

## SOLUÇÃO NUMÉRICA PARA RTM UTILIZANDO O OPENFOAM

### *RTM NUMERIC SOLUTION USING OPENFOAM*

Carla Machado Bulsing Dutra<sup>1</sup>  
Cristiano Peres Oliveira<sup>2</sup>  
Sandro Campos Amico<sup>3</sup>  
Jeferson Avila Souza<sup>4</sup>

**Resumo:** O presente trabalho propõe a utilização do software OpenFOAM para a resolução de problemas de Moldagem por Transferência de Resina (RTM). No decorrer do estudo é apresentada uma contextualização sobre a utilização dos métodos numéricos na engenharia e em especial em problemas de RTM. É apresentado o modelo matemático e discutida a solução através do método VOF (*Volume of Fluid*), já a modelagem computacional é feita com a utilização do solver *interFoam* pertencente ao software livre OpenFOAM, os resultados numéricos são obtidos a partir da resolução com esse software e a validade da solução é discutida através de uma comparação com dados experimentais encontrados na literatura, bem como através de uma comparação com a solução numérica obtida com o software comercial FLUENT, que também foram obtidos nas referências desse trabalho. Pode-se inferir que os resultados obtidos são satisfatórios e que estão em concordância com os referenciais adotados, a diferença máxima obtida na comparação entre a solução numérica e os dados experimentais foi de 9,83%, enquanto que a diferença mínima foi de 1,49%, comparando-se o tempo final de injeção. Já a comparação numérica entre o FLUENT e o OpenFOAM apresentou diferença máxima de 3,80% enquanto que a diferença mínima foi de 0,99% o que demonstra que a técnica é promissora e ainda pode ser aprimorada com a inclusão de outros fenômenos que ainda não foram suficientemente exploradas na modelagem computacional dos problemas estudados.

**Palavras-chave:** RTM. Simulação Numérica. OpenFOAM. Modelagem Computacional.

**Abstract:** Current work proposes the use of OpenFOAM software to solve Resin Transfer Molding Problems (RTM). Numerical solution of engineering problems, mainly RTM problems, is contextualized and discussed in text. Resin injection numerical solution is obtained with the VOF (*Volume of Fluid*) method which mathematical formulation is presented and discussed. *InterFoam* solver, a package in OpenFOAM application, is used to solve the problem and obtained numerical results are validated by direct comparison with experimental data from literature and a FLUENT solution also taken from literature. Results have presented a good qualitative concordance with experimental data with filling time difference varying between 1.48% and 9.83%. Comparison between FLUENT and OpenFOAM software numerical solution has varied between 0,99% and 3.80%. As an overall evaluation, presented solution has shown to be very promising, however it may be improved by the inclusion of new physical phenomena to current available numerical solutions.

**Keywords:** RTM. Numerical Solution. OpenFOAM. Computational Modeling.

---

<sup>1</sup>Licenciada em Matemática. Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). carlabulsing.cb@gmail.com.

<sup>2</sup>Mestre em Modelagem Computacional. Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). cristiano.oliveira@unipampa.edu.br.

<sup>3</sup>Doutor em Engenharia Mecânica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). amico@ufrgs.br.

<sup>4</sup>Doutor em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande (FURG). jasouza@furg.br.

# 1 INTRODUÇÃO

As técnicas numéricas estão sendo amplamente utilizadas em pesquisas científicas a fim de aperfeiçoar e otimizar o processo percorrido na execução dos projetos. O êxito da utilização dessa ferramenta por muitos pesquisadores se deve pelo elevado grau de desenvolvimento relativo ao desempenho dos computadores e de softwares disponíveis atualmente. Os programas de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) são exemplos dessa tendência e que se demonstram satisfatórios na solução de problemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor entre outros fenômenos.

Pode-se destacar, entre outras, as seguintes vantagens com a utilização dos recursos da CFD: redução de custo e de tempo nos projetos de pesquisa, capacidade em pesquisar, bem como aprofundar estudos de sistemas onde as análises experimentais são complexas ou impossíveis e com grau ilimitado de detalhamento de resultados (GOULART, 2014). Esses pacotes são divididos em três etapas: o pré-processamento, a solução (processamento) e o pós-processamento, como aborda Goulart (2014) em seus estudos. No pré-processamento é definido a região de interesse (domínio computacional) onde, a malha é gerada e é selecionado o fenômeno físico que será modelado, enquanto se define as propriedades físico-químicas do fluido e se aplica as condições de contorno e iniciais adequadas. Na etapa do processamento existem diversos métodos aplicáveis para a solução numérica de sistemas de equações diferenciais como, o Método de Diferenças Finitas (MDF), o Método de Volumes Finitos (MVF) e o Método de Elementos Finitos (MEF). Por fim, o pós-processamento, onde os pacotes de CFD dispõem dos resultados qualitativos ou como, por exemplo, topologia dos campos de velocidade e de pressão, entre outros. É possível também a obtenção de resultados quantitativos através do processamento dos dados calculados, os quais são, normalmente, apresentados na forma de gráficos.

Com os avanços tecnológicos e as necessidades do homem contemporâneo em aprimorar as técnicas e os materiais utilizados nas indústrias, torna-se a modelagem numérica como uma possibilidade de auxílio no avanço das pesquisas científicas. Assim, a simulação numérica é uma

ferramenta fundamental nas indústrias e na academia tendo em vista que essa metodologia possibilita que estimativas muitas vezes significativas tornem os projetos de pesquisa economicamente mais viáveis, diminuindo o número de ensaios em laboratório e facilitando as pesquisas para os atuais problemas de engenharia como, por exemplo, o aperfeiçoamento do processo de RTM.

O processo de fabricação de compósitos usando o processo de RTM baseia-se na utilização de um molde fechado e metálico preenchido com um reforço fibroso, que é impregnado com uma resina polimérica (MOLINA; BOERO; SMERIGLIO, 1994). Aspectos como o bom acabamento das peças, baixo custo operacional e produção em larga escala, contribui para a utilização e consequente expansão desse tipo de material na indústria mundial.

A moldagem por transferência de resina obedece a um esquema simples de execução, primeiramente é colocado o reforço fibroso dentro do molde e logo após é injetada resina através de um ou mais pontos de injeção conhecidos como *inlet*. Esse processo de injeção ocorre até que todo o reforço é impregnado e que o molde seja todo preenchido. Após essa fase é necessário que haja a cura da resina para que, finalmente, a peça possa ser retirada do molde. Este processo começou a ser utilizado no Brasil a partir da década de 80 e vêm obtendo destaque na família de processos de Moldagem de Compósito Líquido (LCM) pela eficácia em planejar e produzir peças com bom acabamento e a possibilidade de produção em larga escala. Além disso, outras vantagens do RTM são evidentes em relação a outras técnicas como: utilizar diversas fibras e tecidos para a produção de partes complexas uso de distintos tipos de resina, moldar peças de tamanho grande, possibilidade de integração de partes menores, realizar múltiplos acabamentos superficiais da peça moldada (AMORIM JR., 2007), entre outros benefícios.

Para a resolução dos problemas de RTM são utilizados programas de CFD e a simulação numérica desenvolve um papel fundamental, pois conforme Milanese (2012), um dos principais objetivos de se utilizar o processo de RTM é minimizar os espaços vazios que são facilmente encontrados em compósitos processados por compressão que pode ser diminuído com cuidados em relação à temperatura e na velocidade de fluxo de resina injetada no molde. Assim, a

comunidade científica vem esforçando-se para compreender e desenvolver numericamente como realmente ocorre o avanço da resina no molde e as melhores condições para que não ocorram vazios ou falhas na fabricação do compósito.

Inúmeros trabalhos de simulação numérica utilizando o processo de RTM são encontrados na literatura. Alguns autores como Calado e Advani (1996) e Chen, Ye e Hongyuan (2004) se detêm em tentativas de determinação da permeabilidade efetiva em meios multicamadas. Outro aspecto que demanda um esforço da comunidade científica diz respeito ao estudo de formação de vazios dentro do molde. Pode-se recorrer ao trabalho de Jinlian, Liu e Xueming (2004) que descreve um modelo matemático para possível formação de vazios e demonstra que a relação entre a permeabilidade e a deformação da permeabilidade transversal é uma das possíveis causas para que se criem os vazios no molde. Outros autores como Oliveira (2010) e Ribeiro, Souza e Amico (2007) buscam validar suas soluções numéricas através de dados experimentais e analíticos e apresentam boa concordância nos estudos realizados, porém se utilizaram de softwares que não são livres, o que por vezes pode trazer algumas limitações quanto à aquisição de licenças.

Para realização desse trabalho utilizou-se o software OpenFOAM - versão 3.0.1. Este programa foi criado em 1989 por Henry Weller e foi lançado como código aberto em 2004, onde dentre os recursos disponíveis é possível destacar: dinâmica de fluidos, geometria, análise de dados, solução numérica, programação, entre outros. Também contém ferramentas para geometria complexa, processamento de dados e visualização.

Neste artigo é proposto a realização de uma comparação numérica x experimental. Será simulado no software OpenFOAM três casos de fibras, sendo elas, Fibra de Sisal (FS), Fibra de Vidro (FV) e Fibra de Polipropileno (PP) para problemas de RTM. Por meio dos resultados obtidos com o programa de CFD OpenFOAM, pretende-se realizar uma comparação com as soluções encontradas por este e os dados experimentais e a solução numérica do FLUENT, salienta-se que esses dados serão extraídos da literatura em casos de uma camada.

## 2 MODELO MATEMÁTICO

Nos problemas de Moldagem por Transferência de Resina, o modelo matemático que descreve o avanço de resina no molde é fundamentado na Lei de Darcy, expressa na Eq. 1.

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

onde,  $\vec{V}$  (m/s) é a velocidade de escoamento da resina,  $\mu$  (Pa s) é a viscosidade do fluido,  $P$  (Pa) é a pressão e  $\bar{K}$  (m<sup>2</sup>) tensor de permeabilidades do meio poroso.

Para solucionar as equações que descrevem o fluxo de resina no problema de RTM no software OpenFOAM, foi utilizado o método numérico do Volume de Fluido (*VOF – Volume of Fluid*). A discretização das equações a serem resolvidas foi realizada pelo método dos Volumes Finitos.

No VOF as equações da continuidade, da fração volumétrica e da quantidade de movimento são resolvidas e estão expressas respectivamente pelas Eqs. 2, 3 e 4.

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

onde,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) é a massa específica e  $\vec{V}$  é o vetor velocidade (m/s).

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

onde,  $f_i$  é a fração volumétrica da fase  $i$ .

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

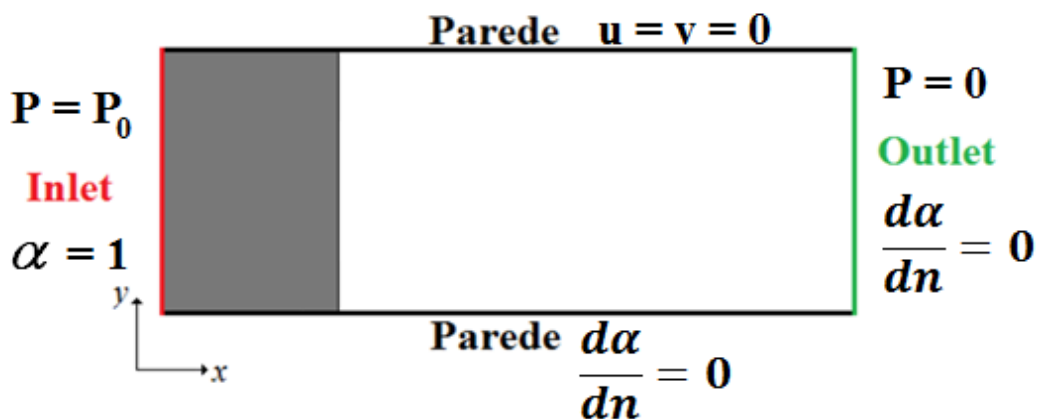
em que,  $\vec{g}$  (m/s<sup>2</sup>) é a aceleração da gravidade,  $\vec{F}$  o termo fonte ou forças externas e  $\bar{\tau}$  (Pa) o tensor de tensões.

Na Eq. 4 o termo  $\vec{F}$  é utilizado em problemas de meios porosos para incluir um termo de força resistiva na equação do movimento que é na realidade a Lei de Darcy.

## 2.1 Modelagem Computacional no OpenFOAM

Os problemas de RTM apresentados nesse estudo foram consultados na literatura e estão de acordo com o domínio computacional e as condições de contorno definidas conforme a Fig. 1:

Figura 1 – Geometria e condições de contorno

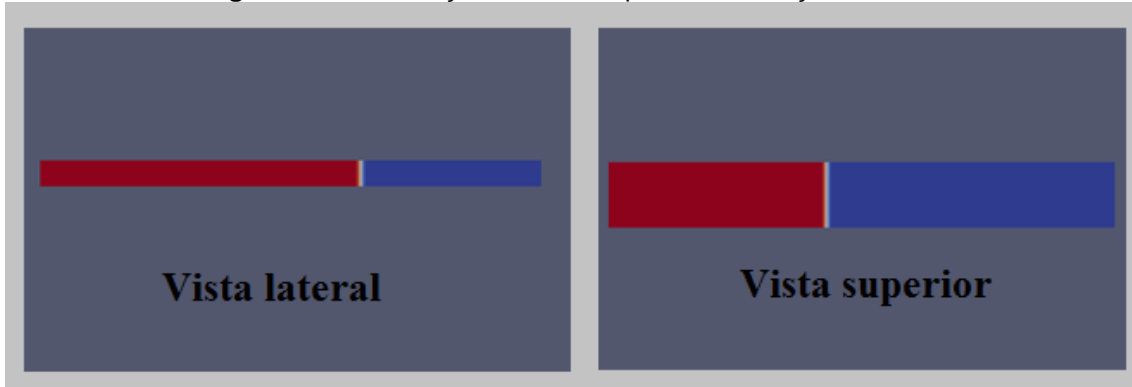


Fonte: Elaborada pelo autor

Onde,  $P$  é a pressão,  $u$  e  $v$  são as velocidades,  $\alpha$  é a fração volumétrica e  $n$  a direção de escoamento.

Neste estudo, propõe-se a utilização do software OpenFOAM para obtenção da solução numérica de problemas de RTM de uma camada. Conforme mencionado anteriormente, serão apresentados dados relativos a três casos de fibras (FS, FV e PP). Na Fig. 2 pode ser visualizada a simulação em casos de uma camada realizada pelo software OpenFOAM em que na figura, a cor vermelha representa a resina sendo injetada e a cor azul é o ar contido dentro do molde.

**Figura 2** – Visualização lateral e superior do avanço de resina



Fonte: Elaborada pelo autor

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, apresenta-se os resultados obtidos com o software OpenFOAM em comparação com os dados experimentais e o programa FUEENT.

As propriedades referente a FV, FS e PP utilizadas para as simulações proposta neste estudo, estão expressas na Tab. 1. Em que,  $K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$  é o tensor de permeabilidade,  $\mu$  é a viscosidade de fluido,  $\varepsilon$  é a porosidade e  $P_0$  é a pressão.

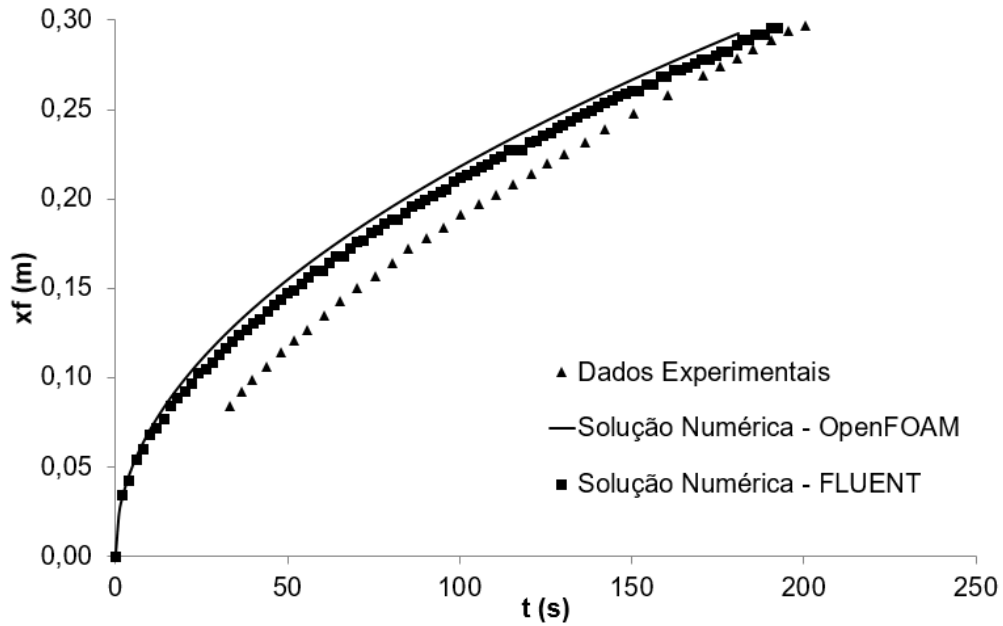
**Tabela 1** – Propriedades das Fibras utilizadas nas simulações dos problemas de RTM

Fibras	$K_{xx} = K_{yy} = k_{zz}(m^2)$	$\mu(Pa \cdot s)$	$\varepsilon(x10^{-2})$	$P_0(x10^5 Pa)$
PP	$1,63 \cdot 10^{-9}$	0,055	80,4	0,0663
FS	$3,96 \cdot 10^{-9}$	0,055	80,3	0,0574
FV	$1,12 \cdot 10^{-9}$	0,065	81,1	0,0545

Fonte: Dados retirados de Oliveira (2010)

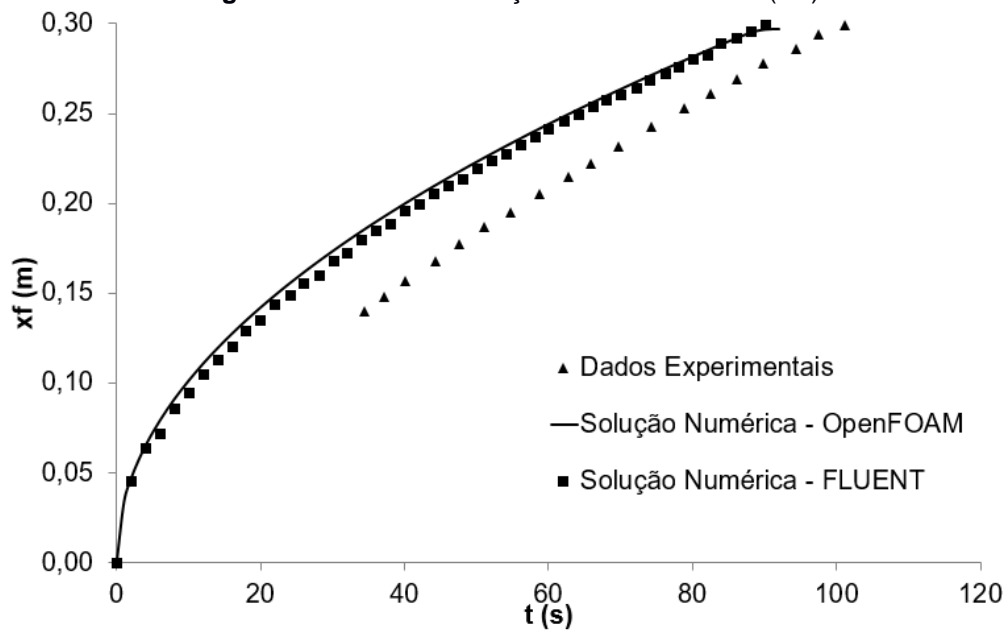
As soluções obtidas pelo OpenFOAM estão representadas nos gráficos das Figs. 3, 4 e 5 em comparação aos dados experimentais e do FLUENT encontrados em (OLIVEIRA, 2010).

**Figura 3** – Gráfico da solução da Fibra de Polipropileno (PP)



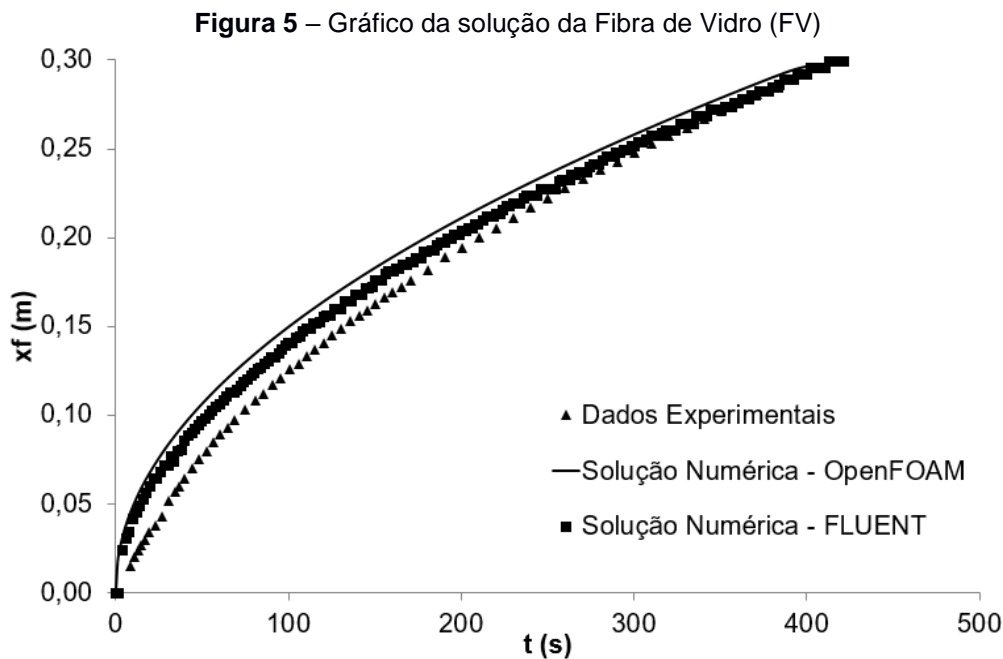
Fonte: Elaborada pelo autor

**Figura 4** – Gráfico da solução da Fibra de Sisal (FS)



Fonte: Elaborada pelo autor





Fonte: Elaborada pelo autor

A partir da análise dos resultados, pode-se perceber que o software OpenFOAM demonstra ser capaz de resolver os problemas de RTM com precisão de forma satisfatória. Aspectos como o efeito de variação de pressão e/ou estudo de malha ainda não foram devidamente testados. No entanto, os resultados preliminares são altamente satisfatórios, considerando uma comparação entre o OpenFOAM e os dados experimentais obtém-se um erro máximo de 9,83% se compararmos o tempo final de injeção, enquanto que na comparação entre o OpenFOAM e o FLUENT esse erro máximo diminui para 3,80%, como pode-se observar na Tab. 2:

**Tabela 2 – Comparação dos Resultados Numéricos x Dados Experimentais/Soluções Numéricas**

Caso	OpenFOAM x Experimental*	OpenFOAM x FLUENT**
Fibra de Polipropileno (PP)	3,24%	3,80%
Fibra de Sisal (FS)	9,83%	0,99%
Fibra de Vidro (FV)	1,49%	1,91%

$$*Erro = \frac{(t_{exp} - t_{OpenFOAM})}{t_{exp}}$$

$$**Erro = \frac{(t_{FLUENT} - t_{OpenFOAM})}{t_{FLUENT}}$$

Fonte: Elaborada pelo autor

Ressalta-se a importância da concordância obtida entre o OpenFOAM e o FLUENT, pois o FLUENT é um pacote de CFD já amplamente utilizado pela comunidade científica e tem boa aceitação no meio acadêmico. A obtenção de

resultados satisfatórios com o OpenFOAM, que é um software livre, abre uma série de possibilidades de ampliação nas pesquisas relativas aos métodos numéricos aplicados à problemas de engenharia.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foi apresentada uma comparação numérica dos softwares OpenFOAM e FLUENT bem como, dos dados obtidos no OpenFOAM em comparação com dados experimentais utilizando três casos com diferentes tipos de fibras. Diante das comparações realizadas, pode-se perceber que o programa OpenFOAM é evidentemente satisfatório em comparação ao FLUENT, este que é um programa com uma vasta expansão de utilização em pesquisas acadêmicas. Convém salientar, que os resultados obtidos nesse estudo são de grande importância, visto que, o OpenFOAM é um software livre. Dessa forma o presente estudo demonstrou que este software é eficaz na resolução de problemas numéricos, especialmente no estudo em questão, o RTM.

## REFERÊNCIAS

- AMORIM JR., W. F. **Processamento de Placa Espessa de Compósito Através de Moldagem por Transferência de Resina**. 2007. Tese de Doutorado em Ciências e Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- GOULART, M. M. **Estudo Numérico da Geometria de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real Empregando Constructal Design**. 2014. Dissertação de Mestrado em Modelagem Computacional. Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, 2014.
- CALADO, V. M. A.; ADVANI, S. G. Effective average permeability of multi-layer preforms in resin transfer molding. **Compos Sci Technol**, vol. 56, n.5, p. 519–531, 1996.
- CHEN, Z.; YE, L.; HONGYUAN, L. Effective permeabilities of multilayer fabric preforms in liquid composite moulding. **Compos Struct**, v. 66, n. 1-4, p. 351-357, 2004.
- JINLIAN, H.; YI, L.; XUEMING, S. Study on Void Formation in multi-layer woven fabrics. **Composites: Part A**, v. 35, n. 5, p. 595-603, 2004.

MILANESE, A. C. **Processamento e Caracterização de Compósito Fibra de Sisal/Resina Epóxi via RTM.** Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Materiais. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

MOLINA, G.; BOERO, G.; SMERIGLIO, P. Resin transfer molding for car body parts – An integrated approach using CAE methodology. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 13, n.8, p. 681-697, 1994.

OLIVEIRA, C. P. **Modelagem Numérica do Transporte de Resina em um Meio Poroso Aplicado ao Processo de RTM.** 2010. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional. Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, 2010.

RIBEIRO, G. G.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C. **Modelagem Numérica do Transporte de Resina no Interior de Moldes Através do Aplicativo Fluent,** in XIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – CREEM, FEMEC/UFU, Uberlândia – MG, 2007.