

Processamento de Placa Espessa de Compósito através de Moldagem por Transferência de Resina

Wanderley F. de Amorim Júnior¹, Gustavo Queiroz Chaves²,
Verônica M. A. Calado³, Fernando Luiz Bastian⁴

^{1,4}CT/PEMM/COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro
Ilha do Fundão – Cx. 68505- Rio de Janeiro, RJ - CEP 21941-972.
e-mail : wander@metalmat.ufrj.edu.br, fbastian@metalmat.ufrj.edu.br

²Centro Tecnológico do Exército, Av. das Américas, 28705, Guaratiba, Rio de Janeiro, RJ, CEP: 23020-040
e-mail : gqueiroz@ctex.eb.br

³EQ/Universidade Federal do Rio de Janeiro - Ilha do Fundão -Rio de Janeiro,RJ - CEP 91949-900
e-mail: calado@eq.ufrj.br

RESUMO

Devido às suas elevadas propriedades mecânicas específicas, os materiais compósitos estão enfrentando demandas novas, onde a capacidade de produção em massa a um custo mais acessível se tornou indispensável. A Moldagem por Transferência de Resina ou RTM (*Resin Transfer Molding*) constitui um promissor processo de fabricação de materiais compósitos. O objetivo deste trabalho é o estudo experimental do processo de infusão durante a fabricação de placa espessa por RTM. Os materiais usados nos experimentos foram: tecido de fibra de vidro e resina éster-vinílica com catalisador Butanox e acelerador CoNaP. As placas de material compósito eram constituídas de 32 camadas de fibra de vidro com espessura de 25,4 mm. Dois tipos de experimentos foram realizados: o primeiro para medir a influência do sistema de injeção de resina no processamento e o segundo para medir a influência da quantidade de resina presente no reservatório de injeção. Nos processamentos realizados, o sistema de injeção de resina alterou o tempo de preenchimento da preforma. A variação na quantidade de resina no reservatório não só alterou os tempos de preenchimento como impediu o preenchimento da preforma em um dos processamentos realizados. Não foi possível impedir o fenômeno de *race-tracking*. Baseando-se nos experimentos realizados, pode-se concluir que: o sistema de injeção de resina é importante no real entendimento do processamento por RTM e que a quantidade de resina no reservatório de injeção pode influenciar o processamento por RTM.

Palavras chaves: Materiais compósitos, processamento de materiais compósitos, moldagem por transferência de resina.

Processing of Thick Composite Plate by Resin Transfer Molding Process

ABSTRACT

Because of their high specific mechanical properties, composite materials are facing new demands, where the large scale production capacity with low cost became important. Resin Transfer Molding (RTM) constitutes a promising process of composite materials manufacturing. The objective of this work is an experimental study of the infusion process during the manufacture of thick plate by RTM. The materials used in the experiments were: fiber glass fabric and vinylester resin with Butanox initiator and CoNaP accelerator. The preform had 32 layers of fiber glass reinforcements whose dimension was approximately 25,4 mm thick. Two types of experiments were carried out: the first one, to measure the influence of the resin injection system on the processing and the second one, to measure the influence of the amount of resin in the reservoir on the injection processing. By the experiments, we could conclude that the resin injection system and the variation of the amount of resin modified the fulfilling time of the preform and prevented the fulfilling of the preform in the experiments. It was not possible to prevent the phenomenon of *race-tracking*. The resin injection system and the variation of the amount of resin in the reservoir of injection influence RTM processes.

Keywords: Composite materials, composite materials processing, resin transfer molding.

1 INTRODUÇÃO

As elevadas propriedades mecânicas específicas dos materiais compósitos têm propiciado uma crescente demanda de seu uso. A capacidade de produção em massa a um custo mais acessível se tornou indispensável. A Moldagem por Transferência de Resina ou RTM (*Resin Transfer Molding*) constitui um promissor processo de fabricação de materiais compósitos. Neste processo, uma preforma seca de fibra é colocada em um molde, a resina é injetada sob alguma combinação de pressão e/ou vácuo e, depois da cura, a peça pode ser retirada.

Os materiais compósitos foram tradicionalmente empregados para aplicações aeroespaciais, em que os laminados são de espessura fina; porém, nos últimos anos, espessas e complexas estruturas de materiais compósitos estão sendo produzidas para as mais diversas aplicações de engenharia. A fabricação de placas compósitas espessas é um desafio tecnológico diferente do processamento de placas finas já que durante o processamento de placas finas, o gradiente de temperatura e o escoamento de fluido na direção da espessura são desprezados.

Muitas pesquisas realizadas para a compreensão do escoamento no interior do molde aplicam modelos físico-matemáticos originados na teoria do Escoamento de Meios Porosos, como a Lei de Darcy. BELLOLI *et al* [1] e MASTERBERGEN [2] chamaram a atenção para a importância do conhecimento do escoamento no sistema de injeção de resina (antes de entrar no interior do molde). O modelo Nedanov-Advani relaciona o escoamento no tubo de injeção com o modelo de Darcy no interior do molde [1]. Para MASTERBERGEN [2], todos os componentes que constituem o sistema de injeção de resina (conectores, conexões, válvulas, *manifold* e mangueiras) devem ser modelados para uma real compreensão do processo por RTM. O fluxo é descrito em função da perda de pressão, da viscosidade e de uma constante K que engloba toda a informação geométrica do sistema de injeção de resina. Essa constante é considerada como a permeabilidade equivalente do sistema de injeção, resultando em uma equação similar à lei de Darcy. Embora a física envolvida no sistema de injeção de resina (escoamento viscoso no interior de tubos) e na preforma (escoamento em meios porosos) sejam diferentes, o escoamento através de ambos pode ser descrito por equações similares. Portanto, para entender o processamento por RTM é necessário estudar o escoamento viscoso no interior do sistema de armazenamento e de injeção de resina.

O objetivo deste trabalho é o estudo experimental do processo de infusão durante a fabricação de placa espessa por RTM.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais usados nos experimentos foram: tecido de fibra de vidro AF 0090(1100 g/m²), fabricado pela Fibertex e resina éster-vinílica DERAKANE 411-350 com catalisador Butanox (1,5%) e acelerador CoNaP (0,3%). As placas de material compósito eram constituídas de 32 camadas de fibra de vidro, com espessura de 25,4 mm (1”) e área de 238 x 238 mm². A estação de processamento consiste de uma mesa de processamento com sistema de fixação para duas câmeras digitais (uma filmando a parte superior e a outra filmando a parte inferior do molde), Figura 1(a), de um molde constituído de um espaçador de aço 1045 com 300 x 300 mm² de área e espessura de 25,4 mm (1”) e de duas placas de acrílico de 300 x 300 x 30 mm que formam a tampa superior e inferior do molde. Nos centros dessas tampas se encontram respectivamente o ponto de alimentação da resina e de vácuo, Figura 1(b). Foi usada uma pressão de vácuo de 50 KPa ou 30 KPa.



Figura 1: a) Estação de processamento por RTM e b) Molde de injeção.

Foi empregado um sistema de instrumentação da National Instruments para monitorar o sensor de pressão do vácuo acoplado a um computador tipo PC. Dois tipos de experimentos foram realizados: o primeiro para medir a influência do sistema de injeção de resina no processamento e o segundo para medir a influência da quantidade de resina presente no reservatório de injeção.

Para o primeiro tipo de experimento, foram testadas duas condições: a resina é injetada através de uma campânula (onde a resina é forçada a passar por mangueira, conectores, válvulas) e, na segunda condição, a resina é injetada por meio de uma mangueira colocada diretamente dentro do béquer. No segundo tipo de experimento, foram testadas diversas quantidades de resina no interior do reservatório de alimentação. Os experimentos seguiram a Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Experimentos realizados.

Experimento	Pressão de vácuo	Sistema de Injeção
1	50 KPa	Campânula com 600 gramas de resina
2	30 KPa	Campânula com 1100 gramas de resina
3	30 KPa	2 Béqueres de PP com 500 gramas de resina em cada um
4	30 KPa	1 Béquer com 900 gramas de resina
5	30 KPa	2 Béqueres de PP com 500 gramas de resina em cada um

Os parâmetros usados neste trabalho foram:

- Tempo para atingir o eixo maior (tempo R_1) e o eixo menor (tempo R_2) da elipse formada durante o escoamento da resina sobre a preforma no interior do molde, ver Figura 2a, como proposto por GAUVIN *et al* [3].
- Tempo do surgimento dos primeiros sinais da resina na parte inferior do molde (tempo de *race-tracking*), ver Figura 2b.

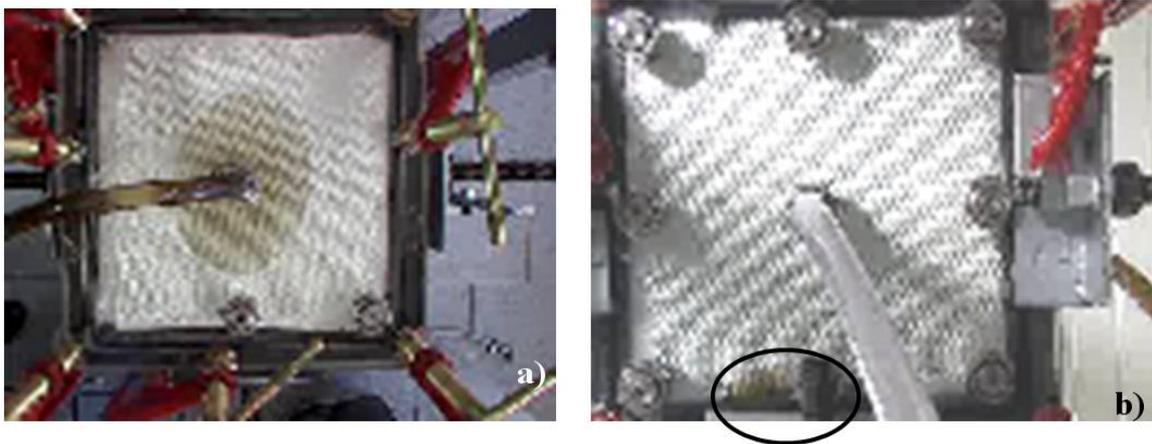


Figura 2 : a) eixo maior da elipse (tempo R_1) e o eixo menor da elipse (tempo R_2) e b) surgimento dos primeiros sinais da resina na parte inferior do molde.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Influência do Sistema de Injeção de Resina no Processamento por RTM

A Tabela 2 apresenta os resultados dos processamentos realizados para os dois tipos de experimentos.

Tabela 2: Resultados dos processamentos realizados

Experimento	Preenchimento	Observação
1	Sem sucesso	Por falta de resina
2	Sem sucesso	Resina gelificou na campânula
3	Com sucesso	-
4	Sem sucesso	Por falta de resina
5	Com sucesso	-

A Figura 3 apresenta a análise do escoamento no interior do molde baseando-se nos tempos R_1 e R_2 para os experimentos realizados.

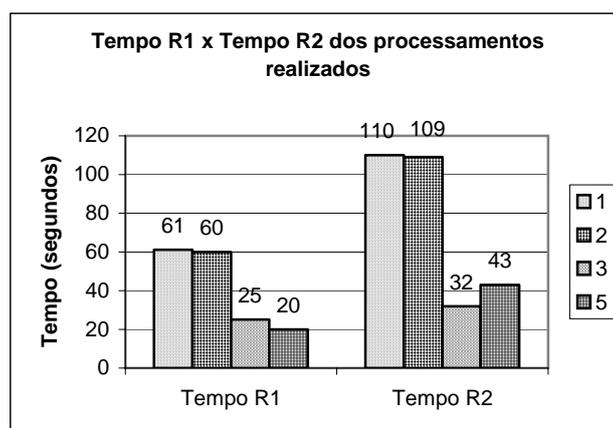


Figura 3: Análise do escoamento no interior do molde baseando-se nos tempos R_1 e R_2 para os experimentos realizados.

O uso da campânula nos experimentos (1 e 2) mais do que dobrou os tempos (R_1 e R_2) para o total desenvolvimento da elipse formada durante o escoamento da resina através da preforma, quando comparado aos processamentos (3 e 5) que usaram como reservatório de injeção só o bécquer.

A Figura 4 apresenta a análise do escoamento no interior do molde, baseando-se no tempo de *race-tracking* para os experimentos realizados.

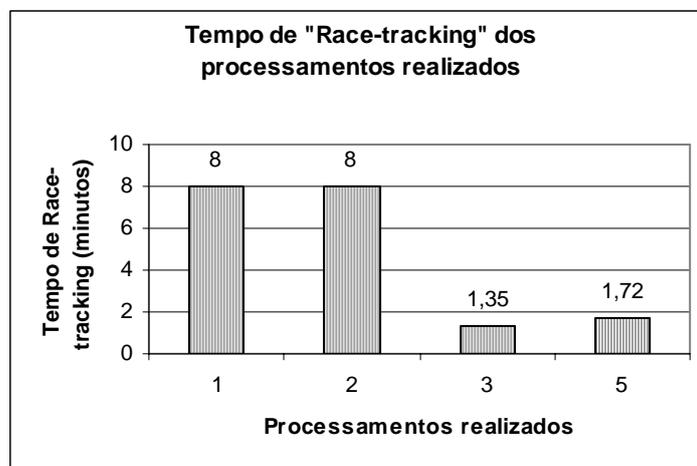


Figura 4: Análise do escoamento no interior do molde baseado no tempo de *race-tracking* para os experimentos realizados.

O uso da campânula nos processamentos (1 e 2) mais do que quadruplicou os tempos de *race-tracking* através da preforma quando comparado aos processamentos (3 e 5) que usaram como reservatório de injeção só o bécquer.

A grande diferença de comportamento apresentado durante o processamento com a mudança do sistema de injeção da campânula para um simples bécquer pode estar relacionada com a maior perda de carga apresentada pelo primeiro sistema. Portanto, o escoamento no sistema de injeção de resina é importante para o entendimento do processamento por RTM.

3.2 Influência da Quantidade de Resina no Reservatório de Injeção

A Figura 5 apresenta a análise do escoamento no interior do molde baseando-se nos tempos R_1 , R_2 e *race-tracking* para os experimentos 1 e 2.

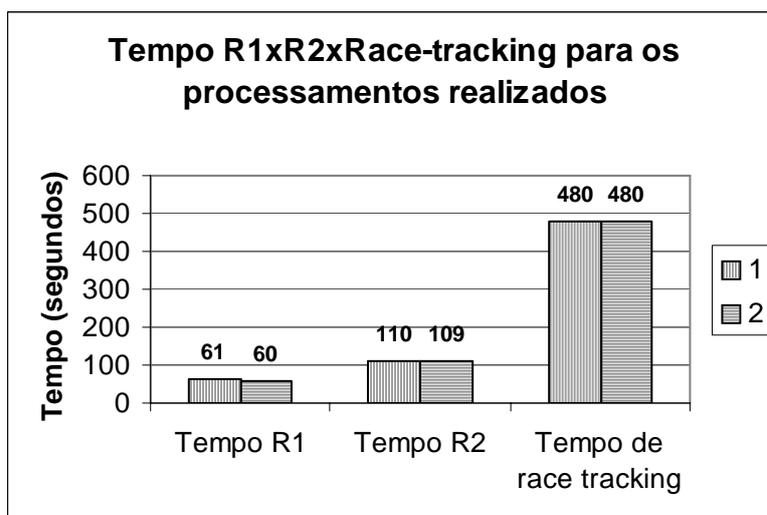


Figura 5: Análise do escoamento no interior do molde baseado nos tempos R_1 , R_2 e de *race-tracking* para os experimentos realizados.

O vácuo teve o seu valor alterado de 50 KPa no experimento 1 para 30 KPa no experimento 2. Com essa mudança, esperava-se a diminuição dos tempos R_1 , R_2 e o *race-tracking*, porém os mesmos ficaram praticamente inalterados, ver Figura 5. A única diferença entre o experimento 1 e 2 está na quantidade de resina no reservatório da campânula que é de 600g e 1100g, respectivamente.

A Figura 6 apresenta a análise do escoamento no interior do molde baseando-se nos tempos R_1 e R_2 e *race-tracking* para os experimentos 3, 4 e 5.

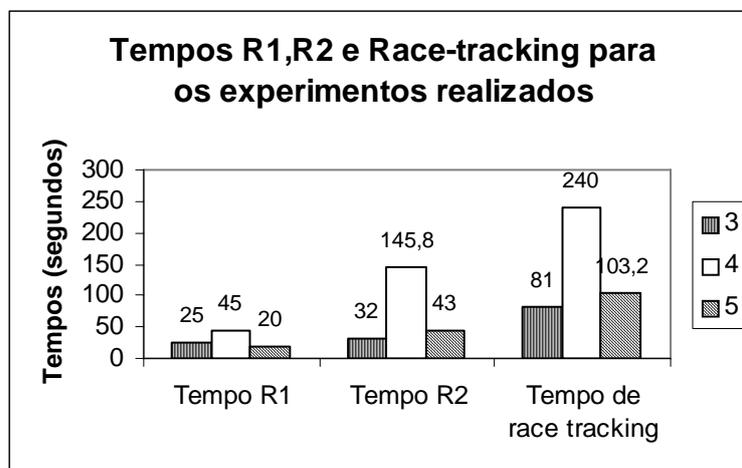


Figura 6: Análise do escoamento no interior do molde baseando-se nos tempos R_1 , R_2 e de *race-tracking* para os experimentos realizados.

A comparação desses experimentos mostra a diferença de tempo de preenchimento com a mudança da quantidade de resina. Os experimentos 3 e 5 são aparentemente semelhantes, ver Tabela 1, ambos possuindo a mesma quantidade de resina nos béqueres, porém os tempos do experimento 4 comparando com os experimentos anteriores são maiores.

O que as Figuras 5 e 6 podem estar indicando é a influência da quantidade de resina no reservatório de injeção no processamento por RTM. Uma das explicações para esse fato seria a aceleração da reação de cura da resina com uma maior quantidade da mesma, devido à maior liberação de calor durante a reação de polimerização.

3.3 Influência do *race-tracking* no Preenchimento da Preforma

As Figuras 7(a) e (b) apresentam a forma de preenchimento da preforma na parte superior e inferior do molde, respectivamente. A frente de escoamento apresentou formato elíptico, Figura 7(a), atingiu a parede lateral do molde e intenso *race-tracking* (tendência do fluido penetrar no espaço entre a fibra e a parede do molde) foi notado após o completo espalhamento da resina sobre a preforma. Como pode ser observada na Figura 7(b), a placa foi preenchida das bordas para o centro.

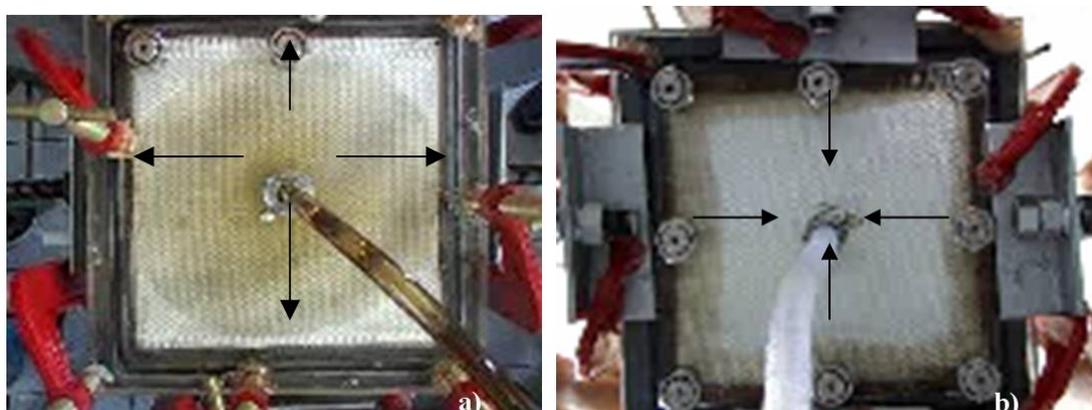


Figura 7: Imagens da frente de escoamento avançando no interior do molde.

A placa produzida pelo experimento 2 foi seccionada para análise, ver Figura 8. Como indicado nessa figura, houve o preenchimento das fibras até uma profundidade em torno de 12 mm; a área à esquerda da curva apresenta-se impregnada de resina e a da direita não houve impregnação de resina, o que corrobora com os resultados apresentados anteriormente; ou seja, o preenchimento da preforma foi da borda para o centro.



Figura 8: Preenchimento da placa do experimento 2.

Até o momento, as análises feitas nos processamentos realizados mostraram que o fenômeno de *race tracking* é um dos responsáveis pelo preenchimento da preforma.

HAMMAMI *et al* [4] afirmam em seu trabalho que o *race-tracking* pode produzir um importante fluxo transversal, em direção ao interior da preforma, gerado por um gradiente de pressão. Nos processamentos realizados, um gradiente de pressão pode existir entre a borda e o centro da preforma já que o ponto de vácuo é aplicado no centro da tampa inferior do molde, ver Figura 7(b). Esse gradiente de pressão, presente no interior da preforma, pode estar gerando o fluxo de resina no sentido da borda para o centro do molde e com isso preenchendo a preforma.

4 CONCLUSÃO

Baseado nos experimentos realizados pode-se concluir que:

- O sistema de injeção de resina é importante no real entendimento do processamento por RTM. Nos processamentos realizados, esse sistema alterou o tempo de preenchimento da preforma.
- A quantidade de resina no reservatório de injeção pode influenciar no processamento por RTM. Nos processamentos realizados, a quantidade de resina não só alterou os tempos de preenchimento como impediu o preenchimento da preforma em um dos processamentos (experimento 2).
- Não foi possível impedir o fenômeno de *race-tracking*, sendo esse um dos responsáveis pelo preenchimento da preforma.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao CNPq e ao Centro Tecnológico do Exército pelo apoio financeiro e técnico respectivamente.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] BELLOLI, A., SCHAER, N., ADVANI, S.G., HEIDER, D., ERMANNI, P., “PERMSTAT – Automated Permeability Measurement Station”, Poster, www.ccm.udel.edu. Acessado em abril de 2004.
- [2] MASTBERGEN, D.B., *Simulation and Testing of Resin Infusion Manufacturing Processes for Large Composite Structures*, M.Sc. Thesis, Montana State University, Bozeman, Montana, USA, 2004.
- [3] GAUVIN, R., TROCHU, F., LEMENN, Y., DIALLO, L., “Permeability Measurement and Flow Simulation through Fiber Reinforcement”, *Polymer Composites*, v. 17, pp. 34- 42, 1996.
- [4] HAMMAMI, A., GAUVIN, R., TROCHU, F., “Modeling the Edge Effect in Liquid Composites Molding”, *Composites Part A* , v. 29A, 1998.
- [5] ABRAHAM, D., MCLLHAGGER, R., “Investigations Into Various Methods of Liquid Injection to Achieve Mouldings with Minimum Void Contents and Full Wet Out”, *Composites Part A*, v. 29A, pp. 533-539, 1998.
- [6] BICKERTON, S., ABDULLAH, M.Z., “Modeling and Evaluation of the Filling Stage of Injection/Compression Moulding”, *Composites Science and Technology*, v. 63, pp. 1359–1375, 2003.
- [7] FOX, R.W., MCDONALD, A.T., *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, Rio de Janeiro, ed. Guanabara, 1988.
- [8] MACHADO, J.C.V., *Reologia e Escoamento de Fluidos*, Rio de Janeiro, ed. Interciência, 2002.