

VII SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 23 à 25 de Novembro de 2016

ESTUDO NUMÉRICO DE UM PROCESSO DE INFUSÃO DE RESINA PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE UM CANAL VAZIO EM FORMA DE Y

Carolline A. Schnich¹, Glauciléia M. C. Magalhães², Sandro C. Amico³, Luiz A. O. Rocha⁴, Liércio A. Isoldi², Jeferson A. Souza², Elizaldo D. dos Santos²

 ¹ Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil Avenida Itália, Km 8, s/n - Carreiros, Rio Grande - RS, 96203-900. e-mail: caryene@hotmail.com
 ² Universidade Federal do Rio Grande, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil. e-mail: mglaucileia@gmail.com e-mail: liercioisoldi@furg.br e-mail: jasouza@furg.br
 ³ Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. e-mail: amico@ufrgs.br
 ⁴ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,Brasil e-mail: luizrocha@mecanica.ufrgs.br

RESUMO

O presente trabalho avalia numericamente o processo de Infusão de Resina Líquida (LRI- Liquid Resin Infusion) em distintas configurações de canais vazios com geometria "Y" inseridos numa placa retangular com meio poroso (que simula o comportamento do reforço fibroso). O LRI consiste na injeção de uma resina polimérica em um molde fechado constituído por um meio poroso e canais vazios, que facilitam a propagação da resina por toda extensão do domínio. É essencial destacar que esse processo apresenta grande aplicação na indústria automotiva, marítima e aeroespacial. O escoamento de resina aqui estudado é considerado incompressível, laminar e transiente tanto no meio poroso quanto no não-poroso, ou seja, é simulado o princípio físico de funcionamento do processo de LRI. O principal objetivo é comparar o tempo de preenchimento da resina ao longo de todo o domínio em diferentes configurações de canais vazios em formato de "Y" e identificar a geometria que minimiza o tempo de injeção. As restrições geométricas do problema são a área da placa com o meio poroso, a espessura e comprimento total do canal vazio. O problema possui dois graus de liberdade, a razão entre os comprimentos do ramo simples e dos ramos bifurcados do canal aberto (H_0/H_1) e o ângulo entre os ramos bifurcados e a direção horizontal (a), que neste estudo é mantido constante, $\alpha = 10^\circ$. As equações de conservação de massa e quantidade de movimento para a mistura de resina-ar e, uma equação para o transporte de fração volumétrica de resina são resolvidos com o Método dos Volumes Finitos (FVM). A interação entre as fases é tratada com o método Volume of Fluid (VOF) e para representar o efeito do meio poroso sobre o escoamento da resina é considerada uma força de campo dada pela lei de Darcy. Os resultados obtidos demonstraram que a variação de configuração tem alta influência no tempo de preenchimento da resina. Para

o caso estudado, observou-se que a maior razão H_0/H_1 conduziu ao melhor desempenho do sistema, ou seja, minimizou o tempo de injeção da resina no reforço fibroso.

Palavras-chave: Infusão líquida de resina, Simulação numérica, Canais vazios, Geometria Y.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação dos materiais compósitos tem aumentado extensamente na indústria automobilística, aeronáutica e naval desde a década de 40, devido as suas notáveis vantagens, nas quais se evidenciam: baixa densidade, alta resistência, flexibilidade de projeto com geometrias complexas e excelente resistência à corrosão. Além disso, os custos de manutenção em materiais compósitos são menores em comparação com outros materiais de comportamento mecânico semelhante (Pardini e Gonçalves, 2009; Poodts et al., 2013). Como consequência, várias técnicas industriais foram desenvolvidas para a fabricação de materiais compósitos. Entre eles, é possível destacar os processos baseados na modelagem líquida de compósitos (LCM), nos quais podem ser citados: moldagem por transferência de resina (RTM) e infusão líquida de resina (LRI), que têm sido amplamente aplicados para a produção de vários componentes como painéis de veículos, cascos de barcos, hélices de navios e pás para turbinas eólicas (Poodts et al., 2013; Yenilmez e Sozer, 2009).

Os processos de Infusão de Resina Líquida (LRI) estão possibilitando a produção de peças estruturais grandes, espessas e complexas. Este processo consiste na injeção de uma resina polimérica através de canais vazios inseridos em um domínio com meio fibroso, o que torna mais fácil a propagação global da resina ao longo do domínio do molde (Wang et al, 2012). Uma das maiores dificuldades em aplicar o processo de infusão está relacionada com o preenchimento do molde, ou seja, garantir que o reforço fibroso seja infiltrado completamente pela resina no interior do molde, para que assim a qualidade final da peça possa ser garantida. Como consequência, vários estudos têm sido realizados no âmbito analítico, experimental e numérico a fim de melhorar a compreensão acerca do escoamento de resina no processo de infusão (Goncharova et al, 2015). A despeito de vários estudos experimentais e numéricos, poucos trabalhos focam na avaliação da influência da geometria de canais de escoamento de resina em processos de Moldagem Líquida de Compósitos. Entre os recentes estudos nesse assunto destaca-se as investigações de Isoldi et al. (2013) que empregaram o Design Construtal para avaliar o efeito da geometria no tempo de injeção durante um processo de Moldagem de Transferência de Resina Light (LRTM). Assim como, as recentes investigações de Magalhães et al. (2016) que aplicaram o Design Construtal para investigar a influência da geometria de canais vazios em forma de "I" e "T" inseridos em uma placa retangular bidimensional com um meio poroso sobre o tempo de injeção da resina em todo domínio analisado, simulando um processo de infusão. Os melhores formatos obtidos apontaram melhoras de cerca de 140% e 139% no tempo de injeção da resina para os canais em forma "I" e "T" respectivamente, sem formação de espaços vazios dentro do domínio da placa.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar numericamente, um processo de infusão de resina líquida para diferentes configurações de canais vazios em forma de Y inseridos em uma placa retangular com meio poroso, que simulam o princípio de funcionamento de um processo de infusão de resina líquida (LRI). O principal objetivo é investigar a influência das diferentes configurações sobre o comportamento da resina no molde fechado do domínio. Mais precisamente, os tempos de preenchimento da resina são comparados para as diversas configurações. Para todas as configurações avaliadas, a soma de todos os comprimentos e espessuras de canais são iguais, isto é, apenas a configuração do canal vazio inserido na placa retangular porosa é variada. Além disso, foi considerado neste estudo que o ângulo entre os canais abertos bifurcados e a direção horizontal é constante ($\alpha = 10^{\circ}$) sendo variada a razão H_0/H_1 (relação entre os comprimentos do ramo simples e bifurcado do canal em Y). As simulações efetuadas pretendem avaliar se as mudancas nos formatos dos canais vazios podem levar a melhorias significativas no tempo de infusão de resina. O avanço da resina é modelado através das equações de conservação de massa, quantidade de movimento para a mistura de resina-ar e uma equação para o transporte de fração volumétrica de resina, sendo resolvidas com o Método dos Volumes Finitos (FVM) (Fluent, 2007; Morren et al, 2009). A interação entre as fases é tratada com o método Volume of Fluid (VOF) e a resistência do meio poroso é considerada através da Lei de Darcy como uma força de campo. Mais precisamente, as simulações são realizadas utilizando um código de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), mais precisamente o software FLUENT (Isoldi et al, 2012).

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

No processo de infusão de resina, a resina flui através de um reforço fibroso, que pode ser modelado como um meio poroso. Na região do meio poroso é considerada uma força de campo resistente ao escoamento da resina abordada pela Lei de Darcy, que indica que a taxa de escoamento de resina por unidade de área é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade da resina (Ribeiro et al, 2007). A equação matemática para esse fenômeno é dada por:

$$V_i = -\frac{\kappa_{ij}}{\mu} \nabla P \tag{1}$$

onde V_i é o vetor velocidade (m/s), μ é a viscosidade dinâmica da resina (Pa.s), K_{ij} é o tensor de permeabilidade do reforço fibroso (m²), ∇ é o operador de gradiente, *P* é a pressão (Pa) e os índices *i*, *j* = 1 e 2 representam as direções *x* e *y*, respectivamente.

Considerando o escoamento de resina incompressível, a equação de conservação da massa pode ser escrita como:

$$\nabla V_i = 0 \tag{2}$$

No método VOF, as equações de quantidade de movimento, continuidade e fração volumétrica devem ser resolvidas simultaneamente. Neste trabalho, a solução VOF é obtida com o software FLUENT[®] que é baseado no método dos volumes finitos (FVM) que inclui um módulo VOF para a solução dos problemas com dois ou mais fluidos imiscíveis (Fluent, 2007; Isoldi et al, 2012). Um único conjunto de equações de quantidade de movimento e de continuidade é resolvido para a mistura resina-ar em todo o domínio, e a interface de fluido (resina e ar) é calculada através da solução de uma equação de conservação de fração de volume (Jinlian et al, 2004). Para a simulação da LRI, as duas fases envolvidas no problema são a resina (fase líquida) e o ar (fase gasosa). Desta forma a equação da continuidade para a mistura é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . \left(\rho V_i \right) = 0 \tag{3}$$

E a equação da quantidade de movimento é dada por:

$$\frac{\partial(\rho V_i)}{\partial t} + \nabla . \left(\rho V_i V_i\right) = -\nabla p + \nabla . \left[\mu \tau_{ij}\right] + \rho g_i + F_i$$
(4)

sendo ρ a massa específica da mistura (kg/m³), *t* é o tempo (s), τ_{ij} é o tensor de cisalhamento no escoamento (Pa), g_i é o vetor de aceleração gravitacional (m/s²) e F_i é um vetor de forças externas em (N/m³).

Na presente formulação, o efeito do meio poroso é incluído no modelo matemático pela inserção de uma força resistiva ao escoamento na equação da quantidade de movimento.

$$Fi = -\frac{\mu}{K_{ii}} V_i \tag{5}$$

Também é necessária a solução para o transporte da fração de volume da resina, f, que é definida por:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla . \left(f V_i \right) = 0 \tag{6}$$

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema consiste em um escoamento de resina considerado no regime laminar, transiente e incompressível em uma placa bidimensional, conforme ilustrado na Fig. 1 que apresenta um croqui do domínio fora de escala. A região cinza clara representa o meio poroso, enquanto a cinza escuro representa o canal vazio analisado na forma "Y". Destaca-se que o escoamento é causado pela aplicação de uma diferença de pressão entre a entrada da resina (região inferior do canal não-poroso) e a região de saída (superfície superior do meio poroso). Considera-se uma pressão de entrada de $P_{\text{entrada}} = 1.0 \times 10^5$ Pa e uma $P_{\text{saída}} = 0$ Pa. As demais superfícies (com linhas tracejadas) impõe-se uma condição de contorno de não-deslizamento e impermeabilidade (u = v = 0 m / s). Para a fração de volume, é prescrito f = 1 na seção de entrada e zero de gradiente (normal para as condições de contorno) em todas as outras superfícies. No que diz respeito às propriedades termofísicas da resina é considerado uma densidade de $\rho = 916$ kg/m³ e uma viscosidade dinâmica de $\mu = 0.06$ Pa.s. Para o meio poroso, considera-se uma permeabilidade de $k = 3.0 \times 10^{-10}$ m² e uma porosidade de $\varepsilon = 0.88$.

No presente problema, considera-se que a soma de todos os comprimentos do canal é igual para cada configuração analisada , assim como, a espessura dos canais vazios. As dimensões consideradas são $L_0 = L_1 = 0.0635$ m e $(H_0 + 2H_1 = 0.4 \text{ m})$, sendo a última citada utilizada para serem feitas diferentes razões de H_0/H_1 , tendo assim diferentes configurações para uma geometria"Y". Os ramos bifurcados de canais vazios têm um ângulo de $\alpha = 10^{\circ}$ com a linha horizontal. No que diz respeito ao meio poroso, considera-se que a região de análise é H = L = 0.5 m (tracejado na Fig. 1).



Figura 1. Ilustração computacional do domínio no processo de Infusão de Resina Líquida para diferentes configurações em formato "Y".

Para a simulação numérica das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e fração de volume é utilizado o Método dos Volumes Finitos (FVM) (Fluent, 2007; Isoldi et al, 2012). Para a interpolação da pressão foi utilizado o esquema PRESTO (*PREssure STaggering Option*). O acoplamento pressão-velocidade é realizado pelo método PISO, enquanto o método *Geo-Reconstruction* é empregado para resolver a fração volumétrica. Além disso, fatores de subrelaxação iguais a 0,3 e 0,7 são impostos para as equações de conservação de continuidade e movimento, respectivamente. Mais detalhes relacionados com a metodologia numérica podem ser obtidos nos trabalhos de Magalhães et al. (2016) e Isoldi et al. (2012).

As simulações numéricas foram realizadas utilizando um computador com dois processadores Intel dual-core com clock de 2.67 GHz e 8 GB de memória RAM. Para a paralelização é usado a biblioteca de passagem de mensagens MPI (Message Passing Interface). Para a discretização temporal, é empregado um passo de tempo de $\Delta t = 1.0 \times 10^{-3}$ s. No que diz respeito à discretização espacial, o domínio foi discretizado em vários volumes finitos retangulares e um teste de independência de malha foi realizado para definir o número de elementos usado para todas as simulações. A Tab.1 mostra o número de volumes, o tempo de injeção para o preenchimento do molde e o tempo de processamento necessário para cada malha para um problema com "I" em forma de canal vazio penetrado num meio poroso. Considera-se um canal com as seguintes dimensões H = L = 0.5 m, $L_0 = 0.2236$ m e $H_0 = 0.0559$ m. No que diz respeito à avaliação da malha, quando a diferença entre os resultados atingidos com duas malhas sucessivas é inferior a 1,0%, considera-se a solução independente da discretização espacial. No presente caso, uma malha com 18,271 volumes finitos retangulares é levado em conta para simulações futuras, conforme mostra a Tabela 1. O mesmo tipo de malha está sendo empregada para o canal em forma de "Y".

Tabela 1: Teste de Independência de malha para um canal "I", com as seguintes dimensões (H = L = 0.5 m, $L_0 = 0.2236$ m e $H_0 = 0.0559$ m).

Número de volumes	Tempo de preenchimento (s)	Diferença (%)	Tempo de processamento (s)
1,209	188.3	1.69	43.026
4,636	185.1	1.18	78.387
18,271	182.9	0.87	126.456
72,451	181.3		184.882

A fim de avaliar a metodologia numérica empregada aqui, o tempo para preenchimento do meio poroso com resina obtida para um caso simplificado e um fluxo retilíneo que foi alcançado analiticamente em trabalhos anteriores da literatura são comparados (Isoldi et al., 2012; Magalhães et al., 2016). O caso simplificado consiste em um escoamento

de resina em um canal em forma de I de tal modo que $L_0 = L$. O objetivo é o de simular com o presente modelo numérico um caso retilíneo. Uma solução analítica para a colocação da linha de resina como função do tempo é dado por :

$$X_f = \sqrt{\frac{2KP_0 t}{\mu\varepsilon}}$$
(7)

onde *K* é a permeabilidade (m²), P_0 é a pressão de injeção (Pa), *t* é o tempo de avanço resina (s), μ é a viscosidade dinâmica (Pa.s) e ε é a porosidade no meio poroso.

Para a obtenção dos resultados numéricos, uma linha de monitorização é criada no centro de domínio, mais precisamente é uma linha que se sobrepõe ao eixo y. A linha foi definida pelos seguintes pontos: P_1 ($x_1 = 0.3$ m, $y_1 = 0.0256$ m) e P_2 ($x_2 = 0.3$ m, $y_2 = 0.75$ m). A coordenada $x_1 = x_2$ representa o centro do domínio na direção x, enquanto que o símbolo y_1 representa a colocação da interface entre o canal não-poroso e o meio poroso e y_2 a saída do canal. A Figura 2 mostra a colocação da primeira linha de resina em função do tempo previsto numericamente com o método usado aqui e que se previu analiticamente na literatura, em que a maior diferença é 0.66 %. Esta concordância diz respeito à verificação do presente método.



Figura 2. Comparação entre o avanço da linha de frente da resina em função do tempo obtido no presente trabalho e a solução analítica apresentada na literatura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de melhorar o processo de LRI, dois aspectos principais devem ser levados em consideração. O primeiro é a infiltração completa da resina no reforço fibroso sem a formação de bolhas de ar na peça final. A segunda relacionase com o tempo de preenchimento completo da resina no domínio. Estes aspectos podem ser importantes para a fabricação de vários componentes, principalmente no campo industrial. Neste sentido, a avaliação geométrica é um assunto extremamente importante, não só para o aumento da produtividade, mas também para melhorar o acabamento dos produtos realizados com o processo de LRI. O presente trabalho compara o tempo de preenchimento de resina ao longo de todo o domínio procurando por recomendações teóricas para futuros estudos de otimização geométrica nas diferentes configurações da mesma geometria avaliadas.

Para obter o tempo de injeção, é criada uma linha de referência definida pelos seguintes pontos: $P_1 (x_1 = 0.05 \text{ m}, y_1 = 0.5 \text{ m})$ e $P_2 (x_2 = 0.55 \text{ m}, y_2 = 0.5 \text{ m})$. A posição da linha de frente do escoamento foi monitorada ao longo desta linha. Quando a linha de frente da resina atravessa completamente a linha de referência é considerado a conclusão do processo de LRI. Mais precisamente, isto ocorre quando a fração volumétrica ao longo de toda a linha é f = 1.0. Também foi considerado um espaçamento de 0.05m de cada lado do molde fibroso para evitar a formação de vazios na região que define a placa, que é a região de análise do problema. Também é verificado o campo da fração volumétrica para identificar se não há formação de vazios ao longo do domínio.

A Figura 3 mostra o efeito das diferentes configurações geométricas dos canais vazios para um formato "Y" sobre o tempo total de injeção da resina ao longo de todo o domínio, mais precisamente o efeito de H_0/H_1 sobre t para $\alpha = 10^\circ$. Pode ser observado que a configuração que apresenta uma razão $H_0/H_1 = 40$ conduziu ao melhor resultado, com tempo de t = 124.3 s, enquanto o pior resultado ocorreu com $H_0/H_1 = 0.01$ e um tempo de injeção de t = 501.1 s. Os resultados mostram que a primeira avaliação sobre o efeito da relação H_0/H_1 sobre o tempo de infusão conduziu a uma

melhoria de mais de 400% no desempenho do problema. Essa melhora pode ser atribuída ao comportamento transiente, que leva a uma redução no tempo (t) de injeção da resina em relação ao pior caso, isso porque o canal tem a maior penetração no interior do domínio poroso para a região da saída, já que devido ao baixo valor de H_1 , essa configuração lembra um formato "I", sendo assim menos complexa que as demais. É significativo enfatizar então a indubitável importância da definição da geometria para o processo de infusão. Nos resultados obtidos aqui, é possível verificar que geometrias mais complexas levam a piores desempenhos, indicando que existe uma dependência do tempo de injeção em relação ao tipo de configuração geométrica adotada. É possível que, para outros ângulos entre o ramo bifurcado e a direção horizontal tenha-se outro comportamento e devem ser investigados em futuros trabalhos.



Figura 3. Efeito da razão H₀/H₁ sobre o tempo de infusão de resina para um canal aberto em forma de "Y".

A fim de ilustrar a influência geométrica dos canais vazios a Fig. 4 ilustra o comportamento do avanço da resina no instante de tempo t = 100.0 s para as duas configurações em formato de "Y" que apresentaram o pior e o melhor resultado, respectivamente. Além disso, afim de uma melhor compreensão foi inserida uma ilustração de um H₀/H₁=3 . Na figura, a região vermelha representa a resina, ao passo que a região azul representa o ar. Regiões com outras cores (amarelo e verde) representam frações intermediárias da fase entre resina e ar. De uma forma geral, observa-se que para a razão $H_0/H_1 = 40$ há um maior avanço da resina na direção y (direção de saída da resina da placa) em comparação com outras configurações realizadas. Entretanto, é nítido que na direção x a propagação é mais lenta. Para configurações de maior complexidade a resina tende a fluir de forma mais uniforme em ambos os eixos (x, y). Portanto, o caso ótimo de $H_0/H_1 = 40$ possui um menor tempo de injeção. Esse comportamento está relacionado com a distribuição mais uniforme do escoamento da resina dentro do domínio de canais alongados, isto é, de acordo com o princípio Construtal da Ótima Distribuição das Imperfeições (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008).



Figura 4. Escoamento da resina na parte interna do molde para um tempo de t = 100.0 s para diferentes configurações: a) $H_0/H_1 = 0.01$; b) $H_0/H_1 = 40$ e c) $H_0/H_1 = 3$

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico avaliando o princípio de funcionamento de um processo LRI para diferentes configurações de canais vazios em formato de "Y" inseridos em uma placa retangular com reforço fibroso. Mais precisamente, foram avaliados ao total vinte e quatro diferentes razões de H_0/H_1 . Em todos os casos, a soma de todos os comprimentos e espessuras de canais são mantidas constantes. As equações de conservação de massa e quantidade de movimento para a mistura de resina e ar e uma equação para o transporte de fração volumétrica da resina foram resolvidas com o método dos volumes finitos (FVM). A interação entre as fases foi tratada com o método *Volume of fluid* (VOF) e é considerada a resistência do meio poroso abordada pela a lei de Darcy.

Em geral, os resultados mostraram a importância da geometria para o projeto processo LRI. Apenas uma simples comparação entre as diferentes razões adotadas levou a diferenças de tempo de enchimento de resina de até 400 %. Os melhores resultados foram obtidos com razões mais altas dos canais vazios em formato "Y", mostrando que esta geometria é promissora para futuros estudos de otimização geométrica. Os resultados foram obtidos para um ângulo entre o ramo bifurcado e a direção horizontal ($\alpha = 10^{\circ}$) e outros ângulos serão estudados.

6. AGRADECIMENTOS

A autora C. A. Schnich agradece a CNPq pela bolsa de iniciação científica na graduação. A autora G. M. C. Magalhães agradece a CAPES pela bolsa de estudos no mestrado. Os autores S. C. Amico, L. A. O. Rocha, L. A. Isoldi, J. A. Souza e E. D. dos Santos agradecem ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa. Todos os autores agradecem ao CNPq e FAPERGS pelo auxílio financeiro ao trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bejan, A., 2000, Shape and Structure, from Engineering to Nature, Cambridge University Press, Cambridge, UK. Bejan, A., Lorente, S., 2008, Design with Constructal Theory, Wiley, Hoboken.
- Fluent, Documentation Manual, 2007 FLUENT 6.3.16, Ansys Inc.
- Goncharova, G., Cosson, B., Deléglise Lagardère, M., 2015. "Analytical modeling of composite manufacturing by vacuum assisted infusion with minimal experimental characterization of random fabrics", Journal of Materials Process Technology, Vol. 219, pp.173-180.
- Isoldi, L.A., Souza, J.A., dos Santos, E.D., Marchesini, R., Porto, J., Letzow, M., Rocha, L.A.O., Amico, S.C., 2013. "Constructal Design applied to the light resin transfer molding (LRTM) manufacturing process". Proceedings of 22nd COBEM, Ribeirão Preto – SP.
- Isoldi, L.A., Oliveira, C.P., Rocha, L.A.O., Souza, J.A., Amico, S.C. 2012. "Three-dimensional numerical modeling of RTM and LRTM processes". Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 34, pp.105–11.
- Jinlian, H., Yi, L., Xueming, S. 2004. "Study on void formation in multi-layer woven fabrics. Composites Part A, Vol. 35, pp. 595–603.
- Magalhães, G.M.C., Lorenzini, G., Nardi, M.G., Amico, S.C., Isoldi, L.A., Rocha, L.A., Souza, J.A., dos Santos, E.D., 2016. "Geometrical evaluation of a resin infusion process by means of constructal design", International Journal of Heat and Technology, Vol. 34, S101-S108.
- Morren, G., Bottiglieri, M., Bossuyt, S., Sol, H., Lecompte, D., Verleye, B., Lomov, S.V. 2009 "A reference specimen for permeability measurements of fibrous reinforcements for RTM, Composites Part A, Vol. 40, pp. 244-250.
- Pardini, L. C., Gonçalves, A., 2009. "Processamento de Compósitos Termoestruturais de Carbono Reforçado com Fibras de Carbono". V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte.
- Poodts, E., Minak, G., Dolcini, E., Donati, L., 2013. "FE analysis and production experience of a sandwich structure component manufactured by means of vacuum assisted resin infusion process". Composites Part B, Vol. 53, pp. 179 – 186.
- Ribeiro, G.G., Souza, J.A., Rocha, L.A.O., Amico, S.C. 2007. "Utilização do aplicativo Fluent na modelagem numérica do processo RTM". IV Congresso Brasileiro de Carbono, Gramado/Rs. pp. 557-560.
- Yenilmez, B., E.M, Sozer., 2009. "Compaction of e-glass fabric preforms in the Vacuum Infusion Process, A: Characterization experiments". Composites Part Apliccation Science and Manufacturing, Vol. 40, pp.499-510.
- Wang, P., Drapier, S., Molimard, J., Vautrin, A., Minni, J., 2012. "Numerical and experimental analyses of resin infusion manufacturing processes of composite materials". Journal of Composite Materials, Vol. 46, pp.1617-1631.

9. AVISO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material apresentado neste artigo.