

## ESTUDO DO PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS COM INSERTS EMBEBIDOS VIA RTM

Rudá Aranha, rudaaranha@gmail.com<sup>1</sup>

Wilma Sales Cavalcanti, wilmasalescavalcanti@gmail.com<sup>1</sup>

Wanderley Ferreira de Amorim Jr., engenhariabrasileira1@gmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Campina Grande, Rua Aprígio Veloso-822 - Bairro Universitário – CEP 58429 – 900 – Campina Grande/PB

**Resumo:** Os materiais compósitos são sinônimos de boas propriedades mecânicas associadas a baixo peso estrutural. A partir dos avanços tecnológicos e da necessidade de desenvolvimento de novos materiais, torná-los multifuncionais surge como interesse imediato. Uma maneira de atingir tal objetivo é através da introdução de inserts nos compósitos, conferindo-os as mais variadas características. É importante entender como os inserts vão afetar o processamento dos compósitos. O estudo experimental do escoamento de resina através da pré-forma e os efeitos recorrentes devido à adição dos inserts impermeáveis aos compósitos durante o processo de Moldagem por Transferência de Resina (RTM) são os objetivos deste trabalho. Neste trabalho, foram utilizados tecido de fibra de vidro e resina poliéster na composição placas com 1 e 9 inserts impermeáveis de polietileno processadas pelo método de RTM para fabricação de um compósito para futuros fins estruturais e/ou balísticos. Com o processamento finalizado, foram percebidas variações na espessura das placas e formação de regiões ricas em resina próximo às laterais dos inserts devido ao mecanismo de afastamento das fibras. Por fim, quatro zonas distintas foram identificadas nas placas de material compósito com inserts impermeáveis embebidos via RTM.

**Palavras-chave:** Materiais compósitos, RTM, inserts embebidos

### 1. INTRODUÇÃO

O conceito de materiais compósitos envolve a combinação de dois ou mais materiais diferentes que atuam como uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que não são apresentadas por nenhum dos componentes isoladamente (Mendonça, 2005). Possuem excelentes propriedades mecânicas, resistência à fadiga, leveza, além de considerável resistência a ataques químicos. Os materiais compósitos são normalmente utilizados nas indústrias aeronáutica, aeroespacial e naval, com alguma utilização na indústria automotiva, construção civil, isolamento térmico, e vibro-acústico, recreação e lazer, além de aplicação no âmbito militar, mais especificamente na área de blindagem balística.

A Moldagem por Transferência de Resina (RTM) é um conhecido processo de fabricação de materiais compósitos que consiste em injetar uma resina líquida no meio fibroso em um molde fechado pertencente à categoria de Moldagem Líquida (LM) (Garay, 2016). Com a crescente utilização de materiais compósitos, o processamento por RTM surge como uma excelente alternativa, aumentando a produtividade além de viabilizar a redução de custos.

Com a grande gama de materiais disponíveis para engenharia, faz-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de materiais especializados para aplicações específicas como materiais compósitos multifuncionais. Ao se inserir objetos (inserts) para além do compósito tradicional composto por matriz e reforço, a estrutura fabricada é caracterizada como um material compósito multifuncional. Tais componentes servem tanto para aperfeiçoar as propriedades inerentes dos compósitos quanto para adicionar funcionalidades ao material (Lawrence *et al.*, 2007).

Alguns exemplos seriam o uso de inserts de cobre com a finalidade de melhorar a propriedade de condutividade do material (Kim *et al.*, 2006; Adu-Obaid and Yarlagadda, 2008; Zhao *et al.*, 2012) e de camadas de cerâmica conferindo as propriedades necessárias para utilização do material como uma estrutura blindada (Walsh and Fink, 2001; Lee *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2013).

A introdução de inserts impermeáveis na pré-forma gera um compósito com componentes permeáveis e impermeáveis, onde a presença dos inserts tende a bloquear o escoamento no sentido transversal durante o processamento, dificultando o preenchimento completo do molde, formando vazios e dry-spots em algumas regiões das peças fabricadas. Este trabalho tem por objetivo o estudo do processamento pelo método de RTM de placas de material compósito com inserts impermeáveis embebidos e os efeitos recorrentes devido à adição dos inserts nos compósitos fabricados.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As placas foram fabricadas com dimensões de  $250 \times 250 \times 14 \text{ mm}^3$ , com pré-formas compostas por tecido de fibra de vidro com gramatura de  $600 \text{ g/mm}^2$  e inserts de polietileno com dimensões de  $50 \times 50 \times 4 \text{ mm}^2$ . A fase matriz do compósito foi composta por resina poliéster com viscosidade de 350 cP e catalisador em uma proporção de 1%.

Primeiramente as placas foram processadas pelo método de RTM Light, sendo a primeira placa, chamada de PRL-1, a única fabricada por este método, utilizando-se da máquina industrial de RTM produzida pela empresa Transtécnica, ilustrada na Fig. 1 (a). As demais placas, chamadas de PVR com dígitos de 1 à 6, foram fabricadas pelo método de VARTM, ilustrado na Fig. 1 (b).

Os experimentos foram realizados em um molde com base e moldura de polietileno de alta densidade e tampa de vidro, a vedação do molde foi realizada por duas camadas de borrachas e uma câmera foi posicionada para captar o escoamento da resina através de uma das superfícies do molde, em destaque na Fig. 1 (b).

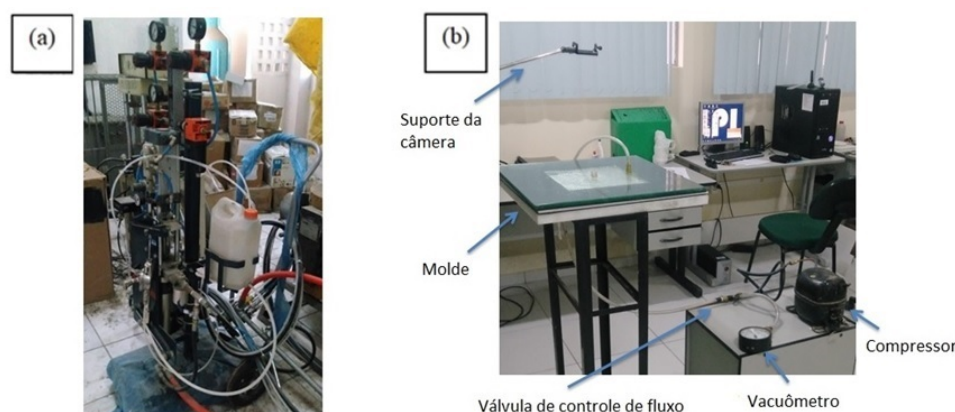


Figura 1: **Sistemas utilizados para o processamento das placas. (a) máquina industrial para o método de RTM Light; (b) sistema adaptado para VARTM.**

A pressão de vácuo utilizada no molde foi gerada por um compressor de 1/8 Cv de potência de modelo EMI 45HER ligado em linha com um vacuômetro. A Tabela 1 mostra as principais variáveis de fabricação das placas, sendo elas: O número de camadas de fibra, número de inserts, intensidade das pressões positivas e de vácuo, lay-up de injeção com variação no número de pontos de entrada e saída e disposição dos mesmos no molde, e o tipo de método de fluxo (retilíneo ou radial).

Tabela 1: **Principais variáveis de processamento das placas fabricadas.**

|       | Nº de camadas | Nº de inserts | Pressão positiva (Kpa) | Pressão negativa (Kpa) | Nº de pontos de entrada | Nº de pontos de saída | Tipo de fluxo |
|-------|---------------|---------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------|
| PRL-1 | 16            | 1             | 250                    | 80                     | 1                       | 3                     | retilíneo     |
| PVR-1 | 16            | 1             | 101,325                | 80                     | 1                       | 3                     | retilíneo     |
| PVR-2 | 14            | 1             | 101,325                | 50                     | 1                       | 3                     | retilíneo     |
| PVR-3 | 10            | 9             | 101,325                | 40                     | 1                       | 3                     | retilíneo     |
| PVR-4 | 10            | 9             | 101,325                | 40                     | 1                       | 3                     | radial        |
| PVR-5 | 10            | 9             | 101,325                | 40                     | 1                       | 3                     | retilíneo     |
| PVR-6 | 10            | 9             | 101,325                | 40                     | 1                       | 3                     | retilíneo     |

Os inserts foram posicionados no centro do molde, como ilustrado na Fig. 2, sendo possível ver pequenas peças de borracha que foram usadas para separar os inserts de maneira uniforme, como utilizado por Mahdi *et al.* (2003).

Ao final dos processamentos, as placas foram cortadas de acordo com o esquema ilustrado na Fig. 3.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante os processamentos das placas foram realizadas mudanças em alguns parâmetros de processamento com a finalidade de se estudar os efeitos gerados nos compósitos pela presença dos inserts, sendo eles: pressão positiva e negativa, número de camadas da pré-forma, lay-up de injeção e número de inserts.

No processamento das primeiras placas, chamadas de PRL-1 (processada por RTM Light) e PVR-1 (processada por VARTM), foram identificadas a formação de dry-spots na superfície superior das placas, ou seja, grandes vazios onde não houve o molhamento das fibras pela resina, ilustradas pela Fig. 4 (a) para placa PRL-1 e (b) para placa PVR-1.

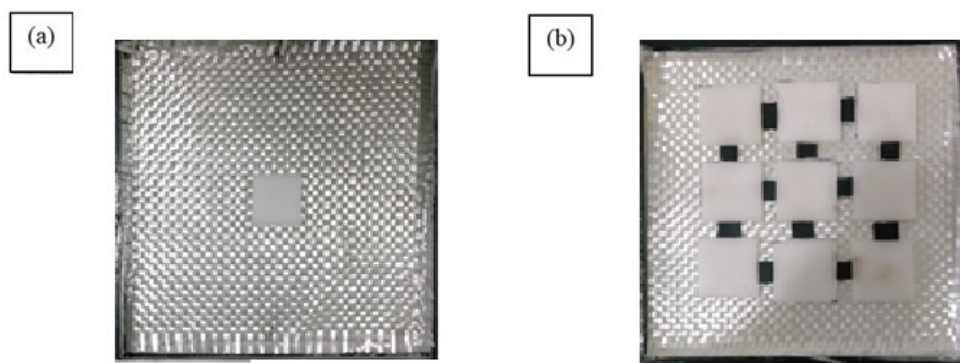


Figura 2: Posicionamento dos inserts na pré-forma. (a) Pré-forma com 1 insert; (b) pré-forma com 9 inserts.

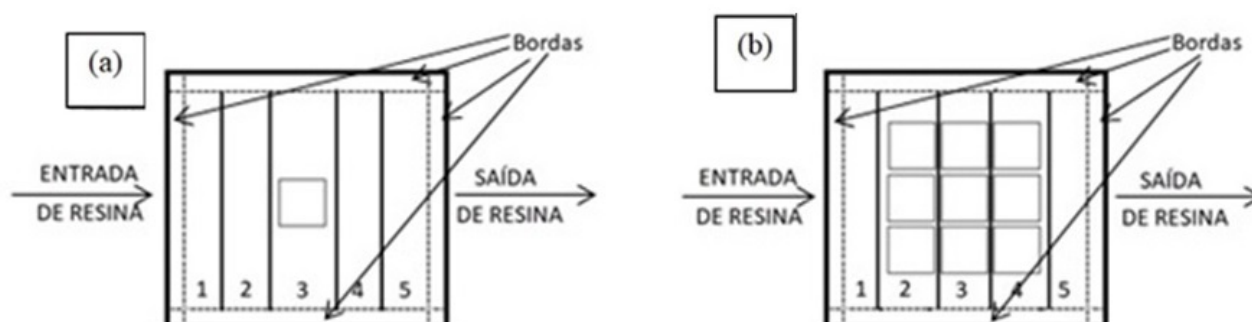


Figura 3: Planejamento de corte das placas. (a) placas com 1 insert embebido; (b) placas com 9 inserts embebidos.

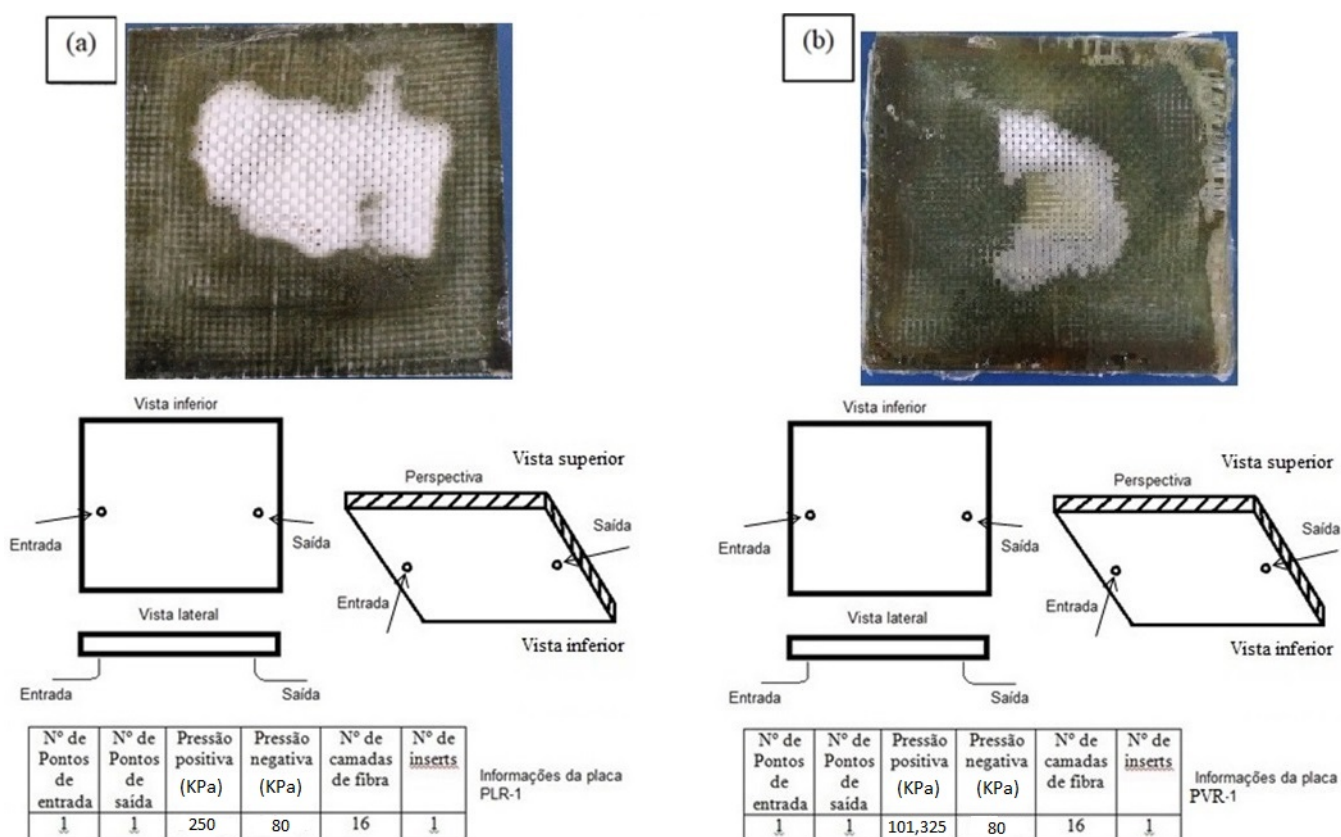


Figura 4: Placas PRL-1 e PVR-1 após o processamento e variáveis do processo, sendo possível identificar a formação de dry-spot nas superfícies das placas. (a) placa PRL-1 e suas variáveis do processo; (b) placa PVR-1 e suas variáveis do processo.

Para a placa PVR-2 foram modificados o número de camadas da pré-forma, a pressão negativa e o lay-up de injeção.

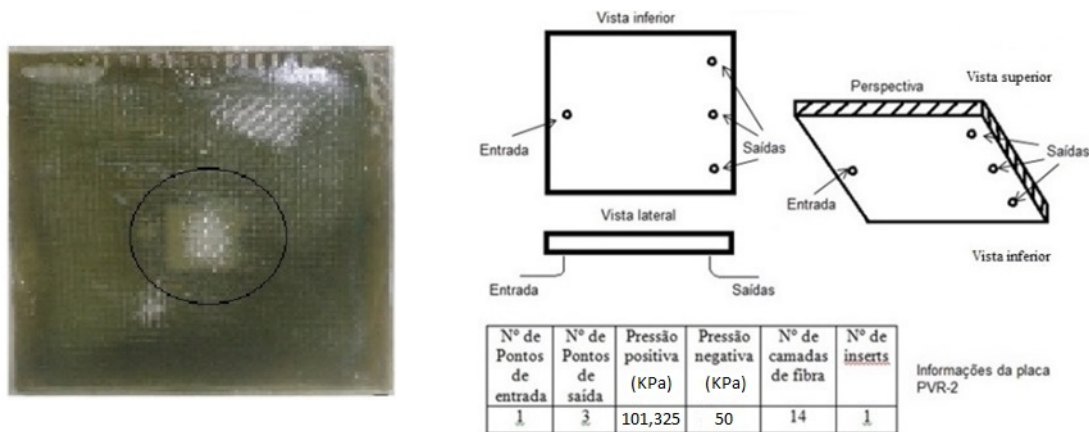


Figura 5: Placa PVR-2 após o processamento e suas variáveis do processo, é possível identificar uma região sem molhamento das fibras acima do insert na superfície da placa.

A Figura 5 mostra a superfície superior da placa PVR-2, sendo possível perceber que as modificações surtiram efeito evitando a formação dos dry-spots, sendo identificado apenas uma pequena região acima do insert onde as fibras não foram molhadas, sendo este um resultado semelhante ao encontrado por Lawrence *et al.* (2007).

A placa PVR-3 foi a primeira em que utilizou 9 inserts embebidos, sendo realizada uma diminuição no número de camadas de fibras de 14 para 10. A Figura 6 ilustra a placa PVR-3 após o processamento, sendo possível perceber que devido ao aumento no número de inserts na pré-forma, o fluxo transversal de resina foi bloqueado, não conseguindo atravessar alguns dos canais entre os inserts, gerando uma região de dry-spot concentrada acima dos inserts.

Com a análise da placa PVR-3 foi possível montar o esquema ilustrado na Fig. 7 demonstrando os tipos de fluxo de resina existentes durante o processamento das placas. Devido à presença dos inserts, o fluxo transversal de resina tende a ser bloqueado, tornando o fluxo lateral o único responsável pelo molhamento das fibras na região acima dos insert, acarretando na formação dos vazios identificados, uma vez que o fluxo lateral por si só não tem força suficiente para vencer as dificuldades ao escoamento impostas pelo meio poroso.

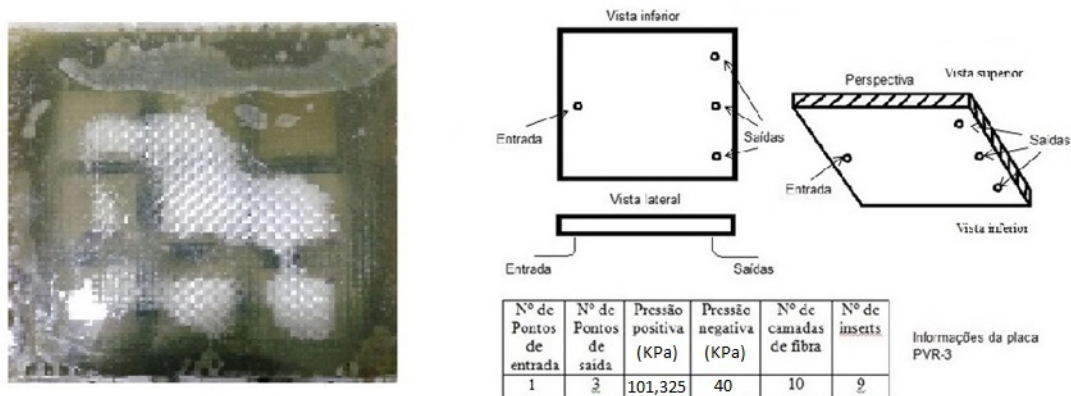


Figura 6: Placa PVR-3 após o processamento e suas variáveis do processo, sendo possível identificar uma região sem molhamento das fibras na superfície da placa devido ao bloqueio do fluxo transversal de resina.

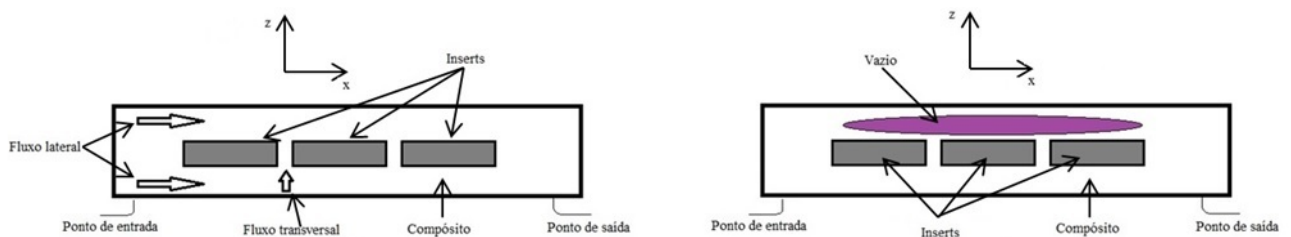


Figura 7: Esquematização dos tipos de fluxos de resina existentes durante o processamento

Nas placas PVR-4 e PVR-5, mudanças no lay-up de injeção foram realizadas, com os pontos de entrada e saída sendo posicionados em planos diferentes, o ponto de entrada na base do molde, enquanto os pontos de saída foram

posicionados na tampa do molde, sendo usado o método de fluxo de resina radial no processamento da placa PVR-4 e retornando ao método de fluxo retilíneo no processamento da placa PVR-5. A Figura 8 ilustra as placas PVR-4 e PVR-5 após o processamento, sendo constatado que as mudanças evitaram a formação dos dry-spots superficiais, porém, houve movimentação dos inserts durante o processamento.

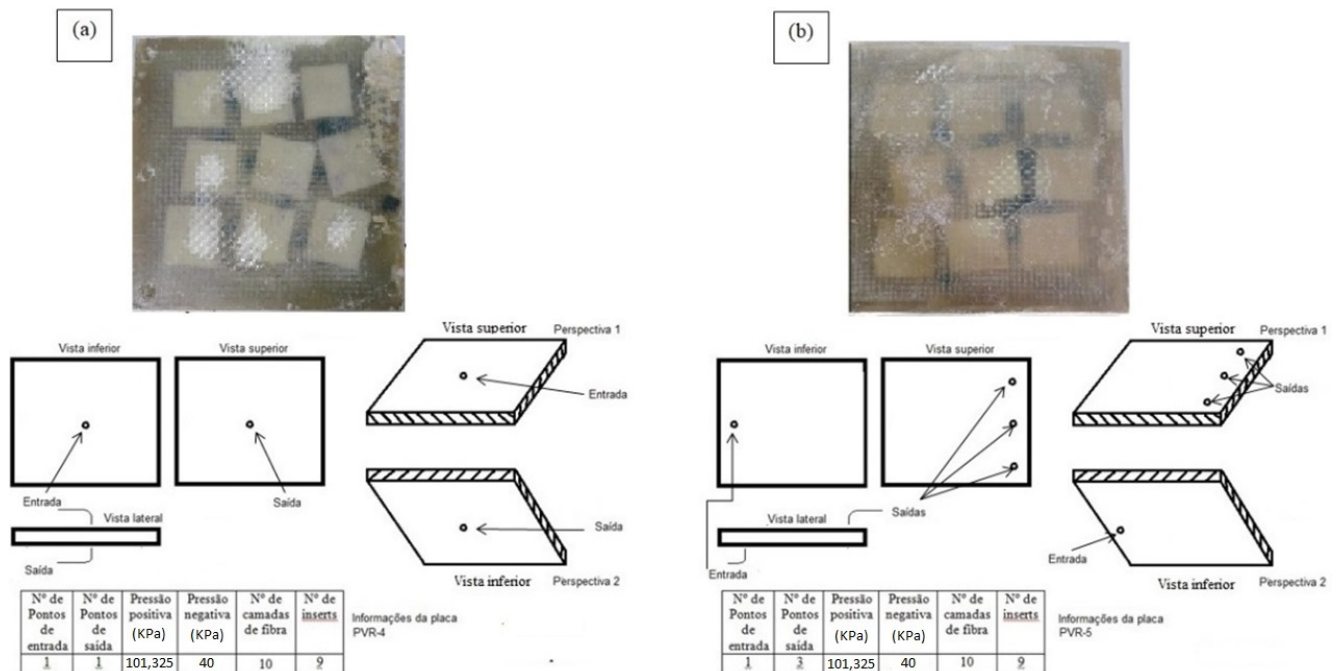


Figura 8: Placas PVR-4 e PVR-5 e suas variáveis do processo, sendo constatada a movimentação dos inserts após o processamento ao se utilizar de pontos de entrada e saída em faces diferentes do molde. (a) placa PVR-4; (b) placa PVR-5.

Como forma de evitar a movimentação dos inserts, foi proposta uma metodologia utilizando uma tela para fixação dos inserts com cola de silicone antes de serem posicionados na pré-forma, ilustrado na Fig. 9.

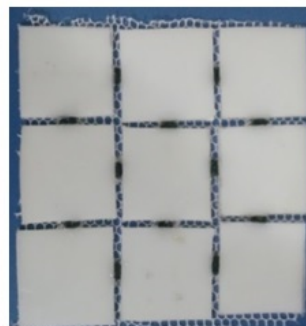


Figura 9: Metodologia de fixação dos inserts em uma tela com cola de silicone para evitar a movimentação.

Com a utilização da tela de fixação, o processamento da placa PVR-6 foi realizado mantendo os parâmetros de injeção utilizados no processamento da placa PVR-5. A Figura 10 ilustra a Placa PVR-6 após o processamento, sendo possível perceber que a utilização da tela de fixação logrou êxito, evitando a movimentação dos inserts durante o processamento e tornando a placa PVR-6 o protótipo final deste trabalho.

Cortes foram realizados nas placas PVR-2 e PVR-6 com a finalidade de se estudar o escoamento nas seções transversais das placas. A Figura 11 ilustra duas seções da PVR-2 e a partir das análises surgiu a hipótese que houve variação da espessura devido ao uso da pressão de vácuo e da compactação das fibras pela presença do insert. Assim foram realizadas medições nas seções, com os resultados ilustrados na Fig. 12.

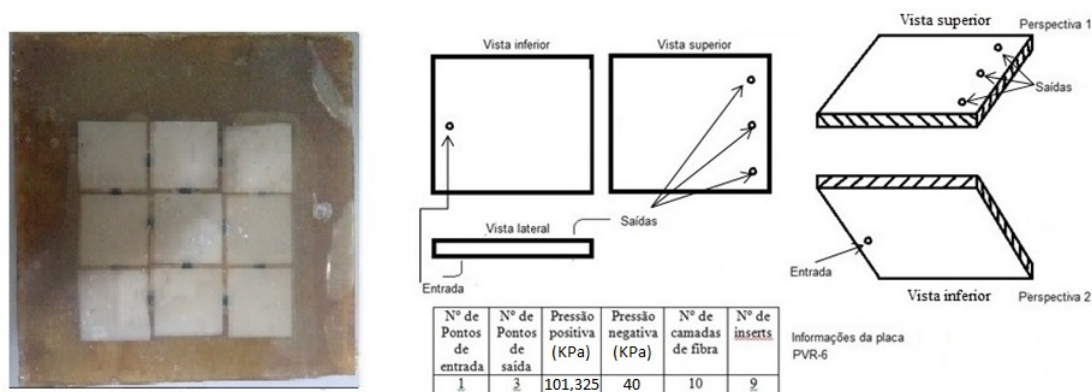


Figura 10: Placa PVR-6 após o processamento e suas variáveis do processo, é possível constatar que a utilização da tela evitou a movimentação dos inserts.

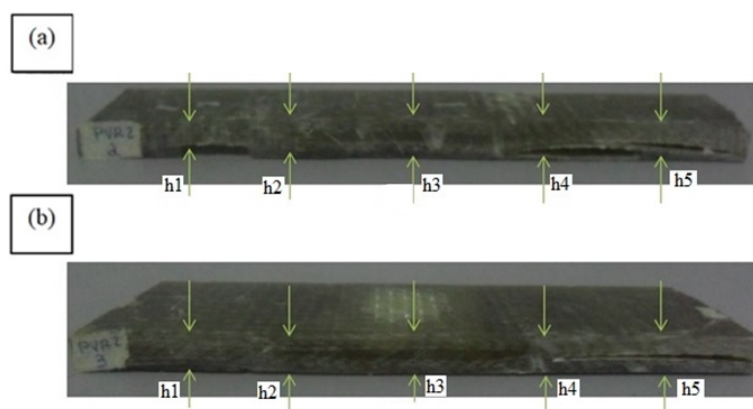


Figura 11: Seções laterais da placa PVR-2 após o corte. (a) seção 2, chamada de PVR-2-A1; (b) seção 3, chamada de PVR-2-A2.

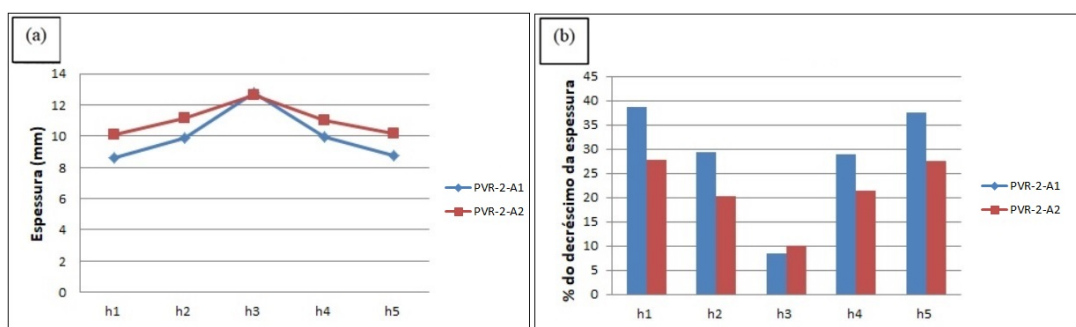


Figura 12: Resultado das medições na placa PVR-2. (a) seção 2, PVR-2-A1; (b) seção 3, PVR-2-A2.

Pela Figura 12, a hipótese de que houve variação na espessura da PVR-2 foi confirmado, apresentando valores de decréscimo da espessura da placa quando comparado com o espaçamento do molde, sendo um decréscimo de até 38%.

Medições nas seções da placa PVR-6 foram realizadas para analisar possíveis variações na espessura da placa com um maior número de inserts pela compactação das fibras (Fig. 13).

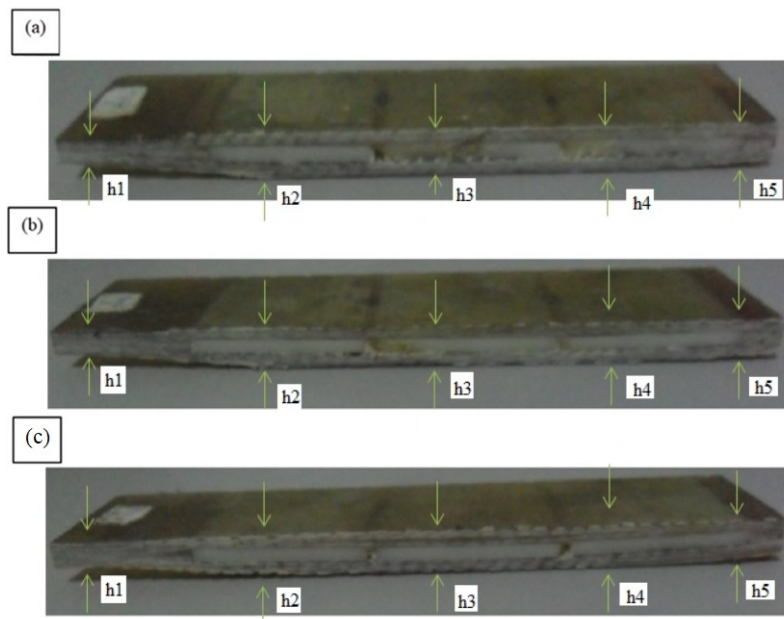


Figura 13: Seções laterais da placa PVR-6 após o corte. (a) seção 2, chamada de PVR-6-A1; (b) seção 3, chamada de PVR-6-A2; (c) seção 4, PVR-6-A3.

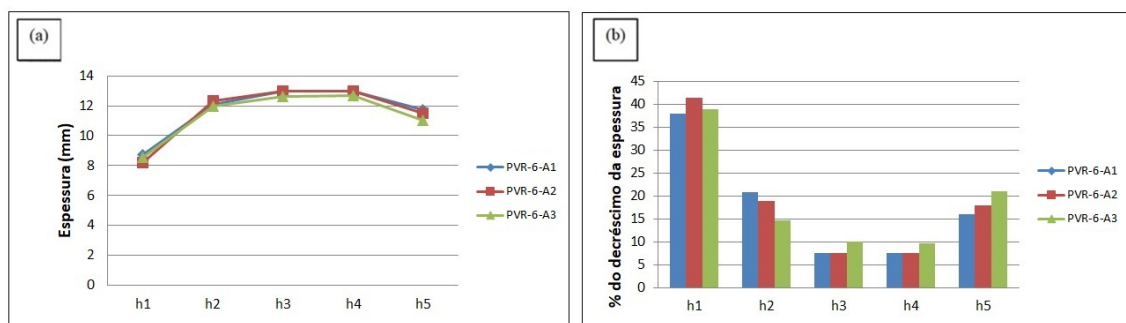


Figura 14: Resultado das medições na placa PVR-6. (a) seção 2, chamada de PVR-6-A1; (b) seção 3, chamada de PVR-6-A2; (c) seção 4, PVR-6-A3.

A Figura 14 ilustra os resultados das medições realizadas nas seções da placa PVR-6, onde foi possível perceber que nas regiões onde havia inserts, houve pequena variação na espessura da placa, enquanto nas regiões sem inserts (pontos h1), grandes variações na espessura foram identificadas, sendo possível concluir que quanto mais distante de uma borda os inserts forem posicionados, maiores serão os efeitos de compactação das fibras naquela região.

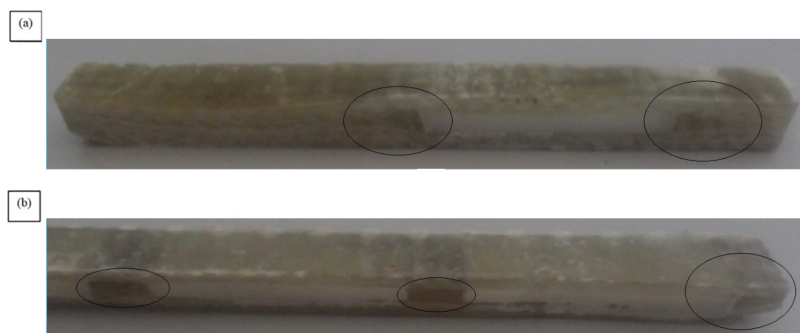


Figura 15: Regiões ricas em resina devido ao mecanismo de afastamento das fibras pela presença dos inserts. (a) seção da placa PVR-2; (b) seção da placa PVR-6.

A Figura 15 ilustra seções das placas PVR-2 e PVR-6 onde os inserts foram cortados. Nas seções foram identificadas regiões ricas em resina próximas dos inserts devido a um mecanismo de afastamento das fibras, sendo este último uma

consequência da presença dos inserts embebidos. Tal resultado é semelhante ao obtido por Steeves and Fleck (2006); Simoneau *et al.* (2014); Xiao *et al.* (2016) em seus trabalhos.

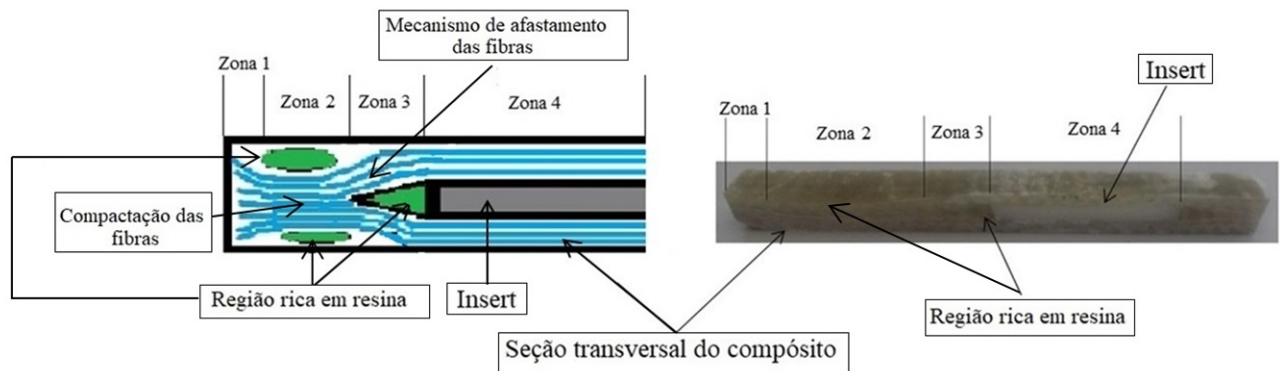


Figura 16: Diferentes zonas identificadas em compósitos processados com inserts embebidos via RTM.

Por fim, a Fig. 16 ilustra quatro zonas diferentes identificadas em compósitos processados com insert embebidos via RTM. A zona 1, localizada nas bordas da placa, sendo uma região em que as fibras não sofreram efeitos de compactação. Na zona 2 as fibras sofreram efeitos de compactação devido à presença dos inserts e do uso da pressão de vácuo, gerando regiões ricas em resina na superfície da placa. Na zona 3 há o afastamento das fibras e formação das regiões ricas em resina próximas às laterais dos inserts. A zona 4 é aquela onde o insert está posicionado.

#### 4. CONCLUSÕES

A partir das mudanças realizadas durante o processamento das placas, como lay-up de injeção, método de fluxo, número de pontos de entrada e saída, número de camadas de fibra e inserts, foi possível fabricar um protótipo inicial de um compósito com inserts embebidos. Com o procedimento experimental, ficou constatado que os inserts introduzidos na pré-forma vão bloquear o fluxo transversal de resina, acarretando na formação de dry-spots na superfície da placa. Também foi percebido que houve variação na espessura das placas processadas tanto com 1, quanto com 9 inserts impermeáveis embebidos. Foi percebido também que quanto mais próximo das bordas os inserts são posicionados, menores são os efeitos de compactação das fibras, do mesmo jeito que quanto mais distante das bordas os inserts são posicionados, maiores são os efeitos de compactação das fibras. A partir do corte das placas, regiões ricas em resina foram identificadas próximas às laterais dos inserts devido ao mecanismo de afastamento das fibras. Por fim, quatro zonas distintas foram identificadas em compósitos com inserts embebidos via RTM: A zona 1, localizada nas bordas da placa, sendo uma região em que as fibras não sofreram efeitos de compactação; a zona 2 que é a região onde as fibras sofreram efeitos de compactação devido à presença dos inserts e do uso da pressão de vácuo gerando regiões ricas em resina na superfície das placas; a zona 3 que é a região onde há a formação das regiões ricas em resina próximas às laterais dos inserts devido ao mecanismo de afastamento das fibras; e a zona 4, sendo aquela onde o insert está posicionado.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica de Universidade Federal de Campina Grande, Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas – UFCG, Laboratório de Projetos de Instrumentos – UFCG, Laboratório de Tecnologias aplicadas à Saúde pertencente ao Núcleo de Tecnologias Estratégicas em Saúde – UEPB e a empresa Stratus Aeronaves.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Adu-Obaid, A. and Yarlagadda, S., 2008. "Structural performance of the glass fiber-vinyl ester composites with interlaminar copper inserts". *Composites: Part A*, Vol. 39, pp. 195–203.
- Garay, A.C., 2016. *Propriedades Mecânicas de Compósitos Estruturas Sanduíche Moldadas por RTM Light e Simulação Numérica da Infiltração*. Ph.D. thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Kim, H., Park, M. and Hsieh, K., 2006. "Fatigue fracture of embedded copper conductors in multifunctional composite structures". *Composites science and technology*, Vol. 66, No. 7-8, pp. 1010–1021.
- Lawrence, J.M., Frey, P., Obaid, A.A., Yarlagadda, S. and Advani, S.G., 2007. "Simulation and validation of resin flow during manufacturing of composite panels containing embedded impermeable inserts with the vartm process". *Polymer composites*, Vol. 28, No. 4, pp. 442–450.
- Lee, C.H., Kim, C.W., Yang, S.U. and Ku, B.M., 2007. "A development of integral composite structure for the ramp of infantry fighting vehicle".

- Mahdi, S., Gama, B., Yarlagadda, S. and Gillespie Jr, J., 2003. "Effect of the manufacturing process on the interfacial properties and structural performance of multi-functional composite structures". *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Vol. 34, No. 7, pp. 635–647.
- Mendonça, P.T.R., 2005. *Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise*. Manole.
- Simoneau, C., Terriault, P., Lacasse, S. and Brailovski, V., 2014. "Adaptive composite panel with embedded sma actuators: Modeling and validation". *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, Vol. 42, No. 2, pp. 174–192.
- Steeves, C.A. and Fleck, N.A., 2006. "In-plane properties of composite laminates with through-thickness pin reinforcement". *International journal of solids and structures*, Vol. 43, No. 10, pp. 3197–3212.
- Walsh, S.M. and Fink, B.K., 2001. "Achieving low cost composite processes through intelligent design and control". *Proc RTO-MP-069 (II)*, pp. 7–11.
- Wang, Q., Chen, Z. and Chen, Z., 2013. "Design and characteristics of hybrid composite armor subjected to projectile impact". *Materials & Design*, Vol. 46, pp. 634–639.
- Xiao, Y., Qiao, W., Fukuda, H. and Hatta, H., 2016. "The effect of embedded devices on structural integrity of composite laminates". *Composite Structures*, Vol. 153, pp. 21–29.
- Zhao, D., Liu, T., Zhang, M., Liang, R. and Wang, B., 2012. "Fabrication and characterization of aerosol-jet printed strain sensors for multifunctional composite structures". *Smart Materials and Structures*, Vol. 21, No. 11.

## 7. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

O autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

# STUDY OF THE PROCESSING OF COMPOSITE MATERIALS WITH EMBEDDED INSERTS VIA RTM

Rudá Aranha, rudaaranha@gmail.com<sup>1</sup>

Wilma Sales Cavalcanti, wilmasalescavalcanti@gmail.com<sup>1</sup>

Wanderley Ferreira de Amorim Jr., engenhariabrasileira1@gmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Campina Grande, Rua Aprígio Veloso-822 - Bairro Universitário – CEP 58429 – 900 – Campina Grande/PB

**Resumo:** The composite materials are synonymous with good mechanical properties associated with low structural weight. Starting from technological advances and the need to develop new materials, making them multifunctional appears as immediate interest. One way to achieve this goal is by introducing inserts into the composites, giving them the most varied characteristics. It is important to understand how the inserts will affect the processing of the composites. The experimental study of the resin flow through the preform and the recurrent effects due to the addition of the impermeable inserts to the composites during the process of Resin Transfer Molding (RTM) are the objectives of this work. In this work, fiberglass fabric and polyester resin were used in the composition sheets with 1 and 9 polyethylene impermeable inserts which were processed by the RTM method for manufacturing a composite for future structural and / or ballistic. With the finished processing, variations in the thickness of the plates and formation of resin-rich regions near the sides of the inserts due to the mechanism of fiber separation were observed. Finally, four distinct zones were identified on composite material plates with embedded impermeable inserts via RTM.

**Palavras-chave:** Composite Materials, RTM, Embedded Inserts