COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS VOF E FE/CV APLICADOS À SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE RTM

Cristiano Peres Oliveira[1], Jeferson Avila Souza[2], Sandro Campos Amico[3], Liércio André Isoldi[4], Rafael Diego Sonaglio Silva[5]

RESUMO

A moldagem por transferência de resina (RTM) é um processo amplamente utilizado na produção de compósitos poliméricos com as mais diferentes geometrias. É um processo de infusão de resina em um molde fechado e preenchido com um reforço fibroso e poroso. Existem algumas variantes do processo de RTM tradicional, como o RTM *Light* e o VARTM. No estudo desse processo, a simulação numérica desenvolve um papel fundamental, pois através dela pode-se determinar como se dá o avanço da resina no interior do molde e assim perceber possíveis falhas no preenchimento bem como determinar com precisão os pontos mais adequados para a entrada e a saída da resina. Estes fatores possibilitam que haja, por exemplo, uma considerável diminuição do número de ensaios, normalmente de custo elevado, necessários para a construção dos moldes. Para a modelagem numérica do processo RTM são utilizados métodos numéricos para a solução do conjunto de equações diferenciais que governam o problema físico. Nesse trabalho, são apresentados e discutidos os métodos VOF (*Volume of Fluid*) e FE/CV (*Finite Element/Control Volume Method*). Para comparação entre os métodos, foram utilizadas as soluções numéricas apresentadas pelo FLUENT® e pelo PAM-RTM®, onde se obteve uma boa concordância entre esses modelos e os resultados experimentais obtidos.

PALAVRAS-CHAVE: Moldagem por transferência de resina. Modelagem numérica. VOF. FE/CV.

COMPARISON OF THE VOF AND FE/CV METHODS APPLIED TO RTM PROBLEMS

ABSTRACT

The resin transfer molding (RTM) process is largely used for the production of polymeric composites in a variety of shapes and sizes. In RTM, a resin is injected into a closed mold filled with a fibrous reinforcement media. There are many variations of the traditional RTM process, including RTM-light and VARTM. The numerical simulation plays an important role in the study and development of this process, including the prediction of the resin flow-front behavior inside the mold cavity, allowing the identification of undesired non-wetted regions and also the most suitable positions for the inlet and outlet gates. With numerical modeling, it is possible, for example, to reduce mold design costs by reducing the number of necessary laboratory experiments. The numerical modeling is based on the solution of a set of differential equations that describe the physical problem. In the present work, the

[1] Mestre em Modelagem Computacional. Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Email: cristiano.oliveira78@gmail.com

[2] Professor Adjunto da Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Email: jasouza@furg.br

[3] Professor Adjunto da Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande - FURG.

[4] Professor. Adjunto da Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Email: liercioisoldi@gmail.com

[5] Engenheiro de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Email: rafael.sonaglio@ufrgs.br

use of the VOF (Volume of Fluid) and FE/CV (Finite Element/Control Volume) methods to the RTM problem is presented and discussed. Comparison between the two methods was carried out by using two commercial applications FLUENT® and PAM-RTM®. Good agreement between the numerical results and the experimental data was observed for all simulated cases.

KEYWORDS: Resin transfer molding. Numerical modeling. VOF. FE/CV.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de LCM (*Liquid Composite Molding*) vêm sendo cada vez mais utilizados nos setores aeroespacial, automobilístico, entre outros. Dentre as inúmeras variações deste tipo de processo, encontra-se o RTM (*Resin Tranfer Molding*), que devido a fatores como ótimo acabamento em peças de geometria complexa, baixo custo operacional e possibilidade de produção em média escala vem se tornando cada vez mais importante. No processo RTM, um reforço fibroso seco, planejado para que se possa obter a fração volumétrica desejada das fibras, é previamente colocado no molde. Após o fechamento do molde, uma resina líquida pré-catalisada é injetada no molde até que todo o molde seja preenchido, ocorrendo a impregnação das fibras (FIGURA 1) e a subsequente cura dessa resina [1]. Após a cura, o molde é aberto e pode-se retirar a peça. Salienta-se que o molde deve conter pelo menos um ponto de entrada da resina e um ponto de saída de ar, embora em peças maiores seja possível que existam vários pontos, ou canais, de entrada e saída [2].

Para uma moldagem bem sucedida, é necessário que o ar residual do meio fibroso seja totalmente eliminado. No entanto, defeitos nos componentes moldados podem ocorrer, por exemplo, devido à impregnação parcial do reforço ou à formação de micro-vazios durante o estágio de infiltração.

Em alguns casos, o processo RTM multicamadas se apresenta como uma alternativa ao RTM convencional, por exemplo, para diminuir o peso do componente e melhorar a performance mecânica ou outra característica. Nesse processo, camadas com meios porosos distintos (i.e. porosidade, permeabilidade, material) são empilhadas tornando a peça final um “sanduíche” com diferentes camadas.

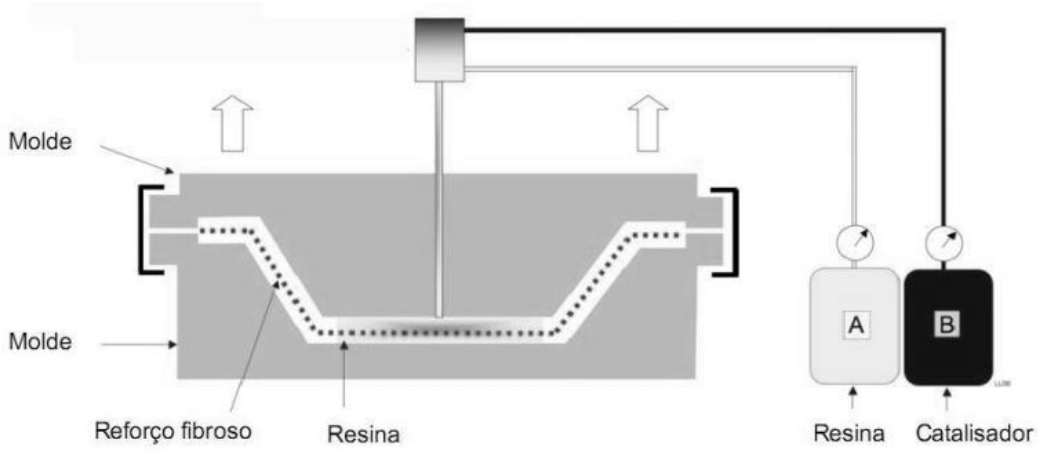


Figura 1 – Processo de RTM [13]

No presente trabalho, são apresentados dois métodos numéricos de solução das equações que descrevem o fluxo da resina dentro do molde no processo de RTM: o VOF e o FE/CV. Esses métodos foram utilizados em dois *softwares* distintos: o FLUENT® que é um código geral de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e utiliza o VOF para resolver problemas multifásicos de fluidos imiscíveis, e o PAM-RTM® que é específico para problemas de RTM. A metodologia utilizada pelo PAM-RTM® não é descrita em detalhes nos manuais [3], contudo, baseado nas informações disponíveis bem como no comportamento da simulação e nas variáveis de controle utilizadas, acredita-se que a metodologia utilizada seja o FE/CV [1,4].

2. MATERIAL E MÉTODOS

Um modelo matemático adequado para descrever o avanço da resina dentro do molde no processo de RTM baseia-se na Lei de Darcy [5] para meios porosos:

$$V = -\frac{K_{ij}}{\mu}\nabla P \qquad (1)$$

onde é a velocidade da resina [m/s], a viscosidade do fluido [Pa s], K_{ij} o tensor de permeabilidade do meio poroso [m^2], P é a pressão [Pa] e i, j = 1, 2 ou 3 representam as componentes do sistema de coordenadas.

No presente trabalho, para a solução dos problemas de RTM foram escolhidos dois métodos comumente encontrados na literatura: o VOF e o FE/CV.

VOF – Volume of Fluid

Foi utilizado o *software* FLUENT®, que é um código geral de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), e o método VOF proposto por Hirt & Nichols [6] para resolver os problemas de RTM propostos neste trabalho. Neste caso, existe a necessidade de discretizar as equações a serem resolvidas [6]. No caso do FLUENT®, a discretização utiliza o método de Volumes Finitos.

O método VOF aplica-se a escoamentos multifásicos de fluidos imiscíveis [1, 7, 8], neste trabalho, o ar e a resina. No presente modelo, as fases são bem definidas, ou seja, as fases são separadas e o volume de uma fase não pode ser ocupado pelo da outra. Para se representar várias fases dentro de um único volume de controle utiliza-se o conceito de fração volumétrica f_i, onde se supõe que essas frações de volume são contínuas no espaço e no tempo e sua soma, dentro de um volume de controle, é sempre igual a um. Nesse sentido, pode-se dizer que as células com valores de f_i entre 0 e 1 contém a interface. Também, se $f_i = 0$ a célula está vazia (a i-ésima fase não existe neste volume), se $f_i = 1$ a célula está cheia (i-ésima fase ocupa todo o volume) e se f_i está entre 0 e 1 a célula contém a interface entre a fase i e uma ou mais fases [9].

Nesse método são resolvidas as equações da continuidade, da fração volumétrica e da quantidade de movimento, como segue:

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

onde, ρ é a massa específica [kg/m^3] e $\vec{V}$ é a velocidade.

Convém salientar que essa equação corresponde à soma da taxa de variação de massa dentro de cada volume de controle com o fluxo de massa que atravessa a superfície de controle [9]. Essa equação mantém o princípio de conservação da massa e é válida para escoamentos compressíveis e incompressíveis.

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

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

$$\frac{\partial (\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla P + \nabla \cdot [\tau_{ij}] + \rho g_i + F_i \tag{4}$$

onde g_i é a aceleração da gravidade [m/s^2], F_i o termo fonte ou forças externas [N], τ_{ij} o tensor de tensões [Pa] e P a pressão [Pa].

Na Equação 4 o termo F_i é utilizado em problemas de meios porosos para incluir um termo de força resistiva na equação do movimento, e desta forma simular o efeito da porosidade do escoamento. Observe-se que este termo é na verdade a Lei de Darcy (Equação 1) [1]. O principal objetivo do VOF para problemas de RTM é determinar como ocorre o avanço da resina dentro do molde.

FE/CV – Finite Element/Control Volume Method

O método FE/CV, em combinação com a técnica FAN (*Flow Analysis Network*) [11], são usados para determinar a localização da frente de fluxo de problemas de dinâmica dos fluídos com uma superfície livre, onde é considerada apenas uma fase. Esse método permite acompanhar a linha de frente do fluxo utilizando uma malha fixa, onde há uma divisão do domínio computacional em células (volumes ou elementos).

Uma única equação diferencial é escrita para a pressão, a qual pode ser resolvida através de um método de volumes finitos, elementos finitos ou diferenças finitas [11]. Para isso, é necessário que haja a discretização das equações a serem resolvidas, que nesse caso resume-se basicamente em determinar o gradiente de pressões pela Equação 4, o campo de velocidades pela Equação 1, o tempo mínimo de preenchimento de cada volume e, finalmente, determinar um fator de preenchimento para cada volume. O processo numérico iterativo do método pode ser descrito resumidamente no esquema apresentado na FIGURA 2 [5, 12]:

Aplicando-se a Equação 2 para um escoamento incompressível, pode-se considerar que ρ é constante, dessa forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \qquad (5)$$

onde t é o tempo [s].

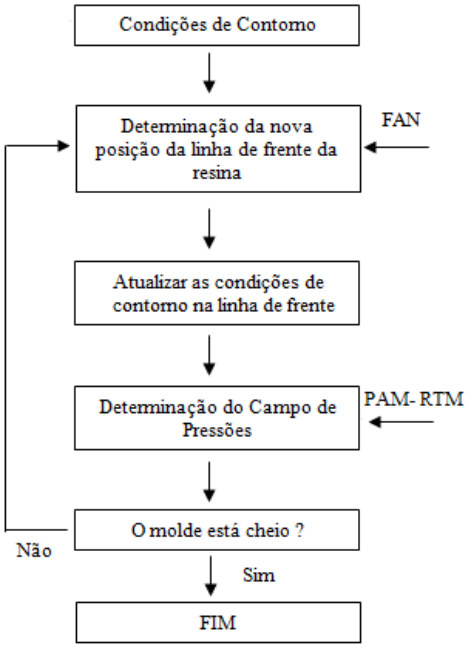


Figura 2 – Algoritmo utilizado na simulação

Combinando a Equação 2 e a Equação 5, e com ρ constante, tem-se:

$$\nabla \cdot (V) = 0 \tag{6}$$

Por outro lado, considerando a Lei de Darcy para meios porosos (Equação 1), com K/μ é constante e combinando com a Equação 6 tem-se finalmente que:

$$\nabla^2 P = 0 \tag{7}$$

$$(\Delta t)_{min} = \min\left(\frac{\forall_i - \forall_i^f(t)}{\dot{\forall}(t)}\right) \tag{8}$$

$$f(t + \Delta t) = \frac{\forall_i^f(t) + \Delta t \dot{\forall}(t)}{\forall_i} \tag{9}$$

o termo $\forall_i$ é o volume total da célula *i* [m³] e $\forall_i^f$ é o tempo de preenchimento de cada volume num tempo t [m³].

A técnica FE/CV pode ser descrita basicamente em três etapas [11]: num primeiro momento deve-se ter a formação das células, ou pré-processamento, onde decide-se por uma das técnicas de discretização (nesse caso, volumes finitos), e gera-se a malha. O

segundo momento destina-se ao cálculo do fluxo, ou ainda, a determinação do tempo mínimo de preenchimento de pelo menos um volume de controle com resina. Em alguns casos, com a malha e a geometria regulares, pode ocorrer que este tempo mínimo de preenchimento seja o mesmo para vários volumes de controle. Após essas etapas, pode-se determinar o avanço do fluxo da linha de frente. Na FIGURA 3, é possível observar uma ilustração de como ocorrem as etapas principais deste método.

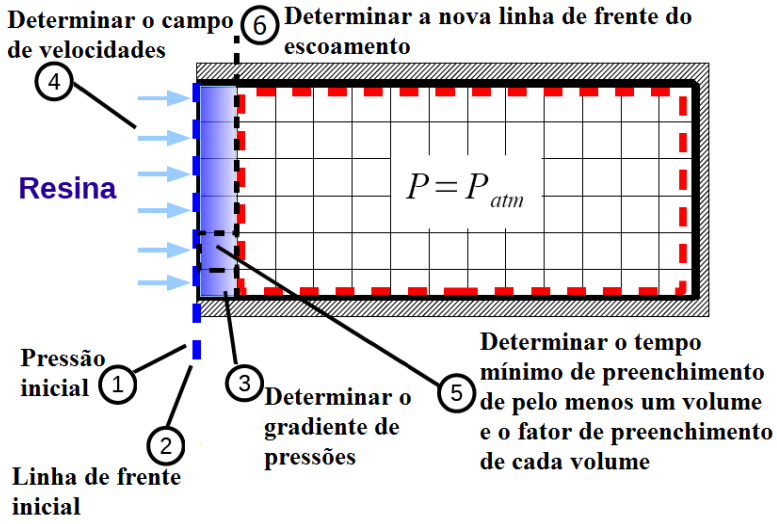


Figura 3 – Ilustração esquemática das etapas de solução com o método FE/CV

Deve ser observado que, à medida que a resina avança, os volumes de controle são preenchidos, ou seja f =1. Nesse momento, a linha de frente será formada por esses volumes. Pode-se perceber mais claramente esse aspecto na Figura 4, onde é apresentada uma parte da malha que está sendo impregnada pela resina. Nota-se que um sub-volume mais escuro é parte de um volume de controle que está totalmente preenchido, f = 1, e assim os pontos j, k e l são considerados pertencer à linha de frente. Desta forma, aplica-se as condições de contorno sobre eles, assim como foi descrito anteriormente.

Diferentemente do método VOF, a técnica FE/CV não apresenta problemas de convergência por apresentar uma solução numérica simples. Apesar da metodologia utilizada pelo PAM-RTM® não ser apresentada em detalhe nos seus manuais, acredita-se que o mesmo utilize a técnica FE/CV nas soluções numéricas, considerando-se as informações disponíveis, os dados requeridos pelo *software* para desenvolvimento do modelo numérico e o comportamento das variáveis de controle envolvidas.

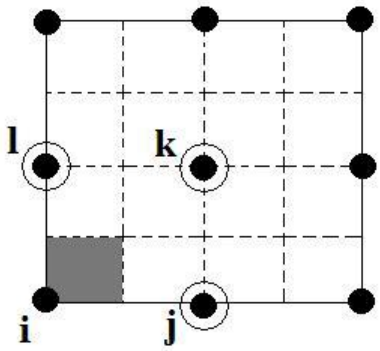


Figura 4 – Determinação da linha de frente

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

A seguir, apresenta-se alguns resultados das soluções numéricas obtidas pelo FLUENT® (VOF) e pelo PAM-RTM® (FE/CV) e validadas através dos ensaios experimentais obtidos no Lapol/UFRGS [1,4]. As simulações foram realizadas de acordo com a geometria e as condições de contorno apresentadas na FIGURA 5, onde o domínio computacional foi dividido em tetraedros, num total de 26120 volumes, considerados nos dois *softwares* utilizados. A linha que aparece no centro do molde serve para determinar o avanço da linha de frente da resina (x_f) em função do tempo (t).

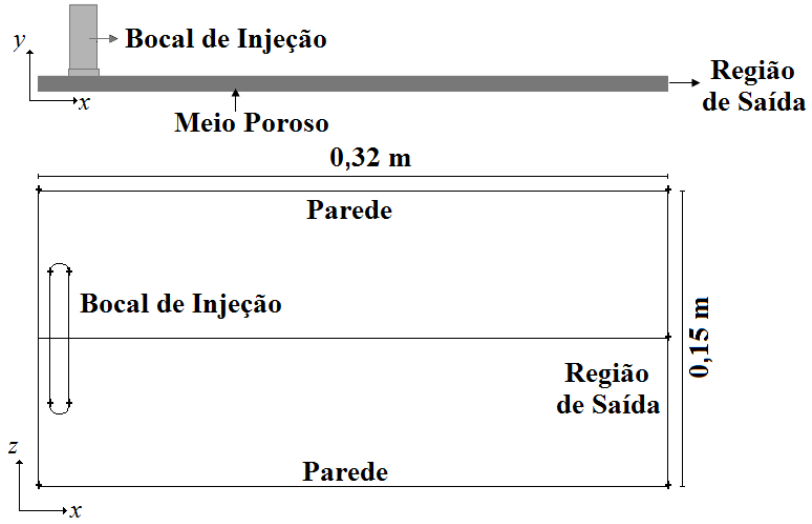


Figura 5 – Geometria e condições de contorno

CASO 1 – FIBRA DE PP

O primeiro caso foi simulado considerando o meio poroso composto por fibra de polipropileno (PP *non-woven*) e as propriedades consideradas estão apresentadas na

TABELA 1. Neste estudo, foi considerado o efeito de variação de pressão durante o processo de infusão (Figura 6).

Tabela 1 – Condições de Contorno

Caso	Meio Poroso	K (m^2)	$\mu(\mathrm{X10^{-2}}Pa\cdot s)$	$\varepsilon(\mathrm{X10^{-2}})$
1	Fibra de PP	1,86 x 10^{-9}	55	80,4
2	Fibra de Vidro	1,12 x 10^{-9}	65	81,1

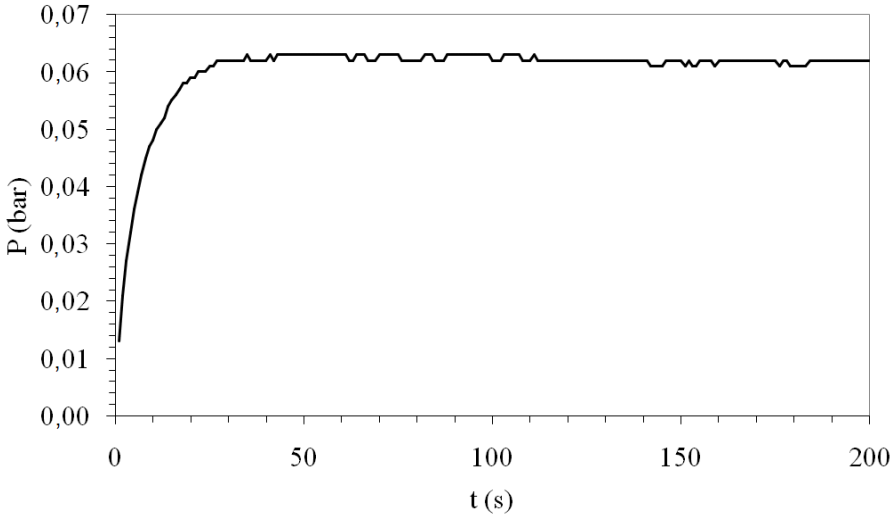


Figura 6 – Pressão de injeção x Tempo – Caso 1

A seguir são apresentados os resultados obtidos pelo FLUENT® e pelo PAM-RTM® em comparação aos resultados experimentais (FIGURA 7). Nota-se que há uma boa concordância entre os resultados numéricos e os experimentais, e esse resultado satisfatório tem ligação direta com a consideração de variação de pressão no começo do escoamento. Se a pressão fosse erroneamente considerada constante durante todo o processo de injeção, o gradiente de pressão seria superestimado no início da simulação.

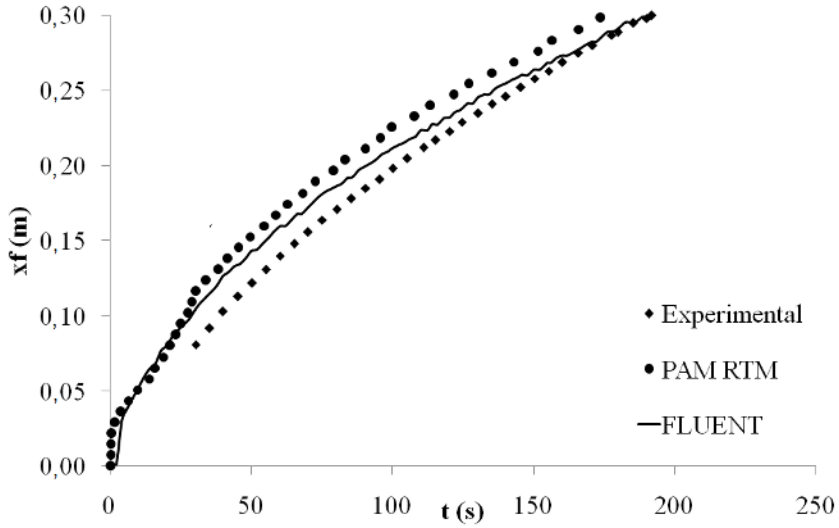


Figura 7 – Resultados – Caso 1

CASO 2 – FIBRA DE VIDRO

Para esse caso, o meio poroso escolhido foi a fibra de vidro e as propriedades utilizadas estão de apresentadas na TABELA 1. Mais uma vez foi considerado o efeito de variação de pressão, conforme pode ser observado na FIGURA 8.

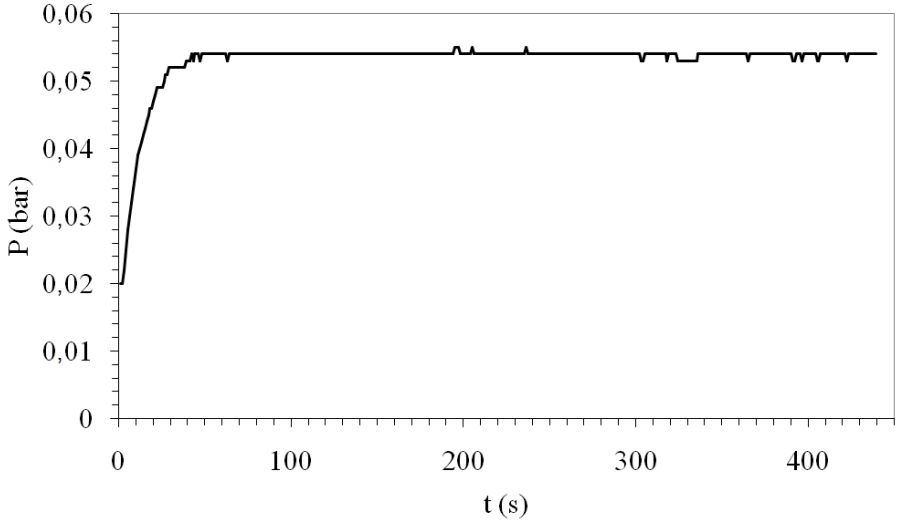


Figura 8 – Pressão de injeção x Tempo – Caso 2

Na FIGURA 9, são apresentados os resultados numéricos obtidos em comparação aos resultados experimentais. Mais uma vez é possível observar que houve boa concordância entre os modelos desenvolvidos e os dados experimentais.

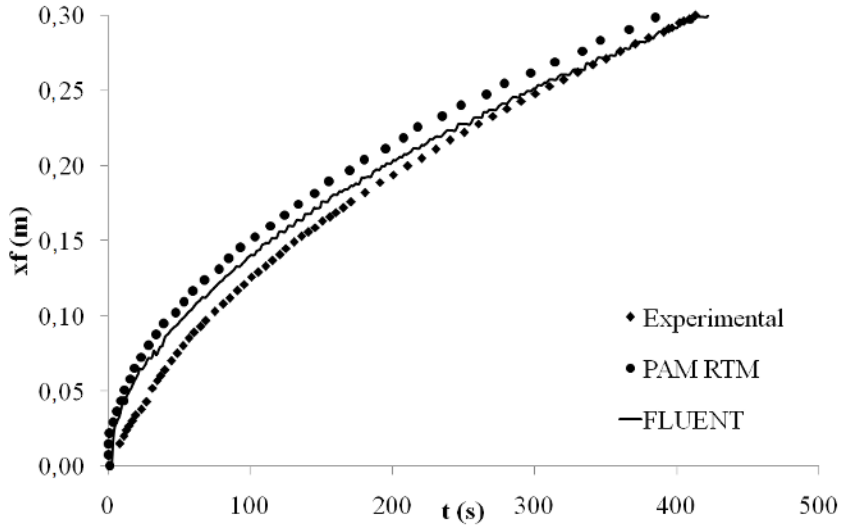


Figura 9 – Resultados Caso 2

Comparando o tempo final de injeção, pode-se observar na TABELA 2 que o erro numérico está dentro de um padrão aceitável.

Tabela 2 – Comparação do tempo final de injeção

Caso	FLUENT® x Experimental	PAM-RTM® x Experimental	FLUENT® x PAM-RTM®
1	1.53%	5.99%	7.10%
2	0.37%	8.23%	7.95%

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou dois métodos numéricos, VOF e FE/CV, para a solução de problemas de RTM. As simulações foram realizadas com dois *softwares* comerciais: FLUENT® e PAM-RTM®. As soluções numéricas foram validadas por comparação com resultados experimentais obtidos no Lapol/UFRGS.

Pode-se perceber através dos resultados obtidos que os modelos numéricos desenvolvidos foram capazes de resolver os problemas de RTM estudados. Convém salientar também a importância dos resultados do modelo numérico obtido com o FLUENT®, pois o mesmo é um aplicativo genérico para dinâmica dos fluídos computacional, o que demonstra a eficácia do método numérico VOF.

5. REFERÊNCIAS

[1] SCHMIDT, T. M.; GOSS, T.M.; LEKAKOU C.; AMICO, S.C. Evaluation of the permeability of hybrid fibrous reinforcements as a function of the stacking sequence in resin transfer

molding (RTM)", no ICAMC 2007 - **International Conference on Advanced Materials and Composites**, Thiruvananthapuram/India, 2007.

[2] AMORIM, Jr. W.F. **Processamento de Placa Espessa de Compósito Através de Moldagem por Transferência de Resina**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2007.

[3] PAM-RTM® 2008 User's Guide & Tutorials (GR/PART/08/01/00/A), ESI Group The Virtual Try-Out Space Company, 2008.

[4] SCHMIDT, T. M.; SUZUKI, K. C.; ABREU, T. M.; AMICO, S.C. Influência das Características do Fluído Impregnante na Permeabilidade de Diferentes Reforços Fibrosos, 18º CBECiMat - **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Porto de Galinhas/PE, 2008.

[5] SOUZA, J. A.; NAVA, M. J. A.; ROCHA, L. A. O.; AMICO, S. C. Two-Dimensional Control Volume Modelling of the Resin Infiltration of a Porous Medium with a Heterogeneous Permeability Tensor, **Materials Research**, v. 11, n. 3, p.261-268, 2008.

[6] HIRT, C.W.; NICHOLS, B.D. Volume of Fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries, **J. Comput. Phys**. v. 39, p.201-225, 1981.

[7] LUOMA, J. A.; VOLLER, V. R. An explicit scheme for tracking the filling front during polymer mold filling, **Applied Mathematical Modelling**, v. 24, p. 575-590, 2000.

[8] MALISKA, C. R.; VASCONCELLOS, J. F. V. de. An unstructured finite volume procedure for simulating flows with moving fronts, **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v.182, p.401-420, 1998.

[9] SAVINO, J. **Deslocamento de Fluídos em Poços Horizontais não Retilíneos** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2009.

[10] LAPOL, Site Laboratório de Polímeros da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: http://www.ufrgs.br/lapol

[11] PHELAN, F.R.. Simulation of the injection process in resin transfer molding, **Polymer Composites**, v. 18,n. 4, p. 460-476, 1997.

[12] SILVA, F. DE M. VAZ DA ; SOUZA, J. A. ; ROCHA, L. A. O. ; AMICO, S. C. Comparison of Two Numerical Methodologies for the Modelling of the RTM Process, ENCIT 2008 - **12th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering**, Belo Horizonte/MG, 2008.

[13] Laurensvan Lieshout. Disponível em:

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RTM_process.png. Acesso em 31 de março de 2009.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (PROCAD N ° 0303054), ao CNPQ e à FAPERGS (Casadinho n ° 0701263) pelo apoio financeiro.