



MODELAGEM NUMÉRICA DO TRANSPORTE DE RESINAS NO INTERIOR DE MOLDES ATRAVÉS DO APLICATIVO FLUENT

Gustavo Gondran Ribeiro

Fundação Universidade Federal de Rio Grande, Departamento de Física, Av. Itália, km 08 s/n - Campus Carreiros, 96201-900 - Rio Grande - RS - Brasil
gustavoribeiro@furg.br

Jeferson Avila Souza

Fundação Universidade Federal de Rio Grande, Departamento de Física, Av. Itália, km 08 s/n - Campus Carreiros, 96201-900 - Rio Grande - RS - Brasil
jasouza@furg.br

Sandro Campos Amico

Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Departamento de Materiais, Av. Bento Gonçalves, 9500, Bairro Agronômica, 91501-970 - Porto Alegre - RS - Brasil
amico@ufrgs.br

Resumo: *O processo de injeção de resinas através de moldes é conhecido como RTM (Resin Transfer Molding), o qual baseia-se na utilização de um reforço fibroso dentro de um molde fechado, seguido de injeção de resina por uma porta de entrada propiciando a impregnação do reforço para posterior cura. Esse processo apresenta algumas vantagens com relação a outros processos por ser um processo versátil e capaz de produzir compósitos de formas diversas e complexas, além de gerar peças de espessura uniforme e com bom acabamento nas duas superfícies, sendo o mesmo bastante utilizado pelas indústrias aeronáutica e automotiva.*

O transporte de resina no interior do molde pode ser modelado como um escoamento em meio poroso, no qual a Lei de Darcy, que associa a velocidade do escoamento com o gradiente de pressões dentro do meio poroso pode ser utilizado como base teórica para a modelagem do problema físico.

No presente trabalho, o aplicativo comercial conhecido como FLUENT é utilizado para a modelagem numérica do processo de RTM. Este é um software de aplicação geral para a solução de problemas de Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor que permite também a solução de problemas de meios porosos.

O objetivo primário deste trabalho é o aprendizado da utilização do software FLUENT para solução de problemas de transporte de uma resina polimérica em um meio poroso formado por fibras vegetais. Pretende-se também estudar a dependência das propriedades físicas da resina e do meio, visando determinar a influência destes fatores no processo de RTM.

Algumas simulações foram realizadas baseadas em problemas clássicos de modelagem numérica para o processo de RTM retirados da literatura. Dentre esses modelos foram desenvolvidos o avanço linear da resina e o avanço radial da resina onde se obtiveram resultados esperados.

Este projeto constitui uma das frentes de pesquisa de um projeto maior (CAPES/PROCAD nº 0303054), do qual outras três universidades também fazem parte: UFRGS (coordenação geral), UCS e UDESC.

Palavras-chave: *Modelagem Numérica, FLUENT, Materiais Compósitos, Processos Fabricação de Compósitos, Moldagem por Transporte de Resinas.*

1. INTRODUÇÃO

A origem do processo de RTM (Resin Transfer Molding) foi datada por volta de 1940 onde as primeiras tentativas foram realizadas através da utilização de vácuo para forçar a impregnação. O mesmo foi utilizado por fornecedores da marinha americana no desenvolvimento de grandes botes feitos com reforço de fibra de vidro. Já na década de 1950, o processo de RTM era utilizado por várias indústrias sendo assim gerado um avanço neste seguimento. A partir de 1970 começou-se a utilização do processo de RTM para produção de peças no setor marítimo, sendo que em 1980 o desenvolvimento deste processo chegou a tal ponto que se iniciou o emprego do mesmo na geração de peças estruturais nas indústrias de aeronaves e automobilística (Amico, S. C., 2005).

Apesar do processo de RTM ter seus primeiros desenvolvimentos por volta de 1940, esta tecnologia chegou ao Brasil apenas no final da década de 80, e mesmo assim, sendo pouco utilizado na indústria. Já nas Universidades Brasileiras, em termos de pesquisa científica, ainda é pouco explorado. Na fabricação de materiais compósitos de matriz polimérica existem inúmeros métodos disponíveis, esses métodos podem ser classificados em processos de molde aberto, onde temos moldagem manual e por *spray*, processos de molde fechado, que são os autoclaves, moldagem por injeção, por compressão e por transferência de resina e processos contínuos, no qual encontramos pultrusão e produção de laminados (Amico, S. C., 2005).

A moldagem manual é talvez o método mais antigo de fabricação de materiais compósitos, este método se utiliza de um único molde aberto, e toda a inserção de camadas de reforço e matriz, alternadamente, são adicionadas manualmente. Este processo exige mão-de-obra intensiva, não é rápido e é de difícil controle. Moldagem por compressão por sua vez é um método que se utiliza de moldes fechados, porém ferramental muito caro, mas possuem estabilidade dimensional alta com complexidade dos componentes limitada. Neste processo, o material a ser moldado é prensado, ou a uma temperatura mais quente ou a temperatura ambiente, entre duas partes de um molde rígido, com o auxílio de uma prensa hidráulica (Amico, S. C., 2005).

Na moldagem por injeção encontra-se facilidade na aplicação para grandes volumes, no entanto, o custo das ferramentas necessárias é muito alto com uma dificuldade significativa em controlar a orientação das fibras, em peças estruturais se faz muito necessário. Os processos de moldagem líquida por sua vez vêm eliminando as dificuldades de fabricação de materiais compósitos reforçados por fibras, diminuindo aceitavelmente os custos de fabricação (Amico, S. C., 2005).

A moldagem líquida é formada por um conjunto de processos, no qual sua característica geral é a introdução de resina ou resinas líquidas, em um molde fechado sob ação de um gradiente de pressão. As principais diferenças entre os vários métodos de moldagem líquida se dão pela maneira com que é criada a diferença de pressão, que podem ser: por aplicação de vácuo, por aplicação de pressão externa ou ainda uma combinação das duas modalidades anteriores (Amico, S. C., 2005).

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).

2. MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica é de forma simplificada, a resolução de um sistema de equações diferenciais através de técnicas numéricas. A metodologia inclui tanto à parte de discretização das equações diferenciais quanto à parte de resolução das equações ordinária originadas dessa discretização. Devido às equações diferenciais serem de difícil resolução através de métodos analíticos, para problemas com geometrias e condições de contorno mais complexas, se desenvolve a resolução das mesmas através de métodos numéricos, porém estes últimos podem demandar muito tempo de processamento.

2.1 Equação de Darcy

O transporte de resina no interior de um molde pode ser modelado matematicamente como um escoamento em meio poroso. A Lei de Darcy, que associa a velocidade do escoamento com o gradiente de pressões dentro do meio poroso pode ser utilizada como base teórica para a modelagem matemática do problema físico (Bejan, A., 1995).

$$\vec{V} = \frac{k}{\mu} \cdot \nabla P \quad (1)$$

onde \vec{V} é a velocidade do fluido, K a Permeabilidade do meio poroso, μ a viscosidade do fluido e P a pressão exercida no fluido.

Substituindo a equação da lei de Darcy na equação da conservação da massa para fluidos incompressíveis, e considerando em uma primeira aproximação a permeabilidade do meio e a viscosidade do fluido constantes, encontramos a seguinte equação em função apenas do gradiente de pressões.

$$\nabla^2 P = 0 \quad (2)$$

A partir da Equação. 2 determina-se o campo de pressões e após se calcula a velocidade do fluido no meio poroso através da Equação. 11. Três são os métodos normalmente utilizados para a solução da Equação 2: Diferenças Finitas, Elementos Finitos e Volumes Finitos. Este cálculo é realizado a cada passo no tempo. E desta forma a linha de frente da resina pode ser determinada ao final de cada passo temporal (Phelan, F. R. JR., 1997).

2.2 Softwares Utilizados

O *software FLUENT*, adquirido pelo setor termofluidico do departamento de física da FURG, é o aplicativo no qual foi realizada a simulação numérica do processo de RTM. Para tanto é necessário a definição do domínio computacional, a inserção das propriedades físicas dos materiais e os parâmetros do fenômeno físico que se quer modelar. Antes, da simulação numérica propriamente dita é necessário a criação da geometria e da malha na qual será realizada a simulação. Essa malha é construída através do *software GAMBIT*, que acompanha o *FLUENT*. Neste *software*, a criação da geometria é realizada com ferramentas gráficas de desenho em duas e em três dimensões. O passo seguinte é a geração da malha, que inclui a escolha do tipo de elemento a ser utilizado e uma avaliação prévia da qualidade da malha gerada, em cima da geometria que foi criada anteriormente. Finalmente, é possível ainda no aplicativo *GAMBIT*, inserir as condições de contorno do problema, assinalando as faces e arestas que representam as paredes ou regiões de entrada e/ou saída de fluido. (Fluent online manual, 2007; Gambit online manual, 2007).

O *FLUENT* contém em sua estrutura de menus, manipulação da malha, inserção das condições iniciais, desenvolvimento da simulação com escolha de parâmetros para os diversos métodos de resolução nele contidos, além de muitas outras opções que serão descritas ao longo deste trabalho.

Dentre estas opções, o **FLUENT** é capaz de realizar simulações numéricas para a solução de vários problemas da mecânica dos fluidos e transferência de calor, dentre eles o escoamento em meios porosos. Um dos objetivos na simulação do escoamento da resina em um meio poroso é a determinação da linha de frente da resina no molde. Este problema é resolvido no **FLUENT** como um problema multifásico, ar e resina, no qual foi utilizado o método VOF (Volume of Fluid), para a determinação da superfície de contato (*interface*), dos dois fluidos. O método VOF pode ser utilizado para se modelar dois ou mais líquidos imiscíveis, através da solução das equações do movimento (quantidade de movimento) e a determinação da fração do volume de cada um dos fluidos durante todo o domínio de cálculo. Assim, através deste método foi possível a determinação da linha de frente (avanço) do fluido no interior da malha (Fluent online manual, 2007; Gambit online manual, 2007).

A seguir é possível a visualização do ambiente gráfico disponibilizado pelos *softwares* utilizados.

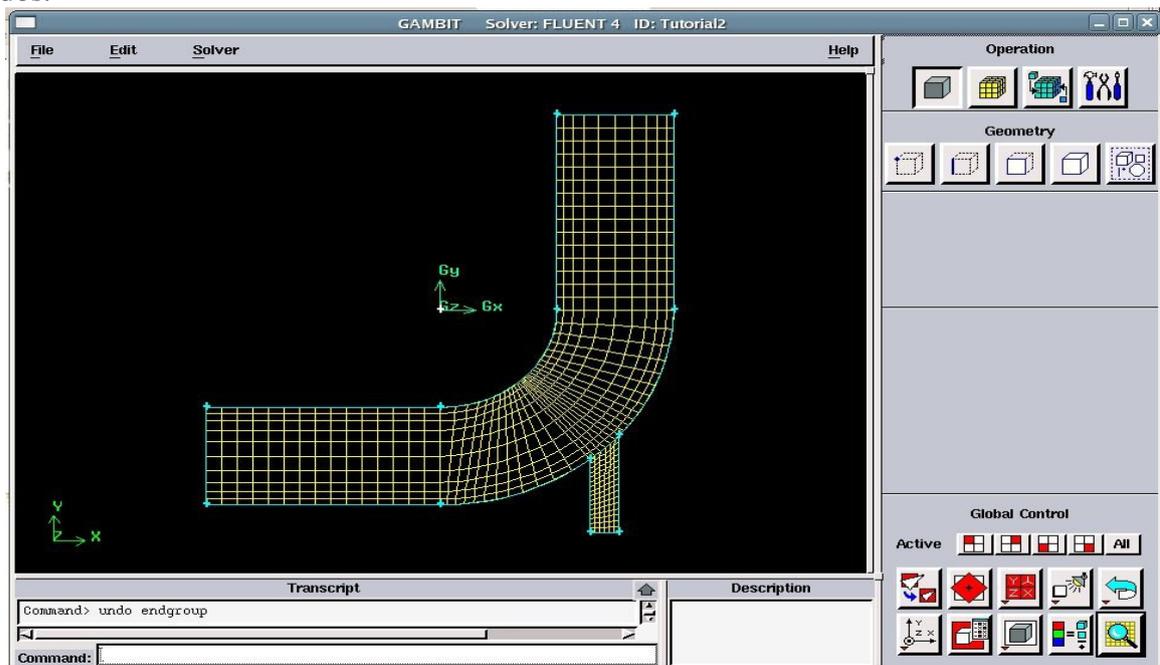


Figura 1: Desenvolvimento da geometria e geração de uma malha 2D no software **GAMBIT**

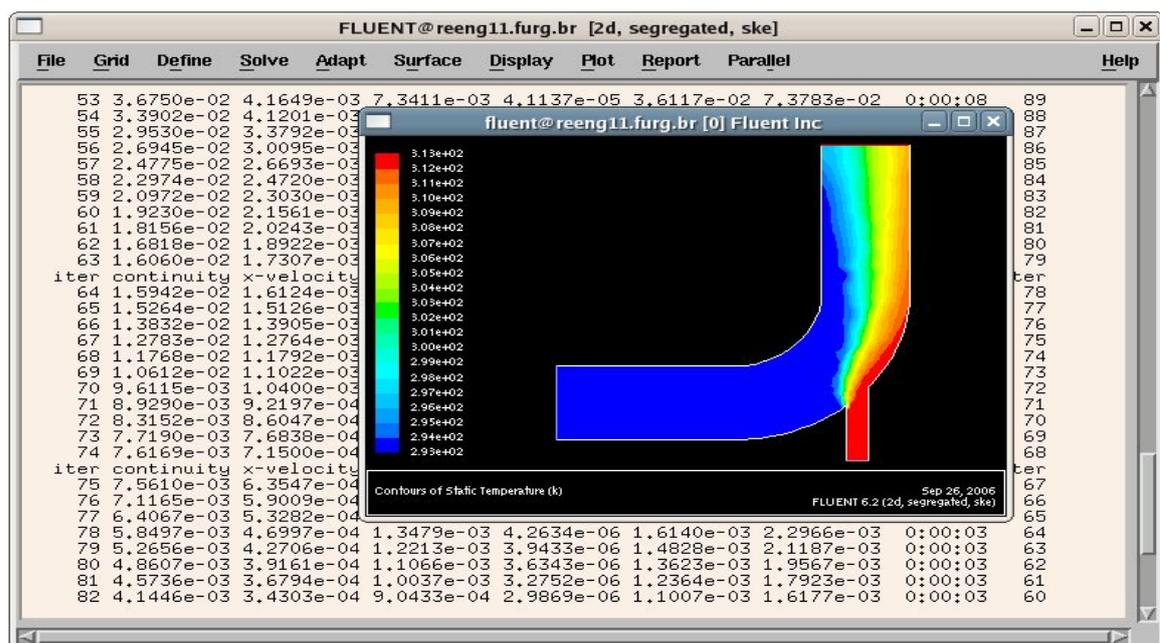


Figura 2: Desenvolvimento de uma simulação em 2D no Software **FLUENT**

3. MODELAGEM E RESULTADOS

Com base na bibliografia citada foram realizadas algumas simulações do processo de RTM no *FLUENT*, onde utilizou-se exemplos com resultados analíticos já determinados. A partir deste momento gerou-se um gráfico tempo versus linha de frente da resina, plotando os dois resultados, analítico e numérico, no mesmo gráfico para que fosse possível uma comparação entre as duas resoluções. Dessa forma validou-se o resultado obtido a partir da simulação numérica desenvolvida com o *FLUENT*, comprovando assim de que a simulação de moldes mais complexos deste processo é confiável.

3.1. Avanço Linear da Resina

Primeiramente foi desenvolvido a simulação de um problema de injeção de resina em um molde de forma linear. Esse problema é constituído de um molde bidimensional composto por 0,3 m de comprimento por 0,05 de largura com uma pressão de injeção de 200kPa. As propriedades do meio e do fluido foram fixadas em valores de: Viscosidade do fluido(μ) igual a 0.01 Pa.s; Permeabilidade do meio(k) igual a $1.10^{-10} \text{ m}^{-1}$ (Phelan, F. R. JR., 1997). Na Figura 3 pode ser visualizada a simulação do problema descrito acima desenvolvida no *FLUENT*, onde em vermelho é a resina sendo injetada e em azul é o ar contido dentro do molde.

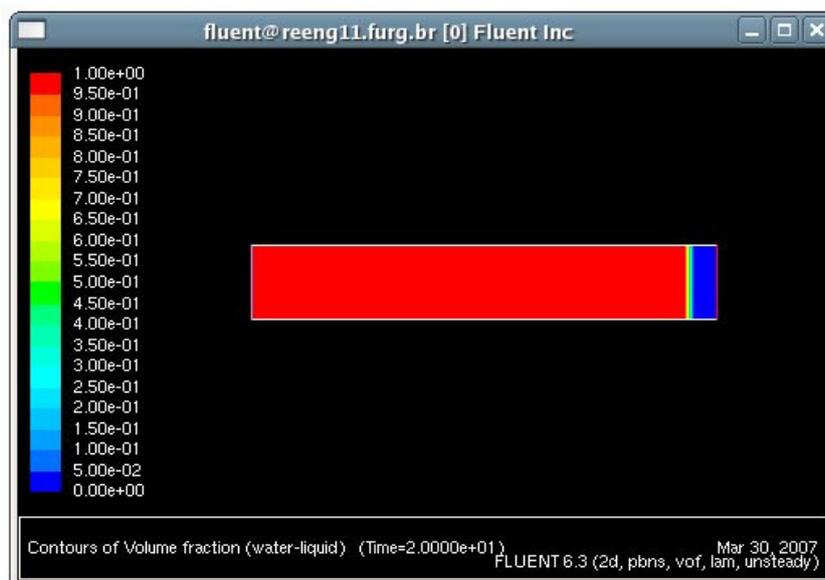


Figura 3: Simulação do Avanço Linear da Resina desenvolvida no *software FLUENT*

Para essa mesma simulação foi determinada a distância da linha de frente da resina em relação ao ponto de injeção, que esta localizado a direita na Figura 3, para que logo após pudesse ser comparada através do gráfico tempo versus posição da linha de frente, com a solução analítica. A expressão analítica encontrada na bibliografia (Jinlian, H., Yi, L., Xueming, 2004) na qual foi tomada como referência esta demonstrada a seguir

$$t = \frac{x_f^2 \mu}{2kP_0} \quad (3)$$

Onde t é o tempo, x_f a posição da linha de frente em relação ao ponto de injeção da resina, μ é a viscosidade do da resina, k a permeabilidade do meio e P_0 a pressão de injeção.

Na Figura 4 é possível visualizar o gráfico analítico em conjunto com os resultados obtidos pelo **FLUENT**.

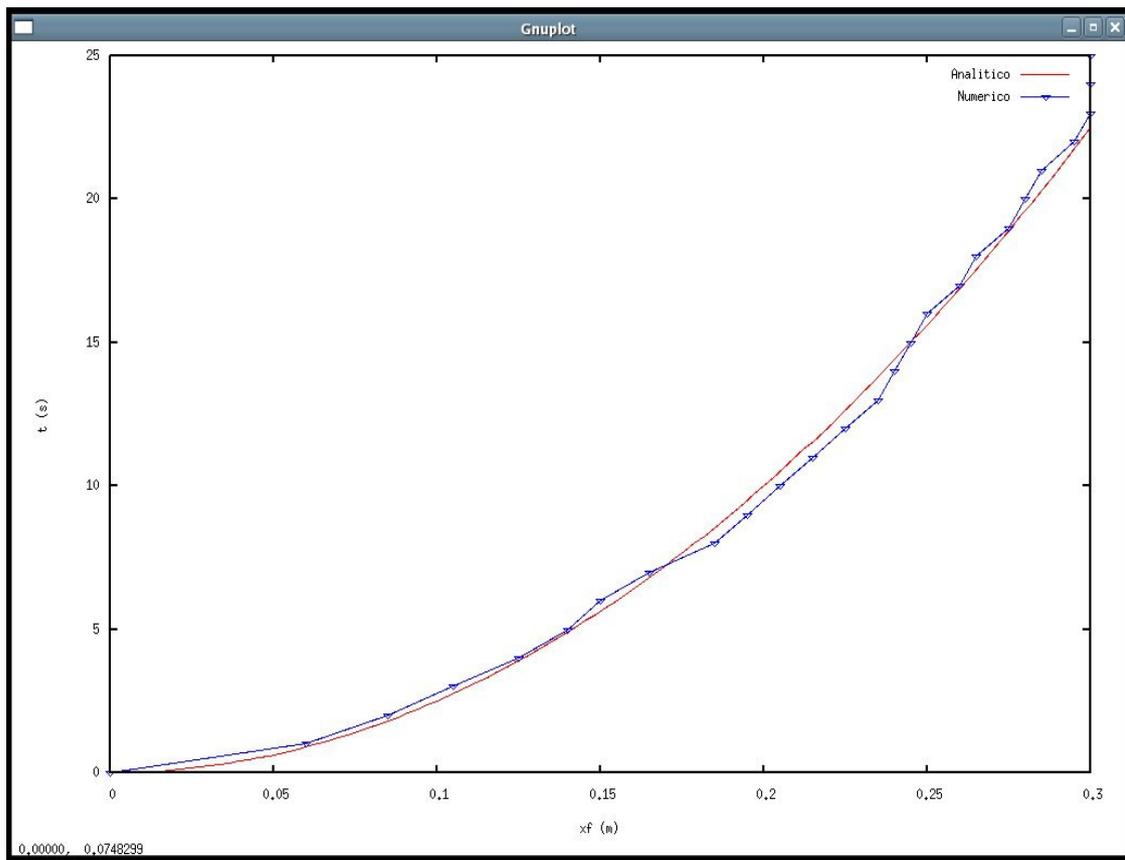


Figura 4: Gráfico t versus x_f

Na Figura 4 no eixo das ordenadas está o tempo e no eixo das abscissas está o x_f , sendo que a linha em vermelho representa a solução analítica e a linha em azul representa a solução numérica encontrada através da simulação no **FLUENT**. Pode se notar no gráfico que os resultados numéricos estão bem compatíveis com o resultado analítico, comprovando que a simulação numérica chegou aos resultados esperados.

3.2. Avanço Radial da Resina

Após a simulação de um problema de avanço linear partiu-se para um problema com um molde ponto de injeção central de resina. Neste caso busca-se a determinação do avanço radial da linha de frente da resina. Da mesma forma que no caso linear, utilizou-se como referência para validação da simulação, um problema retirado da literatura na qual houvesse solução analítica. O problema radial tem as mesmas características do meio e do fluido do problema linear, sendo que o raio de injeção de resina é de 0,0035 m.

Na Figura 5 pode ser visualizada a simulação do problema descrito acima desenvolvido no **FLUENT**, onde em vermelho é a resina sendo injetada e em azul é o ar contido dentro do molde. Assim como na simulação do problema linear, foi determinada a posição da linha de frente da resina sendo que neste caso foi determinado o raio da linha de frente já que o ponto de injeção é central.

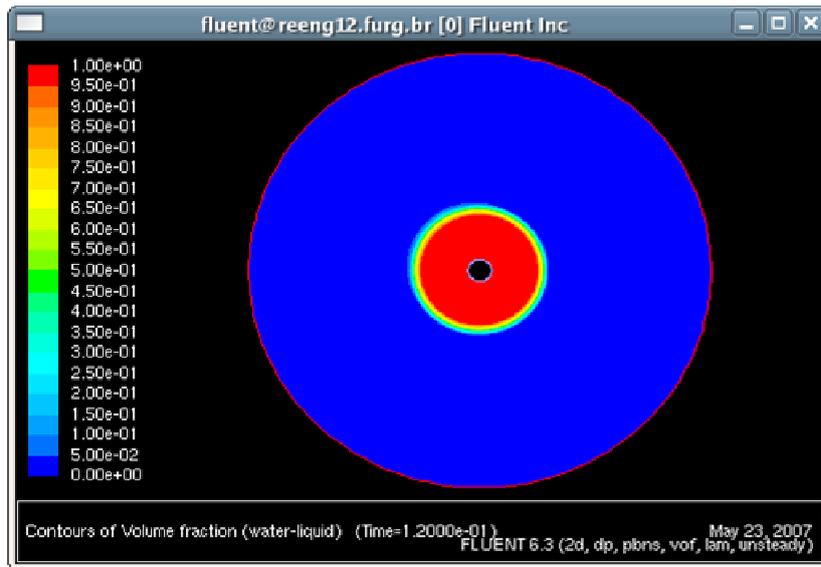


Figura 5: Simulação do Avanço Radial da Resina desenvolvida no *software FLUENT*

A solução analítica encontrada na bibliografia esta expressa da Equação 4 (Modi, D., Simacek, P., Advani, S., 2003).

$$t = \frac{\mu}{2kP_0} \left[r^2 \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) - \frac{1}{2}(r^2 - r_0^2) \right] \quad (4)$$

onde o r_0 é o raio de injeção da resina, e r o raio da linha de frente da resina.

Na Figura 6 é possível visualizar a solução analítica em conjunto com os resultados obtidos pelo *FLUENT*.

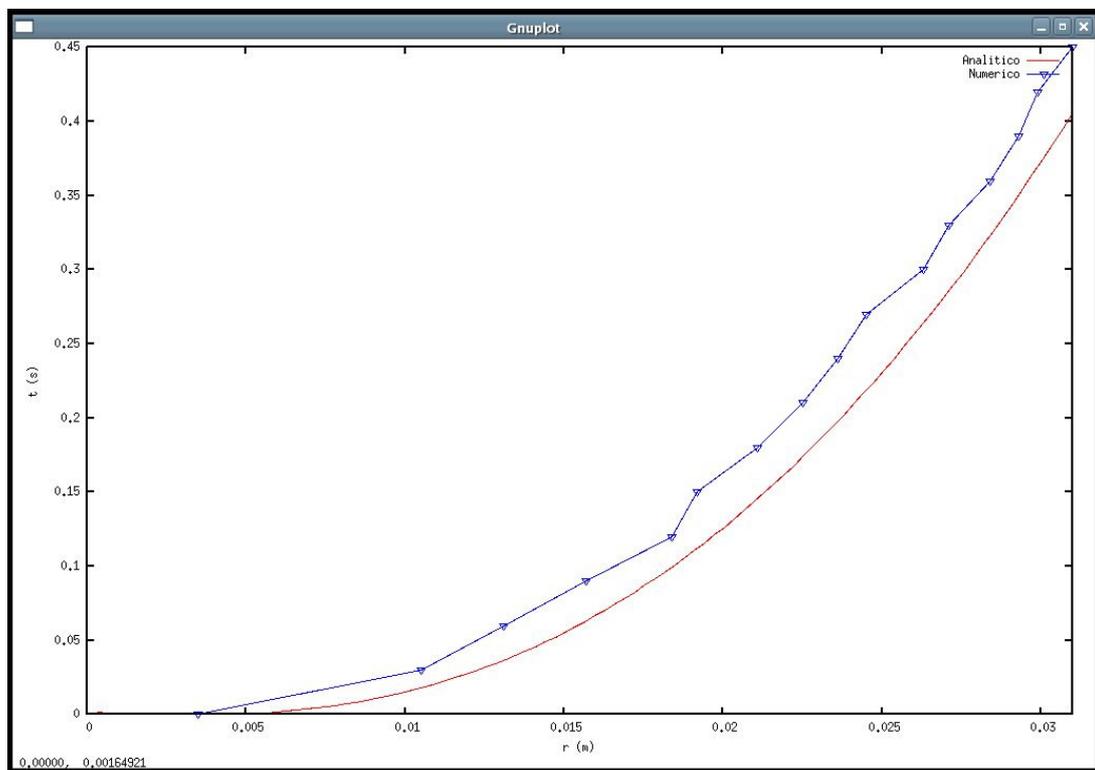


Figura 4: Gráfico t versus r

Na Figura 6 no eixo das ordenadas esta o tempo e no eixo das abscissas esta o r , sendo que a linha em vermelho representa a solução analítica e a azul representa a solução numérica encontrada com o *FLUENT*. No avanço radial foi necessário desenvolver mais simulações devido um problema na malha, pois como um avanço radial é em duas dimensões, ocorre um problema matemático no que diz respeito ao número de elementos que compõem a malha, sendo dessa forma resolvido aumentando o número de elementos na malha na qual é realizada a simulação.

Nota-se nesta figura uma boa concordância entre a solução numérica obtida e a solução analítica. Foi utilizada uma malha com 37500 elementos quadrangulares.

4. CONCLUSÃO

Ao longo de todo o trabalho desde as etapas preliminares até a modelagem com o aplicativo *FLUENT*, notou-se a importância dos conhecimentos teóricos adquiridos principalmente nas aulas de fenômenos de transporte. A aplicação das equações da mecânica dos fluidos e da transferência de calor foi notável para o desenvolvimento do presente trabalho, bem como os métodos numéricos necessário para resolução destes tipos de problemas.

Ao final desta etapa de trabalho é possível a prática de atividades na área de modelagem numérica, visto que ao longo do trabalho encontrou-se uma metodologia de resolução de problemas, com o auxílio de ferramentas computacionais numéricas, como o aplicativo *FLUENT*.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (PROCAD nº 0303054) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Bejan, A., 1995, "Convection heat transfer", 2º ed. Durham: John wiley & Sons, Inc.
- Amico, S. C., 2005, "Compósitos e nanocompósitos poliméricos moldados por transferência de resina.", Porto Alegre – Brasil.
- Jinlian, H., Yi, L., Xueming, S., 2004, "Study on Void Formation in multi-layer woven fabrics.", Composites: Part A 35, 595-603.
- Phelan, F. R. JR., 1997, "Simulation of the injection process in resin transfer molding.", Polymer Composites: vol. 18, 460-476.
- Modi, D., Simacek, P., Advani, S., 2003, "Influence of injection gate definition on the flow-front approximation in numerical simulations of mold-filling processes.", International Journal for Numerical Methods in Fluids: 42, 1237-1248.
- Fluent online manual, acessado em 17/04/2007
- Gambit online manual, acessado em 17/04/2007

NUMERICAL MODELING OF THE RESIN TRANSPORT IN THE INTERIOR OF MOLDS USING THE SOFTWARE FLUENT

Gustavo Gondran Ribeiro

Fundação Universidade Federal de Rio Grande, Departamento de Física, Av. Itália, km 08 s/n - Campus Carreiros, 96201-900 - Rio Grande - RS - Brasil
gustavoribeiro@furg.br

Jeferson Avila Souza

Fundação Universidade Federal de Rio Grande, Departamento de Física, Av. Itália, km 08 s/n - Campus Carreiros, 96201-900 - Rio Grande - RS - Brasil
jasouza@furg.br

Sandro Campos Amico

Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Departamento de Materiais, Av. Bento Gonçalves, 9500, Bairro Agronomica, 91501-970 - Porto Alegre - RS - Brasil
amico@ufrgs.br

Abstract: *The RTM (Resin Transfer Molding) is a well known resin injection process applied to the modeling of the resin transport through a fibrous reinforcement inside a mold. In this process resin enters in the mold by one or more injection points and move through the mold until the complete impregnation of the media with the resin. This is a versatile process which presents some advantages with regard to other processes. It is capable of produce composites with complex forms with uniformity density and food surface finishing. The process is now a day used in large scale by the automotive and aeronautic industries. The resin transport inside the mold may be formulated as a flow through a porous media and the Darcy's Law, which associates the flow velocity with the pressure gradient inside the porous media, can be used for the physical modeling of the problem.*

In the present work, the FLUENT, which is a commercial software was used for the numerical modeling of the RTM process. This is a general application for the solution fluid mechanics and heat transfer problem that also allows the solution of porous media problems.

The main goal of this work is the learning of using the software FLUENT for the solution of resin transport problems in a porous media. It is also intended to determine the influence of the physical properties of the resin and the media in the transfer process inside the mold. Some classical problems, with analytic solution, has been solved with FLUENT in order to validate the present numerical solution.

This project constitutes part of a bigger project (CAPES/PROCAD n ° 0303054), which is being developed with the collaboration of others three university: UFRGS (main coordination), UCS and UDESC.

Keywords: *Resin Transfer Molding, Numerical Modeling , Flow Through Porous Media; Polimer Composites.*