

# 11º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS

16 a 20 de Outubro de 2011  
Campos do Jordão - SP

## ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE FLUXO DE FLUIDO EM MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA

Felipe F. Luz<sup>1</sup>, Sandro C. Amico<sup>1\*</sup>, Iran R. de Oliveira<sup>2</sup>, Sérgio M. S. Ribeiro<sup>2</sup>, Antonio G. B. de Lima<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Laboratório de Materiais Poliméricos – LAPOL/UFRGS, Porto Alegre – RS – amico@ufrgs.br

<sup>2</sup> - Universidade Federal de Campina Grande – Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos – LCTF/DEM/UFCG, Campina Grande – PB – gilson@dem.ufcg.edu.br

**Resumo:** Este trabalho visa caracterizar o fluxo de um fluido em um meio poroso (fibroso) durante o processo de Moldagem por Transferência de Resina (RTM). Foi utilizada uma pré-forma de tecido (0/90) de fibra de vidro que foi impregnada por um óleo vegetal em injeção radial de RTM. Diversos experimentos foram realizados variando-se pressão de injeção, teor volumétrico de fibra e temperatura do molde a fim de observar o comportamento do fluxo deste fluido. Resultados de permeabilidade e viscosidade do fluido nas diversas temperaturas e o tempo de preenchimento do molde são apresentados e analisados. Concluiu-se que existem relações entre as variáveis de processo e caracterizou-se o comportamento do fluido no meio fibroso proposto na intenção de alimentar a simulação numérica futura.

**Palavras-chave:** RTM, Fluxo de Fluido, Permeabilidade, Meio Poroso Fibroso, Temperatura.

### *Fluid Flow Behavior Studies in Resin Transfer Molding*

**Abstract:** This work aims at characterizing the fluid flow in a porous (fibrous) media in a Resin Transfer Molding (RTM). A glass fiber fabric (0 / 90) was impregnated with a vegetable oil in a radial RTM injection. Several experiments were performed varying injection pressure, fiber volume fraction and mold temperature in order to observe the flow behavior in these conditions. Permeability, fluid viscosity at various temperatures and mold filling time were measured. The relationship among the variables involved was discussed, and it was possible to characterize the behavior of the fluid in the fibrous media studied in order to feed future numerical analysis.

**Keywords:** RTM, Fluid Flow, Permeability, Porous Fibrous Media, Temperature.

### **Introdução**

Moldagem por transferência de resina (RTM) é um processo de fabricação de materiais compósitos onde uma resina líquida termorrígida é injetada em um molde fechado contendo uma pré-forma fibrosa seca, impregnando o reforço, para posterior cura da resina. Dos diversos processos de fabricação de materiais compósitos avançados, o RTM vem ganhando destaque no setor industrial [1]. Porém, este processo ainda é sub-utilizado comparado ao seu potencial, e uma das principais barreiras é a reprodutibilidade das propriedades finais e acabamento das peças [2], além do entendimento do processo de fluxo da resina. Uma adequada caracterização da permeabilidade da pré-forma é determinante para a simulação computacional do fluxo e para o processo de fabricação real, evitando assim, a fabricação de peças defeituosas [3].

No processo RTM, a equação geralmente aceita para descrever o fluxo planar de um fluido Newtoniano em um meio poroso fibroso é a lei de Darcy dada pela Equação (1):

$$\frac{\mathbf{r}}{u} = -\frac{1}{\mu} K \cdot \nabla P \quad (1)$$

onde:  $\frac{\mathbf{r}}{u}$  = vetor velocidade da frente de fluxo (m/s);  $\mu$  = viscosidade dinâmica (cP);  $K$  = permeabilidade (m<sup>2</sup>) e  $\nabla P$  = gradiente de pressão (bar/m).

Quando se utiliza a infiltração radial no RTM, o tempo requerido ( $t_{ff}$ ) para o fluido, que passa por uma porta de injeção com raio  $r_{inj}$  e pressão de injeção  $P_{inj}$ , preencher uma região de raio  $r_{ff}$  dentro do molde é dado pela Equação (2), onde  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 1 - V_f$ , sendo  $V_f$  a fração volumétrica de fibras) é a porosidade do meio poroso fibroso. Esta equação é aplicada apenas até que a frente de fluxo alcance a parede do molde.

$$t_{ff} = \frac{\varepsilon \cdot \mu}{2 \cdot K \cdot P_{inj}} \cdot \left( r_{ff}^2 \cdot \ln \left( \frac{r_{ff}}{r_{inj}} \right) - \frac{1}{2} \cdot (r_{ff}^2 - r_{inj}^2) \right) \quad (2)$$

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo estudar o processo de moldagem de materiais fibrosos por RTM e seus parâmetros físicos (permeabilidade e porosidade do meio fibroso, viscosidade do fluido e tempo de enchimento) para se obter um melhor entendimento do fenômeno, especialmente considerando o fluxo em temperatura acima da temperatura ambiente.

## Experimental

O fluido Newtoniano utilizado para os experimentos foi um óleo vegetal (óleo de soja) comercial de densidade 0,914 g/cm<sup>3</sup>. Para o reforço fibroso, utilizou-se tecido (0/90) de fibra de vidro-E da *Owens Corning* (300 g/m<sup>2</sup>). Antes de se iniciar o processo de moldagem, mediu-se a viscosidade do fluido em diversas temperaturas (Fig. 1) em um viscosímetro Brookfield HBDV-II+C/P com o *spindle* S40. Utilizou-se moldagem por RTM, em injeção radial, como mostra a Fig. 2.

Durante a infiltração, foi medido o raio da frente de fluxo em diversos tempos e, empregando a Equação 2, determinou-se a permeabilidade do meio. Com os dados de pressão coletados, gerou-se um gráfico de Pressão × Tempo. Diversos experimentos foram realizados variando-se o teor volumétrico de fibras ( $V_f$ ), a pressão de injeção e a temperatura do molde. Os parâmetros dos experimentos estão descritos na Tabela 1.

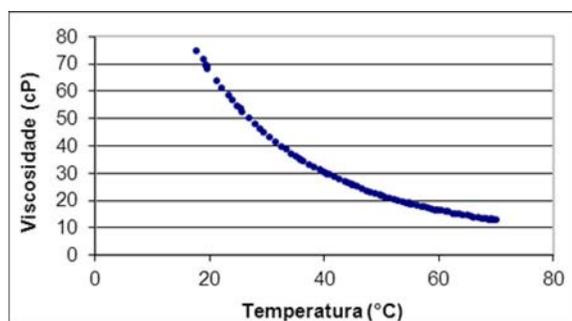


Figura 1 - Variação da viscosidade em função da temperatura do óleo vegetal.



Figura 2 - Evolução do fluxo do fluido na injeção radial RTM para 1 s (A), 90 s (B) e 560 s (C).

Tabela 1 - Parâmetros dos experimentos realizados.

	Nomenclatura	$P_{inj}$ (bar) – pré-set	$V_f$ (%) – pré-set	$V_{f,real}$ (%)	Temperatura (°C)
Variação de $V_f$	P01V20TA	0,1	20	24,0	23
	P01V30TA	0,1	30	30,3	23
	P01V40TA	0,1	40	43,4	23
Variação de $P_{inj}$	P03V40TA	0,3	40	41,7	23
	P05V40TA	0,5	40	41,6	23
	P07V40TA	0,7	40	42,2	23
	P09V40TA	0,9	40	41,7	23
	P11V40TA	1,1	40	41,9	23
Variação de Temperatura	P03V40T40	0,3	40	41,7	40
	P03V40T60	0,3	40	42,2	60

Os experimentos P03V40T40 e P03V40T60 contemplam o aquecimento do molde no processo, a 40°C e a 60°C. O sistema de aquecimento do molde foi feito através de resistências elétricas acopladas ao molde. Para se aferir a temperatura foram tiradas fotos térmicas da superfície do molde (Fig. 3) com o equipamento Fluke TiR32 *Thermal Imager*. Para o experimento P03V40T40, este equipamento indicou dentro do molde uma faixa de temperatura entre 38,2°C e 40,3°C. Já para o experimento P03V40T60, a faixa de temperatura obtida foi entre 55,8°C e 60,1°C.

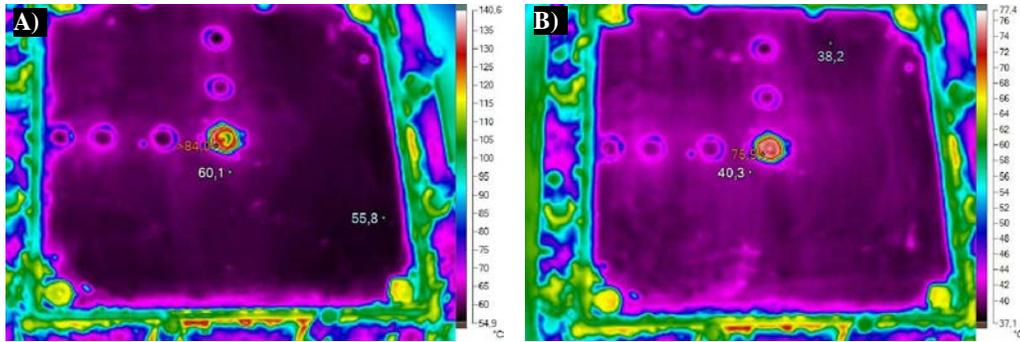


Figura 3 - Imagens térmicas do molde: A) Molde a 40°C. B) Molde a 60°C.

### Resultados e Discussão

Os resultados das medidas de permeabilidade ( $K$ ) e de tempo de preenchimento ( $t_{fill}$ ) do molde para os diversos experimentos estão apresentados na Tabela 2. Observando-se os experimentos P03V40TA, P03V40T40 e P03V40T60, nota-se que o aumento da temperatura alterou os valores de permeabilidade, pois mesmo os experimentos possuindo a mesma  $P_{inj}$  e  $V_f$ , a viscosidade do fluido varia com a temperatura. Para calcular a permeabilidade (Equação 2) dos experimentos P03V40T40 e P03V40T60 assumiu-se os valores de viscosidade do fluido nas temperaturas de aquecimento do molde, ou seja, mesmo o fluido estando inicialmente na temperatura ambiente, foram considerados os valores de viscosidade do fluido nas temperaturas de 40°C e 60°C, respectivamente. Isto porque o cálculo da permeabilidade tem início somente quando o equipamento estabiliza a  $P_{inj}$ , o que demanda, para estes experimentos, cerca de 100 s, assim, acredita-se ter havido um tempo suficientemente longo para que o calor fosse transferido do molde (com espessura pequena, 2 mm) para o fluido, alterando sua viscosidade.

Tabela 2 - Permeabilidade e tempo de preenchimento para os diversos experimentos

	Experimento	$V_f$ (%)	$P_{inj}$ (Pa)	$K$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> )	$t_{fill}$ (s)
Variação de $V_f$	P01V20TA	23,964	7420	136,8	130
	P01V30TA	30,27	7780	30,9	420
	P01V40TA	43,41	7460	4,4	2280
Variação de $P_{inj}$	P03V40TA	41,715	28570	3,0	860
	P05V40TA	41,562	48260	2,5	700
	P07V40TA	42,242	67240	2,2	640
	P09V40TA	41,726	88450	2,0	560
	P11V40TA	41,862	99800	3,7	380
Variação de Temperatura	P03V40T40	41,66	27200	2,5	790
	P03V40T60	42,17	27200	1,6	780

A Fig. 4 ilustra a variação de pressão de injeção durante o processo de RTM, nela são apresentados os gráficos dos experimentos P05V40TA e P11V40TA. Ao se analisar a variação da pressão nesses

experimentos, observa-se que à medida que se aumenta a pressão a permeabilidade diminui levemente, mas dentro do erro experimental. Estudos mostram diferenças nas medidas de permeabilidade provocadas por alterações na pressão de injeção [4], bem como sugerem que a taxa de fluxo, a pressão, a natureza do fluido, o manuseio do reforço e a rigidez cavidade do molde estão entre os fatores que podem fortemente influenciar as medidas de permeabilidade [5]. O experimento P11V40TA é uma exceção, pois sua permeabilidade aparentemente aumentou consideravelmente. Isto se deve ao fato de que o equipamento demanda um longo tempo para a pressão estabilizar (em 1,0 bar), deixando poucos pontos para serem empregados na resolução da Equação 2, levando a erros na determinação experimental de  $K$ . Assim, conclui-se que o sistema RTM (i.e. molde) utilizado não pode ser empregado nestas condições de moldagem para determinar  $K$ . Apesar da utilização da Lei de Darcy ser algumas vezes controversa, como apresentado em [6], nestes experimentos ela se demonstrou confiável.

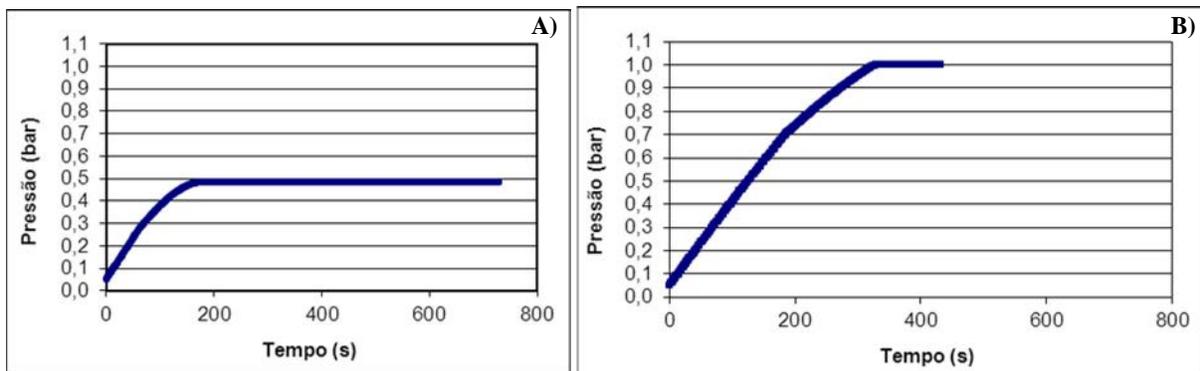


Figura 4 – Gráfico pressão × tempo durante a infiltração RTM para: A) P05V40TA e B) P11V40TA.

Os experimentos P01V20TA e P01V30TA foram os que apresentaram os maiores valores de permeabilidade. Isto era esperado, pois são os experimentos com menor volume de fibra, ou seja, com um maior volume de poros para o fluido percorrer.

Por fim, ao se analisar o tempo de preenchimento do molde, é visível sua relação com a  $P_{inj}$ , ou seja, quanto maior a pressão, menor o tempo para preencher o molde. O aumento da temperatura também diminuiu o tempo de preenchimento do molde.

## Conclusões

As equações utilizadas mostraram-se empregáveis no estudo do comportamento do fluxo do fluido em um processo de moldagem por RTM. Quanto maior for o  $V_f$ , menor será a permeabilidade, e a variação da temperatura no molde provocou alterações na permeabilidade. O tempo de preenchimento do molde é diretamente afetado com a alteração na  $P_{inj}$  e de temperatura do molde. Com os experimentos realizados foi possível caracterizar o comportamento do fluido no meio fibroso proposto e assim ter dados suficientes para uma futura aplicação em uma análise numérica.

## Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro, bem como aos pesquisadores referenciados que, com suas pesquisas, ajudaram no seu melhoramento.

## Referências Bibliográficas

1. G.Morren, M.Bottiglieri, S.Bossuyt, H. Sol, D.Lecompte, B.Verleye, S. V. Lomov. *Composites: Part A* 40, 2009, 244–250.
2. J. Li, C. Zhang, R. Liang, B. Wang. *Composites: Part A* 36, 2005, 564–580.
3. K. Hoes, D. Dinescu, H. Sol, M. Vanheule, R. S. Parnas, Y. Luo, I. Verpoest. *Composites: Part A* 33, 2002, 959–969.
4. I. C. Visconti, A. Langella, M. Durante. *8<sup>th</sup> European Conference on Composite Materials*, 1998, 737-743.
5. R. Gauvin, F. Trochu, Y. Lemenn, L. Diallo. *Polymer Composites*, 1996, 17(1): 34-42.
6. S. C. Amico, Tese de Doutorado, University of Surrey, 2000.