



SIMULAÇÃO DO FLUXO DE RESINA EM MOLDE RETANGULAR PARA FABRICAÇÃO DE PEÇAS AUTOMOTIVAS A PARTIR DE MATERIAL COMPOSTO

Luiz Alberto Paoliello Alvim

Marcos de Mattos Pimenta

Míriam Rocchi Tavares

Departamento de Engenharia Mecânica -Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária

Cep 05508-900, São Paulo, SP, Brasil

Geraldo Accetturi de Araujo

Claudemir Merlotte

Mercedes-Benz do Brasil S.A. - CTE

Av. Alfred Jurzykowski, 562 – Vila Paulicéia,

Cep 09680-900, São Bernardo do Campo, SP, Brasil

Resumo. *Este trabalho trata do desenvolvimento de um modelo matemático para o escoamento de uma resina poliéster através de uma manta de fibra de vidro colocada internamente a um molde bidimensional retangular. A caracterização da frente de avanço da resina permite estimar-se o tempo total de impregnação. Este estudo encontra aplicação na simulação de escoamentos em moldes utilizados na fabricação de peças estruturais automotivas a partir de material composto. O algoritmo de cálculo resolve a equação de Darcy modificada para meio poroso pelo método dos elementos finitos, com formulação para a variável pressão. O comportamento não-newtoniano do fluido é considerado alterando-se a cada passo, o valor da viscosidade, calculada através de uma lei de potências (obtida experimentalmente). A discretização do domínio de escoamento utiliza malha com elementos triangulares. À medida em que a frente avança dentro do molde, o domínio de escoamento é redefinido utilizando-se técnicas de marcadores de células e volume de controle para as células de fronteira.*

Palavras-chave: *Elementos finitos, Escoamento em molde, Meio poroso.*

1. INTRODUÇÃO

A otimização de processos de produção de peças estruturais para veículos a partir da fabricação de material composto plástico é de grande importância para a indústria automobilística. Neste contexto, a impregnação, por resinas epoxi ou poliéster, de moldes contendo fibras diversas deve ser considerada a tendência mais promissora da atualidade. Como

características importantes deste processo podemos citar entre outras, seu baixo custo operacional, facilidade de inclusão à linha de montagem, baixa geração de refugos e resíduos, ausência de ar no interior das peças, ausência de monômeros nocivos à saúde durante o processo, menor tempo de produção das peças e o bom acabamento superficial das mesmas.

No estágio atual, a impregnação de moldes apresenta um problema operacional sério que se refere tanto à definição e dimensionamento dos pontos de injeção e sucção de resina, como ao do dimensionamento correto de seus canais de distribuição no contra molde. Além disso é necessário controlar o tempo de impregnação e evitar que bolhas ou defeitos se formem. Assim, tendo em vista que o preenchimento de um molde depende apenas da dinâmica do escoamento da resina dentro dele, seria extremamente conveniente a elaboração de algoritmos computacionais que pudessem simular de que forma é preenchido o molde, evitando-se a construção de contra moldes inadequados.

Este trabalho trata do desenvolvimento de um modelo matemático para o escoamento de resina poliéster através de um molde retangular que contém em seu interior uma manta de fibra de vidro. O modelo matemático baseia-se na resolução das equações de Darcy para escoamento em meio poroso. O algoritmo para solução computacional deste modelo está baseado na técnica dos elementos finitos e permite simular o escoamento através do molde. O regime transiente do movimento é levado em conta pela atualização, a cada passo, do campo de velocidades e da frente de avanço da resina, que determinam a evolução temporal do domínio de escoamento. O cálculo do gradiente de velocidades, a cada passo permite determinar, através de uma lei de potências obtida experimentalmente, o valor da viscosidade do fluido não-newtoniano. Os resultados preliminares deste desenvolvimento são comparados a dados experimentais.

2. APARATO EXPERIMENTAL

Foi construído um conjunto de molde e contra-molde planos, retangulares para ensaios do avanço da resina (Fig.1).

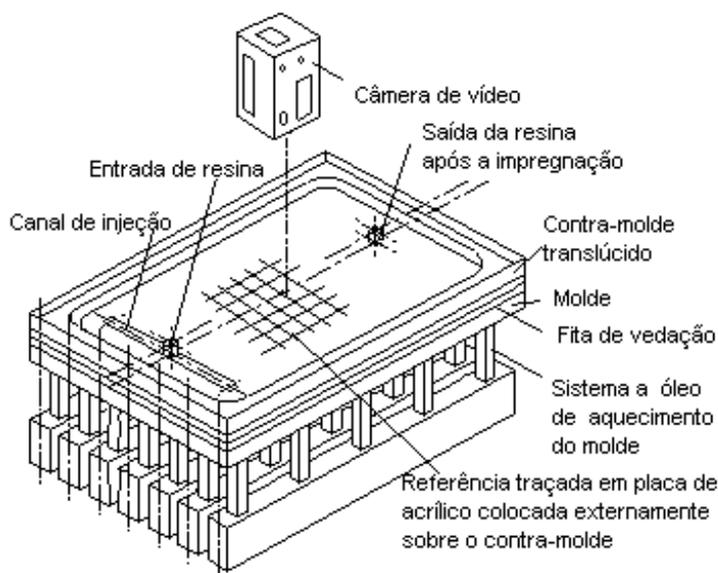


Figura 1 – Croquis da montagem do molde de impregnação

A descrição do procedimento experimental adotado para realização dos ensaios pode ser encontrada em Araujo et al. (1997). Utilizou-se uma câmera de vídeo, disposta verticalmente em relação ao plano do escoamento, de maneira a possibilitar a perfeita visualização da frente do escoamento à medida em que esta avançava dentro do molde e contra-molde translúcido (Fig. 1), cujas superfícies internas encontram-se separadas de 3 mm.

Para referência geométrica colocou-se ainda, sobre o contra-molde, uma placa fina de acrílico (1,5 mm de espessura), previamente traçada com linhas verticais e horizontais eqüidistantes entre si de 20 mm, compreendendo a superfície total de visualização da impregnação do molde (cerca de 380 x 600mm). As imagens resultantes obtidas mostram a frente de avanço e sua posição pode ser identificada sobre a malha.

3. MODELO MATEMÁTICO

Sendo o movimento quasi-estacionário, podemos utilizar equação de Darcy para o escoamento de um fluido incompressível em meio poroso.

3.1 Equação do movimento

Tomando a pressão P como variável independente a equação que rege o escoamento com baixas velocidades em meio poroso é citada por Brusckhe & Advani (1994):

$$\frac{\kappa_x}{\eta} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\kappa_y}{\eta} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

onde κ_x e κ_y representam as componentes da permeabilidade do meio nas direções x e y , e η a viscosidade do fluido.

A solução da Eq. (1) exige condições de contorno adequadas aplicadas às fronteiras do escoamento, Sendo \vec{n} o versor da normal à superfície do molde, temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial n} &= 0 && \text{nas superfícies fixas do molde} \\ P &= 0 && \text{na frente de avanço da resina} \\ P &= P_0 \text{ ou } u_n = u_0 && \text{nas entradas do molde} \end{aligned} \quad (2)$$

onde P_0 e u_0 , representam respectivamente a pressão e velocidade inicial, conhecidas.

A velocidade pode então ser calculada por meio da equação de Darcy:

$$\vec{V} = -\frac{\kappa}{\eta} \nabla P \quad (3)$$

A equação, denominada lei de Darcy modificada, propõe a substituição, na Eq. 1, da viscosidade newtoniana por uma viscosidade não-newtoniana, avaliada através de modelos de viscosidade que descrevem a dependência da mesma com a taxa de cisalhamento (Tadmor & Gogos, 1979). Conforme citação de Caetano (1992), Scheidegger apresenta os desvios da lei de

Darcy como sendo, em geral, devido a efeitos inerciais, efeitos iônicos, efeitos moleculares e comportamento não-newtoniano do fluido percolante.

3.2 Modelo de viscosidade

Adotou-se o modelo de lei das Potências (Power Law) para avaliação da dependência da viscosidade com a taxa de cisalhamento, por ser este um dos modelos mais utilizados para descrever o comportamento de polímeros que apresentam a viscosidade como função decrescente da taxa de cisalhamento, referido como comportamento pseudoplástico (Agassant et al.,1991). Este modelo é expresso por:

$$\eta = C|\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (4)$$

onde C é o índice de consistência do fluido e n o expoente, constante, da lei das Potências. Este modelo deve ainda ser modificado para levar em consideração a dependência da viscosidade com a temperatura e o patamar newtoniano observado para $\dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_{\text{lim}}$ (Tucker III ,1989), resultando em:

$$\begin{aligned} \eta &= C(T)\dot{\gamma}^{n-1} & \text{para} & \quad \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_{\text{lim}} \\ \eta &= \eta_0 & \text{para} & \quad \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_{\text{lim}} \end{aligned} \quad (5)$$

onde

$$C(T) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \quad (6)$$

sendo B e T_b constantes, T a temperatura, $\dot{\gamma}$ a taxa de cisalhamento efetiva e $\dot{\gamma}_{\text{lim}}$ a taxa de cisalhamento limite em que ainda se tem η constante. Estes parâmetros podem ser obtidos experimentalmente pelo levantamento da curva de viscosidade em função da taxa de cisalhamento.

Obtenção dos índices de consistência e de potência. A caracterização reológica da resina poliéster, com obtenção da curva de viscosidade em função da taxa de cisalhamento, necessária à implementação do respectivo modelo de viscosidade, foi realizada no DEMa-UFSCar (Depto de Eng. de Materiais da UFSCar), em um Reômetro ARES, montado com sistema cone-placa. Os valores da viscosidade η (em Pa.s) foram obtidos variando-se a taxa de cisalhamento $\dot{\gamma}$ (s^{-1}) empregada, na faixa de temperatura de processo (20°C , 27°C e 35°C). A Fig. 2 mostra a curva obtida para a temperatura de 20°C .

O objetivo da realização dessas medidas é a determinação dos índices de consistência (C) e de potência (n) para implementação do modelo de viscosidade adotado (Tabela 1). As curvas obtidas com esses índices são interpoladas dentro de um programa computacional para se determinar a curva de viscosidade, na temperatura especificada ($T = 25^\circ\text{C}$), para simulação do processo de impregnação.

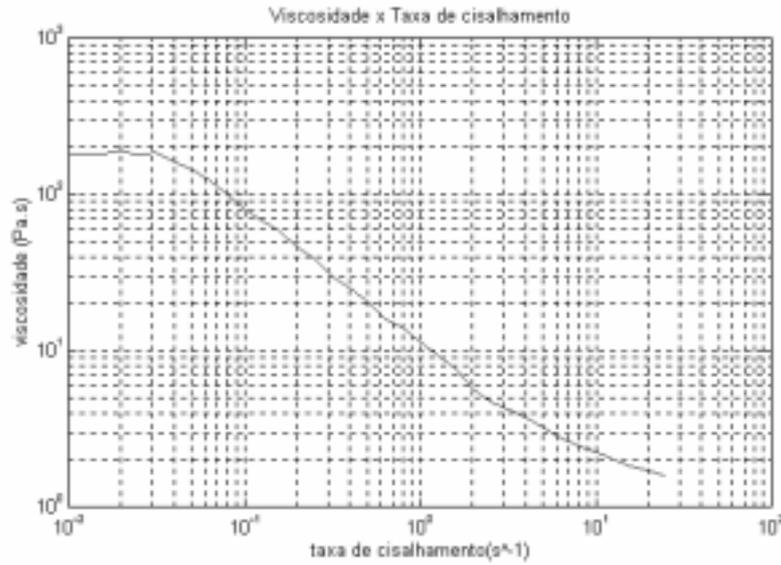


Figura 2 – Viscosidade η (Pa.s) x Taxa de cisalhamento $\dot{\gamma}$ (s^{-1}) para a resina poliéster a 20°C

Tabela 1 – Índices para implementação do modelo de viscosidade ($\eta = C|\dot{\gamma}|^{n-1}$)

Índices e faixa de temperatura	20°C	27°C	35°C
Índice de consistência (C)	11,2448	6,9649	4,8561
Índice de potência (valores de $n-1$)	-0,6977	-0,6566	-0,7070

3.3 Modelo da permeabilidade (κ) da manta de fibra de vidro

Com baixas velocidades (número de Reynolds $Re < 1$), caso da impregnação de mantas em moldes por transferência de resina, a permeabilidade do meio se resume à chamada permeabilidade darciana, κ , que depende apenas da estrutura porosa da manta, de acordo com a seguinte relação (Matsuoka, 1995):

$$\frac{1}{\kappa} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\delta^2 \varepsilon^3} \quad (7)$$

onde ε é a porosidade aparente do meio, no caso a manta de fibra de vidro, e δ o diâmetro médio dos fios que constituem a mesma. A porosidade aparente foi determinada por picnometria de hélio e neste caso utilizando-se a densidade aparente do meio (ρ_a) e a densidade do sólido do meio filtrante (ρ_s) temos:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (8)$$

sendo ρ_a calculada dividindo-se a massa do meio filtrante pelo seu volume geométrico.

4. MÉTODO NUMÉRICO

Emprega-se o método dos elementos finitos, discretizando-se a Eq. (1) em um determinado domínio físico, com elementos triangulares lineares, bidimensionais. Pode-se escrever a contribuição de cada elemento ao sistema de equações como sendo dada por:

$$\{R^{(e)}\} = - \int_A [N]^T (D_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}) dA \quad (9)$$

onde D_x e D_y são as componentes do coeficiente de permeabilidade D , nas direções x e y , que relaciona a permeabilidade κ com a viscosidade η ($D = \kappa/\eta$). A matriz $[N]^T$ representa a matriz transposta da matriz das funções de forma de interpolação dos elementos, que permite que se escreva P em um determinado elemento em função de seus valores nodais (P_i, P_j e P_k ., no caso do elemento ser triangular de vértices i, j e k) e de suas coordenadas (X_p e Y_p), conforme pode ser visto em Rao (1989) e Segerlind (1984).

A integração do lado direito da Eq. (9) com a minimização de $\{R^{(e)}\}$, resulta num conjunto de equações algébricas em termos da matriz de rigidez $[S^e]$ e o vetor coluna de pressão nodal $\{P\}$ para o domínio todo do fluido:

$$[S^e] \{P\} = \{O\} \quad (10)$$

Conforme pode ser visto em Rao (1989) e Segerlind (1984), a matriz de rigidez $[S^e]$ é facilmente avaliada considerando-se as coordenadas nodais dos elementos e o coeficiente de permeabilidade calculado localmente para cada elemento do domínio. A solução do sistema de equações vai exigir a montagem de uma matriz global em que se considera a conectividade dos elementos com a influência em cada nó dos seus respectivos nós vizinhos.

Avanço da frente. A caracterização da evolução temporal do preenchimento das células foi baseada em critérios apresentados por Zaidi et al. (1996), que adota diferente marcação para os diversos tipos de células do domínio, se cheias, vazias, da fronteira móvel etc.

Para implementação computacional das condições de contorno adequadas, o programa diferencia ainda as células pertencentes à entrada e ao canal de impregnação, o que permite a visualização do preenchimento do molde passo a passo.

5. ALGORITMO DE CÁLCULO PARA IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O algoritmo de cálculo para a obtenção da solução numérica pode ser brevemente resumido pela Figura 3. Quando utilizada malha com 640 elementos o tempo típico de computação num Pentium IBM/PC de 100 MHz é de aproximadamente duas horas.

Para solução do sistema de equações, obtido com a discretização do espaço de impregnação pelo Método de Elementos Finitos, utilizou-se o Método do Gradiente Conjugado Pré-condicionado (Barret et al., 1992). O campo de velocidades foi obtido derivando-se as funções de

forma estabelecidas para cada elemento triangular e considerando-se as pressões nodais desses elementos.

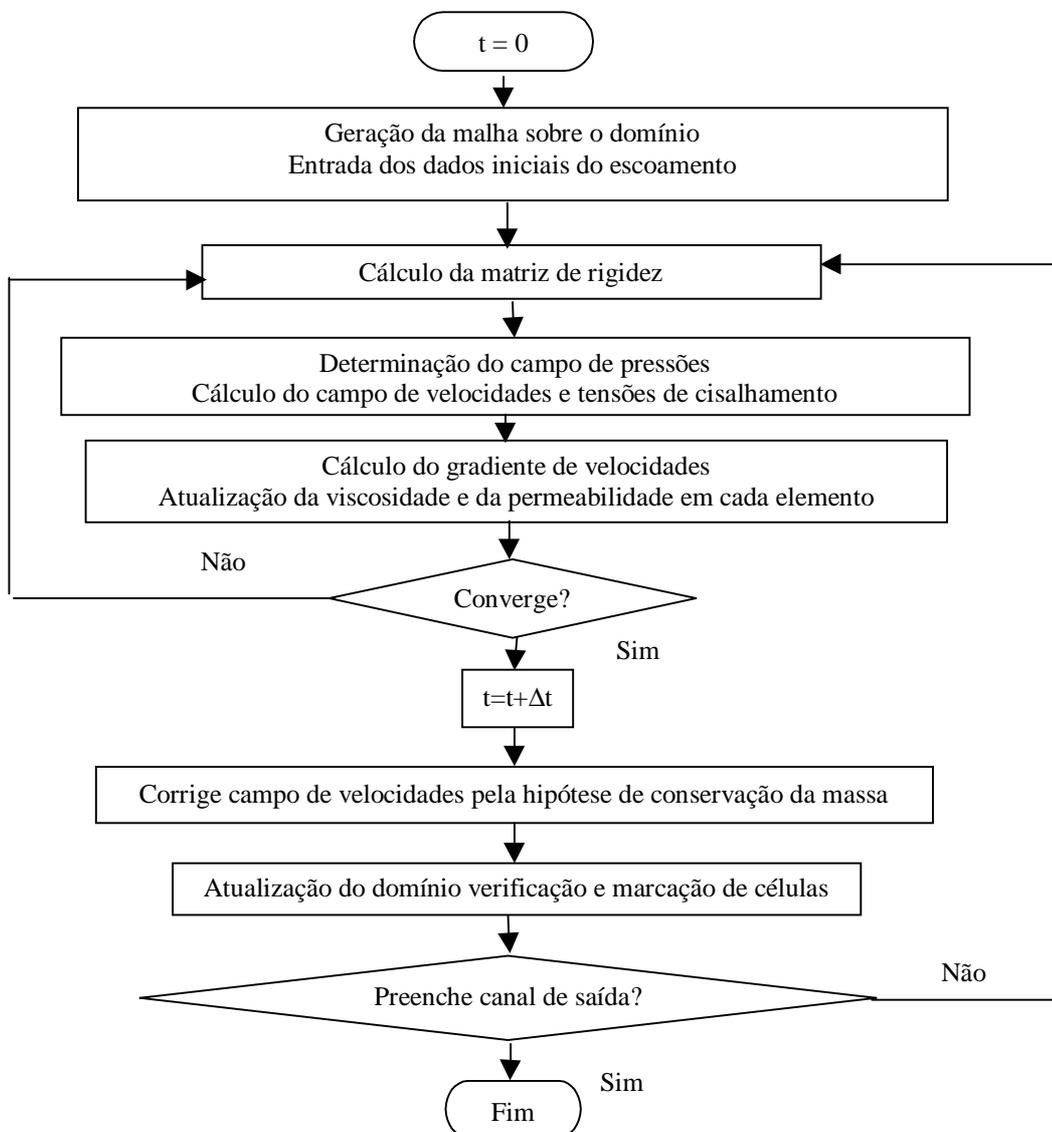


Figura 3 – Representação do algoritmo de cálculo

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados preliminares da simulação numérica são apresentados nesta seção e comparados aos experimentais.

A Fig. 4 mostra a evolução temporal da posição do ponto mais a jusante da frente de resina, aqui caracterizada pela distância percorrida entre os canais de entrada e saída, situados nas abcissas 0,02 m e 0,56 m na linha de centro do molde. As curvas de número (1), (2), (3) e (5) foram obtidas por simulação numérica utilizando-se diferentes valores de permeabilidade para o

meio constituído pela manta de fibra de vidro enquanto que a curva de número (4) provém dos resultados experimentais.

Os valores da permeabilidade, correspondentes às simulações numéricas, são decrescentes da curva (1) para a (5), conforme explicitado na legenda da Fig. 4. Observa-se que os resultados numéricos simulam bem o comportamento físico esperado para o sistema, ou seja, diminuindo-se a permeabilidade do meio (isto é, sendo este mais impermeável) aumenta-se o tempo necessário para a total impregnação da manta, como consequência da redução nas velocidades.

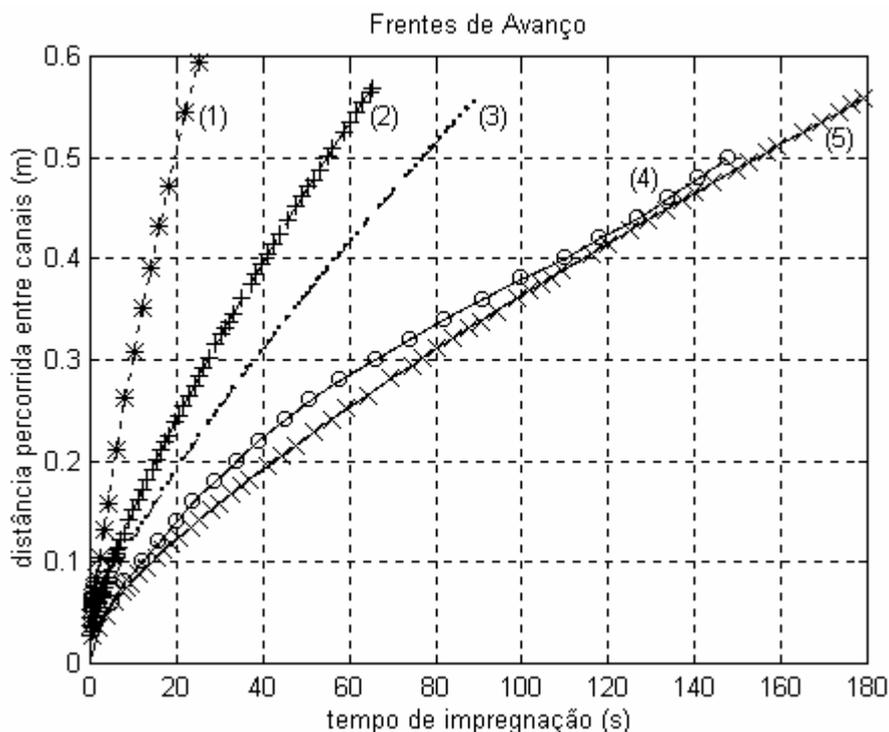


Figura 4 – Frente de Avanço x Tempo com diferentes permeabilidades (curvas obtidas por simulação para várias permeabilidades: (1) $3,7 \times 10^{-11} \text{ m}^2$; (2) $5,4 \times 10^{-12} \text{ m}^2$; (3) $2,7 \times 10^{-12} \text{ m}^2$; (5) $6,75 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, e curva (4) experimental obtida através de filmagem)

Nota-se também que a curva (5) aproxima-se bastante da obtida experimentalmente, curva (4), com desvios menores que 10% em toda a sua extensão. Embora não tenha sido possível, até o momento, obter-se dados experimentais confiáveis sobre o valor estimado da permeabilidade da manta, queremos salientar que o valor de $\kappa = 6,75 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, correspondente à curva (5) está dentro dos valores típicos de permeabilidade para o tipo de manta utilizada neste trabalho.

A Fig. 5 ilustra a saída gráfica, correspondente a um instante típico, para a frente de impregnação da resina poliéster obtida através do programa de simulação desenvolvido neste trabalho. Este gráfico refere-se a resultados da simulação correspondente a um domínio de dimensões reduzidas (0,1m de comprimento e 0,08 m de largura). A figura apresenta ainda o tipo e a disposição dos elementos utilizados para discretização do domínio de cálculo. As diferentes tonalidades de cinza ilustram elementos com marcações diferentes, conforme comentado no item 4, e que representam células cheias, da fronteira móvel (mais claras), vazias (mais escuras), e dos canais de entrada e saída do contra-molde.

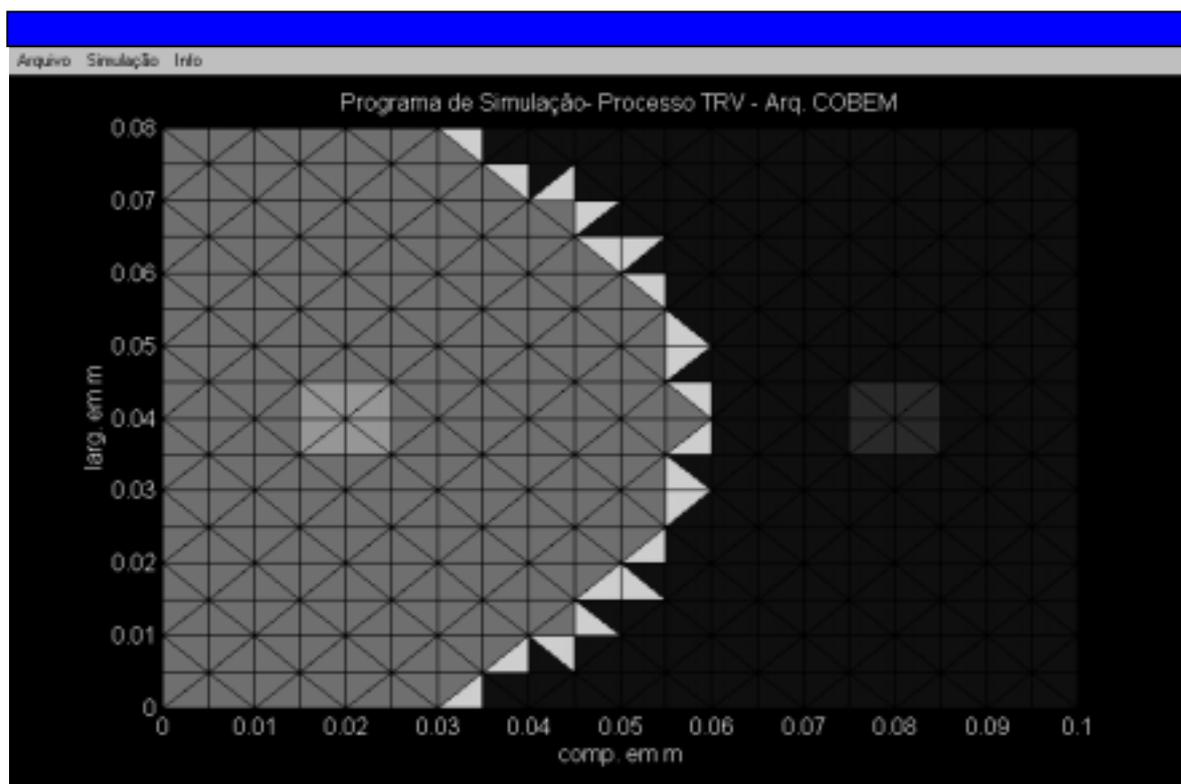


Figura 5 – Saída gráfica da frente de impregnação

Queremos salientar que a evolução temporal da frente, obtida numericamente, reproduz bem, qualitativa e visualmente, o avanço da resina observado através do contra-molde translúcido, seja pelo tempo de impregnação (Fig. 4), pelo formato da própria frente (com ponto de máximo e simetria na linha de centro) ou pela maneira de preenchimento do molde.

7. CONCLUSÃO

A implementação computacional do modelo matemático adotado apresentou bons resultados preliminares ao se comparar estes resultados numéricos com os obtidos experimentalmente. Isto fica evidenciado ao se verificar a semelhança no comportamento das curvas 4 e 5 (Fig.4), demonstrando que o modelo de viscosidade adotado em conjunto com o efeito da permeabilidade da manta de fibra de vidro, considerada de valor constante, resulta numa evolução temporal do avanço da frente que retrata com bastante similaridade o comportamento da resina poliéster dentro do molde, a medida em que a mesma é impregnada.

Agradecimentos

À Prof. Rosario Elida Suman Bretas juntamente com os membros de sua equipe, do DEMa-UFSCar, pelo auxílio técnico e por permitirem a utilização de equipamentos imprescindíveis à caracterização da resina.

À Mercedes-Benz do Brasil pela proposta do trabalho, além do apoio financeiro e técnico para desenvolvimento do mesmo.

REFERÊNCIAS

- Agassant, J. F., Avenas, P., Sergent, J. PH., Carreau, P.J., 1991, Polymer processing: principles and modeling, Oxford University Press – New York, 475p.
- Araujo, G. A., Ferreira, M. P., Merlotte, C., Ueda, M. C. S., Xavier, M., 1997, Desenvolvimento de um processo para fabricação de peças em material composto para aplicações automobilísticas/Development of a manufacturing process to parts in composite material for automotive applications, anais do XIV COBEM, cd rom COBEM-97, arquivo COB384, 9p.
- Barret, R., Berry, M., Chan, T., Demmel, J., Donato, J., Dongarra, J., Eijkhout, V., Pozo, R., Romine, C., Vorst, H. V. D., 1992, TEMPLATES - For the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods, cap. 2, pp. 14-16.
- Bruschke, M. V., Advani, S. G., 1994, A numerical approach to model non-isothermal viscous flow through fibrous media with free surfaces, International Journal for Numerical Methods in Fluids, October, v.19, no.7, pp.575-603.
- Caetano, I.K.,1992, Permeabilidade de meios fibroso, Dissertação de mestrado – Universidade Federal de São Carlos, 163p.
- Dávila, M. A., 1996, Processo de injeção de polímeros semicristalinos – caracterização e simulação assistida por computador. Florianópolis, 110p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
- Matsuoka, T., 1995, Fiber orientation prediction in injection molding, cap. 3, pp. 113-141. In: Polypropylene: structure, blends and composites, edited by J. Karger-Kocsis, London.
- Rao, S. S., 1989, The finite element method in engineering, Pergamon Press, 2.ed, 643p.
- Segerlind, L. J., 1984, Applied finite element analysis, John Wiley & Sons, Inc., 2.ed, 427p.
- Tadmor, Z., Gogos, C. G., Principles of Polymer Processing, 1979, eds John Willey & Sons – New York, 736 p.
- Tucker III, C. L., 1989, Fundamentals of computer modeling for polymer processing, Hanser Publishers – New York, Computer Aided Engineering for Polymer Processing, 623p.
- Zaidi, K. , Abbès, B., Teodosiu, C., 1996, Finite element simulation of mold filling using marker particles and the κ - ϵ model of turbulence, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v.13, no.3-4, Aug., pp. 241-247.

SIMULATION OF RESIN FLOWS IN VEHICULAR PARTS MOULDS DURING INJECTION PROCESS

Abstract. *This work deals with the development of a mathematical model for the flow of polyester resin through a fiberglass mat inserted in a flat rectangular mould. The characterization of the resin front allows the estimate of the time required to completely fill the mould. This study has a direct application in the car industry where vehicles structural parts are made of composite materials .The numerical algorithm solves Darcy's equation for flow through a porous medium, and uses a finite element technique, taking pressure as variable. The non-newtonian characteristic of the fluid is taken into account by adjusting at each time step, the fluid viscosity, calculated by an experimental power law relation. The flow domain is discretized in an structured mesh of triangular elements. As the resin front advances through the mould, the flow domain is redefined by using cell markers and “advancing particles”.*

Keywords: Finite elements, flow in moulds, porous medium