

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INFILTRAÇÃO EM PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS POR RTM

Gustavo L. P. Machado^{*1}, André C. Garay¹, Pedro B. Roesse¹, Tiago M. Schmidt¹, Jeferson A. Souza², Sandro C. Amico¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS – Porto Alegre-RS – gugalpm@terra.com.br

² Universidade Federal do Rio Grande – FURG – Rio Grande-RS

O Processo RTM é um dos processos de fabricação de materiais compósitos de maior importância para a indústria moderna e consiste na injeção de uma resina polimérica através de um reforço fibroso disposto dentro de um molde. A simulação da infiltração é importante para o controle do tempo dos ciclos de processo, uma vez que influi não só no tempo de fabricação de cada peça mas também nos materiais a serem usados. No presente trabalho, usou-se o software Composite RTM Process 2 para simular a infiltração de resina poliéster em reforços de fibra de vidro em fluxo retilíneo e radial. Também foram realizadas simulações de infiltração de resina poliéster carregada com CaCO₃. Estas simulações foram comparadas a resultados experimentais e analíticos. Os resultados se mostraram dentro de uma faixa de erro esperada mostrando que o fluxo pode ser descrito tanto analítica quanto numericamente.

Palavras-chave: RTM, Simulação de Fluxo, Injeção retilínea, Injeção radial

Numerical analysis of the infiltration in the RTM composite manufacturing process

The RTM process is one of the most important composite manufacturing processes in use nowadays and consists in the injection of a polymeric resin into a fibrous reinforcement disposed inside a mold. Injection simulation is important to control process cycle times, which affects not only the manufacturing time of each part, but also materials selection. In the present work, the software Composite RTM Process 2 was used to simulate the injection of polyester resin in glass fibre reinforcements, in rectilinear and radial flow pattern. Simulations using polyester resin with CaCO₃ as filler were also performed. These simulations were compared to experimental and analytical results. The results were in agreement, within an expected error range, confirming that the flow may be analytically and numerically monitored.

Keywords: RTM, Flow Simulation, Rectilinear injection, Radial injection

Introdução

Nos últimos anos, a moldagem por transferência de resina (RTM) atraiu muita atenção na área de compósitos termofixos de alta performance. As principais vantagens do processo em relação aos métodos de fabricação convencionais são a boa qualidade superficial do produto obtido, baixo investimento de capital, excelente controle das propriedades mecânicas, baixas pressões de preenchimento, possibilidade de se produzir peças grandes e complexas e baixo tempo de ciclo. Além disso, o RTM é um processo com baixo impacto ambiental, uma vez que o processamento se dá num sistema fechado, controlando assim emissões indesejadas [1,2]. Como resultado, o processo RTM tem aplicações e potencial de aplicação em uma variedade de ramos da indústria, como na automotiva, aeroespacial e esportiva [3].

O processo de RTM se dá em quatro estágios: o primeiro é a colocação do reforço na cavidade do molde; o segundo começa assim que o molde é fechado e selado, quando a resina é introduzida através da porta de injeção, tendo como força motriz um gradiente de pressão; o terceiro

se dá após a injeção, quando ocorre a cura da resina; o último estágio é a abertura do molde e a desmoldagem da peça [2,4]. Entre os fatores que afetam o processo, estão o projeto, a temperatura e o preenchimento do molde, além da molhabilidade do reforço pela resina. Entre estes, o preenchimento do molde é um dos fatores de maior importância e está relacionado ao tipo de reforço, a posição do ponto de injeção, entre outros. Uma falha no projeto do molde pode levar à formação de pontos não-impregnados no reforço, que reduzem as propriedades mecânicas e a qualidade do acabamento superficial [1].

Para uma boa impregnação, conhecimento preciso do comportamento do fluxo de resina no molde é de grande importância. Embora algumas vezes seja aceitável procurar uma estratégia de injeção por tentativa e erro, este método é arriscado e caro, especialmente se o custo do material e do molde é significativo [2]. Além disso, quando se trata do custo do processo, as variáveis mais importantes são o tempo de preenchimento do molde e o tempo de cura da resina. Ou seja, uma vez escolhida a resina, o único grau de liberdade, em busca da minimização do tempo de processo, reside no tempo de preenchimento [5].

O uso de softwares de simulação de fluxo é, portanto, de grande valia para a otimização do processo. Através de simulações numéricas do processo, uma estratégia de injeção pode ser adaptada de acordo com as necessidades do projeto da peça, com o intuito de obter um processo de produção robusto com o menor tempo de ciclo possível. Estes métodos de simulação, por sua vez, necessitam de dados de entrada confiáveis em relação à geometria do molde, viscosidade da resina e porosidade e permeabilidade do reforço [2].

Há várias alternativas de softwares no mercado que podem ser usados para modelar o processo de RTM. Entre elas, pode-se citar aplicativos específicos para a modelagem do RTM como o PAM-RTM e também os softwares chamados de CFD (Computational Fluid Dynamics), os quais não são específicos para RTM, mas que trazem módulos que podem simular o avanço e a cura da resina dentro do molde. Estes aplicativos, devido à ampla variedade de problemas que podem resolver e também ao fato de serem capazes de trabalhar com geometrias complexas, normalmente requerem um esforço significativo por parte do usuário durante a definição do problema e, dependendo do caso, exigem também um alto custo computacional. Na tentativa de se evitar as dificuldades acima mencionadas, neste trabalho foi realizada a simulação da etapa de impregnação do processo RTM no software comercial Composite RTM Process 2, o qual restringe-se a um número menor de aplicações, mas que possui como vantagens um menor custo computacional, menor complexidade de uso e interface amigável no software. Este software é desenvolvido pelo Pôle de Plasturgie de L'Est, de Saint-Avold, França. O tempo decorrido para o preenchimento

ponto a ponto do molde fornecido pelo software foi comparado a valores experimentais e analíticos em fluxo retilíneo e radial.

Por fim, este trabalho também abordou o uso de CaCO_3 como carga na resina usada no processo RTM. O CaCO_3 é de interesse da indústria por sua influência na melhoria de algumas propriedades mecânicas dos compósitos e na redução de custos [6]. A adição de carbonato de cálcio diminui a permeabilidade e simular tal situação é bastante relevante para o processamento, uma vez que uma permeabilidade muito baixa pode acarretar em ciclos muito longos de processamento, inviabilizando o método de processamento utilizado.

Metodologia

O *Composite RTM Process 2* é um software criado com múltiplas funções, entre elas:

- Projeto e pré-dimensionamento de moldes para fabricação de materiais compósitos;
- Análise de comportamento mecânico para dimensionamento de peças de compósito;
- Ferramenta auxiliar na decisão entre diferentes processos de fabricação de compósitos, como RTM Light, RTM, compressão e injeção e;
- Análise do fluxo de resina no processo de RTM para geometrias 2D.

O software também possui um banco de dados de diferentes tipos de reforços e resinas para uso imediato, com possibilidade de criação de quaisquer novos tipos, uma vez inseridos os dados de um material particular no banco. No presente trabalho, foi usado o módulo de simulação de infiltração apenas. Foram criadas novas entradas no banco de dados do material para cada característica de reforço utilizado. Os dados de entrada para cada simulação são: geometria do molde (largura, espessura e comprimento), permeabilidade (K), viscosidade (μ), fração volumétrica ($\%V_f$), Pressão de injeção (P_{inj}) e raio de injeção (r_{inj}).

Foram feitas simulações neste software para 4 casos diferentes de infiltração pelo processo RTM: (i) infiltração retilínea de resina poliéster em fibra de vidro usando pressão de injeção constante ($P_{inj} = 0,1$ bar) e $\%V_f$ variável, (21,3 a 36,3%); (ii) infiltração radial de resina poliéster em fibra de vidro usando pressão de injeção constante ($P_{inj} = 0,1$ bar) e $\%V_f$ variável (21,3 a 33%); (iii) infiltração retilínea em reforço de fibra de vidro com $\%V_f$ constante (33 a 36%) e pressão de injeção variável (0,1 a 1,1 bar), e (iv) infiltração retilínea em reforço de fibra de vidro com uma variação na adição de carbonato de cálcio (0 a 15% em peso de resina) e $\%V_f$ constante.

Os resultados das simulações (posição do fluxo x tempo de preenchimento) foram comparados com dados experimentais disponíveis de outros estudos de permeabilidade planar de reforços de fibra de vidro publicados pelo grupo de pesquisa [6,7]. O molde utilizado nos experimentos referenciados na Tabela 1 tem dimensões de 320 x 150 mm. Para os experimentos

retilíneos, sem adição de CaCO_3 , a posição de preenchimento total, t_{fill} , é considerada 310 mm [7]. Nos experimentos radiais, a posição para alcançar t_{fill} é de 150 mm e nos experimentos retilíneos com CaCO_3 , o t_{fill} se dá em 320 mm [6,7]. A representação do molde e do avanço da frente de fluxo se encontra na Figura 1.

Tabela 1 – Relação das propriedades usadas para os diferentes experimentos.

Tipo de infiltração	% CaCO_3	K - Permeabilidade (m^2)	%Vf	ϵ - Porosidade	P_m (bar)	μ - Viscosidade Dinâmica (cP)	Fonte
Retilínea	0	$7,91 \times 10^{-10}$	21.3	0.787	0.10	62	[7]
Retilínea	0	$4,58 \times 10^{-11}$	25.8	0.742	0.10	65	[7]
Retilínea	0	$3,91 \times 10^{-12}$	28.7	0.713	0.10	71	[7]
Retilínea	0	$1,74 \times 10^{-13}$	33.0	0.67	0.10	71	[7]
Radial	0	$5,42 \times 10^{-10}$	23.5	0.765	0.10	71	[7]
Radial	0	$1,78 \times 10^{-10}$	36.3	0.637	0.10	68	[7]
Retilínea	0	$6,46 \times 10^{-10}$	24.1	0.759	0.15	118	[6]
Retilínea	5	$4,89 \times 10^{-10}$	24.2	0.759	0.15	145	[6]
Retilínea	10	$4,29 \times 10^{-10}$	24.7	0.753	0.15	199	[6]
Retilínea	15	$3,55 \times 10^{-10}$	23.5	0.765	0.15	252	[6]



Figura 1 – Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea no experimento [6]

Além disso, os resultados numéricos também foram comparados com a solução analítica assumindo a equivalência com o fluxo de um fluido incompressível por um meio poroso, a conservação de massa e a Lei de Darcy, representada na Equação 1 [7,8]:

$$\vec{u} = -\frac{1}{\mu} \left[\overline{\overline{K}} \right] \nabla P \quad (1)$$

onde \vec{u} é o vetor da velocidade superficial do fluido, μ é a viscosidade dinâmica, $\left[\overline{\overline{K}} \right]$ é o tensor de permeabilidade e ∇P o gradiente de pressão. Esta relação se aplica a fluidos Newtonianos e é usada com sucesso para simular o fluxo para o processo RTM. No caso do presente trabalho, todos os experimentos foram realizados à pressão de injeção constante. Lembrando que a velocidade é a

variação da posição com o tempo e assumindo μ e $\left[\overline{K}\right]$ constantes, a solução da Equação 1 é dada pela Equação 2:

$$t_{ff} = \frac{\phi\mu}{2KP_{inj}} x_{ff}^2 \quad (2)$$

onde (t_{ff}) é o tempo requerido para a frente de fluxo alcançar uma posição (x_{ff}) no caso de um fluxo retilíneo, ϕ é a porosidade do reforço ($= 1 - V_f$) e P_{inj} a pressão de injeção da resina [7,8]:

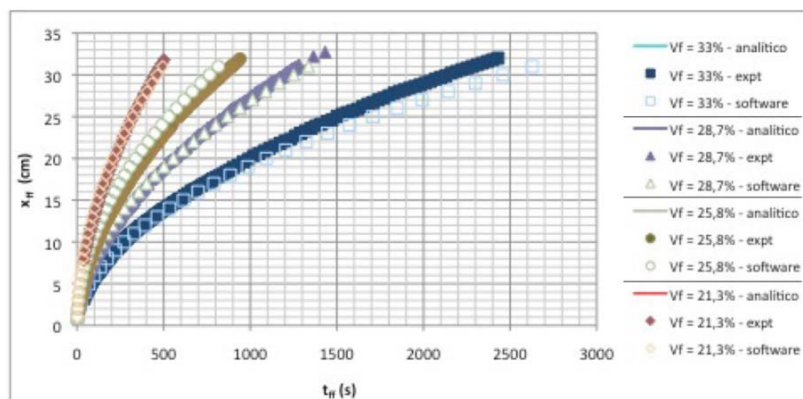
Para o caso radial, a solução da Equação 1 é dada pela Equação 3, onde r_{ff} é a posição radial da frente de fluxo [8]:

$$t_{ff} = \frac{\phi\mu}{2KP_{inj}} \left[r_{ff}^2 \ln\left(\frac{r_{ff}}{r_{inj}}\right) - \frac{1}{2}(r_{ff}^2 - r_{inj}^2) \right] \quad (3)$$

onde r_{inj} é o raio da porta de injeção, neste caso 4,25 mm.

Resultados e Discussão

Para o caso retilíneo (Figura 2a), os resultados do software foram muito similares aos resultados experimentais, com uma variação inferior a 10%. Quando os resultados da simulação são comparados aos resultados analíticos, a margem de variação é ainda menor – 5%. A principal consideração feita em relação à discrepância entre os dados experimentais e do software foi de que a configuração real inicial do fluxo nos experimentos é diferente da configuração usada pelo software, para o fluxo retilíneo. Como visto na Figura 1, o ponto de injeção no molde usado nos experimentos é radial, levando a um fluxo radial nos primeiros instantes do experimento, até que o raio de curvatura deste círculo seja tão grande que se assemelhe a uma reta. Esta característica gera grandes desvios para tempos curtos, como exemplifica a Figura 2b.



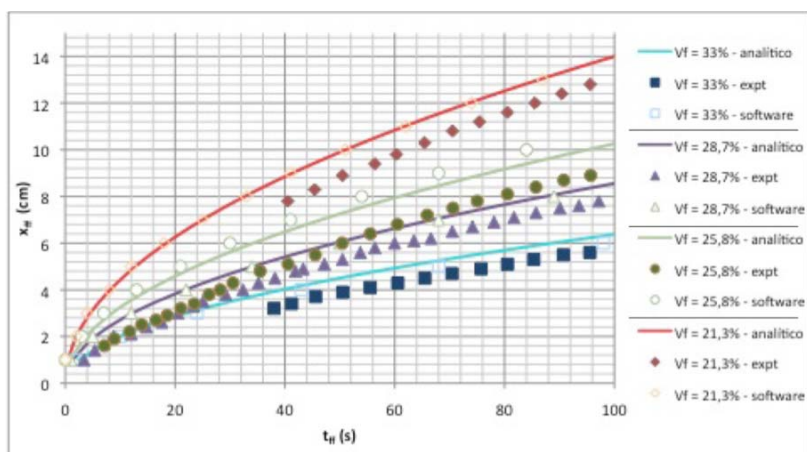


Figura 2: (a) Representação da posição da frente de fluido com o tempo para os experimentos retilíneos com diferentes $\%V_f$ ($P_{inj} = 0,1$ bar); (b) Representação para valores de tempo de 0 a 100 s e posições de 0 a 15 cm apenas.

O aumento da pressão de injeção ocasiona o aumento da velocidade da frente de fluxo, e em seguida, investigou-se a magnitude da diferença das posições para diferentes pressões de injeção (com $\%V_f$ constante), como mostra a Figura 3. A diferença entre a posição indicada pela simulação e a posição medida experimentalmente aumenta com o aumento de pressão – de 7,9 para 29,4%. Ou seja, quanto mais rápido o fluxo, maior a influência do padrão de infiltração inicial no molde, já que o software considera um avanço plano da frente de fluxo.

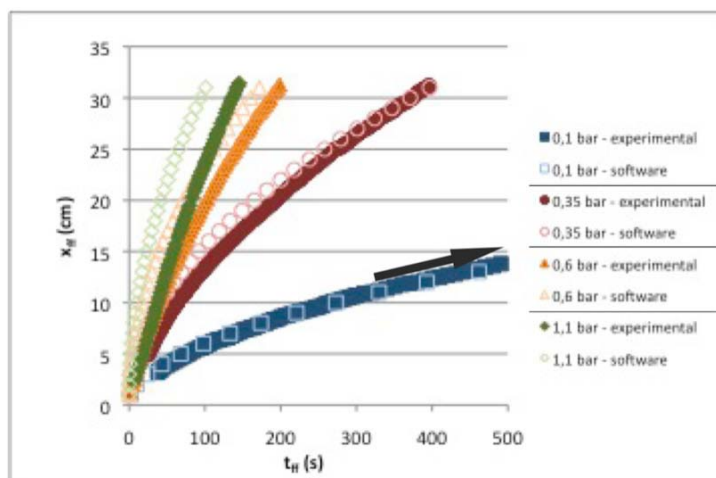


Figura 3 – Representação da posição da frente de fluxo com o tempo para fluxo retilíneo ($\%V_f$ 33-36%)

No outro estudo, compararam-se então os resultados de experimentos com fluxo radial, uma vez que o padrão radial de infiltração é idêntico ao padrão considerado pela simulação desde o início da infiltração. Na Figura 4 estão representadas as posições da frente de fluxo com o tempo para o fluxo radial [6].

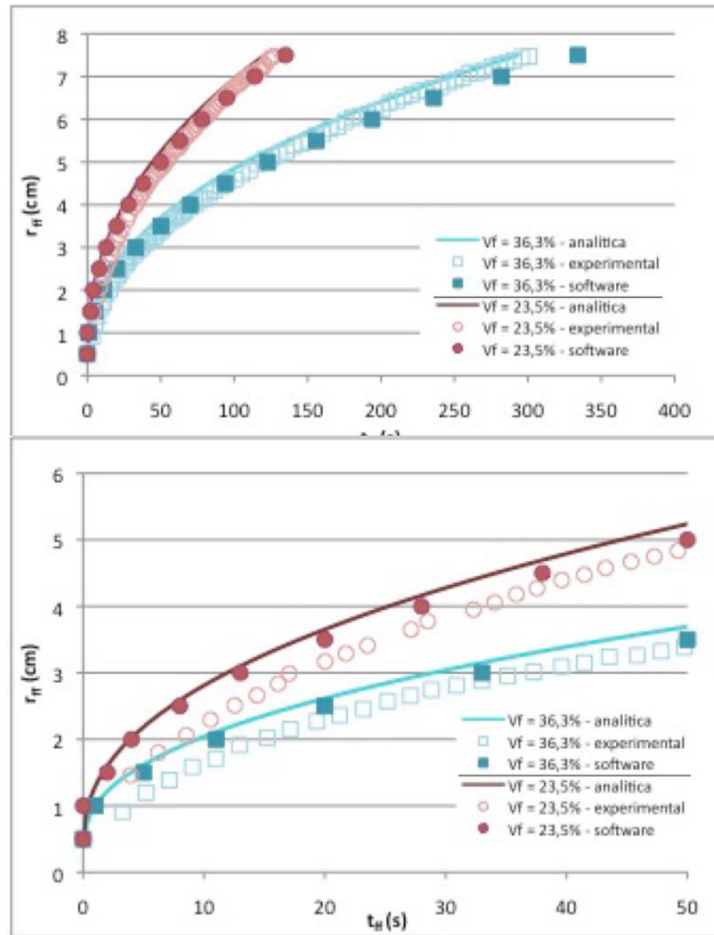


Figura 4 (a) Representação da posição da frente de fluxo com o tempo para infiltração radial ($P_{inj} = 0,1$ bar); (b) Representação para uma faixa de tempo de 0 a 50 s apenas.

A discrepância em relação à geometria do molde nos primeiros instantes de infiltração diminui, em relação à infiltração retilínea. A margem de variação desta diferença de tempo de preenchimento se manteve em um limite de 12% para $\%V_f = 36,3$.

Por fim, foram comparados os resultados da simulação numérica com os dados experimentais de infiltrações retilíneas de resina poliéster carregada com diferentes teores de CaCO_3 em um reforço de fibra de vidro. A Figura 5 representa os pontos experimentais e da simulação da infiltração neste caso. Lembra-se aqui que, com a adição de CaCO_3 , alteram-se os valores de ρ , μ e K em cada teor de CaCO_3 .

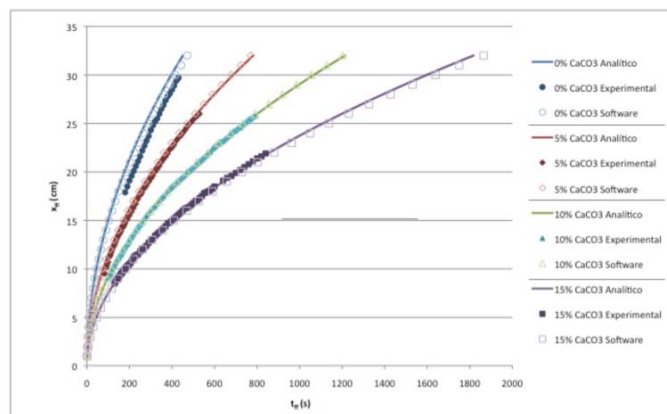


Figura 5: Representação da frente de fluxo com o tempo para infiltração retilínea de resina carregada com CaCO₃ (P_{inj} = 0,15 bar)

Os valores mais uma vez caem dentro de uma faixa aceitável de diferença: aproximadamente 12%.

Na Tabela 2 estão apresentadas as discrepâncias para todas as simulações.

Tabela 2 – Diferença entre os valores da simulação por software com os valores experimentais e analíticos

Tipo de infiltração	%CaCO ₃	%V _f	t _{fil} ^{Exp} (s)	t _{fil} ^{Software} (s)	t _{fil} ^{Teórico}	(t _{Exp} -t _{Software})/t _{Exp} (%)	(t _{Teórico} -t _{Software})/t _{Teórico} (%)	(t _{Teórico} -t _{Exp})/t _{Teórico} (%)
Retilínea	0	21.3	480	495	491	3.1%	-0.9%	2.2%
Retilínea	0	25.8	890	890	914	0.0%	2.6%	2.6%
Retilínea	0	28.7	1272	1336	1313	5.0%	-1.8%	3.1%
Retilínea	0	33	2280	2460	2368	7.9%	-3.9%	3.7%
Radial	0	24.1	127	135	121	6.3%	-11.8%	-5.2%
Radial	0	35.3	300	334	293	11.3%	-13.8%	-2.2%
Retilínea	0	24.1	525	472	451	-10.1%	-4.6%	-16.4%
Retilínea	5	24.2	860	771	782	-10.4%	1.5%	-9.9%
Retilínea	10	24.7	1330	1201	1214	-9.7%	1.0%	-9.6%
Retilínea	15	23.5	2020	1865	1817	-7.7%	-2.6%	-11.1%

As maiores diferenças ocorreram nas frações volumétricas de 21,3 e 33% para fluxo retilíneo, 35,3% para fluxo radial e para resina carregada com 5% de CaCO₃, nas simulações de infiltração em fluxo retilíneo com resina carregada com CaCO₃. Entre os fatores que geram esta pequena discrepância, pode-se citar

- Que o software considera a frente de fluxo como retilínea desde o início da infiltração, enquanto isso não ocorre experimentalmente;
- A diferença entre os valores teóricos e das simulações se deve principalmente a uma limitação de inserção dos valores no número de casas decimais. Para a permeabilidade, 3 casas são possíveis apenas, e para a pressão e viscosidade, 2 casas apenas;
- Outro fator, também importante, é uma leve variação da pressão durante o experimento, que leva a variações na velocidade da frente de fluxo. Além disso, no início do experimento a pressão não é constante, pois ela leva algum tempo para estabilizar;
- Também pode-se destacar a dificuldade de um controle perfeito da %V_f no reforço e tal variação pontual na velocidade do fluxo pode, interferir na medida de permeabilidade, especialmente para baixos V_f.

Outras fontes de erro que justificam as discrepâncias nos experimentos, são as limitações inerentes ao método de medida da permeabilidade por mensuração da frente de fluxo visualmente. Por exemplo, pode se destacar

- A curva de permeabilidade versus %V_f [9], que, devido ao seu perfil característico, mostra que uma pequena variação na %V_f, pode levar a uma grande variação na permeabilidade medida para baixos %V_f;
- A frente de fluxo, como vista na Figura 1, não é uma reta perfeita. Tal fenômeno torna difícil a medida da posição exata da frente de fluxo. Esta dificuldade se torna maior quanto

mais perto da porta de injeção se mede os pontos, uma vez que, em boa parte dos experimentos, como mostra a Figura 1, essa frente é uma curva por um grande período de duração do experimento;

- Devido à total impossibilidade de se aproximar uma curva por uma reta nessas posições iniciais do molde, a medida da posição da frente de fluxo nessas posições não é possível, como se nota nas Figuras 2b e 4b;

- Outra complicação inerente ao método usado é que o momento exato da entrada da resina no molde é difícil de ser estabelecido, uma vez que o operador só consegue começar a cronometrar o experimento quando vê o início do fluxo impregnando o reforço e;

- Por fim, a reta x_{ff}^2 por t_{ff} , usada para se calcular a permeabilidade, não é uma reta perfeita, mas uma aproximação dos dados experimentais.

Devido às características inerentes do método experimental e do modo de variação das propriedades do reforço fibroso, percebe-se também que os tempos finais de preenchimento são normalmente maiores para as medidas experimentais que para a simulação do software.

Conclusões

Simulações de fluxos retilíneos usando a mesma pressão de injeção e diferentes % V_f foram realizadas com o uso do software Composite RTM Process 2 para determinar sua aplicabilidade na simulação do processo RTM. Nas simulações realizadas, o tempo de preenchimento e os pontos da frente de fluxo em relação ao tempo reproduziram os dados experimentais e analíticos dentro de uma margem de erro aceitável. Comparações de infiltrações radiais foram realizadas e demonstram um erro similar ao erro verificado na condição de fluxo retilíneo. Para ampliar o foco do estudo, também foi investigada a aplicação da simulação na impregnação com fluxo retilíneo de resinas carregadas com $CaCO_3$. Da mesma forma que nas outras infiltrações, a simulação reproduziu os dados experimentais. A fonte dos erros foi discutida e considerada inerente ao método e às características de variação das propriedades na infiltração de reforços fibrosos, indicando o software como possível suporte a futuros estudos de permeabilidade e infiltração, desde que sejam consideradas suas limitações de aplicação, especialmente na construção de uma geometria de peça mais complexa.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPERGS pelo apoio financeiro e ao colega de LAPOL Alexsandro Oliveira.

Referências Bibliográficas

1. P.A. Sreekumar; J. Kuruvilla; G. Unnikrishnan; T. Sabu *Compos. Sci Technol.* 2007, 67, 453-461.
2. G. Morren; S. Bossuyt; H. Sol *Compos. Part A – Appl. S.* 2008, 39, 1530-1536.
3. S. Amico; C. Lekakou *Compos. Sci Technol.* 2001, 61, 1945-1959.
4. S. Soukane; F. Trochu *Compos. Sci Technol.* 2006, 66, 1067-1080.
5. C.H. Park; A. Saouab; J. Bréard; W.S. Han; A. Vautrin; W.I. Lee *Compos. Sci Technol.* 2009, *In Press*.
6. A.C. Garay; S.C. Amico; Anais do X Congresso Brasileiro de Polímeros, 2009, *In Press*.
7. T.M. Schmidt; T.M. Goss; H.L. Ornaghi Jr.; S.C. Amico Anais do IV Congresso Brasileiro de Carbono, 2007
8. C. D. Rudd; A. C. Long; K. N. Kendall; C. G. E. Mangin, *Liquid Moulding Technologies*, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, 1997.
9. A. Endruweit; L.T. Harper; T.A. Turner; N.A. Warrior; A.C. Long *Compos. Part A – Appl. S.* 2008, 39, 1660-1669.