



XXIV CREAM  
Congresso Nacional de Estudantes  
de Engenharia Mecânica



Universidade Federal  
do Rio Grande



INSTITUTO FEDERAL  
RIO GRANDE DO SUL  
Campus Rio Grande

## XXIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 11 a 15/09/2017 – Rio Grande - RS

### SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO RTM APLICADA A UM CAPACETE DE USO MILITAR

**Otavio Duarte Aires Heckler**

Universidade Federal do Rio Grande  
Av. Itália, km 8, s/n, CEP 96203-900, Rio Grande – RS  
otaviooduarte@gmail.com

**Jeferson Avila Souza**

jasouza1974@gmail.com  
Universidade Federal do Rio Grande  
Av. Itália, km 8, s/n, CEP 96203-900, Rio Grande – RS

**RESUMO:** Nos últimos anos, a moldagem por transferência de resina (RTM) atraiu muita atenção na área de compósitos termofixos de alta performance, principalmente para a produção de peças com geometrias complexas. Este processo vem sendo utilizado pelas indústrias automotiva, naval e aeroespacial. O Processo RTM consiste na injeção de uma resina polimérica em um molde fechada, infiltrando um reforço fibroso disposto previamente dentro dele. Nesse trabalho é simulado a infusão de resina em um capacete balístico militar utilizando softwares *Open-source*. A simulação é feita no software *OpenFOAM*, e o objetivo é analisar o comportamento do avanço da resina em função do tempo no interior do molde. Os resultados mostraram que o posicionamento dos pontos de injeção e saída da resina são uma importante variável de projeto do molde que precisa ser determinada antes da construção do mesmo.

**Palavras-Chave:** RTM; OpenFOAM; Simulação Numérica; Capacete militar;

**ABSTRACT:** In recent years, resin transfer molding (RTM) has attracted a lot of attention in the area of high performance thermosetting composites, mainly for the production of parts with complex geometries. This process has been used by the automotive, naval and aerospace industries. The RTM process consists of injecting a polymer resin into a closed mold, infiltrating the fibrous reinforcement previously disposed therein. In this work it will be simulated resin infusion in a military ballistic helmet using Open-Source software. All simulations are performed with OpenFOAM software, and main goal is to study resin behavior, as a function of time, inside mold cavity. Results have shown that correct positioning of inject and vents ports are a key issue in mold design and should be performed before mold construction.

**Keywords:** RTM; OpenFOAM; Numerical Simulation; Military helmet.

### INTRODUÇÃO

Um compósito pode ser constituído por uma matriz polimérica, metálica ou cerâmica. Os polímeros podem ser reforçados pela inclusão de materiais fibrosos e/ou particulados (Callister, 2000; Matthews e Rawling, 1994). O uso desses materiais vem aumentando pela indústria mundial, já são usados intensamente na fabricação de uma grande variedade de produtos, incluindo aeronaves, embarcações de pequeno e médio portes, coletes à prova de balas e blindagens de automóveis e capacetes militares. O objetivo principal da produção do compósito é combinar diferentes propriedades para produzir um compósito que possua propriedades superiores aos dos materiais isolados (Silva apud Magalhães, 2009).

A moldagem por transferência de resina (RTM) é uma das tecnologias mais promissoras disponíveis hoje, é capaz de fazer geometrias tridimensionais complexas com alto desempenho mecânico, com uma ótima tolerância dimensional e alto acabamento superficial. Com o processo de RTM é possível fabricar peças complexas tridimensionais de forma quase líquida, oferecendo produção de peças estruturais econômicas em quantidades de médio volume usando ferramentas de baixo custo. É um processo de fabricação que objetiva a produção de compósitos de elevado desempenho mecânico a partir de pré-formas secas e, geralmente, usando-se uma resina termorrígida de baixa viscosidade. Tal processo necessita basicamente de alta pressão, vácuo relativamente baixo e de um molde rígido que, por sua vez, deve suportar a pressão de injeção e, consequentemente, garantir a geometria final da peça produzida (Susanna Laurenzi and Mario Marchetti, 2012).

O RTM é um processo mais barato e tem sido empregado principalmente quando a fração volumétrica de fibras deve ser elevada (maior que 50%) e, também, quando se requer que a peça produzida apresente boas características

superficiais em ambos os lados (Brocks et al., 2013). O processo RTM se baseia em quatro estágios: primeiramente a colocação do reforço na cavidade do molde; o segundo estágio é após o molde ser selado, quando começa a infiltração da resina no molde; o terceiro passo é após a injeção, quando ocorre a cura da resina; por último é a abertura do molde e a desmoldagem da peça. O RTM é um processo recomendado para produção de componentes de pequeno e médio porte, e que necessitam de acabamento liso em ambas as faces (Giovedi et al., 2011).

Os processos chamados de moldagem líquida são por sua vez mais vantajosos tecnicamente, devido a sua aplicação a uma gama grande de componentes. Os moldes necessários são geralmente de construção leve e baixo custo, resultando em um menor investimento inicial. Sistemas controlados de bombeamento de resina, molde fechado e selado permitem ótimo controle de dimensões e bom acabamento superficial, além do controle de emissão de voláteis, que tem importância crescente por questões de segurança e preservação do meio-ambiente (Jinlian, H., Yi, L., Xueming, S., 2004).

O processo de RTM então, por ser um processo de molde fechado e de moldagem líquida, apresenta uma grande dificuldade no que diz respeito ao controle de vazios durante a injeção. Esta dificuldade se faz presente, pois a impregnação das fibras com a resina, se realiza durante o processo de moldagem. O controle de formação de vazios é necessário devido ao mesmo provocar problemas estruturais, bem como alteração nas propriedades mecânicas, nos componentes desenvolvidos através do processo de RTM, diminuindo a qualidade do componente (Jinlian, H., YI, L., Xueming, S., 2004).

Neste trabalho realizaremos uma simulação de um processo de RTM em um capacete militar, visto que é uma geometria complexa, sendo assim favorável a utilização do RTM. A simulação será feita no software *OpenFOAM*, a partir dela podemos analisar a infiltração da resina no molde e o tempo de ciclo do processo, todo o processo foi feito com softwares *Open-Source*.

A geração da malha foi feita utilizando o software *HELIX-OS*. É uma interface gráfica de usuário de código aberto projetada para trabalhar nativamente com as bibliotecas do *OpenFOAM*. A *GUI* é desenvolvida pelo *ENGYS* usando Java + VTK e entregue ao público sob a *GNU General Public License*.

## METODOLOGIA

Um capacete balístico militar é utilizado como referência para a criação da geometria, no qual a partir dela será criado a malha com o seu meio poroso onde irá ocorrer a infiltração de resina.



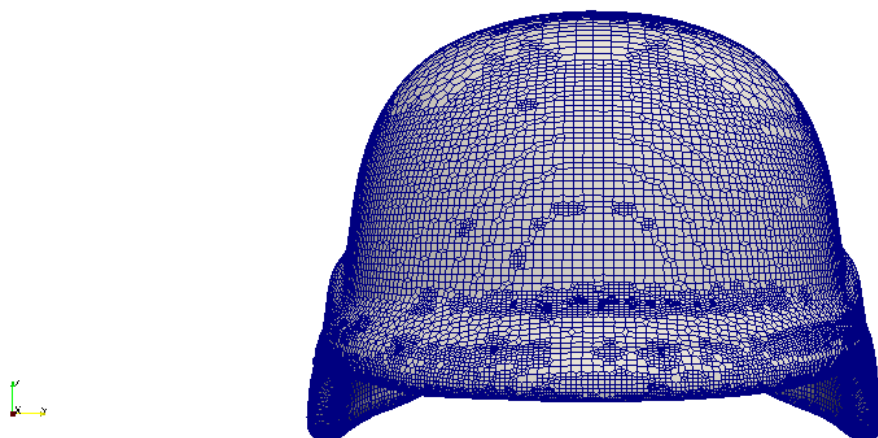
**Figura 1.** Capacete militar

### Geometria e domínio computacional

A figura 1 mostra a geometria utilizada. Para poder realização da simulação, foi preciso fazer algumas modificações na geometria a fim de poder definir suas condições de contorno. As entradas e saídas da geometria foram definida no software *FreeCad*, onde foi necessário selecionar as superfícies triangulares do arquivo do tipo *stl* para poder delimitar as regiões como a superfície de entrada e de saída de resina (e ar).

### Geração da malha

A geração da malha foi feita utilizando o software *HELIX-OS*. Nesse software utilizamos a ferramenta *SnappyHexMesh* para a geração da malha a qual posteriormente exportada para ser utilizada no *OpenFOAM*, A Fig. 2 mostra a malha utilizada na presente simulação.



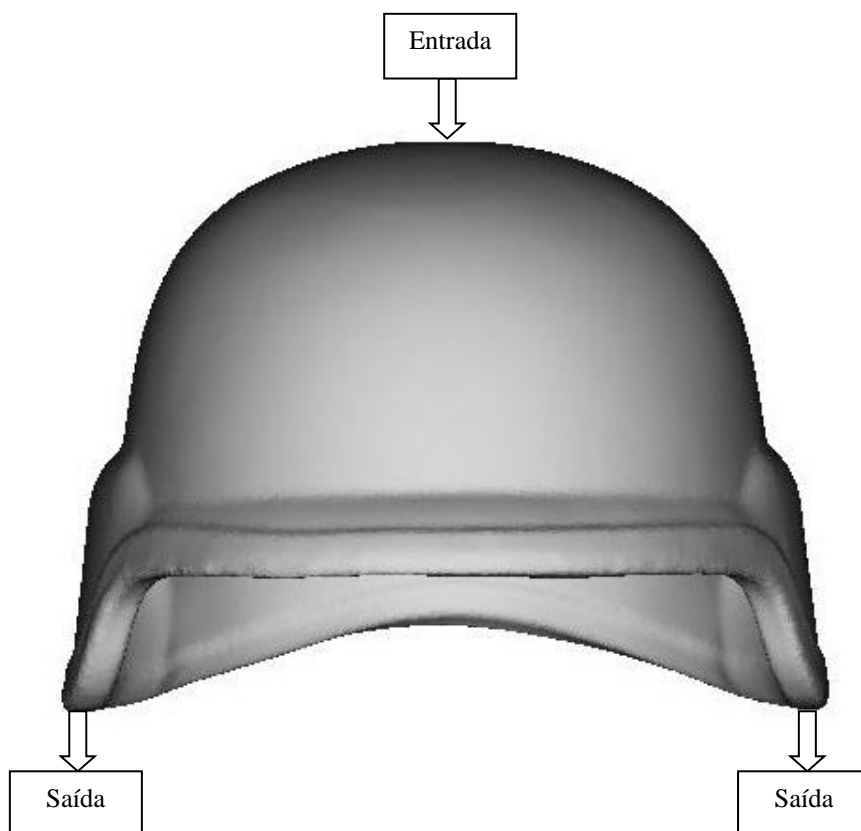
**Figura 2.** Malha do capacete gerada

O nível de refinamento da malha foi conforme mostra a tabela 1:

Tabela 1. Parâmetros utilizados na construção da malha		
Superfície	Refinamento mínimo	Refinamento máximo
Capacete	0	5
Entrada	0	5
Saídas	0	5

### Condições de contorno

As condições de contorno do problema são mostradas na Fig. 3. A entrada de resina é realizada pela parte superior do capacete e as saídas na parte lateral inferior. Na entrada foi definida uma pressão prescrita ( $P_0 = 1 \text{ bar}$ ) e uma fração de volume ( $\alpha = 1$ ), enquanto que as saídas foram definidas com uma pressão igual a zero e um gradiente zero para  $\alpha$ . As paredes tem velocidade igual a zero (condição de não deslizamento) e o gradiente zero para  $\alpha$ . Inicialmente, a fração de volume e os campos de velocidade foram ajustados para zero em todo domínio computacional. As propriedades Físicas e condições de operações são mostradas na Tab. 2.



**Figura 3.** Condições de contorno no capacete

Tabela 2: Propriedades Físicas e condições de operações

	Símbolo	Valor	Dimensão
Courant number	$Co = V \cdot \Delta t / \Delta x$	0.5	
Inlet Pressure	$P_0$	1	bar
Densidade	$\rho$	1109,63	$\text{Kg/m}^3$
Viscosidade cinemática	$\nu$	2,7E-4	$\text{m}^2/\text{s}$
Porosidade	$\varepsilon$	0,536	
Permeabilidade	$K$	2,03E-10	$\text{m}^2$

### Modelo matemático

A simulação do processo de RTM é feita no software *OpenFOAM*. Para tanto utiliza-se o solver *porousInterFoam* que utiliza o método *VOF (volume of fluid)*. A solução se baseia em um modelo de dois fluidos imiscíveis (resina e ar) e o escoamento é dito isotérmico e incompressível. As simulações são realizadas em regime laminar e a geometria do capacete, a menos dos canais de entrada e saída de resina, são considerados como regiões de meio poroso. Na formulação do VOF todas as fases são bem definidas, sendo que uma fase não pode ocupar o volume da outra. Neste método é utilizada uma função chamada de fração volumétrica,  $\alpha$ , que é definida como:

Se  $\alpha=0$  a célula é totalmente preenchida com ar;

Se  $\alpha=1$  a célula é totalmente preenchida com resina;

Se  $0 < \alpha < 1$  a célula contém no interior as duas fases, ar e resina.

No processo de infusão de resina, a resina flui através de um reforço fibroso que pode ser modelado como um meio poroso. Portanto, este fluxo pode ser assumido de acordo com a Lei de Darcy, a qual estabelece que a taxa de fluxo de resina por unidade de área é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade da resina (Morren, G., et al, 2009), a qual é descrita matematicamente por

$$\vec{v} = -\frac{K}{\mu} \cdot \nabla P \quad (1)$$

onde  $\vec{v}$  é a velocidade do fluido [m/s],  $K$  a Permeabilidade do meio poroso [m<sup>2</sup>],  $\mu$  a viscosidade do fluido [Pa s] e  $P$  a pressão exercida no fluido [Pa]. Considerando a resina com propriedades físicas constantes e um fluido incompressível, a equação da conservação da massa é dada por:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

Equação do momento é a seguinte:

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu \cdot \bar{\tau}] + \rho \vec{g} + \vec{F} + \sigma k \nabla \alpha \quad (3)$$

onde  $\rho$  é a massa específica da resina [kg/m<sup>3</sup>],  $\vec{g}$  é vetor da gravidade [m/s<sup>2</sup>], e  $\tau$  é o tensor de tensão [Pa]. O tensor de tensão ( $\tau$ ) é dado por:

$$\bar{\tau} = \mu[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I] \quad (4)$$

no qual  $I$  é o tensor da unidade.

O termo  $\vec{F}$  na Eq. (3) é utilizado para modelar as forças externas ao escoamento. Esta é usada para modelar a resistência ao fluxo através do meio poroso. A partir da lei de Darcy (Eq. (1)), é possível escrever

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

onde  $K$  é a permeabilidade [m<sup>2</sup>].

As propriedades físicas são médias entre as fases avaliadas em função da fração de volumétrica (Srinivasan et al., 2011) como

$$\rho = \alpha \cdot \rho_{resin} + (1 - \alpha) \cdot \rho_{ar}, \quad (6)$$

$$\mu = \alpha \cdot \mu_{resin} + (1 - \alpha) \cdot \mu_{ar} \quad (7)$$

## RESULTADOS e DISCUSSÃO

A utilização da simulação numérica é muito importante para avaliar os melhores parâmetros para se utilizar no processo, visto que com ela podemos escolher os melhores métodos para a injeção da resina no molde. Além do mais, podemos aprimorar o tempo de ciclo e potencializar o processo de produção. Por isso o processo RTM vem com um crescente, visto que é possível ter uma alta produtividade, baixo custo de produção, baixa emissão de resíduos e um bom acabamento final do produto.

A Figura 1 mostra o avanço da resina (em vermelho) para dois instantes de tempos distintos. Como pode ser observado na Fig. 1, a injeção é feita por um ponto na parte superior do capacete e a saída de ar (e resina) é feita na parte inferior das laterais, mostrados na Fig. 1.





$t = 2 \text{ s}$



$t = 37 \text{ s}$

Fonte: O autor.

Em síntese, nesta primeira simulação foram obtidos bons resultados, porém a configuração de entrada e saída da resina não são adequadas, visto que foram geradas bolhas de ar que podem comprometer a estrutura e provocar perda das propriedades mecânicas do material. Esses vazios estão localizados nas bordas inferiores do capacete. A geração da malha é um ponto crítico deste trabalho. Foram realizadas várias tentativas até que fosse obtida uma malha cuja solução convergisse com um tempo de simulação não proibitivo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A simulação foi de extrema importância para analisar a infiltração da resina no molde, visto que foi utilizado uma geometria complexa no formato de um capacete militar. Busca-se determinar o melhor método de injeção, contudo os resultados obtidos nesta primeira simulação ainda não são satisfatórios. São observadas bolhas de ar perto dos pontos de saída do molde. O estudo continua com a modificação dos pontos de injeção e saída de tal maneira a minimizar os problemas encontrados.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), visto que o trabalho foi executado com o auxílio do CNPq PIBIC/PIBITI-FURG.

## REFERÊNCIAS

- Brocks, T. Compósito estrutural carbono/epóxi via RTM para aplicação aeronáutica: processamento e caracterização. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.
- Callister J., W.B. (2000). Characteristics, applications and processing of polymers. In: Materials Science and Engineering: An Introduction. 5th edition. LTC New York, cap 16.465-509p.
- Giovedi, C., Marinucci, G., Rouse, P.R., Cláudio, A.L.L. Determinação das Frações Volumétricas de Compósito de Fibra de Carbono e Matriz Epóxi por Diferentes Metodologias. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto Alegre, 2004.
- Jinlian, H., Yi, L., Xueming, S., 2004, “Study on Void Formation in multi-layer woven fabrics.”, Composites: Part A 35, 595-603.
- Magalhães, A.C.T.V., Estudo de fibras vegetais, mucilagem de cacto e gesso e 134 componentes construtivos, Dissertação de Mestrado em Arquitetura, Universidade de Brasília; 2009.
- 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,” Compos Part Appl Sci Manuf, 40(3), 244-250, 2009. DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.11.011.



**XXIV CREEM**  
Congresso Nacional de Estudantes  
de Engenharia Mecânica



**Universidade Federal  
do Rio Grande**



**INSTITUTO FEDERAL**  
**RIO GRANDE DO SUL**  
Campus Rio Grande

- Silva, LUIS CARLOS, 2014, “Comportamento Balístico de Compósitos Epóxi-Fibra Natural em Blindagem”. Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Doutorado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, 2014.
- Susanna Laurenzi and Mario Marchetti (2012). Advanced Composite Materials by Resin Transfer Molding for Aerospace Applications, Composites and Their Properties, Prof. Ning Hu (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/48172. Disponível em:<<https://www.intechopen.com/books/composites-and-their-properties/advanced-composite-materials-by-resin-transfer-molding-for-aerospace-applications>>
- V. Srinivasan, A. J. Salazar and K. Saito, Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology, Appl. Math. Model. 35(8) (2011), 3710-3730.

## **DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

O autor é o único responsável pelo material impresso contido neste artigo.