

**XXIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 11 a 15/09/2017**  
**Rio Grande - RS**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DO PROCESSO DE INFUSÃO DE  
RESINA NO CASCO DE UMA EMBARCAÇÃO**

**Thiago Alves Teixeira**

**Jeferson Avila Souza**

Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Av. Itália, Km 8 S/N, Campos Carreiros – Rio Grande, RS, Brasil

[teixeira.alves.thiago@hotmail.com](mailto:teixeira.alves.thiago@hotmail.com)

[jasouza1974@gmail.com](mailto:jasouza1974@gmail.com)

**RESUMO:** Este trabalho tem como objetivo modelar computacionalmente o processo de Infusão de Resina (sigla RI, do inglês *Resin Infusion*) aplicado à fabricação do casco de uma embarcação de pequeno porte com material compósito. Para tal foram utilizados quatro softwares distintos, o *Blender* para modelar tridimensionalmente o casco, o *Gmsh* para gerar o domínio computacional, o *ParaView* para o pós-processamento dos resultados, e o *OpenFOAM* para realizar a solução numérica usando o método VOF. Foram realizadas quatro simulações numéricas para determinar um procedimento otimizado de fabricação do barco. Cada simulação representa um aprimoramento em relação a solução anterior onde problemas, como por exemplo, a formação de vazios, são corrigidos. Ao final, uma metodologia para fabricação do barco através de um processo de infusão de resina é apresentada e discutida.

**Palavras-Chave:** Infusão de Resina, Embarcações de pequeno porte, Modelagem Computacional

**ABSTRACT:** *This study aims to computationally model the Resin Infusion (RI) process applied to the manufacture of a small size vessel hull using composite materials. For this purpose, four different software were used: Blender for the three-dimensional modeling of the hull, Gmsh to generate the computational domain, ParaView for the post-processing and OpenFOAM to perform the numerical solution using the VOF method. Four numerical simulations were performed in order to adjust an optimized manufacture process of the vessel. Each new simulation was an improvement of the previous one, on which problems, like void formation, were corrected. At the end, a methodology for hull manufacturing using an infusion process is presented and discussed.*

**Keywords:** *Resin Infusion, Small craft, Computational Modeling*

## **INTRODUÇÃO**

Atualmente, de acordo com Verma *et al.* (2014), há uma crescente demanda por produtos feitos com materiais compósitos de alta qualidade, ou seja, materiais que apresentam, por exemplo, alta resistência mecânica, rigidez, resistência a corrosão e a fadiga. Neste aspecto, de acordo com Isoldi (2008), os materiais compósitos laminados tem ganhado muito espaço em diversas áreas da indústria.

Os compósitos, conforme explica Isoldi (2008) e Levy Neto & Pardini (2006), têm sua estrutura formada pela combinação de dois materiais, um de fase descontínua filamentar (reforço), geralmente fibrosa ou particulada, que confere ao compósito suas propriedades mecânicas. O outro material tem fase contínua aglutinante (matriz), geralmente uma resina líquida nos compósitos poliméricos, que se agrega físico-quimicamente ao reforço e é responsável por estruturá-lo, além de lhe transferir as solicitações mecânicas e protegê-lo do ambiente externo.

Na área naval, de acordo com Arora (2014), materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro ou de carbono estão sendo usados principalmente na fabricação dos cascos de embarcações, geralmente as de pequeno e médio porte. Anteriormente eles eram construídos somente com aço, porém a utilização dos compósitos se deve por apresentarem uma significativa redução no peso, mantendo as propriedades mecânicas.

Para fabricar cascos com este tipo de material, é comumente usado o processo RI (*Resin Infusion*), que de acordo com Govignon *et al.* (2008), é um processo de fabricação pertencente à família LCM (*Liquid Composite Moulding*), assim como o RTM (*Resin Transfer Molding*) e o LRTM (*Light Resin Transfer Molding*). No RI, Govignon *et al.* (2008) explica que, um molde, responsável por dar formato a o produto, é fechado por um saco plástico que cobre e sela a vácuo um reforço fibroso que posteriormente é impregnado por uma resina polimérica líquida através de tubos de infusão. Além disso, o mesmo tem como vantagem um baixo custo, e aplicabilidade na fabricação de grandes estruturas

compositas reforçadas com fibras. Porém, ainda apresenta alguns desafios para a indústria em relação à sua confiabilidade e repetibilidade, podendo ser oneroso se aplicado de forma inadequada, gerando desperdício de matéria prima principalmente devido a tentativas e erros. Sendo assim, este estudo justifica-se, pois, é essencial aprimorar o processo com o intuito de amenizar desperdícios, e por consequência os custos. Uma das maneiras de estudá-lo é através da modelagem computacional, que torna possível obter conhecimento sobre o mesmo, antes que ele seja aplicado industrialmente.

Há diferentes trabalhos sobre LCM sendo realizados atualmente. Isoldi *et al.* (2012), por exemplo, realizaram um estudo sobre RTM, onde vários casos foram resolvidos numericamente e comparados com resultados analíticos, experimentais e numéricos. Também foi desenvolvida uma nova metodologia computacional para simular o processo LRTM. Já Hadigheh *et al.* (2015) estudaram, a partir de experimentos, as características de ligação entre placas de concreto e FRP (*Fiber-Reinforced Polymer*) fabricadas usando o processo RI. Por fim, Yue *et al.* (2017), indicam, em seu estudo, o excelente potencial das resinas epóxi bio-baseadas como uma alternativa sustentável às resinas epoxi tradicionais baseadas em petróleo.

O presente estudo, tem como objetivo modelar computacionalmente o processo RI aplicado na fabricação do casco de uma embarcação de pequeno porte com material compósito. A simulação numérica realizada descreve o avanço da resina ao longo da infusão, o que torna possível localizar a posição exata dos tubos de entrada e saída da mesma, e com isso, eles podem ser devidamente posicionados a fim de evitar desperdícios. Sendo assim, o intuito final é propor a melhor forma de aplicar o processo, ou seja, a melhor forma de posicionar os tubos de infusão.

## MODELAGEM COMPUTACIONAL

Neste estudo foi desenvolvido uma metodologia usando três *softwares*, o *Blender* (*Blender* versão 2.76) para modelar tridimensional do casco, o *Gmsh* (*Gmsh* versão 3.0.4) para geração do domínio computacional, o *OpenFOAM* (*OpenFOAM* versão 2.1.1) para realização da solução numérica, e o *ParaView* para o pós-processamento.

Primeiramente, o casco em conjunto com os tubos usados na infusão foi modelado tridimensional no *Blender*, e a partir deste modelo é construído e gerado o domínio computacional no *Gmsh*. Este procedimento se dá, exportando o modelo tridimensional construído no *Blender* em um arquivo do tipo *obj* (*Wavefront OBJ – Object*), que é um arquivo de formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) que descreve malhas poligonais tridimensionais. Após isto, o mesmo é convertido para um arquivo de formato *geo* (*Gmsh Script – Geometry*), que é o arquivo de *script* usado para construir malhas poligonais no *Gmsh*. Esta conversão se dá através da edição textual manual da sintaxe do código *obj* para a sintaxe do *script geo*. Com o domínio computacional construído no *Gmsh*, o mesmo é exportado para um arquivo no formato *msh* (*Mesh Gmsh*), que também é um arquivo de formato ASCII que descreve malhas poligonais tridimensionais construídas no *Gmsh*. O arquivo *msh* permite a integração do *OpenFOAM* com o *Gmsh* através de um utilitário de conversão de malha chamado *GmshToFoam* (*gmshToFoam*), onde este permite que o *msh* seja importado para ser configurado e usado no *OpenFOAM*. Por fim, no *OpenFOAM*, após o *msh* ser importado e configurado, a solução numérica é obtida através do *solver PoroInterFoam* (*porousInterFoam*).

A Lei de Darcy, expressa pela Eq. (1), de acordo com Porto *et al.* (2012), é normalmente usada para relacionar o campo de velocidades com o campo de pressões em reforços fibrosos sendo infundidos por resina no interior de um molde através do processo RTM (*Resin Transfer Molding*). A mesma metodologia é a aplicada ao processo RI, pois segundo Govignon *et al.* (2008), o RI, RTM e LRTM são processos LCM.

$$\vec{v} = - \frac{K}{\mu} \nabla p \quad (1)$$

Na Eq. (1),  $\vec{v}$  é a velocidade ( $m/s$ ) e  $\mu$  a viscosidade ( $Pa \cdot s$ ) da resina,  $K$  é a permeabilidade ( $m^2$ ) da resina no reforço fibroso, e  $p$  a pressão ( $Pa$ ) de infusão.

O método numérico usado no *OpenFOAM* é o VOF (*Volume of Fluid*). Porto *et al.* (2012) explica que, o VOF aplica-se a escoamentos multifásicos de fluidos imiscíveis, ou seja, escoamentos com fases bem definidas, onde volume de uma fase não ocupa o lugar da outra. A representação das fases dentro de uma célula computacional, utiliza-se do conceito de fração volumétrica ( $\alpha$ ). Sendo assim, define-se que na situação bifásica, neste caso, resina e ar, tem-se que  $\alpha = 0$  quando a célula computacional estiver totalmente preenchida com ar,  $\alpha = 1$  se célula estiver totalmente preenchida com resina, e quando  $0 < \alpha < 1$ , a mesma contém ambas as fases.

Ainda, de acordo com Porto *et al.* (2012), é resolvida para a mistura bifásica a equações de conservação da massa e quantidade de movimento, sendo que, também inserida no modelo uma força resistiva que representa o efeito poroso, que é o reforço fibroso na modelagem computacional.

A equação da continuidade para a mistura bifásica é expressa na Eq. (2), sendo essa a forma geral da equação da conservação da massa. Esta se aplica para escoamentos compressíveis e incompressíveis, onde neste caso é considerado incompressível.

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

Neste caso, na Eq. (2),  $\rho$  é a massa específica ( $kg/m^3$ ), e  $t$  o tempo (s). No VOF é resolvida apenas uma equação da conservação da massa para ambos os fluidos. Da mesma forma, isto se aplica a equação da quantidade de movimento, expressa pela Eq. (3).

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

Na Eq. (3),  $\bar{\tau}$  é o tensor de tensões (Pa),  $\vec{g}$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ), e  $\vec{F}$  é o termo de força resistiva ( $N/m^3$ ), usado neste modelo para incluir na formulação o efeito resistivo do meio poroso. Com isso, combinando as Eq. (1) e Eq. (3), chega-se a uma expressão para  $\vec{F}$ , mostrada na Eq. (4).

$$\vec{F} = \nabla p = -\frac{\mu}{K} \vec{v} \quad (4)$$

Tendo isso, o transporte advectivo da fração volumétrica em cada célula do domínio computacional pode ser descrita conforme a Eq. (5).

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

Por fim, a partir da definição de fração volumétrica, a massa específica cada célula do domínio computacional pode ser calculada a partir da Eq. (6) e a viscosidade a partir da Eq. (7).

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

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

O objetivo é obter  $\alpha = 1$  em todo o domínio computacional, tornando o produto fabricado livre de imperfeições, e consequentemente com boa qualidade.

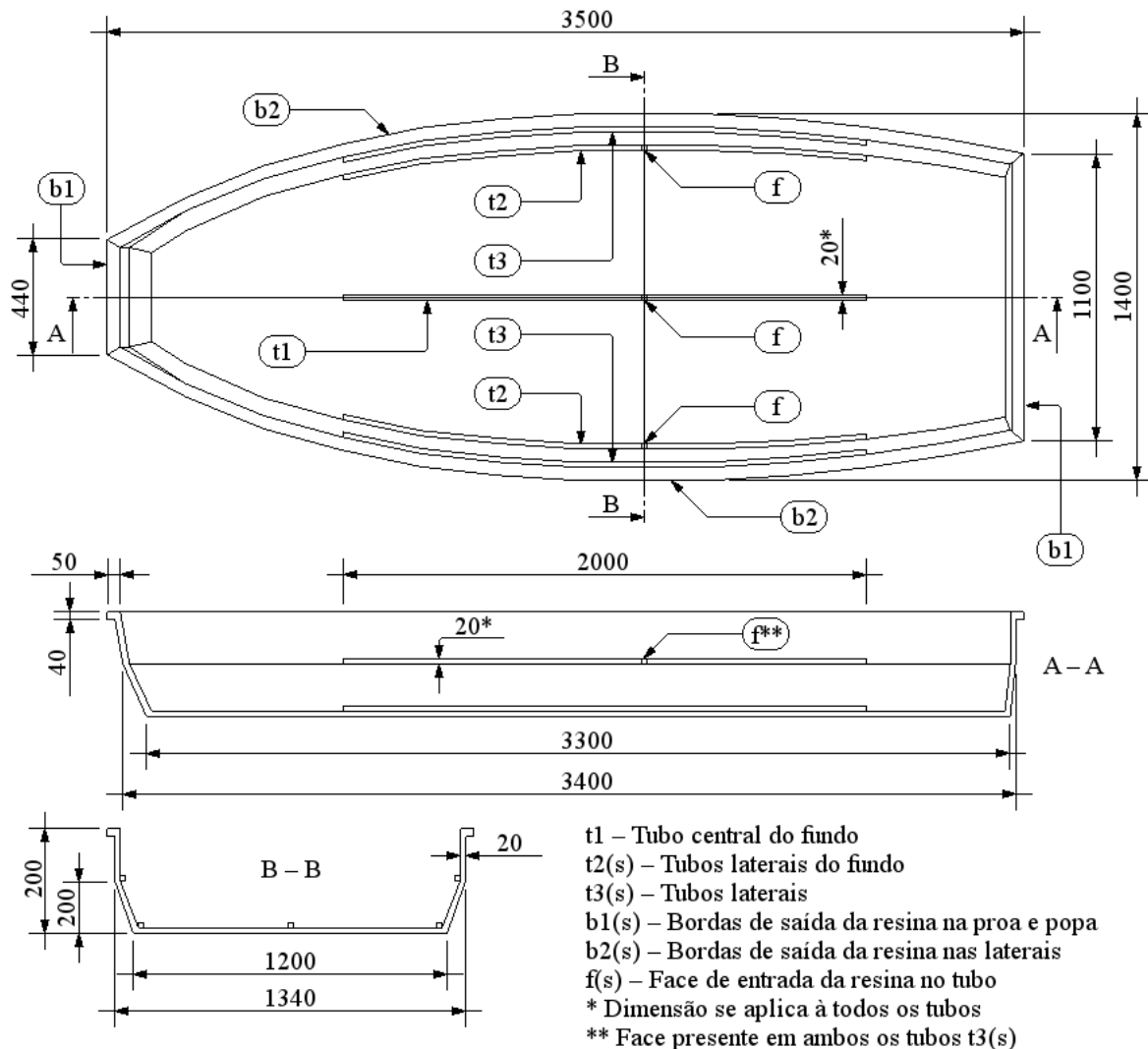
## FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Para a realização deste estudo, foi escolhida uma embarcação simples de pequeno porte, a fim de facilitar sua modelagem tridimensional, e por consequência, a construção do domínio computacional e a solução numérica. O casco da embarcação escolhida foi usado como referência, isto significa que a partir das dimensões do mesmo, mostradas na Tab. (1), foi feito um esquema e posteriormente tendo-o como base o modelo tridimensional. O catálogo da embarcação não apresenta todos os dados dimensionais, que seriam necessários para reproduzi-la integralmente, sendo assim, os não presentes foram escolhidos de maneira coerente, conforme o casco foi sendo esquematizado.

**Tabela 1.** Dimensões do casco

Dimensões	Funyak (2017) – Barque FY 350
Comprimento total (m)	3,50
Largura total – boca (m)	1,40
Altura total – pontal (m)	0,4

O esquema do casco é mostrado na Fig. (1). Os tubos usados na infusão da resina foram esquematizados junto com o casco.



**Figura 1.** Esquema do casco da embarcação

Os cinco tubos usados foram posicionados no sentido longitudinal do casco, conforme mostra a Fig. (2), com o intuito de impregnar o reforço com maior efetividade. Estes possuem 2 m de comprimento cada, com formato quadrangular de 20 mm (espessura e largura). O motivo da escolha destas dimensões se deve, primeiramente ao fato que comprimentos múltiplos de 2 contemplam tamanhos de tubulações encontradas no mercado, como por exemplo, as de 4, 6, 8, 10, e 12 m, sendo assim, são evitados desperdícios que poderiam ser causados em decorrência de recortes e emendas. Já a espessura, a largura e principalmente o formato quadrangular são devidos a construção do domínio computacional, onde existiram problemas com os tamanhos das células computacionais criadas no interior de tubos circulares, os quais seriam “incompatíveis” demais dimensões do casco, levando a não convergência da solução numérica. Por este mesmo motivo foi escolhida a espessura do casco, que é de 20 mm em toda sua extensão, exceto nas bordas.

No domínio computacional da Fig. 2 os tubos t1, t2(s) e t3(s) são definidos como estando vazios não são preenchidos com reforço fibroso, e suas faces em contato com o casco são abertas para que a resina flua através das mesmas em direção ao casco do barco. A resina entra nos tubos através de pontos de infusão (faces, f(s)), presentes em cada tubo. Já a saída se dá através da borda lateral externa do casco, sendo que, b1(s) representa duas faces, proa e popa, e b2(s) as duas laterais. Por fim, o casco é preenchido como o reforço fibroso, ou seja, o meio poroso no qual a resina flui.

Para realizar a solução numérica, é necessário definir quais as propriedades físicas que serão usadas, ou seja, as condições iniciais e de contorno. Estas são mostradas na Tab. (2).

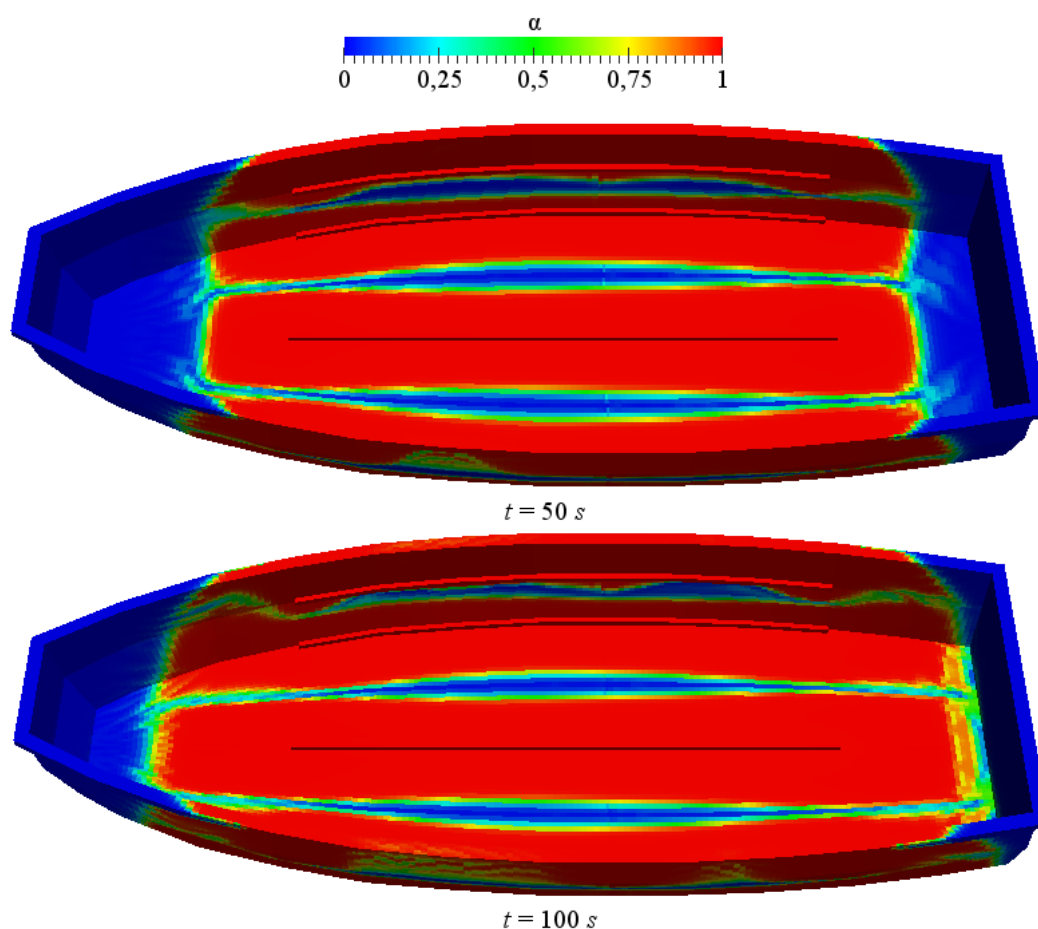
**Tabela 2.** Propriedades físicas usadas

Propriedade	Poodts <i>et al.</i> (2013)
Viscosidade da resina – $\mu$ (Pa s)	0,25
Massa específica da resina – $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1100
Porosidade média – $\varepsilon$	0,56
Permeabilidade média – $K$ (m <sup>2</sup> )	0,021e-9
Pressão de injeção – $p_0$ (bar)	0,9

As propriedades mostradas na Tab. (2) foram escolhidas a partir de literatura, onde Poodts *et al.* (2013) realiza procedimentos experimentais, usando um tecido de fibra de carbono, núcleo perfurado de PVC (*Polyvinyl Chloride*), e resina epóxi.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

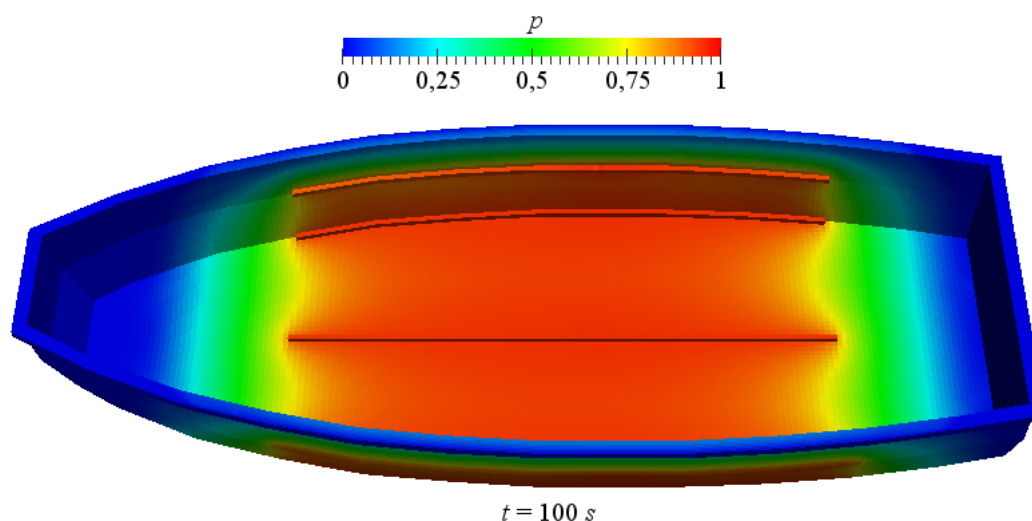
No início do desenvolvimento deste estudo foi realizada uma primeira simulação do processo RI no casco. Esta teve como proposta simples, o uso de toda a borda lateral externa do casco, ou seja, b1(s) e b2(s), como saída para a resina. A infusão da mesma foi realizada simultaneamente em todos os tubos, isso significa que no tempo  $t = 0$  s a resina foi liberada em t1, t2(s) e t3(s). A Fig. (2) mostra os resultados de  $\alpha$  obtidos, em  $t = 50$  s e  $t = 100$  s.



**Figura 2.** Resultados de  $\alpha$  obtidos para a infusão no casco



Na Fig. (2) é possível observar que esta solução não teve êxito, pois, conforme a resina foi impregnando o reforço, o ar entre os tubos, que deveria sair através das bordas, ficou aprisionado no interior do molde. O encontro da resina entre os tubos gerou vazios (células computacionais com  $\alpha < 1$ ) tanto do fundo quanto nas laterais do casco. O motivo disso, é que ela se encontrou primeiramente nas pontas do casco, impedindo do a saída do ar. Isto concentrou a pressão de infusão ( $p$ ) ao longo de casco, conforme mostra a Fig. (3), entre os tubos, impedindo o avanço longitudinal da resina.



**Figura 3.** Pressão de infusão ao longo do casco

Além da formação de vazios, o vazamento de resina através das bordas b2(s) também ajudou a diminuir o avanço longitudinal da mesma. A pressão deve fazê-la fluir de tal forma que preencha totalmente o casco antes de sair pelas bordas laterais (b2(s)). Observando a geometria do casco, percebe-se que o essencial é que a resina saia primeiro através de das bordas na popa e proa (b1(s)).

Apesar do procedimento metodologia desenvolvido ser satisfatório em relação ao seu sucesso na realização simulação proposta, os resultados da mesma não foram. Com a continuação deste estudo serão propostas novas maneiras de realizá-la. Tendo como próxima proposta, a infusão sendo realizada em tempos simultâneos em cada tubo, ou seja, no tempo  $t = 0$  s a resina será liberada no tubo t1, e após, será liberada nos tubos t2(s) usando um tempo que dependerá do comportamento da mesma, e o mesmo para os tubos t3(s).

## CONCLUSÃO

Considerando os resultados obtidos, observa-se que a utilização em conjunto dos softwares *OpenFOAM*, *Gmsh* e *Blender* são adequados para este tipo de modelagem computacional, visto que trazem aplicabilidade prática na construção e simulação numérica do processo RI.

No *Blender* é possível modelar tridimensionalmente uma geometria complexa, no caso deste estudo, o casco da embarcação escolhida, de forma simples e eficiente em relação à *Gmsh*. Isto porque, o mesmo possui ferramentas em sua interface gráfica que facilitam a edição dinâmica de modelos tridimensionais, ou seja, é possível inserir os dados das coordenadas dos pontos que os formam mantendo suas dimensões corretas, onde neste estudo isso foi feito a partir da esquematização do casco, mostrada na Fig. (1). Além disso, a criação de linhas e faces usando as demais ferramentas de edição do software traz facilidades em relação ao *Gmsh*, que não as possui ferramentas semelhantes implementadas.

O *Gmsh* tornou possível criar um domínio computacional utilizando células computacionais no formato de hexaedros. Sendo que esse formato favorece a realização da solução numérica, eliminando possíveis erros ou problemas de convergência. Além disso, sua integração com o *Blender*, através da conversão do código interno do arquivo *Wavefront* para o script *Gmsh*, se mostrou eficaz e interessante, metodologia esta, desenvolvida neste trabalho.

A utilização do *OpenFOAM* foi essencial, pois o mesmo através do utilitário *GmshToFoam* integra-se facilmente com *Gmsh*. Além de já ser um software conceituado no estudo de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), com vários estudos sendo realizados utilizando-o, e apresentar o solver, *PorousInterFoam*, necessário para as soluções numéricas resolvidas neste estudo.



**XXIV CREEM**  
Congresso Nacional de Estudantes  
de Engenharia Mecânica



**Universidade Federal  
do Rio Grande**



**INSTITUTO FEDERAL**  
RIO GRANDE DO SUL  
Campus Rio Grande

O resultado obtido a partir da simulação numérica realizada trouxe propostas interessantes para a continuidade do estudo. A metodologia desenvolvida mostrou-se satisfatória, e o ponto de partida para a realização de novos estudos, poderá ser utilizada em futuras simulações em conjunto com novas propostas para o procedimento de fabricação de casco da embarcação.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem as instituições, Universidade Federal do Rio Grande – FURG e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS. Além disso, o autor Thiago Alves Teixeira agradece em especial a FAPERGS pela bolsa de estudos no Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PROBIC.

## **REFERÊNCIAS**

- Arora, H., Kelly, M., Worley, P. Del L., Fergusson, A. Hooper, P. A, Dear, J. P. “Compressive strength after blast of sandwich composite materials”, Phil. Trans. R. Soc. A 372: 20130212, 2014.
- Funyak. 2017, Barque FY 350, ver: <<http://www.fun-yak.fr>>.
- Govignon, Q., Bickerton, S. Morris, J., Kelly, P. A., “Full field monitoring of the resin flow and laminate properties during the resin infusion process”. Composites: Part A: 39, 2008, 1412-1426 p.
- Hadigheh, S. A., Gravina, R. J., Setunge, S., Kim, S. J. “Bond characterization of adhesively bonded joints made with the resin infusion (RI) process”. International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol.57, 2015, 13-21 p.
- Isoldi, L. A., “Análise estática e dinâmica de estruturas delgadas de materiais compostos laminados incluindo materiais piezelétricos”. Tese de D., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2008.
- 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., Vol.34 No.2, 2012, 105-111 p.
- Levy Neto, F., Pardini, L. C., 2006, “Compósitos Estruturais – Ciência e Tecnologia”. Ed. Edgar Blucher, São Paulo, SP, Brasil, 1-3 p.
- Yue, L., Maiorana, A., Patel, A., Gross, R., Mans-Zloczower, I. “A sustainable alternative to current epoxy resin matrices for vacuum infusion molding”. Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol.100, 2017, 269-274 p.
- Porto, J. S., Letzow, M., Silva, T. M. Da, Santos, E. D. Dos, Amico, S. C., Jouza, J. A., Isoldi, L. A., “Modelagem Computacional do Processo de Moldagem por Transferência de Resina (RTM) aplicada a Hélices para Propulsão Naval”, V Conferência Sul em Modelagem Computacional – MCSUL2012, 2012.
- 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”. Composites: Part B: 53, 2013, 179-186 p.
- Verma, K. K., Dinesh, B. L., Singh, K., Gaddikeri M. K., Sundaram, R. “Challenges in Processing of a Cocured Wing Test Box using Vacuum Enhanced Resin Infusion Technology (VERITY)”. Advanced Composites Division, CSIR-National Aerospace Laboratories, Bengaluru – 560017, India, 2014.

## **DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

Os autores Acad. Thiago Alves Teixeira e Prof. Dr. Jeferson Avila Souza são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.