



AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE CANAIS RETANGULARES EM UM PROCESSO DE INFUSÃO POR RESINA

Glauciléia Maria Cardoso Magalhães

mglaucileia@gmail.com

Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande

Av. Itália km 8, 96203-900, Rio Grande do Sul, Rio Grande, Brasil.

Sandro Campos Amico

amico@ufrgs.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Luiz Alberto Oliveira Rocha

luizrocha@mecanica.ufrgs.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Liércio André Isoldi

Jeferson Avila Souza

Elizaldo Domingues dos Santos

liercioisoldi@furg.br

jasouza@furg.br

elizaldosantos@furg.br

Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande

Av. Itália km 8, 96203-900, Rio Grande do Sul, Rio Grande, Brasil.

Resumo. *O objetivo deste trabalho é a investigação numérica do princípio de funcionamento de um processo de infusão de resina líquida, que consiste na injeção de uma resina polimérica em um molde fechado composto com um meio fibroso e um canal não-fibroso que facilita a*

propagação da resina ao longo do domínio. O principal objetivo do presente trabalho é mostrar que o método Constructal Design pode ser aplicado para orientar o projeto neste tipo de processo. Mais precisamente, é investigada a influência da geometria de um fluxo de resina introduzido por um canal em forma de I com meio não poroso em uma placa retangular bidimensional com um meio poroso sobre o tempo de infusão da resina em todo domínio. 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 é tratada com o método Volume of fluid (VOF). A resistência ao escoamento no meio poroso é abordada através da lei de Darcy. Os resultados mostraram a importância do emprego de Constructal Design para minimização do tempo de injeção de resina no meio poroso.

Palavras-chave: Processo de infusão, Avaliação geométrica, Constructal Design, Simulação numérica.

1 INTRODUÇÃO

Com o mercado cada vez mais exigente e com o rápido crescimento da indústria dos compósitos a competição entre as empresas se torna cada dia mais acirrada, buscando continuamente componentes fortes, leves e de rápida fabricação. Com isso há a necessidade de novas técnicas de fabricação e de otimização de processos já utilizados, levando a usar técnicas de pressão e vácuo para consolidar e formar materiais com propriedades mecânicas melhoradas.

Desde a década de 40 os materiais compósitos vêm conquistando seu lugar nas indústrias automotiva, aeronáutica e naval devido a várias vantagens desses materiais. Por exemplo, pode-se citar a baixa densidade, excelente resistência à corrosão, além disso os materiais compósitos causam menor impacto ambiental e têm custo mais acessível (Pardini & Gonçalves, 2009). Neste sentido, diversas técnicas industriais foram desenvolvidas para a fabricação de materiais compósitos. É possível destacar os processos de Moldagem de Compósitos Líquidos (LCM), tais como Moldagem por Transferência de Resina – *Resin Transfer Molding* – (RTM), Moldagem por Transferência de Resina Light – *Light Resin Transfer Molding* – (LRTM) e Infusão de Resina Líquida (LRI) que têm sido amplamente aplicados para produzir vários componentes (Brouwer et al., 2003; Isoldi et al., 2012; Yenilmez et al., 2009; Poodts et al., 2013).

Os processos de Infusão de Resina Líquida (LRI) estão possibilitando formas de manufatura para produzir peças estruturais grandes, espessas e complexas e consiste na injeção de uma resina polimérica através de canais sem meio fibroso inseridos em um domínio com meio fibroso, o que torna mais fácil a propagação de resina ao longo do domínio do molde (Wang et al., 2012). Uma das maiores dificuldades em aplicar os processos de infusão está relacionada com o preenchimento do molde, ou seja, garantir que o reforço fibroso seja impregnado completamente pela resina no interior da peça. Como consequência, vários estudos têm sido realizados no quadro analítico, experimental e numérico, a fim de melhorar a compreensão acerca do escoamento de resina no processo de infusão (Goncharova et al., 2015).

Marin (2012) descreve um método experimental para a medição de tensão e de temperatura aplicado a uma peça compósita, durante o processo de fabricação por Infusão de Resina Líquida (LRI – do inglês: *Liquid Resin Infusion*). O método utiliza um sensor de fibra para extrair as

características térmicas e mecânicas do material compósito, principalmente durante o processo de cura.

No campo numérico foi desenvolvido por Celle et al. (2008) um modelo, a fim de otimizar os parâmetros dos projetos de fabricação e monitorar o processo de infusão. Tal modelo representa um escoamento de resina transiente no meio poroso compressível e descreve a interação mecânica entre as deformações do meio poroso e o escoamento da resina durante a infusão. A implementação deste modelo foi realizada, computacionalmente, utilizando bibliotecas Pro-Flot e o software PAM-RTM. Wang et al. (2012) utilizaram o modelo proposto por Celle et al. (2008) para uma comparação entre os resultados das simulações numéricas e os experimentais de um teste realizado por processo de infusão em condições industriais. Verificou-se que a partir da predição numérica, podem ser determinados o tempo de enchimento, a massa de resina e a espessura do pré-molde. Poodts et al. (2013) desenvolveram e validaram uma estrutura sanduíche, utilizando um código de elementos finitos por meio do software PAM-RTM e através da definição de um ensaio normalizado para a caracterização dos laminados para obter dados confiáveis de permeabilidade. Isoldi et al. (2012) realizaram um estudo numérico do escoamento da resina em diversas aplicações de RTM, baseando-se no método (VOF – do inglês: *Modelo Volume of Fluid*) e utilizando o software comercial FLUENT. Neste estudo, vários casos foram resolvidos numericamente e comparados com outros resultados analíticos, experimentais e numéricos da literatura. Além disso, uma nova metodologia computacional foi desenvolvida para simular um processo por Moldagem por Transferência de Resina Light (LRTM), que consiste na injeção de resina num molde através de uma borda, sem substrato poroso, em que a resina flui em torno do perímetro do molde, o que torna o preenchimento mais homogêneo e rápido.

Apesar de vários estudos experimentais e numéricos, pouco tem sido visto sobre a avaliação da influência da geometria de um escoamento de resina no processo de infusão. A única exceção encontrada pelos autores é o trabalho de Isoldi et al. (2013) onde o Constructal Design foi empregado para avaliar o efeito do canal de injeção no tempo de injeção durante um processo de Moldagem por Transferência de Resina Light (LRTM).

Vale destacar que, no âmbito industrial, o método da tentativa e erro é usualmente empregado para a definição da geometria e posicionamento dos canais não porosos, que podem levar a tempos elevados de injeções e falha durante as fases iniciais de produção de um novo componente. Neste sentido, o presente trabalho propõe a aplicação do Constructal Design para a racionalização do *design* neste tipo de processo de fabricação, o que ainda não foi explorado na literatura. Constructal Design é o método utilizado para avaliar geometrias em todos os sistemas de fluxo com base em objetivos e restrições. O princípio físico utilizado para explicar a geração e evolução do design (configuração, forma, estrutura) em sistemas de fluxo animados e inanimados é a Lei Constructal (Bejan & Lorente, 2011). A Lei *Constructal* afirma que: “Para um sistema de dimensões finitas, onde existe fluxo, persistir no tempo (sobreviver), a sua configuração deve evoluir de tal forma que propicie o mais fácil acesso às correntes que escoam através dele” (Bejan, 2000; Bejan & Lorente, 2008; Bejan & Lorente, 2011). A Teoria Constructal tem sido utilizada para explicar a geração de formas determinísticas e estruturas na natureza, por exemplo, na circulação global do clima, formas de animais, tecidos vascularizados entre outros (Reis & Bejan, 2006; Bejan, 2012). Além disso, ela pode ser usada como uma ferramenta poderosa para a avaliação da evolução de padrões em design urbano, tráfego, transporte, dinâmica social, economia (Bejan & Merks, 2007) e, em muitos problemas de engenharia, tais como: projetos de eletrônica, turbinas, conversores de energia das ondas, refrigeração, problemas de transferência de calor e até mesmo em problemas de análise estrutural (Rocha et al., 2005; Kundu & Bhanja, 2010; Xie et al., 2010; dos Santos et al., 2013;

Lorenzini et al., 2014; Rocha et al., 2013; Kepes et al., 2015) . Portanto, a Lei Constructal pode ser considerada como um princípio unificador de design para qualquer tipo de sistema de fluxo.

O presente trabalho tem como objetivo empregar o Constructal Design para orientar a concepção de um processo de infusão de resina. Mais precisamente é investigada a influência da geometria de um canal em forma de I com meio não poroso inserido em uma placa retangular bidimensional com um meio poroso sobre o tempo de infusão de resina em todo o domínio analisado. O canal em forma de I possui a razão H_0/L_0 (razão entre a espessura e comprimento do canal não-poroso) como grau de liberdade (DOF – do inglês: *Degree of Freedom*). Neste trabalho é estudado a influência da razão entre a área do canal e a área da placa (ϕ). Foram realizadas várias simulações com as constantes $\phi = 0.01$; $\phi = 0.05$ e $\phi = 0.1$. O avanço da resina é modelado através das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte de fração volumétrica, resolvidas com o método dos volumes finitos (FVM). Para lidar com o escoamento de ar e resina é empregado o método *Volume of fluid* (VOF). Na região do meio poroso também é considerada uma força de campo resistente ao escoamento da resina abordada pela Lei de Darcy. Mais precisamente, as simulações são realizadas utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional código FLUENT (FLUENT, 2007).

2 MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA

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 (Morren et al., 2009). A equação matemática para esse fenômeno é dada por:

$$V_i = - \frac{K_{ij}}{\mu} \nabla P \quad (1)$$

onde V_i é a velocidade μ é a viscosidade da resina, K_{ij} é o tensor de permeabilidade do reforço fibroso, ∇ é o operador de gradiente, P é a pressão e os índices $i, j = 1, 2, 3$ representam as direções x, y e z , respectivamente.

Considerando a resina com propriedades termofísicas constantes e, o escoamento incompressível, a equação de conservação da massa pode ser escrita como:

$$\nabla \cdot V_i = 0 \quad (2)$$

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® - um pacote de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD do inglês: *Computational Fluid Dynamics*) com base no método dos volumes finitos (FVM) que inclui um módulo VOF para a solução dos problemas com dois ou mais fluidos imiscíveis, onde a posição da interface entre os fluidos é de interesse (FLUENT, 2007). Apenas um conjunto de equações de conservação da massa e quantidade de movimento é resolvido para todos os fluidos. 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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V_i) = 0 \quad (3)$$

Da mesma forma, somente uma equação da quantidade de movimento é resolvida em todo domínio computacional. Está é dada por:

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

sendo ρ é a massa específica da mistura, t é o tempo, τ_{ij} é o tensor de cisalhamento no fluído, g_i é o vetor de aceleração gravitacional e F_i é um vetor de forças externas. 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. Sendo:

$$F_i = -\frac{\mu}{K_{ij}} V_i \quad (5)$$

O transporte advectivo da fração volumétrica f , em cada célula do domínio computacional é descrito por:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (f V_i) = 0 \quad (6)$$

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema consiste em um escoamento de resina considerado incompressível, transiente e no regime laminar em uma placa bidimensional composta de meio poroso. Para simular um processo de infusão de resina líquida, canais sem meio poroso em forma de I são inseridos ao longo do domínio com meio poroso para facilitar a impregnação da resina ao longo de todo molde. Na Figura 1 este canal está representado na região cinzenta escuro, enquanto que a região porosa é representada com cinza claro.

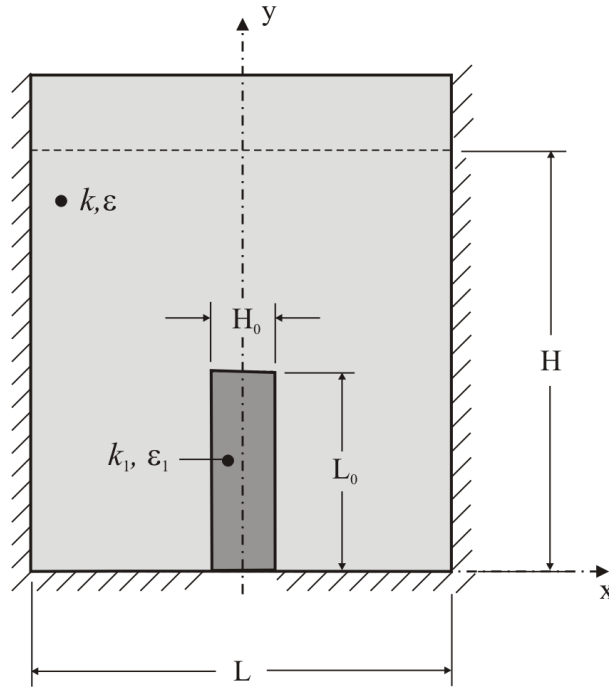


Figura 1. Ilustração do domínio computacional do processo de infusão de resina líquida para um canal em forma de I.

O escoamento entra no domínio através 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 $P_{in} = 1.0 \times 10^5$ Pa e na saída é imposta uma pressão de $P_{out} = 0$ Pa. As demais superfícies laterais e inferior possuem condição de contorno de não-deslizamento e impermeabilidade ($u = v = 0$ m/s). No que diz respeito as propriedades termofísicas da resina é considerada uma massa específica 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 porosidade de $\varepsilon = 0.88$. Para o meio não-poroso, considera-se uma permeabilidade de $K_1 = 9.99 \times 10^9$ m² e uma porosidade de $\varepsilon_1 = 1.0$. Este problema é submetido a duas restrições, a área retangular porosa:

$$A = HL \quad (7)$$

e a área do canal não-poroso:

$$A_0 = H_0 L_0 \quad (8)$$

Para a otimização da geometria do canal em forma de I tem-se dois graus de liberdade: H/L e H_0/L_0 . Para todas as simulações considera-se $H/L = 1.0$ com $H = L = 0.5$ m. O principal objetivo deste problema consiste em obter a geometria do canal por meio do Constructal Design que minimiza o tempo de injeção da resina no molde.

Para a simulação numérica das equações de conservação de massa e quantidade de movimento, um código comercial baseado no Método dos Volumes Finitos (FVM) é empregado (FLUENT, 2007). 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 de Geo-Reconstruction é empregado para resolver a fração volumétrica.

As simulações numéricas foram realizadas utilizando um computador com dois processadores Intel dual-core com 2.67 GHz e 8 GB de memória RAM. Para a discretização temporal, é empregado um passo de tempo de $\Delta t = 1.0 \cdot 10^{-3}$ s. No que diz respeito à discretização espacial, o domínio foi dividido em vários volumes finitos retangulares e um teste de independência malha foi realizado para definir o número de volumes empregado para todas as simulações. A Tabela 1 mostra o número de volumes, o tempo de injeção para enchimento do molde e o tempo de processamento necessário para realizar as simulações para cada malha avaliada para um canal não poroso em forma de I com $\phi = 0.05$, $H/L = 1.0$ e $H_0/L_0 = 4.0$. Quando a diferença entre os resultados obtidos com duas malhas sucessivas é inferior a 1.0%, considera-se que a malha utilizada é independente. Neste sentido, é empregada uma malha com 18271 volumes finitos retangulares.

Tabela 1. Teste de independência de malha para um canal não poroso em forma de I com $\phi = 0.05$, $H/L = 1.0$ e $H_0/L_0 = 4.0$.

Número de volumes	Tempo de Injeção (s)	Diferença (%)	Tempo de Simulação
1209	188.3	-----	11h 57m 06s
4636	185.1	1.69	21h 46m 27s
18271	182.9	1.18	35h 7m 36s
72451	181.3	0.87	51h 21m 22s

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização de uma modelagem bem sucedida, é necessário eliminar totalmente o ar residual no interior do meio poroso. A formação de vazios devido à impregnação parcial da resina no interior do reforço fibroso pode levar a falhas no emprego do produto final. Neste sentido, a otimização geométrica é importante, pois não só aumenta a produtividade, através do menor tempo de injeção, como aumenta a qualidade das peças produzidas pelo melhor preenchimento da resina, evitando, assim a formação de espaços vazios, que passam a ser uma restrição na análise e definição do processo de LRI.

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 o escoamento de resina atravessa completamente a linha de referência, isto é, quando a fração volumétrica ao longo de toda a linha é $f = 1.0$, considera-se que o processo de infusão está concluído. 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.

Para avaliar a influência geométrica do canal em forma de I com meio não poroso introduzido em uma placa retangular com meio poroso sobre o tempo de infusão da resina no molde, várias simulações foram realizadas com diferentes razões de H_0/L_0 e foi estudado a influência da razão entre a área do canal e a área da placa (ϕ) para três diferentes valores: $\phi = 0.01$; 0.05 e 0.1. A “Figura 2” mostra o efeito da razão H_0/L_0 para as diferentes frações de área do canal em I (ϕ) sobre o tempo total de injeção da resina ao longo de todo o domínio. Pode ser observado que as menores razões de H_0/L_0 conduziram aos melhores resultados, ou seja existe uma redução no tempo (t) de injeção da resina quando o canal tem a maior penetração no interior do domínio poroso para a região da saída. Contudo, o aumento demasiado de H_0/L_0 conduz

novamente a uma diminuição no tempo de injeção. Dessa forma, há uma razão mínima ótima global e uma razão ótima local situada no extremo superior de H_0/L_0 que conduzem aos menores tempos de injeção no meio fibroso e uma razão intermediária que leva ao pior desempenho.

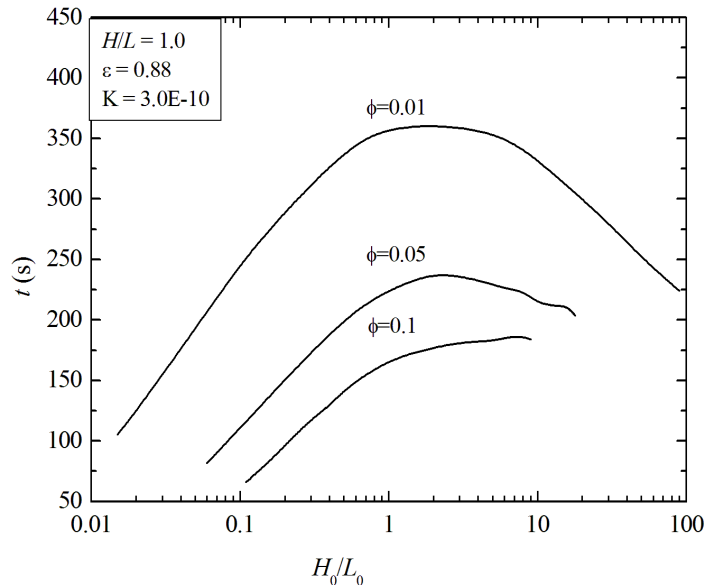


Figura 2. Efeito da razão H_0/L_0 e da razão entre a área do canal e a área da placa (ϕ) ao longo do tempo de injeção da resina no molde poroso com canal não poroso em forma de I.

Os resultados mostram que para a razão $\phi = 0.01$, a razão de H_0/L_0 uma vez otimizada é obtida para $(H_0/L_0)_o = 0.015$ e leva a um tempo de injeção da resina uma vez minimizado (t_m) de aproximadamente $t_m = 105.3$ s. Para a razão máxima $H_0/L_0 = 90$ é obtido um tempo de injeção de $t = 224.0$ s e para a razão intermediária $H_0/L_0 = 1$, que corresponde ao pior desempenho para $\phi = 0.01$, é obtido um tempo de injeção de $t = 362.6$ s. Os resultados mostram que para $\phi = 0.01$, o desempenho fluido dinâmico (tempo de injeção) do pior caso é aproximadamente 244% e 62% inferior ao obtido para as geometrias ótimas global e local, respectivamente. Analogamente para $\phi = 0.05$, a razão de H_0/L_0 uma vez otimizada é obtida para $(H_0/L_0)_o = 0.06$ e leva a um tempo de injeção uma vez minimizado (t_m) de aproximadamente $t_m = 81.5$ s, enquanto que para a razão máxima $H_0/L_0 = 18$ é obtido um tempo de injeção de $t = 203.4$ s. Para a razão intermediária $H_0/L_0 = 4$ (pior desempenho para $\phi = 0.05$) é obtido um tempo de injeção de $t = 233.1$ s, ou seja, aproximadamente 186% de diferença em relação a geometria ótima global e 15% em relação a geometria ótima local. Para $\phi = 0.1$, a razão de H_0/L_0 uma vez otimizada é obtida para $(H_0/L_0)_o = 0.11$ e leva a um tempo de injeção uma vez minimizado (t_m) de aproximadamente $t_m = 66.0$ s enquanto que para a razão máxima $H_0/L_0 = 9$ foi obtido um tempo de injeção de $t = 184.2$ s. Para este caso a razão intermediária $H_0/L_0 = 7$ foi obtido um tempo de injeção de $t = 187.3$ s, representando a geometria de pior desempenho, sendo aproximadamente 184% inferior do que o alcançado pela geometria ótima global.

Os resultados da “Fig. 2” ainda indicam que, conforme esperado, o tempo de injeção uma vez minimizado (t_m) para as maiores frações de área do canal em “I” são menores do que para as menores magnitudes de ϕ . Outra observação importante é que para o maior valor de ϕ ($\phi = 0.1$) há quase um crescimento assintótico do tempo de injeção em função da razão H_0/L_0 , enquanto

que para valores menores de ϕ há um ponto de máximo intermediário para o tempo de injeção em função de H_0/L_0 . Dessa forma, os resultados mostram que o comportamento da razão geométrica H_0/L_0 pode se modificar com a variação da área ocupada pelo canal. Também é importante destacar a importância da avaliação geométrica para o processo de infusão. Nos resultados obtidos aqui, é possível verificar que a geometria ótima obtida para menores razões de ϕ possui um desempenho melhor do que geometrias intermediárias para razões maiores de ϕ . Por exemplo, para $\phi = 0.01$ o melhor desempenho ($t_m = 105.3$ s) obtido para $(H_0/L_0)_o = 0.015$ é superior a grande parte das geometrias obtidas para $\phi = 0.05$ e 0.1 , indicando que a racionalização geométrica pode levar canais de menores dimensões a melhor desempenho do que canais com maiores dimensões.

A fim de ilustrar a influência da razão entre a área do canal e a área da placa (ϕ) e razão H_0/L_0 as “Figs. 3 – 5” ilustram o comportamento do avanço da resina no instante de tempo $t = 40.0$ s para as três diferentes razões estudadas de $\phi = 0.01$, 0.05 e 0.1 , respectivamente. Nas figuras, a região vermelha representa a resina, ao passo que a região azul representa o ar. Regiões com outras cores (amarelo e verde) representa frações intermediárias da fase entre resina e ar, ou seja, $0.0 < f < 1.0$.

A “Figura 3” mostra o avanço da resina para $\phi = 0.01$ e $H_0/L_0 = 0.015$, $H_0/L_0 = 1$, $H_0/L_0 = 90$. Na “Figura 4” é apresentado o avanço da resina para $\phi = 0.05$ e $H_0/L_0 = 0.06$, $H_0/L_0 = 4$, $H_0/L_0 = 18$. Enquanto isso, na “Fig. 5” é mostrado o avanço da resina para $\phi = 0.1$ e $H_0/L_0 = 0.11$, $H_0/L_0 = 7$, $H_0/L_0 = 9$. De uma forma geral, observa-se que para as menores razões de H_0/L_0 há um maior avanço da resina na direção y (direção de saída da resina da placa) e após o avanço pelo canal não poroso, o escoamento da resina ocorre em dois sentidos (do meio para as extremidades laterais da placa). Além disso, na região da extremidade superior do canal, o comportamento da resina é radial. Para as maiores razões de H_0/L_0 o comportamento da resina é radial (“Figs. 3b – 4b”) e linear na direção de y (“Figs. 3c – 5c” e “Fig. 5c”), reduzindo a homogeneidade da distribuição da resina no domínio e, consequentemente, conduzindo aos maiores tempos de injeção. Esse comportamento está de acordo com o princípio Constructal da Ótima Distribuição das Imperfeições.

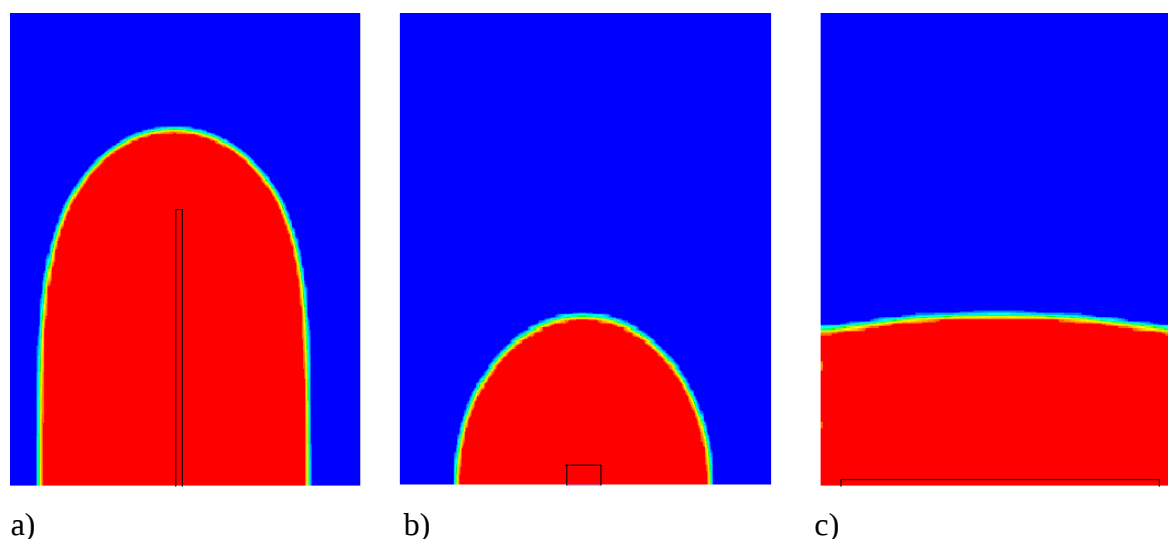


Figura 3. Avanço da resina no interior do molde no instante de tempo $t = 40$ s para $\phi = 0.01$ e diferentes geometrias de canal em forma de I: a) $H_0/L_0 = 0.015$, b) $H_0/L_0 = 1$ e c) $H_0/L_0 = 90$.

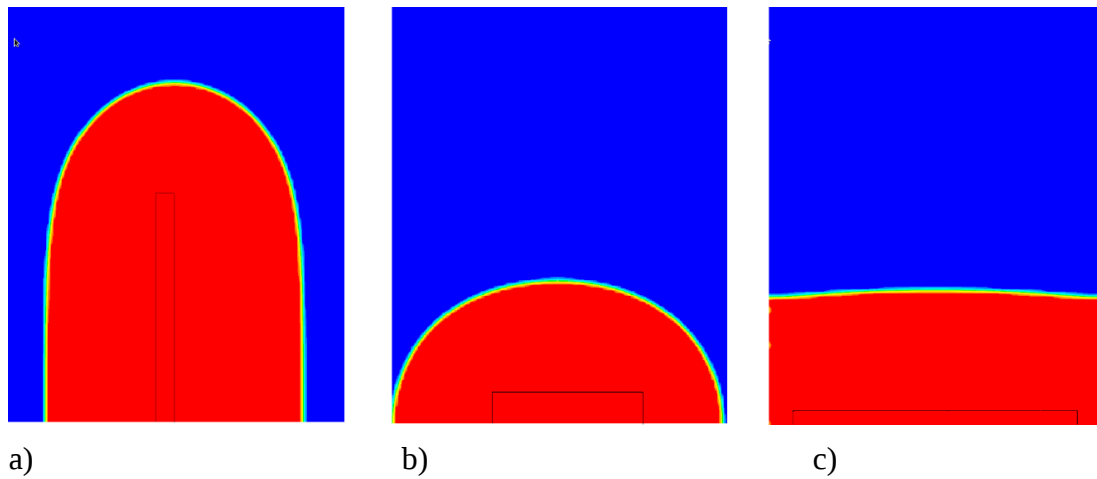


Figura 4. Avanço da resina no interior do molde no instante de tempo $t = 40s$ para $\phi = 0.05$ e diferentes geometrias de canal em forma de I: a) $H_0/L_0 = 0.06$, b) $H_0/L_0 = 4$ e c) $H_0/L_0 = 18$

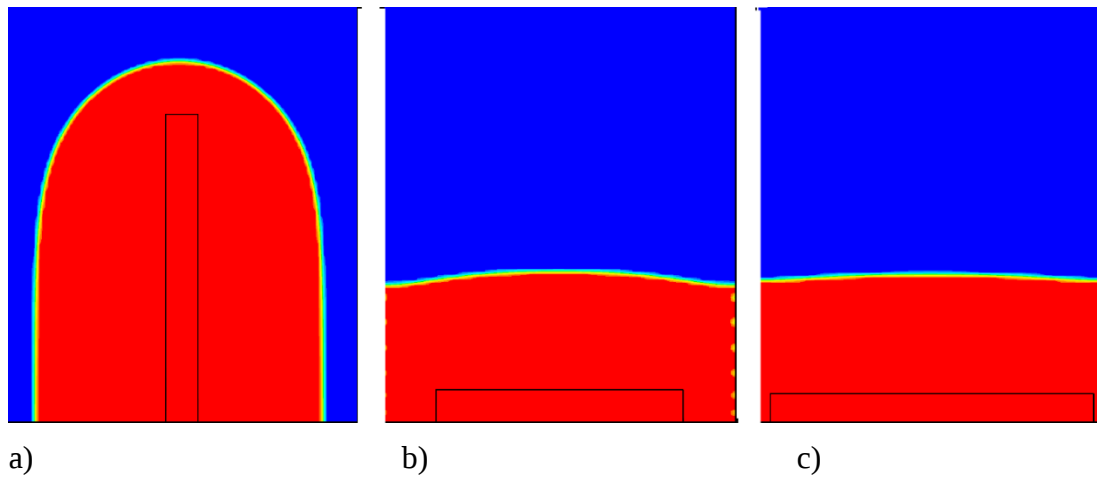


Figura 5. Avanço da resina no interior do molde no instante de tempo $t = 60s$ para $\phi = 0.1$ e diferentes geometrias de canal em forma de I: a) $H_0/L_0 = 0.11$, b) $H_0/L_0 = 7$ e c) $H_0/L_0 = 9$.

Na “Figura 6” é apresentado o avanço da resina no instante $t = 60.0 s$, para $H_0/L_0 = 1$ e $\phi = 0.01$, $\phi = 0.05$ e $\phi = 0.1$ respectivamente. Nota-se que para maiores valores de ϕ a entrada da resina no meio poroso é deslocada para dentro da placa, diminuindo assim o tempo de injeção.

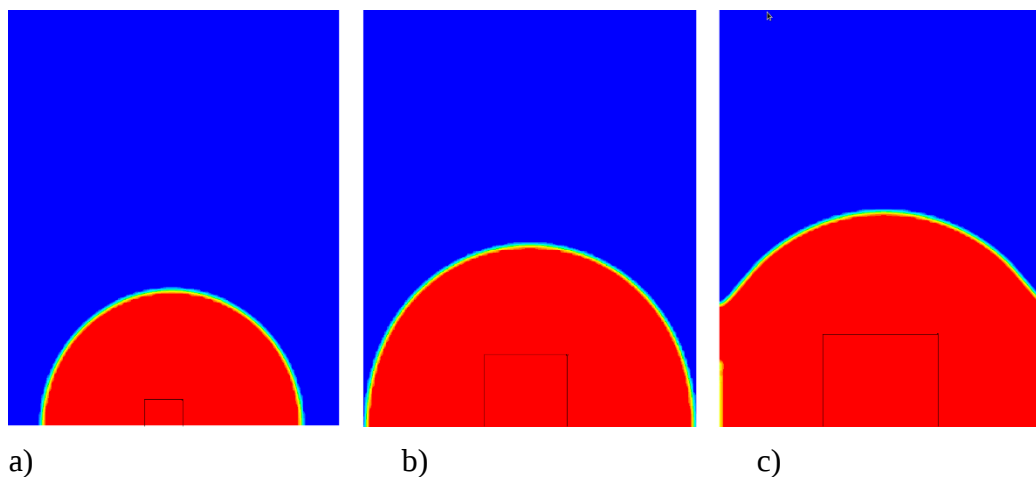


Figura 6. Avanço da resina no interior do molde no instante de tempo $t = 60,0s$ para $H_0/L_0 = 1$ e diferentes ϕ : a) $\phi=0.01$, b) $\phi=0.05$ e c) $\phi=0.1$.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho o Constructal Design foi aplicado para orientar a concepção de um processo de infusão de resina líquida. Mais precisamente, foi investigada a influência da geometria de um fluxo de resina introduzido por um canal em forma de I com meio não poroso em uma placa retangular bidimensional com um meio poroso sobre o tempo de infusão da resina em todo domínio. Os canais em forma de I tem como grau de liberdade a razão H_0/L_0 . Foram realizadas simulações com razões entre a área do canal e a placa, como sendo constantes $\phi=0.01$, $\phi = 0.05$ e $\phi = 0.1$. As equações de conservação de massa e 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 é tratada com o método *Volume of fluid* (VOF) e é considerado a resistência do meio poroso abordada pela lei de Darcy.

Os resultados mostraram a importância do emprego de Constructal Design para minimização do tempo de injeção de resina no meio poroso. As melhores geometrias com os canal em forma de I, foram as com uma maior penetração na placa porosa, ou seja, com menores razões de H_0/L_0 , conforme o esperado. Por exemplo, para $\phi = 0.05$ o melhor desempenho ($t_m=81.5s$) é obtido para $(H_0/L_0)_o = 0.06$ enquanto que para a razão intermediária $H_0/L_0 = 4$ é obtido um tempo de injeção de $t = 233.1s$ (pior desempenho para $\phi = 0.05$) e para razão máxima $H_0/L_0 = 18$ é obtido um tempo de injeção de $t = 203.4 s$. Portanto, note-se que com o aumento demasiado das razões de H_0/L_0 , ocorre uma diminuição no tempo de infusão levando a concluir que para cada ϕ existe uma geometria ótima global e uma geometria ótima local. Além disso, para maiores valores de ϕ é encontrado menores tempos de injeção. A avaliação geométrica no processo de infusão mostrou que a geometria ótima obtida para menores razões de ϕ leva a melhores desempenhos do que geometrias não otimizadas para razões maiores de ϕ , indicando que a racionalização geométrica pode levar canais de menores dimensões a melhor desempenho do que canais com maiores dimensões.

AGRADECIMENTOS

A autora G. M. C. Magalhães agradece a CAPES pela bolsa de 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 a CAPES, CNPq e FAPERGS pelo auxílio financeiro ao trabalho.

REFERÊNCIAS

- Bejan, A., *Shape and structure, from engineering to nature*, New York, Cambridge University Press, 324 p., 2000.
- Bejan, A., Merks, G.W., *Constructal theory of social dynamics*, New York, Springer, 2007.
- Bejan, A. & Lorente, S., *Design with constructal theory*, Hoboken, John Wiley & Sons, 529 p., 2008.
- Bejan, A., Lorente S., The constructal law and the evolution of design in nature, *Phys Life Rev* 8(3), 209-240, 2011.
- Bejan, A., & Zane, J. P. *Design in nature: how the constructal law governs evolution in biology, physics, technology, and social organization* (1 ed.). Doubleday, USA., 2012.
- Brouwer W., van Herpt E.C.F., Labordus M., Vacuum injection moulding for large structural applications. *Compos Part Appl Sci Manuf* 34(6), 551-558, 2003.
- Celle, P., Drapier, S., & Bergheau, J. (2008). Numerical aspects of fluid infusion inside a compressible porous medium undergoing large strains. *Eur J Comput Mech*, 17, pp. 819–827.
- dos Santos, E.D., Machado, B.N., Lopes N., Souza, J.A., Teixeira, P.R.F., Gomes, M.N., Isoldi, L.A., Rocha, L. A. O., Constructal Design of Wave Energy Converters. In: Rocha LAO, Lorente S, Bejan A, editors. *Constructal Law and the Unifying Principle of Design* [Internet]. New York, Springer New York, 2013 [cited 2015 Apr 9]. p. 275–94. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-5049-8_16.
- FLUENT, *Documentation Manual – FLUENT 6.3.16*, Ansys Inc., 2007.
- Goncharova G., Cosson B., Deléglise Lagardère M., Analytical modeling of composite manufacturing by vacuum assisted infusion with minimal experimental characterization of random fabrics, *J Mater Process Technol* 219, 173-180, 2015.
- Isoldi L.A., Oliveira C.P., Rocha L.A.O., Souza J.A., Amico S.C., Three-dimensional numerical modeling of RTM and LRTM processes, *J Braz Soc Mech Sci Eng* 34(2),105-111, 2012.
- Isoldi L.A., Souza J.A., Dos Santos E.D., Marchesini R., Porto J., Letzow M., Rocha, L.A.O., Amico, S.C., *Constructal Design applied to the light resin transfer molding (LRTM) manufacturing process*, Proceedings of 22nd COBEM, Ribeirão Preto - SP, p. 8, 2013.
- Kepes, R.M., Brum, R.S., Vaz, J., Rocha, L.A.O., dos Santos, E.D., Isoldi, L.A., Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) employing the Constructal Design method. *Renew Energy* 80, 538-551, 2015.

- Kundu, B., Bhanja, D., Performance and optimization analysis of a constructal T-shaped fin subject to variable thermal conductivity and convective heat transfer coefficient, *Int J Heat Mass Transf* 53(1-3), 254-267, 2010.
- Lorenzini, G., Biserni, C., Estrada, E.D., Isoldi, L.A., dos Santos, E.D., Rocha, L.A.O., Constructal Design of Convective Y-Shaped Cavities by Means of Genetic Algorithm, *J Heat Transf* 136(7), 071702, 2014 .
- Marin, E., Robert, L., Triollet, S., & Ouerdane, Y. (2012). Liquid Resin Infusion process monitoring with superimposed Fibre Bragg. *Polymer Testing*, pp. 1045–1052.
- Morren, G., Bottiglieri, M., Bossuyt, S., Sol, H., Lecompte, D., Verleye, B., Lomov, S.V., A reference specimen for permeability measurements of fibrous reinforcements for RTM, *Compos Part Appl Sci Manuf* 40(3),244-250, 2009.
- Pardini, L. C., & Gonçalves, A. (14 a 17 de Abril de 2009). Processamento de Compósitos Termoestruturais de Carbono Reforçado com Fibras de Carbono. *V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*. Acesso em 06 de março de 2015, disponível em Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas: <http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/cobef/2009/busca/artigos/152001020.pdf>
- Poodts, E., Minak, G., Dolcini, E., Donati, L., FE analysis and production experience of a sandwich structure component manufactured by means of vacuum assisted resin infusion process, *Compos Part B Eng* 53, 179-186, 2013.
- Reis, A.H., Bejan, A., Constructal theory of global circulation and climate, *Int J Heat Mass Transf* 49(11-12), 1857-1875, 2006.
- Rocha, L.A.O., Lorenzini, E., Biserni, C., Geometric optimization of shapes on the basis of Bejan's Constructal theory, *Int Commun Heat Mass Transf* 32(10), 1281-1288, 2005.
- Rocha, L.A.O., Lorente, S., Bejan, A., editors. *Constructal Law and the Unifying Principle of Design* [Internet], New York, Springer New York, 2013 [cited 2014 Sep 9]. Available from: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-1-4614-5049-8>.
- Wang P., Drapier S., Molimard J., Vautrin A., Minni J., Numerical and experimental analyses of resin infusion manufacturing processes of composite materials, *J Compos Mater* 46(13), 1617-1631, 2012.
- Xie, Z., Chen, L., Sun, F., Geometry optimization of T-shaped cavities according to constructal theory, *Math Comput Model*, 52(9-10), 1538-1546, 2010.
- Yenilmez B., Sozer E.M., Compaction of e-glass fabric preforms in the Vacuum Infusion Process, A: Characterization experiments, *Compos Part Appl Sci Manuf*, 40(4), 499-510, 2009.