

# **Estudo e melhoria do processo de fabricação de peças em compósito com Moldagem por Transferência de Resina à Vácuo - VARTM**

Guilherme Hiroji Anraku Ikeda<sup>1</sup>; Prof. Dr. Guilherme Wolf Lebrão<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup>Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** Trata-se de uma técnica de manufatura de materiais compósitos, com alta produtividade, baixa fração volumétrica de fibras, grande repetibilidade no qual é utilizado um molde fechado onde é inserida uma pré-forma de fibra e com o molde á vácuo, uma resina de baixa viscosidade é injetada para seu interior. Neste trabalho, será realizado um estudo experimental mais aprofundado do processo e do molde.

## **Introdução**

Os processos de RTM (Moldagem por Transferência de Resina) e VARTM (Moldagem por Transferência de Resina Assistido por Vácuo) vêm ganhando bastante destaque por sua capacidade de produzir estruturas resistentes, e permitir a criação de peças com geometrias bastante complexas, este fato tem contribuído para o seu emprego na construção de carenagens, componentes automotivos, peças internas e fuselagens de aviões, pois ambas exigem geometrias e acabamento de superfície de alta qualidade para redução de arrasto aerodinâmico.

Tanto as indústrias aeronáuticas quanto a automobilística têm buscado cada vez mais pôr materiais mais leves visando à redução de consumo de combustível, além de minimizar custos de operação, e evitar a emissão de gases agravantes do efeito estufa; ocasionando um aumento da procura, e pesquisas de materiais compósitos e seus meios de manufatura.

Nas ultimas décadas houve uma crescente demanda desta técnica, mais do que foi previsto na década de 70, quando se iniciou as primeiras pesquisas. A procura é devido à relação de baixo custo de produção e o acabamento final; há vários setores industriais que utilizam desta técnica. As propriedades mecânicas encontradas nesses materiais o tornaram um perfeito substituto de alguns processos e algumas das ligas metálicas usadas.

Apesar da crescente demanda destes processos, eles ainda possuem alguns parâmetros os quais não foram totalmente explorados, durante os processos ocorrem vários fenômenos que interferem nas propriedades mecânicas da peça a ser fabricada.

Este trabalho tem como objetivo o aprimoramento da técnica de RTM e VARTM, com foco em projetos aeronáuticos, visando o acabamento final a redução de massa em função das variáveis encontradas no molde e durante o processo, os quais são: material e geometria do molde, viscosidade da resina, tempo de cura, gramatura, espessura e trama das fibras utilizadas.

## **Revisão Bibliográfica**

O uso de materiais compósitos tem difundido com maior facilidade nas ultimas décadas, a ideia por trás dessa técnica é a de combinar as propriedades mecânicas das fibras com as propriedades mecânicas dos polímeros, com o intuito de obter estruturas com propriedades que são a média ponderada das propriedades dos materiais constituintes e mais as propriedades novas que surgem dessa combinação.

Conforme o uso de compósitos foi crescendo, surgiram novas técnicas de manuseio e produção deste novo tipo de material, dentre as técnicas desenvolvidas estão: Cura em autoclave, Vacuum Bagging, Laminação, Prepregs, RTM, VARTM etc.. Estes processos ainda não tem a produtividade daqueles hoje em uso, mas novas técnicas têm contribuído para o aumento do rendimento, viabilizando novas oportunidades e técnicas para este ramo da indústria.

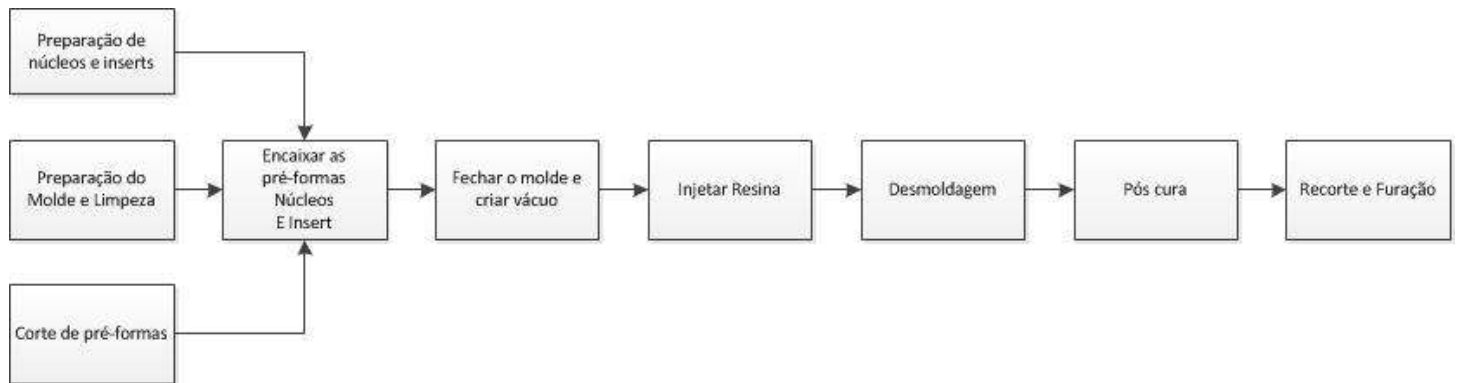
Os Processos de RTM e VARTM são os processos de manufatura de materiais compósitos de maior uso pela indústria moderna, e serão estudado com mais detalhes neste trabalho. Estas duas técnicas consistem na injeção de uma resina polimérica em um molde á vácuo através de uma pré-forma de manta de fibra disposto dentro de um molde fechado.

O seu crescente uso é justificado pela produtividade, baixo custo de produção e baixa emissão de resíduos, e pelo acabamento final do produto. Entretanto este processo apresenta uma complexa inter-relação de variáveis, que devem ser controladas para se obter um processo homogêneo com bom rendimento. A resina que é injetada no molde tem que ter características que garantam as propriedades mecânicas do componente, baixa viscosidade para preencher o molde em meio as fibras e permitir a inserção de carga para adequar as propriedades do componente. Em temperatura ambiente, quando se inicia o processo de cura, a resina começa liberar calor por se tratar de uma reação exotérmica, o aumento da temperatura interfere diretamente na viscosidade, consequentemente interferindo no preenchimento do molde, no tempo do processo e na adesão da resina com a fibra. O tempo de cura da resina e a velocidade de preenchimento devem estar sincronizados para viabilizar um processo com rendimento ideal e ao mesmo tempo evitar um fenômeno conhecido como “Void”, é pequenos vórtices que surgem durante o preenchimento devido a velocidade da resina dentro do molde.

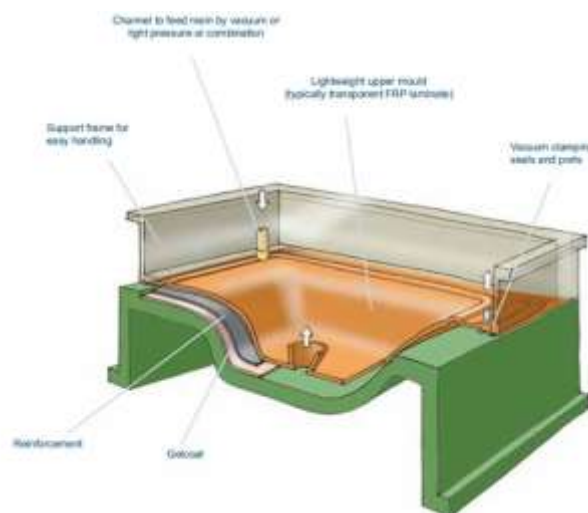
Devido a estes fatores foram desenvolvidos vários softwares de simulação de preenchimento, permitindo ao usuário definir o arranjo ideal de molde e vasos de irrigação de acordo com o seu modelo.

## Materiais e Métodos

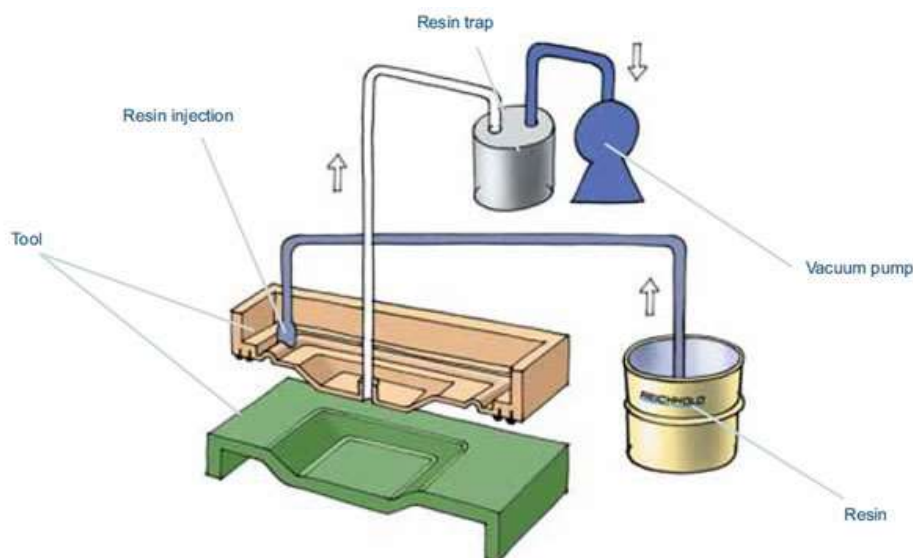
Será realizado um ensaio do processo de RTM, este ensaio será dividido em sete etapas, as etapas são descritas logo abaixo com o auxílio de um fluxograma.



No ensaio serão utilizados dois moldes (superior e inferior), de materiais diferentes para avaliar a melhor condição de trabalho. O molde inferior será usinado através de uma CNC (Controle Numérico Computadorizado) em um material rígido, já o molde superior será moldado em fibra de vidro sobre o molde inferior. Em seguida a manta de fibra será colocada entre o molde inferior e o molde superior, na ordem descrita na figura abaixo.



Após a montagem e com os moldes devidamente posicionado e suas laterais vedadas, é criado o vácuo através de uma bomba de vácuo, ele será responsável pela injeção de resina no molde, concluindo esta etapa a mangueira de resina terá seu fluxo interrompido e vedado para que permaneça o vácuo dentro dos moldes.



O processo de cura irá ocorrer como o molde sobre pressão do vácuo. Após ter alcançado o seu tempo de cura, a peça estará pronta para desmoldagem e, caso necessário, mais uma etapa de cura será feita sobre condições de temperatura e pressão ambiente.

## Parte Prática

### Molde Superior e Inferior:

O molde inferior foi usinado e em uma placa de polipropileno de 414 x 253 x 43 mm, através de uma CNC, foi criado um modelo 3D no computador e através do software SolidCam foi feito a usinagem, porem devido a alta velocidade de avanço a rugosidade do molde não saiu conforme previsto no projeto, exigindo uma etapa a mais de acabamento na peça.

O molde superior foi confeccionado em fibra de vidro, como molde precisa manter a tolerância geométrica foi utilizada a resina epóxi Araldite LY 5052, já que este tipo de resina não possui contração respeitando as tolerâncias do projeto.

O molde superior foi moldado sobre a cera calibrada em 3 mm, esta cera tem função de servir como calço entre os moldes. O desmoldante liquido utilizado foi o QZ13, por se tratar de um composto cerídeo o seu solvente reagiu com a cera calibrada, isso prejudicou bastante na limpeza do molde superior que acabou ficando manchada.



Outro imprevisto encontrado durante a confecção foi o manuseio da manta de fibra de vidro, a manta não conseguia aderir à superfície devido ao desmoldante e a sua geometria, principalmente nas canaletas que possuíam cantos vivos e eram extremamente esbeltas. Devido às estas dificuldades o molde superior ficou impregnado de bolhas comprometendo a fabricação do produto final. Portanto foi feito mais uma etapa para o acabamento superficial da parte interna do molde superior.

### **Ensaaios:**

Antes de realizar os ensaios foi realizado um levantamento de possíveis variáveis do processo, conforme as referencias bibliográficas, dentre as variáveis:

- Tipo da trama da fibra.
- Tipo da resina.
- Viscosidade da resina (Diluição com monômero de estireno).
- Pressão de sucção da resina.
- Espessura entre os moldes.





As variáveis foram fixadas conforme o material a disposição no laboratório:

- Tipo de Fibra: Tecido de fibra de Carbono  $200g/m^2$ , Manta de vidro, polipropileno e vidro moldável com espessura 2 mm, Manta de fibra de vidro.
- Tipo de Resina: Poliéster Centerpol 603 sem proteção UV.  
Viscosidade da resina: 200-300 centipoise com diluição de 5%, com base em: “Viabilidade técnica da utilização de fibra de PET como compósito estrutural”.
- Pressão de Sucção: 67 cmHg, pressão da bomba disponível.
- Espessura: 3mm

Os primeiros ensaios foram feitos apenas variando o numero de camadas de tecidos de fibra de carbono, inicialmente com 5 camadas (espessura final de 1,25 mm ) ate 10 camadas (espessura de 2,5 mm ). Em seguida foram feitos testes com a utilização de mantas de vidros, com os resultados obtidos entre as três mantas disponíveis, foi realizado os últimos testes com mescla dessas mantas, visando à melhor distribuição da resina e preenchimento do molde durante o processo, combinar as propriedades mecânicas das fibras e acabamento do produto final.

## Resultados e discussão

Abaixo Sugue os testes e resultados obtidos e suas descrições:

Fotos dos testes	Descrição
	<p>Teste 1:</p> <p>Volante em fibra de carbono sem mistura de outras fibras, foi utilizado 180g de poliéster com 10% de monômero de estireno, e 5 camadas de fibra.</p> <p>Obs: A resina atravessou em alta velocidade a peça, formando bolhas grandes, devido a baixa viscosidade, houve pontos onde a resina não impregnou na fibra.</p>
	<p>Teste 2:</p> <p>Volante em fibra de carbono sem mistura de outras fibras, foi utilizado 200g de poliéster com 10% de monômero de estireno, e 5 camadas de fibra.</p> <p>Obs: A resina novamente atravessou em alta velocidade a peça, formando bolhas grandes, devido a baixa viscosidade, houve entrada de ar</p>
	<p>Teste 3:</p> <p>Volante em fibra de carbono sem mistura de outras fibras, foi utilizado 230g sem diluição com monômero de estireno, e 7 camadas de fibra.</p> <p>Obs: A resina atravessou em baixa velocidade a peça, dando tempo da resina se infiltrar a fibra, devido a baixa viscosidade, foi detectado aparecimento de microbolhas e excesso de resina em alguns pontos devido a geometria da peça.</p>
	<p>Teste 4:</p> <p>Volante em fibra de carbono sem mistura de outras fibras, foi utilizado 230g sem diluição com monômero de estireno, e 5 camadas de fibra.</p> <p>Obs: Diminuiu os pontos de excesso de resina, porem ainda continuou o aparecimento de bolhas.</p>

	<p>Teste 5:</p> <p>Volante em fibra de carbono sem mistura de outras fibras, foi utilizado 230g sem diluição com monômero de estireno, e 10 camadas de fibra.</p> <p>Obs: Diminuiu os pontos de excesso de resina, porem surgiram pontos onde não ocorreu a impregnação da resina devido ao excesso de camadas.</p>
	<p>Teste 6:</p> <p>Volante em fibra de carbono sem mistura de outras fibras, foi utilizado 230g com diluição de 5% (Baseado em estudo anterior sobre infusão feito no instituto), e 10 camadas de fibra.</p> <p>Obs: Escoamento uniforme da resina, e o problema das bolhas foram evitados com a obstrução da entrada da resina logo após o preenchimento completo do molde.</p>
	<p>Teste 7:</p> <p>Volante Híbrido com mistura de apenas mantas de vidro, postas na seguinte ordem:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Manta de vidro, 2 camadas.</li> <li>2. Manta de vidro no meio, 1 camada.</li> <li>3. Manta de vidro grossa, 1 camada.</li> </ol> <p>Injeção de 230g de poliéster com 5% de diluição.</p> <p>Obs: uso de 73,03 g de fibra ao todo, Aplicação de corante azul diluído com álcool anidro, com objetivo de obter o gradiente de cores para estudo experimental do escoamento, falha na vedação interna.</p>
	<p>Teste 8:</p> <p>Volante Híbrido com mistura de apenas mantas de vidro, postas na seguinte ordem:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Manta de vidro, 3 camadas.</li> <li>2. Manta de vidro no meio, 1 camada.</li> <li>3. Manta de vidro grossa, 1 camada.</li> </ol> <p>Injeção de 270,35 g de poliéster com 5% de diluição.</p> <p>Obs: uso de 78,50 g de fibra ao todo, uso de mantas de vidro com objetivo de estudo de bolhas internas da peça.</p>

	<p>Teste 9:</p> <p>Volante Híbrido com mistura de apenas mantas de vidro, postas na seguinte ordem:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. Manta de vidro, 3 camadas.</li> <li>5. Manta de vidro no meio, 1 camada.</li> <li>6. Manta de vidro grossa, 1 camada.</li> </ol> <p>Injeção de 270g de poliéster com 5% de diluição. Obs: uso de 101,93 g de fibra ao todo, uso de corante com objetivo de verificar bolhas internas encontradas no teste anterior.</p>
	<p>Teste 10:</p> <p>Volante Híbrido com mistura das 3 fibras colocadas na seguinte ordem:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fibra de Carbono, 2 camadas.</li> <li>2. Manta de Vidro, 2 camadas.</li> <li>3. Manta grossa de vidro, 1 camada.</li> <li>4. Laterais reforçada com fibra de carbono, 1 camada</li> <li>5. Meio reforçado com manta de vidro, 1 camada.</li> </ol> <p>Injeção de 270g de poliéster com 5% de diluição. Obs: Falha de vedação da flange, gerando bolhas.</p>

Durante os Ensaio foram encontrados os seguintes obstáculos:

- Problemas de vedação.
- Dificuldade de impregnação da resina a fibra.
- Má distribuição da resina durante o processo.

Técnicas desenvolvidas durante o processo:

- Aprimoramento do acabamento superficial da cera calibrada com a utilização de ferramentas odontológicas, sem manuseio direto com a cera.
- Homogeneização da superfície da cera com passadas leves com o maçarico e enceramento com estopa e a própria cera.
- Uso de “tucho” de silicone dentro de flanges para melhor limpeza.

## Conclusão

O objetivo deste trabalho era o desenvolvimento prático do processo de VARTM, com intuito de ao final desta monografia obter um manual de como realizar este processo para futuras peças com geometrias complexas (volantes, barcos, fuselagens e etc).

Ao longo deste estudo foram detectados vários problemas dentre elas: estanqueidade das câmaras, falta de impregnação em alguns pontos da peça, má distribuição da resina e bolhas internas.



Cada problema detectado foi subdividido em dois grupos: peça e molde, desta forma facilitando o estudo individual ate encontrar a solução mais adequada. Conforme o projeto seguia o primeiro protótipo recebia novas modificações, dentre elas a troca do material das tiras de vedação devido a ataques químicos da resina, já que a tira em contato com a resina perdia sua propriedade de contração rápida, a repetição do processo agravava o problema de vedação.

Durante um período do projeto tivemos de trocar a vedação automotiva por outra do mesmo material, pois era o que nos foi disponibilizado, essas modificações custaram um tempo razoável por isso procuramos outro material que apresentasse maior inercia química para vedar as placas.

Quanto aos problemas referentes à peça: má distribuição do fluxo de resina, impregnação, preenchimento e bolhas internas, foram tomadas medidas quanto ao processo. Quanto ao preenchimento, foram acrescentadas mais camadas de fibra, quanto à distribuição, foram realizados testes com diferentes tipos de tramas de fibra, visando encontrar uma homogeneidade na distribuição do fluxo interno da resina, e ao mesmo tempo o total preenchimento. Esses testes revelaram que as tramas de fibra de carbono quando prensadas dificultam ainda mais o fluxo através delas, enquanto que a gramatura da fibra de vidro possui uma ordem aleatória das suas fibras, isso permite que a resina encontre um caminho pra onde possa fluir.

Tendo em vista isso os volantes híbridos foram a solução para o problema do escoamento não uniforme, já que a trama da fibra de vidro tem melhor infiltração permitindo maior impregnação do restante das fibras que compõem o molde. Apesar dessas mudanças em relação à composição das fibras, os buracos internos ainda eram detectados nos modelos, sendo assim foi feita nesse caso uma modificação no ponto de injeção, foi criado uma obstrução pra gerar perda de carga de tal forma que diminuísse a velocidade da resina.

Um segundo protótipo foi desenvolvido a partir dos problemas verificados no protótipo inicial, foi modificado o processo de manufatura dos moldes superior e inferior, visando à precisão geométrica acima da menor contração da resina. Os negativos dos moldes superior e inferior foram usinados na prototipagem em RenShape 440 e sobre eles foi passada uma grossa camada de Gel Coat, e por cima foi laminado com manta de fibra de vidro e resina poliéster.



A vedação do novo molde contou com tubos de silicones, já que estes não reagem com a resina, além disso, foram coladas com uma cola de silicone no molde inferior tornando-o mais eficiente. Como já foi dito a vedação foi um grande obstáculo neste processo, portanto o novo protótipo conta com essas melhorias na vedação interna e fechos de pressão o qual comprime o molde superior no molde inferior evitando o uso de sargentos e empenamento do molde.

A geometria deste protótipo também foi revolucionada, os pulmões foram embutidos no modelo, isto possibilita uma futura automatização através de servo-válvulas, de tal forma que a entrada poder ser operada através de um micro controlador, as laterais possuem ampla funcionalidade de vedação como futuramente serviriam de proteção para sensores de monitoramento interno.

O projeto de automatização poderia ser feito da seguinte maneira, a instalação de sensores de luminosidade, eles seriam responsáveis pela verificação de preenchimento, de um lado da maquina haveria leds de iluminação e do outro os sensores, conforme a resina passa entre as placas a intensidade luminosa se altera, esses serviriam de dados de entrada pra um sistema PID modelando a abertura da válvula para o controle da velocidade de entrada.

### Cronograma

Atividade	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov
<b>Pesquisa Bibliografica</b>	X								
<b>Preparação do molde</b>		X							
<b>Ensaio</b>		X	X	X	X				
<b>Reparos e analise resultados</b>						X	X	X	
<b>Desenvolvimento do novo prototipo</b>								X	X
<b>Relatório Final</b>									X

### Referências

Palardy, G., Hubert, P., Haider, M., Lessard L. (2008), Optimization of RTM processing parameters for Class A surface finish, *Composites: Part B* 39, 1280–1286.

Shi, F., Dong, X., (2011) 3D numerical simulation of filling and curing processes in non-isothermal RTM process cycle, *Finite Elements in Analysis and Design* 47, 764–770.

Ruiz, E., Trochu, F., (2005) Numerical analysis of cure temperature and internal stresses in thin and thick RTM parts, *Composites: Part A* 36, 806–826.

Abbassi, A., Shahnazari, (2004) M.R., Numerical modeling of mold filling and curing in non-isothermal RTM process, *Applied Thermal Engineering* 24, 2453–2465.

Botelho, E. C., Silva, R.A., Pardini, L.C., Rezende, M.C., (2006) A Review on the Development and Properties of Continuous Fiber/epoxy/aluminum Hybrid Composites for Aircraft Structures, *Materials Research, Vol. 9, No. 3*, 247-256.