

Determinação Numérico-Experimental da Permeabilidade Transversal em Problemas de RTM

Numerical-Experimental Determination of the Transverse Permeability in the RTM Problems

Cristiano Peres Oliveira¹, Rafael Scheer Trindade², Luis Guilherme Gierus Reichwald³, Sandro Campos Amico⁴, Jeferson Avila Souza⁵

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo numérico e experimental sobre a permeabilidade transversal em problemas de Moldagem por Transferência de Resina. A permeabilidade é uma variável importante na solução de problemas de Moldagem Líquida, pois ela é a medida do quão facilmente a resina se move através do reforço fibroso. São apresentados os resultados de dois ensaios experimentais realizados no Laboratório de Polímeros da UFRGS. A modelagem computacional dos problemas é realizada com o objetivo de desenvolver soluções numéricas que após serem validadas possam substituir custosos experimentos de laboratório. O modelo numérico foi desenvolvido com o auxílio de softwares livres: na simulação numérica utilizou-se o OpenFOAM, para a geração da malha e discretização do domínio computacional foi usado o software Gmsh e para o processamento dos resultados o software VisIt. Para a simulação numérica optou-se por usar um modelo axissimétrico, pois esse dispõe de larga vantagem em relação às simulações tridimensionais no que tange ao tempo de processamento e se mostrou eficaz para a solução dos problemas estudados. Na etapa de análise dos resultados, aspectos como a análise do fluxo da resina dentro do molde e do campo de velocidade, entre outros, são investigados, concluindo que o modelo desenvolvido foi capaz de representar adequadamente a solução dos problemas apresentados.

Palavras-chave: Permeabilidade Transversal. Simulação Numérica. Ensaios Experimentais. Moldagem Líquida. Modelagem Computacional.

ABSTRACT

Current work presents a numerical and experimental study about the transverse permeability in resin transfer molding problems. Permeability is an important medium property in solving liquid molding problems. It measures how easy is to a fluid to flow through the fibrous reinforcement. Results of two experimental tests, performed at the Polymer Laboratory of UFRGS are also presented. A computational solution was performed aiming to, after appropriated validation, replace expensive laboratory experiments. Only open-source software were used in this work: OpenFOAM for the numerical solution, Gmsh for geometry creation and discretization and VisIt for postProcessing. For the numerical simulation it was decided to use an axissymmetric model, since it has shown a great advantage in relation to the three-dimensional simulations regarding the processing time. The axissymmetric model has also proved to be effective in solving the studied problems. Numerical results for resin flow inside mold cavity, as well as, velocity field were investigated and comparison with experimental data presented good qualitative and quantitative agreement.

Keywords: Transverse Permeability. Numerical Simulation. Experimental Trials. Liquid Molding. Computational modeling.

¹ Doutorando em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande - FURG.

E-mail:

cristiano.oliveira@unipampa.edu.br

² Doutorando em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

³ Graduando em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

⁴ Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

⁵ Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande - FURG.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos tem se constituído em uma das alternativas que a indústria tem utilizado na busca de aprimoramento dos processos de fabricação, bem como em atender especificações técnicas das peças a serem produzidas, buscando sempre reduzir custos e otimizar a produção.

Uma definição de materiais compósitos pode ser encontrada no estudo de Michaud (2016) quando diz que esse tipo de material são combinações de dois ou mais materiais diferentes que produzem novos materiais com propriedades únicas, tais como rigidez melhorada, condutividade térmica ou elétrica adaptadas.

Nesse trabalho serão apresentadas soluções para problemas de Moldagem por Transferência de Resina (*RTM – Resin Transfer Molding*). Esse processo pode ser descrito em quatro etapas: i) posicionamento de um reforço fibroso dentro de um molde, ii) injeção de uma mistura de resina e agente de cura para dentro desse molde através de um ou mais pontos de injeção, iii) cura da resina e iv) desmontagem do molde. (Oliveira, 2010).

O processo de RTM pode ser realizado com a utilização de apenas um tipo de reforço fibroso ou com mais de um tipo de fibra ao que se chama de RTM Multicamadas. Em ambos os casos, diversas variáveis merecem cuidado especial e fatores como velocidade do escoamento, definição da pressão de injeção, tempo de cura, permeabilidade transversal, entre outros, são pontos que despertam o interesse da comunidade científica e já foram discutidas na literatura (Calado et al. (1996), Kuan et al. (2000), Rouison et al. (2004), Alves (2006) e Amorim (2007). Destaca-se que a definição correta dos aspectos citados anteriormente pode evitar que o compósito produzido tenha problemas estruturais.

O conceito de permeabilidade pode ser encontrado no trabalho de Yun et al. (2018) quando cita que a permeabilidade é a medida do quão facilmente a resina se move através do reforço fibroso, e o tensor de permeabilidades pode ser observado na Equação 1:

$$\begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Considerando um escoamento simétrico, no trabalho de Yun et al. (2018), o tensor de permeabilidades se reduz a seis componentes, sendo o K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} os valores da

permeabilidade em cada um dos planos x , y e z , enquanto que K_{xy} , K_{xz} e K_{yz} fornece informações sobre os ângulos entre a direção principal do tecido e a direção escolhida do sistema de coordenadas. Esses valores serão nulos quando as coordenadas coincidirem com as direções principais da malha, que é a situação dos problemas apresentados nesse trabalho, mais ainda, esse estudo dedica-se apenas a uma dessas componentes que é a permeabilidade transversal que se convencionou nesse trabalho chamar de K_{zz} .

Segundo pesquisadores como Visconti et al. (2003) e Ballata et al. (1999) a permeabilidade transversal é uma propriedade importante a ser determinada quando a espessura do compósito não pode ser negligenciada e o fluxo da resina é tridimensional, além disso, essa propriedade é fundamental para modelar o fluxo da resina em moldes multicamadas, pois nesse caso é importante quantificar corretamente o fluxo transversal e para isso é necessário que se conheça o valor da permeabilidade na direção transversal.

Outro estudo referente à permeabilidade transversal é o desenvolvido por Liu et al. (2004) que apresentou um estudo sobre a compressibilidade e permeabilidade efetiva de meios multicamadas, foram realizados testes de fluxo radial de compactação utilizando três diferentes reforços de fibras de vidro e os resultados indicam que a compressibilidade efetiva em reforços híbridos é predominantemente determinada pela proporção de compressibilidade dos reforços utilizados e a permeabilidade efetiva é encontrada através da orientação e proporcionalidade das fibras nas camadas superficiais exteriores.

Apesar da importância que a permeabilidade transversal possui para a modelagem de problemas de RTM, pode-se observar no trabalho de Sharma e Siginer (2008) que a maior parte dos trabalhos realizados focam na medição da permeabilidade planar. Como exemplos de trabalhos que se dedicam em estudar a permeabilidade transversal, cita-se Souza et al. (2012) que sugerem uma metodologia numérica para determinar a permeabilidade média nas três direções a partir de dados experimentais.

Geralmente, a investigação das variáveis de interesse em problemas de RTM baseia-se apenas em estudos experimentais, que buscam investigar a influência desses fatores na produção de compósitos. Porém, como os ensaios experimentais geralmente são muito onerosos, pode-se aliar a utilização de estudos práticos à de métodos numéricos, capazes de auxiliar e fornecer subsídios importantes para a identificação dos motivos que levam aos erros e às possíveis soluções.

Destaca-se que a utilização de métodos numéricos se torna fundamental, pois é necessário que inúmeros ensaios sejam realizados para que se possa estimar o valor da permeabilidade transversal e esses ensaios possuem custos elevados. Aliando o estudo

numérico aos ensaios experimentais, pode-se reduzir o número de experimentos realizados e conseqüentemente diminuir o custo.

O presente trabalho se dedica em determinar a permeabilidade transversal e desenvolver um modelo numérico de problemas de RTM que possa, futuramente, determinar a permeabilidade de reforços, sem a necessidade da realização de vários ensaios experimentais. Para tanto o estudo foi dividido em duas etapas. A primeira etapa consistiu na realização de ensaios experimentais para determinação da permeabilidade transversal a qual foi desenvolvida junto ao Laboratório de Polímeros (LaPol) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Já a segunda etapa se deu com a busca de uma solução numérica que fosse validada a partir dos dados experimentais obtidos na primeira etapa. A modelagem numérica e computacional dos problemas estudados, se desenvolveu na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), junto ao Laboratório de Simulação Numérica (LabSiN).

2. DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA

Os problemas de RTM são modelados com base na Lei de Darcy que é uma equação constitutiva que descreve o fluxo do fluido em um meio poroso e pode ser observada na Equação 2:

$$\vec{V} = -\frac{\bar{K}}{\mu} \nabla P \quad (2)$$

onde, \vec{V} (m/s) é o vetor velocidade, \bar{K} (m²) é o tensor de permeabilidade, μ (Pa · s) é a viscosidade e P (Pa) a pressão.

Associado ao uso da Lei de Darcy, nesse estudo a solução para o escoamento multifásico (ar + resina) é obtida pelo método do VOF (*Volume of Fluid*) proposto em Hirt et al. (1981). O VOF aplicado a problemas bifásicos utiliza a ideia de resolução de uma nova equação diferencial para a fração volumétrica, considerando que para cada volume de controle considera-se que o valor desta variável é igual a zero se o volume está vazio, igual a um se o volume está completo e um valor entre zero e um para os volumes parcialmente preenchidos. Nessa formulação as equações da continuidade, da fração volumétrica e da quantidade do movimento são resolvidas e estão descritas nas Equações 3-5:

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

onde, ρ (kg/m^3) é a massa específica e \vec{V} (m/s) é o vetor velocidade.

$$\frac{\partial(\rho f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho f \vec{V}) = 0 \quad (4)$$

onde, f é a fração volumétrica da resina e $(1 - f)$ para o ar.

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (5)$$

onde, $\bar{\tau}$ (Pa) é o tensor de tensões, \vec{g} (m/s^2) é a aceleração da gravidade e \vec{F} (N/m^3) é o termo fonte.

Cabe ressaltar que na solução do VOF há a consideração da mistura resina + ar, e portanto, é necessário considerar as propriedades físicas do fluido que estão descritas nas Equações 6-7:

$$\rho = f\rho_{\text{resina}} + (1 - f)\rho_{\text{ar}} \quad (6)$$

$$\mu = f\mu_{\text{resina}} + (1 - f)\mu_{\text{ar}} \quad (7)$$

Observa-se que para os problemas de RTM o termo fonte é a própria Lei de Darcy, que é incluída no modelo matemático de forma a considerar um termo de força resistiva na equação do movimento e dessa forma descrever o efeito de porosidade no escoamento, o que pode ser observado na Equação 8:

$$\vec{F} = \nabla P = -\frac{\mu}{K} \vec{V} \quad (8)$$

Portanto a partir da resolução numérica desse conjunto de equações, se consegue descrever o comportamento da resina dentro do molde.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados nesse trabalho são apresentados em duas seções, a primeira referente aos ensaios experimentais e a segunda dedicada a apresentar a Modelagem Computacional dos problemas estudados.

3.1 Ensaio Experimentais

Os ensaios experimentais apresentados nesse trabalho foram realizados junto ao LaPol/UFRGS e foram utilizados os seguintes materiais:

- Manta de Kevlar com gramatura 0,532 kg/m²;
- Óleo de soja comercial para as infiltrações.

O molde apresentado na Figura 1a é metálico e composto por um espaço compreendido entre duas placas perfuradas onde o reforço fibroso deve ser colocado, conforme pode ser observado na Figura 1b.

A Figura 1b mostra a célula de medição de permeabilidade transversal. Nessa é possível observar a cavidade onde será colocada a pré-forma fibrosa, a qual é disposta entre as duas placas perfuradas utilizadas para forçar um escoamento retilíneo na direção perpendicular aos tecidos.

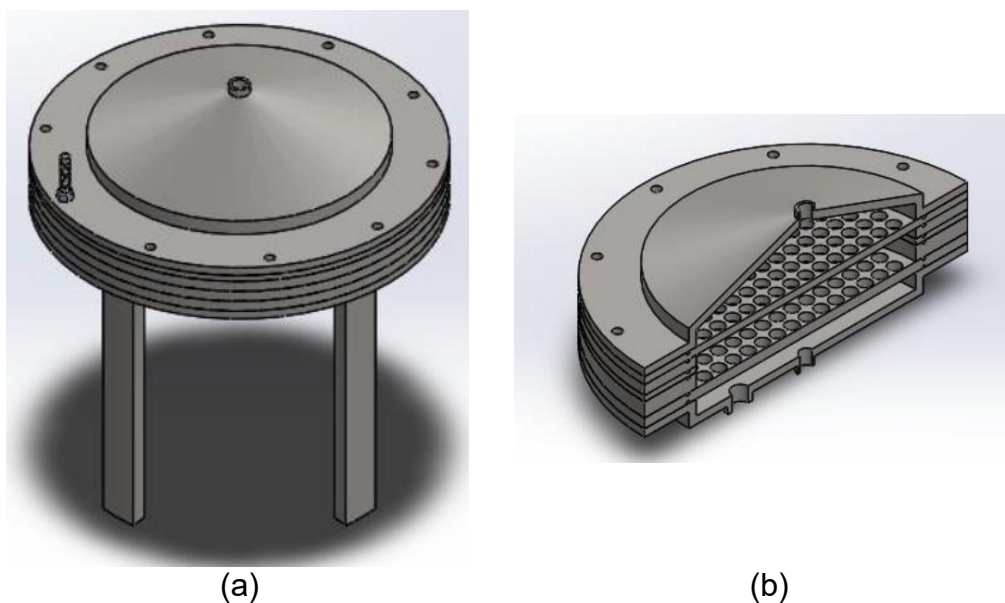


Figura 1. Molde para determinação experimental da permeabilidade: a) vista em perspectiva, b) corte frontal. (Fonte: Escher, 2016)

Neste experimento, a pressão é controlada na entrada do dispositivo (pela parte inferior) e a vazão correspondente medida com o auxílio de uma balança de precisão que mede a quantidade (massa) de resina que passa através do equipamento em função do tempo. Esta vazão mássica é posteriormente convertida em vazão volumétrica. A partir de

um gráfico de vazão em função da pressão é possível estimar o valor da permeabilidade do reforço fibroso utilizado, através da Equação 9:

$$K = \frac{slope \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{\mu}{1000}\right)}{2 \cdot (1000 \cdot P)} \quad (9)$$

onde K (m^2) é a permeabilidade, $slope$ é o coeficiente do termo x da linha de tendência do diagrama de dispersão dos pontos do gráfico que relaciona a vazão (eixo y) à variação de pressão (eixo x), ε é a porosidade do meio fibroso, μ ($Pa \cdot s$) é a viscosidade da resina e P (Pa) a pressão.

3.2 Modelagem Computacional

O modelo numérico desenvolvido para resolver os problemas de RTM estudados nesse trabalho foi desenvolvido no software livre OpenFOAM 5.0. Nesse software é realizado o processamento da solução numérica através do solver *interFoam*. O solver *interFoam* é baseado no método VOF e é utilizado em casos que se utilizam dois fluidos incompressíveis. Nos casos de problemas de RTM esses dois fluidos são ar e resina. Como funções de interpolação para os casos estudados, se considerou para o termo Divergente a função de *Gauss Linear Upwind*, no Gradiente e no Laplaciano usou-se *Gauss Linear* e finalmente para Derivada utilizou-se Euler. O algoritmo utilizado para resolver o problema de acoplamento pressão-velocidade foi o PIMPLE, que é uma combinação do SIMPLE e do PISO, que são algoritmos já reconhecidos no meio acadêmico.

O domínio computacional utilizado no estudo realizado é mostrado na Figura 2. Nesta é apresentada a malha gerada e as condições de contorno. Na Figura 2a especifica-se as condições de contorno que são de pressão zero para o escoamento e derivada nula para a fração volumétrica na saída do molde, pressão prescrita e fração volumétrica igual a 1 na entrada do molde, não deslizamento e derivada nula para fração volumétrica nas paredes do molde e a condição de axissimetria no eixo de simetria.

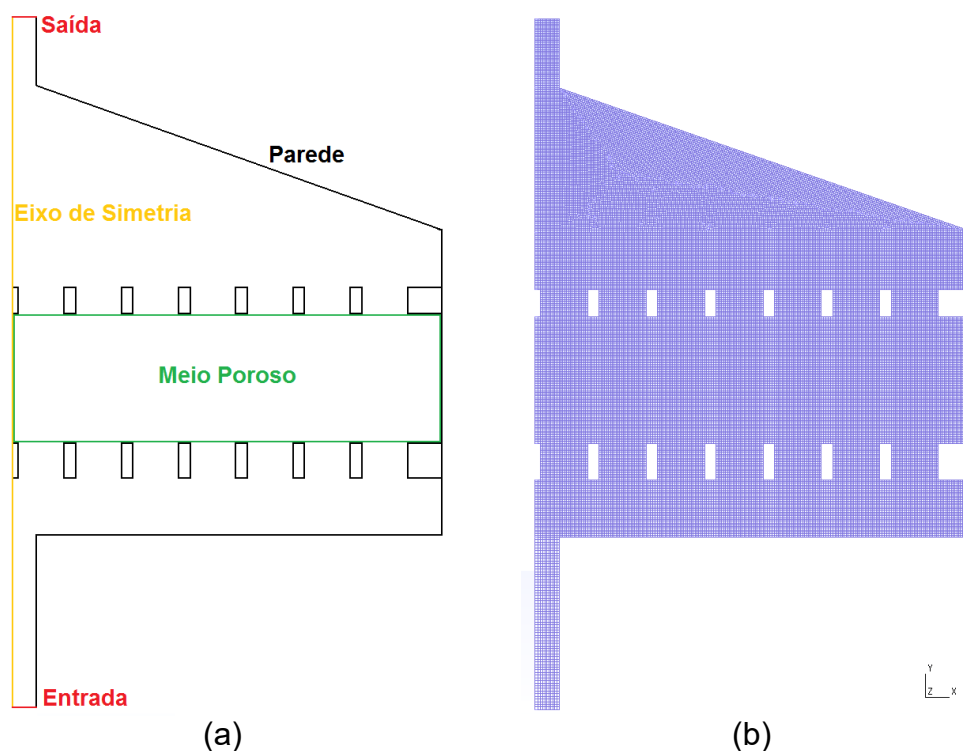


Figura 2. Molde axissimétrico: a) Condições de Contorno. b) Malha gerada pelo Gmsh.

Embora a condição de simetria seja uma aproximação um pouco grosseira para a placa com furos mostrada na Figura 1, o tempo de processamento é muito menor e para este primeiro modelo do molde, esta aproximação mostrou-se satisfatória.

4. RESULTADOS

Os resultados apresentados nesse trabalho, assim como na seção anterior, serão divididos em resultados experimentais e resultados numéricos.

4.1 Resultados Experimentais

A realização dos ensaios experimentais ocorreu com dois espaçadores (distância entre as placas perfuradas conforme Figura 1b), um de 15 mm e outro de 22 mm. O primeiro ensaio foi realizado com espaçador de 15 mm e dezessete camadas de fibra de Kevlar, o que resultou um volume de fibras de 39,57%. Os resultados do Caso 1 podem ser observados na Tabela 1:

Tabela 1. Dados experimentais Caso 1.

Pressão [bar]	Vazão [m ³ /s]
0,20	$3,37 \cdot 10^{-7}$
0,25	$5,03 \cdot 10^{-7}$
0,30	$6,70 \cdot 10^{-7}$
0,40	$9,71 \cdot 10^{-7}$
0,50	$1,22 \cdot 10^{-6}$
0,60	$1,38 \cdot 10^{-6}$
0,70	$1,54 \cdot 10^{-6}$
0,80	$1,65 \cdot 10^{-6}$

A partir dos dados da Tabela 1 obteve-se $K_{zz} = 1,87 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ e o tempo de preenchimento igual a 582 segundos. O tempo de preenchimento é como se chama o tempo de injeção da resina, desde que ela entra no molde até a saída.

O segundo ensaio foi realizado com espaçador de 22 mm e com vinte e cinco camadas fibra de Kevlar, o que resultou em um volume de fibras de 34,91%. Os resultados experimentais podem ser vistos na Tabela 2:

Tabela 2. Dados experimentais Caso 2.

Pressão [bar]	Vazão [m ³ /s]
0,20	$3,40 \cdot 10^{-7}$
0,30	$6,63 \cdot 10^{-7}$
0,40	$9,97 \cdot 10^{-7}$
0,50	$1,32 \cdot 10^{-6}$
0,60	$1,63 \cdot 10^{-6}$
0,70	$1,94 \cdot 10^{-6}$
0,80	$2,22 \cdot 10^{-6}$
0,90	$2,49 \cdot 10^{-6}$

A partir dos dados da Tabela 2 foi calculado o $K_{zz} = 2,62 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ e o tempo de preenchimento igual a 1062 segundos.

Para validar o modelo computacional, é possível se utilizar os dados de vazão volumétrica ou tempo de injeção, pois em ambas as possibilidades o modelo numérico deve ser capaz de reproduzir adequadamente o ensaio experimental, considerando que o tempo de injeção é diretamente proporcional à razão entre a vazão e a pressão. Dessa forma optou-se pela comparação entre o tempo numérico para preenchimento do molde e

o tempo de infiltração obtido nos ensaios. Os resultados podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3. Comparação Numérico x Experimental

Caso	Tempo Numérico [s]	Tempo Experimental [s]	Diferença (%)
Kevlar – 1	580	582	– 0,34%
Kevlar – 2	899	1062	– 15,35%

A diferença entre o tempo numérico e o tempo experimental foi obtida através da Equação 7:

$$Diferença = \frac{T_{exp} - T_{num}}{T_{exp}} \quad (7)$$

Destaca-se que apesar das simplificações provenientes da escolha pelo modelo axissimétrico, obteve-se boa concordância entre a solução numérica e os dados experimentais. Reconhece-se que é preciso avançar no que tange à proporcionalidade entre as áreas de escoamento do molde utilizado experimentalmente e o domínio computacional considerado. Outros aspectos também contribuem para a diferença entre a solução numérica e os dados experimentais; citam-se, a precisão dos instrumentos de medida de massa e de tempo, possíveis arredondamentos provenientes da leitura dos transdutores de pressão, entre outros. Observou-se, nos testes iniciais, que se trata de um modelo computacional altamente suscetível às variações dos parâmetros de entrada e, portanto, quaisquer alterações podem ocasionar diferenças, maiores ou menores, entre o numérico e o experimental.

O escoamento da resina nos dois casos estudados manteve-se de acordo com o esperado. Salienta-se que na Figura 3 as duas fases do escoamento, ar e resina, são representadas pelas cores, azul e vermelho, respectivamente. Pode ser observado também na Figura 3 como estava o escoamento aos 7 segundos do Caso 1:

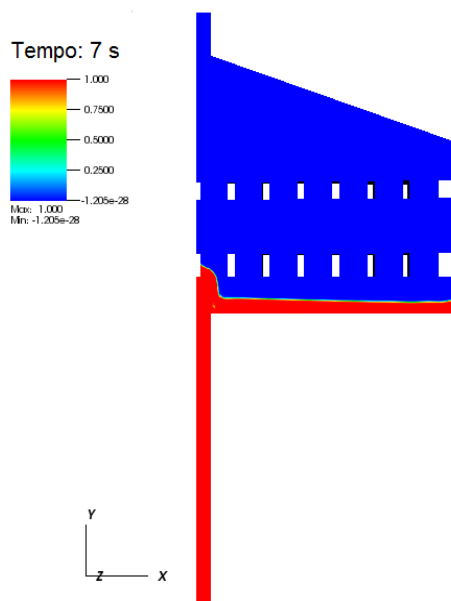


Figura 3. escoamento da resina – Caso 1.

Observa-se que a resina não estava ainda sendo injetada no reforço fibroso e, portanto, uma maior velocidade era esperada para esse estágio do escoamento, o que pode ser confirmado na Figura 4:

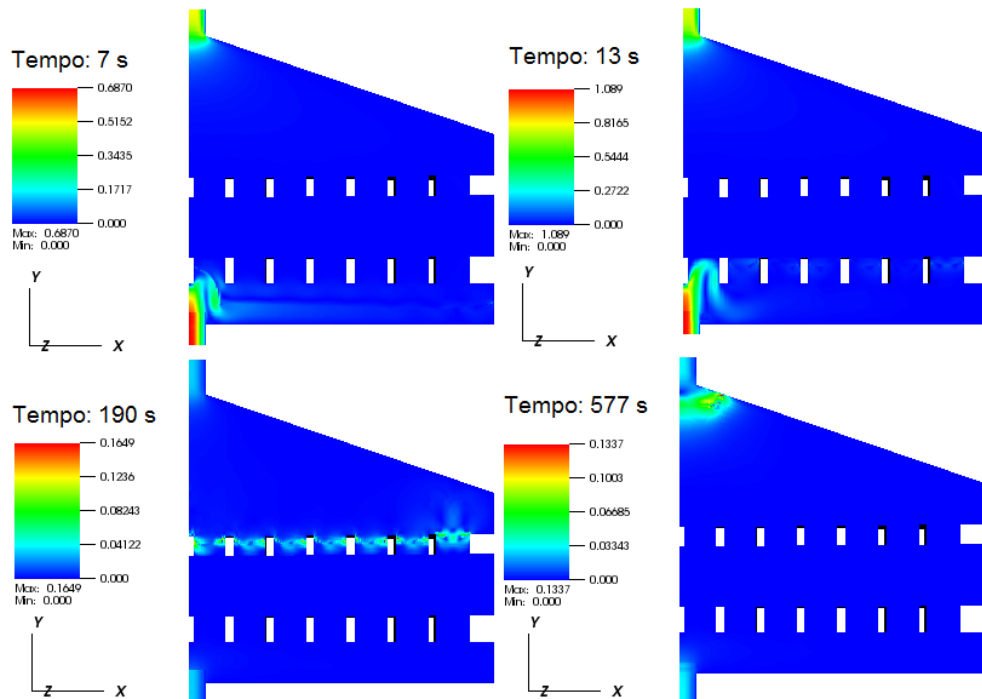


Figura 4. Campo de Velocidade – Caso 1.

Nota-se que a velocidade do escoamento nos dois primeiros tempos mostrados na Figura 4 são maiores que nos dois últimos registros. Esses resultados estão de acordo

com o que ocorre nos ensaios experimentais, pois nesse primeiro momento do escoamento a resina ainda não estava enfrentando a resistência que o meio poroso oferece ao fluxo. Observa-se na Figura 5 como estava a posição da resina em cada um dos três últimos registros desse caso:

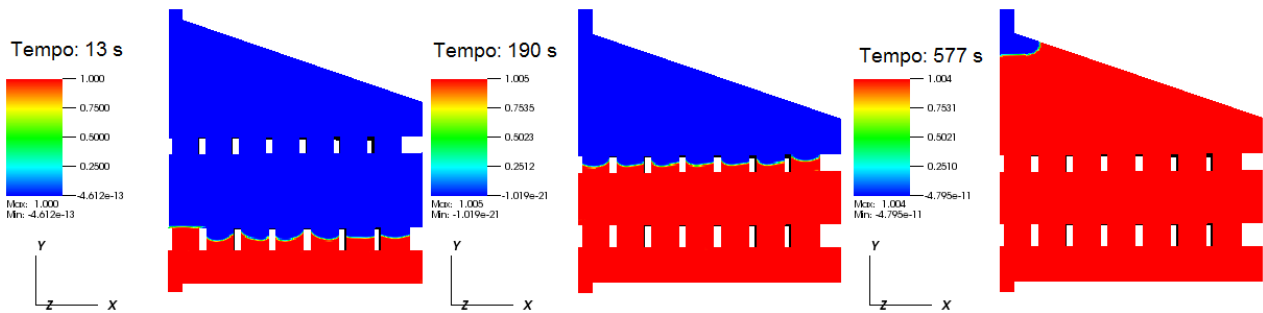


Figura 5. Posição da resina dentro do molde – Caso 1.

Outra constatação que merece destaque na análise dos resultados desse caso é relativa à manutenção de uma velocidade constante na injeção da resina dentro do molde, a medida que a mesma começa a impregnar o reforço fibroso, pois esse comportamento está de acordo com o que se observa nos ensaios experimentais.

Analogamente ao primeiro caso, apresenta-se na Figura 6 o primeiro registro da posição da resina dentro do molde no Caso 2:

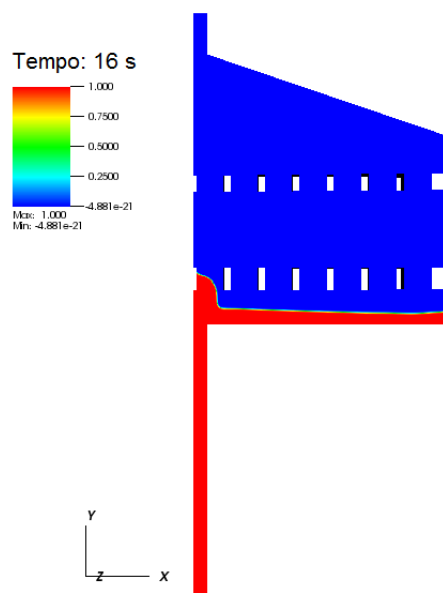


Figura 6. Posição da resina dentro do molde – Caso 2.

Assim como no Caso 1, o comportamento do escoamento ocorreu da forma esperada, com relação à manutenção da linha de frente e preenchimento do molde, como pode-se observar na Figura 7:

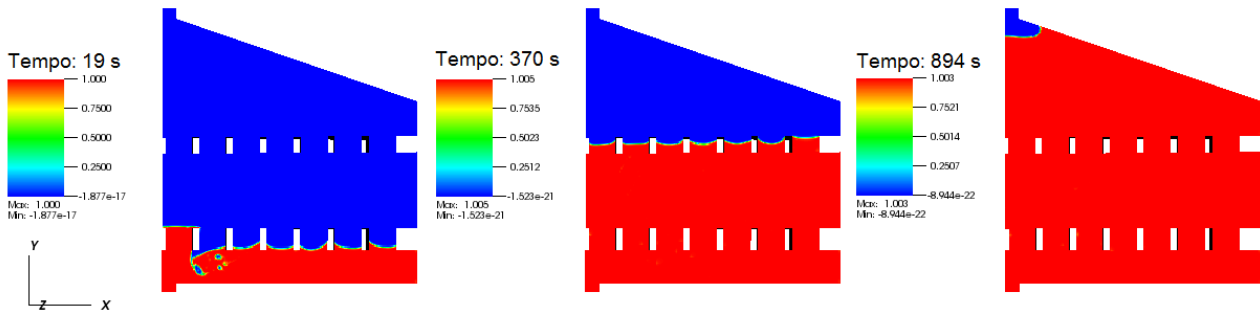


Figura 7. Posição da resina dentro do molde – Caso 2.

Notou-se que no segundo tempo registrado na Figura 7, pequenas bolhas de ar se formaram, no entanto, as mesmas foram retiradas a medida que a resina foi avançando.

Observou-se que, também no Caso 2, a velocidade do escoamento é maior enquanto a resina não começa a ser injetada no reforço fibroso. Pode ser observado o campo de velocidade desse caso na Figura 8:

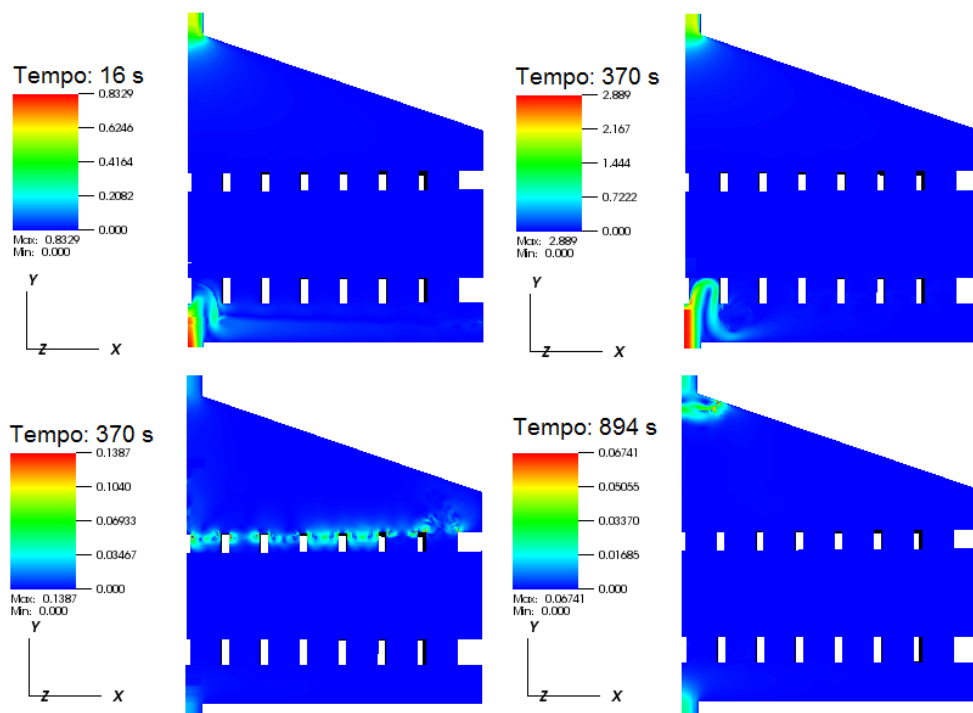


Figura 8. Campo de Velocidade – Caso 2.

Nota-se que no Caso 2 que apesar do comportamento inicial ser similar ao que ocorreria no Caso 1, não se pode observar que a velocidade do escoamento tenha se mantido constante depois que a resina começa a impregnar o reforço fibroso. Apesar

dessa diferença relativa à velocidade de entrada da resina, o escoamento manteve o comportamento esperado.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, conclui-se que o modelo axissimétrico desenvolvido foi capaz de reproduzir adequadamente os resultados obtidos experimentalmente.

O modelo numérico conseguiu reproduzir adequadamente a formação da linha de frente da resina e seu avanço dentro do molde, bem como evidenciou a formação de pequenas bolhas de ar que a medida que a resina avança vão sendo eliminadas.

Além de apresentar bons resultados qualitativos, o modelo se mostrou eficaz também quantitativamente. No Caso 1 uma diferença menor que 1% foi encontrada no que tange ao tempo final de injeção, enquanto que no caso 2 a diferença ficou em aproximadamente 15%, valor que dada as inúmeras simplificações realizadas, considera-se aceitável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – código de financiamento 001 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ALVES, A.L.S. **Processamento de Placas Compósitas pela Técnica de Moldagem por Infusão de Resina de Seemann**. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2006.

AMORIM JR, W.F. **Processamento de Placa Espessa de Compósito Através de Moldagem por Transferência de Resina**. Tese. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2007.

BALLATA, W.O.; WALSH, S.M.; ADVANI, S. **Determination of the Transverse Permeability of a Fiber Preform**. Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 18, p. 1450-1464, 1999.

CALADO, V.M.A.; ADVANI, S.G. **Effective average permeability of multi-layer preforms in resin transfer molding**. Compos Sci Technol 56(5): 519–31, 1996.

ESCHER, M.S. **Projeto mecânico de um equipamento para medição da permeabilidade transversal de pré-formas fibrosas.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio Grande (FURG), 2016.

HIRT, C.W.; NICHOLS, B.D. **Volume of Fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries.** J. Comput. Phys, v. 39, p. 201-225, 1981.

KUAN, Y.; EL-GIZAWY, A.S. **Numerical Characterization of Mold Injection in Resin Transfer Molding Process.** Advances in Polymer Technology, Vol. 19, No. 3, 173–179, 2000.

LIU, X.L.; FALZON, P.J.; SWEETING, R.; PATON, R. **Effective Compressibility and Permeability of Multi-Layer Non-Crimp Fiberglass Reinforcements.** Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 23, p. 861-879, 2004.

MICHAUD, V. **A Review of Non-saturated Resin Flow in Liquid Composite Moulding processes.** Transp. Porous Med, v. 115, p. 581-601, 2016.

OLIVEIRA C. P. **Modelagem Numérica do Transporte de Resinas em um Meio Poroso Aplicado ao Processo de RTM.** Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande (FURG), 2010.

ROUISSON, D.; SAIN, M.; COUTURIER, M. **Resin transfer molding of natural fiber reinforced composites: cure simulation.** Composites Science and Technology, 64, 629–644, 2004.

SHARMA, S.; SIGINER, D.A. **Permeability Measurement Methods in Porous Media: a review.** In Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition - IMECE. Boston, Massachusetts, USA. 2008.

SOUZA, J. A. ; ISOLDI, L. A.; SANTOS, E. D.; OLIVEIRA, C. P.; AMICO, S. C. **A Numerical Methodology for 3D Permeabilities Determination in Polymeric Composites.** In: ENCIT 2012 - 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

VISCONTI, I.C.; LANGELLA, A., DURANTE, M. **Analysis of Transversal Permeability for Different Types of Glass Fiber Reinforcement.** Applied Composite Materials, v. 10, p. 119-127, 2003.

YUN, M.; SAS, H.; SIMACEK, P.; BINETRUY, C.; ADVANI, S.G. **Random field generation of stochastically varying through the thickness permeability of a plain woven fabric.** Composites Science and Technology, 159, 199-207, 2018.