrid composite beams. 2005. Tese (Doutorado) - North Carolina State University, NC University/NC, Raleigh.
- (13) OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. *Shape Memory Materials*. United Kingdom: Cambridge University Press, 1998.
- (14) SILVA, M. M.; SILVA, N. J.; SANTOS, M. A.; ARAÚJO, C. J. Efeito do reprocessamento por plasma nas propriedades físicas e mecânicas de uma liga Cu-Al-Ni com memória de forma. In: 61º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, Rio de Janeiro, RJ, 2006.
- (15) CASTILHO, W. S. Caracterização termomecânica de compósitos híbridos com memória de forma. 2008, 325 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) - Universidade de Brasília, UnB/DF, Brasília.
- (16) FALUHELYL, P. Fabricação e comportamento termomecânico de compósitos estruturais adaptativos com filamentos de liga NiTi. 2013. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, UnB/DF, Brasília.
- (17) LEAL, A. S. C. Estudo térmico em nanocompósitos epóxi/argila organofílica reforçados com fios NiTi. 2015, 120 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, UFCG/PB, Campina Grande.
- (18) LEAL, A. S. C.; SILVA, S. M. L.; ARAÚJO, C. J. Comportamento termomecânico de compósitos ativos preparados com nanocompósitos epóxi/argila organofílica e fios de liga NiTi com memória de forma. *Polímeros*, v. 22, p. 134-141, 2012.
- (19) ARAÚJO, G. S. Estudo Numérico do Escoamento Trifásico de Óleo Pesado, Água e Gás em Dutos Horizontal e Vertical via Técnica Core-Flow. In: 8º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, Curitiba, PR, 2015.
- (20) OLIVEIRA, I. R. Infiltração de fluidos carregados em meios porosos via processo RTM: análise teórica e experimental. 2014. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, UFCG/PB, Campina Grande.
- (21) FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. São Paulo: Ed. LCT, 2001.

## **MANUFACTURING OF POLYMER COMPOSITES REINFORCED WITH NiTi METALLIC ALLOYS VIA TECHNICAL RTM: SIMULATION VIA CFX**

S.K.B.M. Silva<sup>1\*</sup>, R.Q.C. Melo<sup>1</sup>, C.J. Araújo<sup>2</sup>, A.G.B. Lima<sup>2</sup>, T.H.F. Andrade<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Engineering, Center of Science and Technology, Federal University of Campina Grande, 882 Aprígio Veloso Avenue, Campina Grande, Zip code: 58429-900, Paraíba State, Brazil.

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Center of Science and Technology, Federal University of Campina Grande, 882 Aprígio Veloso Avenue, Campina Grande, Zip code: 58429-900, Paraíba State, Brazil.

\*katherine.b.moura@gmail.com

### **ABSTRACT**

*The gradual need to replace traditional materials for high performance materials that have good strength and adequate mechanical properties has driven the development of composite materials. Composites are materials with wide applicability in various industries. The polymer composites reinforced with metallic alloys have attracted great interest due to their high mechanical properties. In this context, this study aims to numerically study the manufacturing of polymer composites reinforced with NiTi alloys via RTM process with the help of ANSYS CFX software. The mathematical model consists of mass and momentum equations applied to a three-dimensional metallic mold containing ten NiTi alloy wires. Results of flow front position of the resin, streamlines, pressure and velocity fields during the process, are presented and analyzed.*

**Keywords:** composites, metallic alloys, RTM, CFX, simulation.