

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

LEONARDO MELO BURIGO

PROJETO CONCEITUAL DE MOLDE *RESIN TRANSFER MOLDING*
LIGHT EM ESCALA LABORATORIAL

Joinville, 2015

LEONARDO MELO BURIGO

PROJETO CONCEITUAL DE MOLDE *RESIN TRANSFER MOLDING*
LIGHT EM ESCALA LABORATORIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville.

Orientador(a): Dr. Gabriel Benedet Dutra

Joinville, 2015

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Ivana Melo Burigo, meu exemplo de pessoa, pelo amor, conselhos, incentivo e confiança em todos os momentos de minha vida.

A meu pai João Batista Burigo, meu melhor amigo, pelo amor, motivação e carinho em todos os anos de minha vida.

A minha família pela ajuda e apoio nos momentos difíceis, em especial aos meus avós, a meu irmão João Paulo Melo Burigo e minha irmã Mirelly Melo Burigo Wissoski.

Ao amor da minha vida, Ianka Engel, pela motivação, compreensão e por todos os momentos maravilhosos.

A meu orientador Dr. Professor Gabriel Benedet Dutra pela confiança, dedicação e companheirismo na elaboração do presente trabalho.

Aos grandes amigos que fiz nesta trajetória pelos momentos mais marcantes e felizes da minha vida.

À Universidade Federal de Santa Catarina e todo seu corpo docente e administrativo, por me proporcionar aprendizado de alta qualidade.

A Deus pela oportunidade de viver esta vida e permitir conhecer pessoas tão marcantes que sempre estarão presentes em minhas memórias.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento do projeto conceitual de um molde *Resin Transfer Molding Light* em escala laboratorial. O processo consiste em moldagem por transferência de resina assistida por vácuo a uma pressão de até 0,9 bar. Para atingir o objetivo do projeto foram empregadas ferramentas para auxílio nas etapas de projeto informacional e conceitual. Utilizando a ferramenta de *brainstorming* determinaram-se as necessidades e os requisitos de projeto. A matriz QFD foi criada para identificar os pontos críticos de projeto. Foram estudadas todas as possíveis maneiras de desenvolver o equipamento e chegou-se a uma que melhor atendia as necessidades dos clientes. Com os requisitos mais críticos identificados, elaborou-se um projeto otimizado. De posse de uma análise destas etapas, os principais componentes do molde foram identificados e realizou-se um levantamento de fornecedores para avaliar os preços dos componentes e identificar os custos do projeto elaborado. O Software *SolidWorks* 2013 foi utilizado para elaboração de um modelo tridimensional do projeto.

Palavras Chave: Projeto, Compósito, Processo, Moldagem, RTM Light, Laminado, Molde.

ABSTRACT

This study presents the development of the conceptual design of a Resin Transfer Molding Light mold in laboratory scale. The process consists in resin transfer molding vacuum assisted at a pressure up to 0.9 bar. To achieve the goal it was necessary to use tools to aid in steps informational and conceptual design. Using the brainstorming tool to determine the needs and project requirements. A QFD matrix was created to determine the design requirements and the main features to achieve these requirements. It studied all possible ways to develop the equipment and reached the one that best met the project needs. With the most critical requirements identified, was drawn up an optimized design. Armed with an analysis of these stages, the main components of mold have been identified and carried out a survey of suppliers to evaluate the prices of components and identify the elaborate project costs. SolidWorks 2013 software was used for the preparation of a three-dimensional model of the project.

Keywords: Design, Composite, Process, Molding, RTM Light, Laminate, Mold.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

“ - Polegada

ASTM - American Society for Testing and Materials

CAD - Computer Aided Design

CCT - Centro de Ciências Tecnológicas

CEM - Centro de Engenharia da Mobilidade

cm - Centímetro

cP - Centipoise

∇P - Gradiente de pressão

ε - Porosidade do meio fibroso antes da moldagem

EPI - Equipamento de Proteção Individual

K - Permeabilidade

kg - Quilograma

LACOMP - Laboratório de Compósitos

ln - Logaritmo neperiano

mm - Milímetro

P_{inj} - Pressão de injeção

PVC - Policloreto de Vinila

QFD - Desdobramento da Função de Qualidade

r_{ff} - Raio em uma região qualquer

r_{inj} - Raio de injeção

RTM - Resin Transfer Moulding

t_{ff} - Tempo requerido para a frente de fluxo avançar uma posição

UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

\underline{u} - Velocidade da frente de fluxo

μ - Viscosidade dinâmica

V_f - Fração volumétrica de fibras

x_{ff} - Posição particular dentro do molde

LISTA DE TABELAS E FIGURAS

Figura 2. 1. Fibras contínuas alinhadas (a) e fibras descontínuas alinhadas (b) e aleatórias (c).....	15
Figura 2. 2. Camadas distribuídas em direções para produção de compósitos laminares.....	17
Figura 2. 3. Processo de fabricação de painéis sanduíche.	18
Figura 2. 4. Esquema do processo de RTM Light.	23
Figura 2. 5. Detalhes típicos de um molde RTM Light.....	24
Figura 2. 6. Sistema RTM do LACOMP/UFRGS.	25
Figura 2. 7. Molde RTM Light construído no Laboratório de Compósitos do Centro de Ciências Tecnológicas da UDESC - Campus Joinville.....	26
Figura 2. 8. Representação do sistema RTM disponível na UNESP.....	26
Figura 3. 1. Etapas e fases do processo de desenvolvimento de produto.	28
Figura 4. 1. Símbolos para avaliar as relações entre as necessidades e os requisitos de projeto.	32
Figura 4. 2. Atributos da matriz de correlação.....	33
Figura 4. 3. Matriz QFD do projeto conceitual do equipamento RTM Light.....	34
Figura 4. 4. Vista superior do molde inferior. Visualização da cavidade do molde, borrachas de vedação e ponto de injeção de resina.	49
Figura 4. 5. Vista em perspectiva do molde inferior posicionado sobre a bancada de sustentação. Possível verificar a cavidade do molde e as borrachas de vedação....	50
Figura 4. 6. Vista em perspectiva do equipamento. Molde superior, molde inferior e bancada de sustentação unida.....	51
Figura A. 1. Vista superior do molde inferior. Possível verificar a dimensão da borracha de vedação externa com 10 mm de largura e 5 mm de espessura. Cavidade do molde com dimensão de 500 x 500 mm e local da posição dos reforços com dimensão de 480 x 480 mm.	57
Figura A. 2. Vista em perspectiva da cavidade do molde. Posição dos reforços com espessura de 2 mm e espessura da borracha interna de 5 mm.....	58

Figura A. 3. Vista em perspectiva do equipamento RTM Light. Molde inferior unido na bancada de sustentação. Montagem do molde superior no molde inferior.	59
Figura A. 4. Vista em perspectiva da cavidade do molde cortada.....	59
Tabela 4. 1. Requisitos de projeto ordenados por peso relativo.....	35
Tabela 4. 2. Requisitos de projeto com seus valores especificados.	40
Tabela 4. 3. Matriz morfológica dos sistemas do molde.....	43
Tabela 4. 4. Definição da melhor alternativa de concepção.....	45
Tabela 4. 5. Preço dos componentes do equipamento RTM Light.....	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. Objetivo Principal	11
1.2. Objetivos Específicos	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1. Materiais Compósitos	12
2.2. Processos de Fabricação	18
2.2.1. Laminação manual (<i>hand lay-up</i>).....	19
2.2.2. Moldagem por aspersão (<i>Spray-up</i>).....	20
2.2.3. Infusão.....	21
2.2.4. RTM.....	21
2.2.5. RTM Light	22
2.3. Equipamentos semelhantes	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4. DESENVOLVIMENTO DE PROJETO.....	30
4.1. Projeto Informacional.....	30
4.1.1. Matriz QFD	32
4.1.2. Especificações de projeto	36
4.2. Projeto Conceitual	41
4.2.1. Sistema de fechamento do molde	41
4.2.2. Sistema de posicionamento da entrada de resina.....	41
4.2.3. Sistema de fluxo de entrada de resina	41
4.2.4. Sistema de posicionamento da aplicação do vácuo	41
4.2.5. Sistema de cavidade.....	42
4.2.6. Sistema de vedação	42
4.2.7. Sistema de material do molde superior e molde inferior.....	42
4.2.8. Geração de alternativas de concepção	42
4.2.9. Escolha da melhor alternativa de concepção	44
4.2.10. Orçamento dos materiais	46
4.2.11. Concepção do Projeto.....	48
5. CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	54
ANEXO A.....	57

1. INTRODUÇÃO

O estudo de materiais na área de engenharia é fundamental para o desenvolvimento da sociedade. Materiais compósitos é um exemplo importante de materiais com grande área de pesquisa e desenvolvimento. Em projetos de componentes, os materiais compósitos apresentam inúmeras vantagens frente à utilização de materiais convencionais. A possibilidade de misturar dois ou mais materiais diferentes permite obter um novo material com propriedades e características desejadas para uma determinada aplicação (CALLISTER, 1999).

Os componentes podem ser produzidos por diversos processos de fabricação. A fabricação de compósitos consiste na impregnação de um reforço fibroso em uma matriz polimérica. Os processos podem ser realizados manualmente ou automatizados e determinados pelo tipo de matriz (polimérica, metálica, cerâmica) e pelo tipo de moldagem, podendo ser realizadas em molde aberto ou molde fechado¹. Os principais processamentos de materiais compósitos utilizados nas indústrias são laminação manual, laminação a vácuo, moldagem por compressão, infusão, RTM (*Resin Transfer Molding*) e RTM Light. A qualidade final e as propriedades do compósito fabricado são influenciadas pelas condições de processamento (LEE et al., 2002 citado por HILLER et al., 2006).

Uma das metodologias que merecem destaque na indústria de compósito é o processo de moldagem por transferência de resina, conhecido como RTM. De acordo com HILLER et al. (2006) esta rota de processamento tem sido utilizada na produção de compósitos poliméricos de médio e alto desempenho. Basicamente, é um processo de impregnação de uma pré-forma fibrosa por uma resina polimérica, normalmente fibra de vidro ou carbono. A moldagem por transferência de resina apresenta muitas vantagens sobre outros processos de fabricação de compósitos, principalmente baixo custo de mão-de-obra e ferramental simples (HILLER et al., 2006).

Um derivado do processo RTM é o RTM Light. A principal diferença é a pressão de injeção de resina, sendo até 6 bar para o RTM convencional, enquanto

¹ Disponível em: <<http://fabricacaodecompositos.blogspot.com.br/>>

que no RTM Light a pressão de até 1 bar é empregada. Esta variação do processo vem ganhando espaço de destaque no processamento de compósitos. Caracterizado pelos produtos de alta performance e flexibilidade da produção, o processamento de compósitos pela moldagem por transferência de resina assistida por vácuo vem sendo empregado na fabricação de estruturas para o setor aeroespacial, automobilístico, náutico, visando principalmente obter ótima relação peso x resistência específica, além do baixo custo de processamento.

Um equipamento semelhante está disponível no Laboratório de Compósitos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LACOMP/UFRGS), auxiliando no estudo para avanços em pesquisas na área de materiais compósitos (SILVA, 2011). Outro equipamento está sendo desenvolvido no laboratório de compósitos do CCT da UDESC.

O estudo de materiais compósitos é de suma importância para o surgimento de novas tecnologias na área de engenharia. A moldagem por transferência de resina assistida por vácuo é um processo de fabricação que necessita de pesquisa. A falta de equipamento semelhante disponível no Centro de Engenharias da Mobilidade da Universidade Federal de Santa Catarina foi o grande incentivo para a realização deste trabalho, tornando o desenvolvimento de tal equipamento indispensável para a formação profissional dos acadêmicos, oferecendo a possibilidade de especialização na área de compósitos de alto desempenho.

Frente a estas vantagens de atuação, a realização deste trabalho visa desenvolver um projeto conceitual de um molde RTM Light em escala laboratorial, a ser instalado no Laboratório de Modelos do Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O Software *SolidWorks* 2013 será utilizado para gerar um modelo do molde. Para realizar uma análise mais detalhada, o projeto do equipamento será dividido em sistemas. Os sistemas são: molde inferior, molde superior, ponto de injeção da resina, ponto de aplicação do vácuo, conexões e mangueiras, bomba de vácuo, reservatório de armazenamento de resina e equipamento para registro do processo de fabricação. Para determinar as características de cada sistema, será realizada uma análise detalhada dos componentes, bem como de equipamentos semelhantes disponíveis.

O desenvolvimento projeto conceitual do equipamento visa auxiliar, em futuro breve, os estudos de materiais compósitos produzidos através do processo de

moldagem por transferência de resina assistida por vácuo. Com o equipamento será possível obter amostras em compósitos fibrados para futuros trabalhos que envolvem caracterização mecânica, magnética e elétrica. Além disso, será possível estudar a influencia dos parâmetros de moldagem em RTM Light na qualidade final do compósito moldado.

1.1. Objetivo Principal

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um projeto conceitual de um molde RTM Light em escala laboratorial, que será instalado no Laboratório de Modelos do Centro de Engenharias da Mobilidade da Universidade Federal de Santa Catarina.

1.2. Objetivos Específicos

- Estudar sobre o processo de RTM Light.
- Estudar sobre metodologia de projeto.
- Aplicar as ferramentas de planejamento de processo e planejamento de produto no desenvolvimento do molde.
- Definir alternativas de concepção de montagem do molde.
- Desenvolver uma concepção do produto no Software *SolidWorks*.
- Validar o projeto com a alternativa de concepção mais viável e adequada para o molde desenvolvido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Materiais Compósitos

O desenvolvimento de novas tecnologias e o avanço das sociedades está conectado com a capacidade dos seres humanos em produzir e manipular materiais para satisfazer as suas necessidades. Através do estudo de materiais é possível analisar suas propriedades para uma determinada aplicação estrutural. As propriedades dos materiais podem ser separadas em seis categorias diferentes: mecânica, elétrica, térmica, magnética, ótica e deteriorativa.

As propriedades mecânicas relacionam deformação com uma força aplicada. Propriedades elétricas referem-se ao estímulo de um campo elétrico. As propriedades térmicas referem-se ao comportamento em relação a condutividade térmica do material, por exemplo. As propriedades magnéticas mostram a resposta do material ao estímulo de um campo magnético. As propriedades óticas são estimuladas por radiação eletromagnética ou a luminosa. As características deteriorativas indicam a reatividade química dos materiais (CALLISTER, 1999a).

Um material depende da maneira como é processado. O processamento interfere diretamente na estrutura do material, influenciando as suas propriedades e conseqüentemente seu desempenho para determinado requerimento de projeto. A seleção correta de um material para uma aplicação requerida depende das condições de serviço que determinarão as propriedades exigidas do material. A deterioração das propriedades do material que ocorrem durante a operação é outro estudo importante no momento da seleção. Outro fator importante na escolha do material está relacionado com o custo do produto.

Os materiais sólidos comumente são agrupados em seis classificações básicas: metais, cerâmicos, polímeros, semicondutores, biomateriais e compósitos (CALLISTER, 1999a).

Os metais são combinações de elementos metálicos, sendo largamente utilizada em aplicações estruturais devido sua alta resistência associada com a capacidade de deformação.

Os cerâmicos são compostos entre os elementos metálicos e não metálicos. São materiais isolantes a passagem de eletricidade e calor, sendo mais resistentes a altas temperaturas e ambientes abrasivos do que os metais e polímeros. Materiais cerâmicos são duros e frágeis (CALLISTER, 1999a).

Os polímeros compreendem os materiais comuns de plástico e borracha. São materiais de baixa densidade e podem ser muito flexíveis.

Os semicondutores possuem propriedades elétricas intermediárias aquelas presentes em condutores elétricos e isolantes. São extensamente utilizados na indústria de produtos eletrônicos e de computadores.

Os biomateriais são utilizados em componentes introduzidos no corpo humano para substituição de partes do corpo danificadas.

Materiais compósitos caracterizam-se pela combinação das melhores características de cada um dos materiais que o compõe (SILVA, 2010). Diversas aplicações requerem materiais com propriedades específicas que não estão presentes em apenas um material. Para atingir tais necessidades, o estudo de materiais compósitos se torna um grande aliado do desenvolvimento de novas tecnologias (CALLISTER, 1999b).

Por intermédio do estudo do comportamento dos compósitos em relação as características, as quantidades relativas, a geometria e distribuição é possível obter materiais que possuam combinações de propriedades melhores do que aquelas encontradas em materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos.

No projeto de materiais compósitos, se busca combinar vários metais, cerâmicas e polímeros para produzir novos materiais com características extraordinárias. A maioria dos compósitos produzidos busca melhorar combinações de características mecânicas, como rigidez, tenacidade e resistência nas condições ambientes e a altas temperaturas. Muitos materiais compósitos são compostos por apenas duas fases, uma chamada de matriz, sendo contínua, e outra chamada fase dispersa, sendo envolvida pela matriz (ABMACO, 2009). As propriedades do compósito são determinadas pelas propriedades das fases que o formam.

As matrizes poliméricas podem ser termorrígidas ou termoplásticas. As resinas termorrígidas mais utilizadas são as resina poliéster, resinas epóxi e as resinas fenólicas. As resinas epóxi apresentam alto desempenho, apresentando alta viscosidade à temperatura ambiente (NETO, 2006). Modificadores de resinas podem

ser acrescentados para facilitar o processamento e alterar propriedades. De acordo com Neto (2006), matrizes termoplásticas são empregadas como uma alternativa de aplicação em estruturas, devido à maior tenacidade à fratura, resistência ao impacto e danos em relação aos termorrígidos.

Os materiais compósitos podem ser classificados em: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais (CALLISTER, 1999b).

Em materiais compósitos reforçados com partículas, as dimensões das partículas são praticamente iguais em todas as direções. Os compósitos reforçados com partículas podem ser subdivididos em compósitos com partículas grandes e os compósitos reforçados por dispersão. A distinção entre as subdivisões está baseada no mecanismo do reforço ou aumento da resistência. Nos compósitos reforçados com partículas grandes, as interações partícula-matriz não podem ser tratadas no nível atômico ou molecular. Na maioria desses compósitos, a fase particulada é mais dura e rígida do que a matriz. As partículas restringem o movimento da matriz, e a matriz transfere parte da tensão aplicada às partículas. A melhoria do comportamento mecânico depende de uma ligação forte na interface matriz-partícula. Para que ocorra um reforço eficaz, as partículas devem ser pequenas e estar distribuídas por igual ao longo do comprimento da matriz (CALLISTER, 1999b).

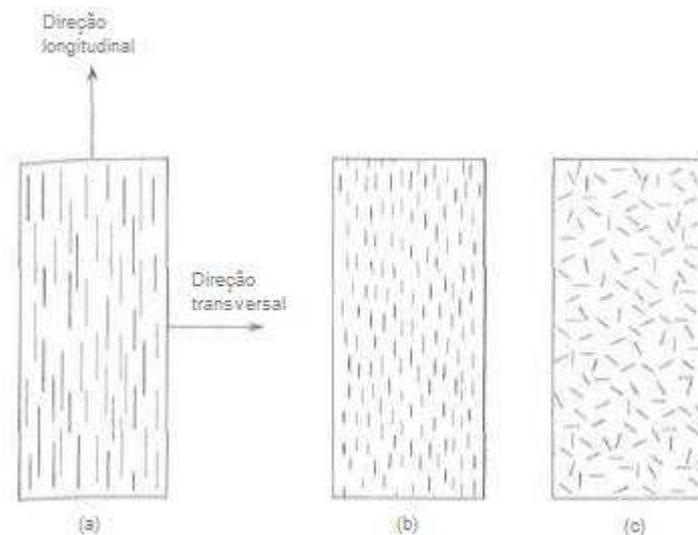
Em compósitos reforçados por dispersão as partículas são muito menores. Neste caso, a matriz suporta a maior parte da carga que é aplicada, enquanto que as pequenas partículas são responsáveis por evitar ou dificultar o movimento de discordâncias. Associado a isto, o limite de escoamento e o limite de resistência à tração são melhorados, restringindo a deformação plástica do compósito.

Os compósitos reforçados com fibras apresentam excelentes relações resistência x peso e módulo de elasticidade x peso (CALLISTER, 1999b). As características mecânicas do compósito reforçado com fibras não dependem somente das propriedades da fibra. De acordo com Callister (1999), o comprimento da fibra influencia as propriedades finais do compósito. Para existir um aumento da resistência do material compósito as fibras devem ser contínuas, ou seja, possuir comprimento acima de 15 vezes o comprimento crítico de fibra.

A orientação e a concentração das fibras têm grande influência na resistência e outras propriedades dos compósitos. As fibras podem ser orientadas em uma

única direção, paralelamente ao eixo longitudinal das fibras, ou estar alinhadas aleatoriamente. Estas três orientações podem ser visualizadas na figura 2.1.

Figura 2. 1. Fibras contínuas alinhadas (a) e fibras descontínuas alinhadas (b) e aleatórias (c).



Fonte: Callister (1999)

Segundo Callister (1999), as melhores propriedades são atingidas quando a distribuição das fibras é uniforme. O comportamento mecânico do compósito depende da direção na qual o esforço é aplicado, como pode ser observado na figura 2.1.

As fibras descontínuas e alinhadas permitem produzir compósitos com módulo de elasticidade muito próximo dos compósitos com fibras contínuas alinhadas, tornando seu uso muito frequente. As principais fibras usadas são fibras de vidro, de carbono e a aramida, e geralmente se apresentam na forma de mantas e tecidos (MARINUCCI, 2011). Para o caso de fibras descontínuas e orientadas aleatoriamente o comportamento mecânico do compósito é isotrópico, diferente do que ocorre em compósitos com fibras alinhadas.

Os compósitos consistem na união de uma fase matriz com uma fase fibra. A fase matriz pode ser realizada a partir de metais, polímeros ou cerâmicas. Em geral, busca-se compósitos com ductilidade, portanto, os metais e os polímeros são os mais utilizados como matriz. A escolha da matriz empregada depende da aplicação final do compósito (ABMACO, 2009). A matriz suporta uma pequena carga aplicada,

tendo como função ligar as fibras umas às outras e proteger as fibras individuais contra danos superficiais, transferindo cargas mecânicas para o reforço. (CALLISTER, 1999b).

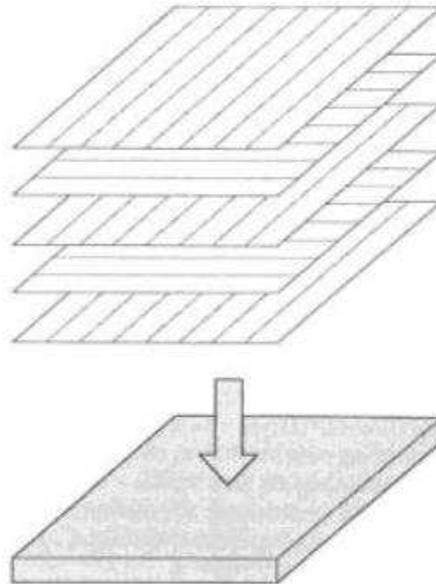
Devido sua facilidade de fabricação, suas propriedades a temperatura ambiente e seu custo, os compósitos com matriz de polímero são os mais utilizados (NETO, 2006) e apresentam inúmeras aplicações aeroespaciais, náuticas, automotivas, e outras áreas (MARINUCCI, 2011).

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro são produzidos em maiores quantidades. Em geral possuem levada resistência, não são muito rígidos, o que limita sua aplicação em estruturas. Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono apresentam alto desempenho e muito usado em compósitos avançados. Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de aramida apresentam alta resistência e excelente relação resistência x peso.

Outra classificação para materiais compósitos são os compósitos estruturais. Em compósitos estruturais, de 70% a 90% das cargas mecânicas são absorvidas pelos reforços (ABMACO, 2009). As propriedades dependem tanto das propriedades dos materiais constituintes quanto da geometria do elemento estrutural. Dois exemplos típicos são os compósitos laminares e os painéis em sanduíche (CALLISTER, 1999b).

Os compósitos laminares são formados por camadas que possuem uma direção preferencial de alta resistência, sendo empilhadas umas às outras. A figura 2.2 mostra esquematicamente o processo de produção de compósitos laminares. A resistência de um compósito laminar é distribuída nas direções de cada camada.

Figura 2. 2. Camadas distribuídas em direções para produção de compósitos laminares.

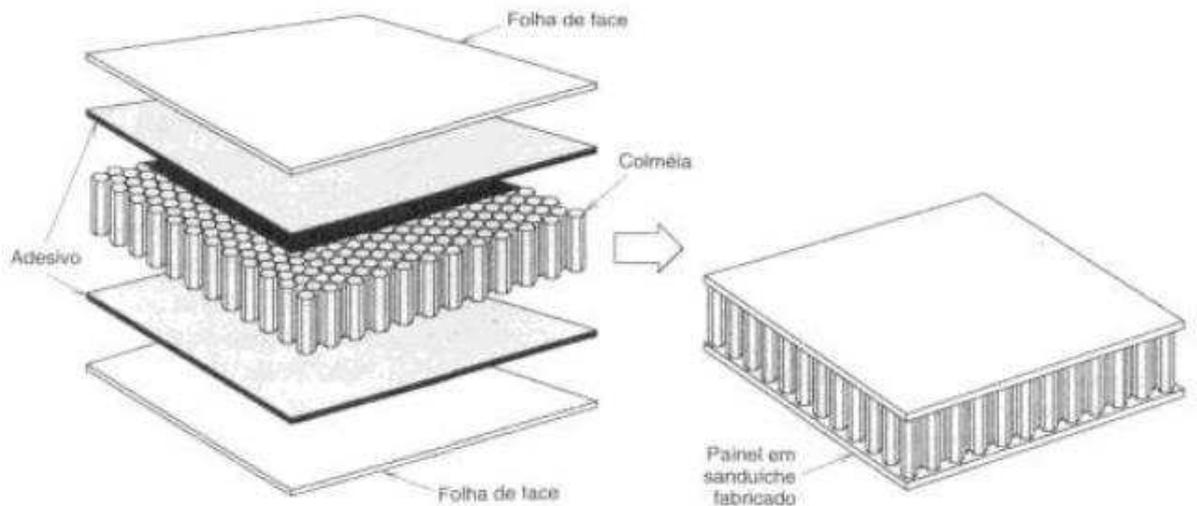


Fonte: Callister (1999)

Os painéis em sanduíche são formados por duas camadas externas com alta resistência, separadas por uma camada de material com menor densidade e menor resistência. A figura 2.3, a seguir, mostra esquematicamente o processo. Os recheios resistem a deformações perpendiculares ao plano das camadas externas e fornecem rigidez contra o cisalhamento (CALLISTER, 1999b).

As aplicações estão presentes em vários segmentos, tanto na indústria aeronáutica, quanto na produção de pequenos e grandes barcos, onde são utilizados na fabricação de cascos, convés e longarinas. (MARINUCCI, 2011).

Figura 2. 3. Processo de fabricação de painéis sanduíche.



Fonte: Callister (1999)

2.2. Processos de Fabricação

A qualidade de um produto empregando-se material compósito é altamente influenciada pelo processo de fabricação. A escolha adequada da técnica utilizada na fabricação de um componente estrutural utilizando materiais compósitos tem grande influencia nas propriedades mecânicas associadas aos reforços e a matriz polimérica.

De acordo com Marinucci (2011), deve-se evitar a dispersão de parâmetros de processo, como por exemplo, frações volumétricas de fibra e matriz e orientação correta do reforço. Através de um processo adequado, mão-de-obra qualificada, fornecedores confiáveis e seguindo especificações e normas, os compósitos fabricados terão capacidade para aplicações estruturais que requerem confiabilidade.

Neto e Pardini (2006) dizem que o processo adequado é determinado pelo tipo de matéria-prima, tipo de reforço e matriz, e pela geometria da peça a ser obtida. Os processos podem ser manuais ou automatizados, realizados em molde aberto ou fechado, influenciando a qualidade do acabamento da superfície do

compósito. Os processos de fabricação correspondem a 50 - 60% do custo total de um compósito.

A fibra e a matriz podem ser combinadas através do sistema pré-impregnado ou através do sistema de impregnação na fabricação (MARINUCCI, 2011).

No sistema pré-impregnado a matriz é impregnada com a fibra através de técnicas que permitem manipular o material após um período após a sua fabricação, exigindo que a cura da matriz deve ser retardada. Esse método permite um controle das frações volumétricas, tempo de gelatinização e uniformidade da espessura do laminado. Contudo, exige uma infraestrutura para fabricação das peças, o custo de material, ferramental e insumos é alto, e necessita um local limpo.

O sistema de impregnação na fabricação consiste na combinação da fibra e matriz no momento de fabricação. O custo do processo é menor, porém exige cuidados na distribuição das fibras ao longo da peça. Deve-se analisar a viscosidade, tempo de gelatinização e a temperatura ambiente no momento de moldagem (MARINUCCI, 2011).

Para a realização do processo corretamente, deve-se aplicar agentes desmoldantes para evitar a aderência do compósito ao molde. A aplicação de *gelcoat* também é realizada para proteger a superfície contra intempéries, raio ultravioleta e ação da água, melhorar a estética, e servir como base para aplicação de tinta em superfícies que requerem pintura. A aplicação é realizada sobre a superfície do molde após a aplicação do agente desmoldante.

2.2.1. Laminação manual (*hand lay-up*)

A laminação manual é a técnica mais simples de se obter produtos moldados com resinas e fibras de reforço não envolvendo investimentos em equipamentos de processo para manufatura (NETO, 2006). O processo de laminação manual é largamente utilizado na produção de protótipos, gabaritos de controle, modelos e moldes.

Contudo, uma limitação do processo se dá a respeito da quantidade de peças a serem produzidas, juntamente com o número de moldes necessários a atingi-la.

Neto e Pardini (2006) descrevem o processo em etapas. Primeiramente ocorre tratamento da superfície do molde pela aplicação de um produto

desmoldante. Posteriormente coloca-se a camada de reforço e a cada camada sobreposta é efetuada a impregnação com a resina pré-formulada com agente endurecedor adequado. A espessura do produto moldado depende do número de camadas sobrepostas. De acordo com Neto e Pardini (2006), os compósitos originados pelo processo de *hand lay-up* não apresentam compromisso estrutural. Nesses compósitos, fracções volumétricas de vazios de cerca de 15% são observados.

As peças obtidas pela laminação manual apresentam uma face lisa e de excelente acabamento superficial e outra face com acabamento rugoso.

Para a realização do processo algumas ferramentas são necessárias, como exemplos, compressor e linhas de ar comprimido, revólver de pintura de *geocoat*, tesoura para corte de manta e tecidos, picador de *roving* pneumático, pincéis de cerdas duras e trinchas para aplicação da resina e auxílio na compactação e remoção de bolhas de ar, roletes para compactação das mantas e tecidos e remoção de bolhas de ar, lixadeiras para acabamento. Equipamentos de proteção individual, EPI's, são obrigatórios, bem como exaustão na área de laminação (ABMACO, 2009).

2.2.2. Moldagem por aspersão (*Spray-up*)

Uma versão mecanizada da laminação *hand lay-up* é o *spray-up*, possibilitando aumento na produção (MARINUCCI, 2011). Esse processo transfere simultaneamente para a superfície do molde a resina pré-catalisada e as fibras de reforço picado através de um picador pneumático de *roving* acoplado diretamente no revolver.

Spray-up é um processo muito econômico para a produção de peças de pequenas e grandes dimensões. Utiliza ferramentas e moldes de baixo custo e é adequado para baixos e médios volumes de produção (ABMACO, 2009).

De acordo com Marinucci (2011), esse processo requer habilidade do operador para manter uniformidade na espessura do produto moldado. Assim como o *hand lay-up*, o processo de *spray-up* requer funcionários auxiliares para fazer a roletagem.

2.2.3. Infusão

O processo de infusão é uma técnica que utiliza apenas um molde, que dará forma geométrica à peça, e uma bolsa de vácuo que fechará o laminado.

O processo na sua concepção é simples e dispensa a necessidade de mão-de-obra especializada, necessitando de um arranjo cuidadoso na montagem da bolsa de vácuo.

A infusão exige a preparação do molde, com limpeza, aplicação do *gelcoat* e do desmoldante no molde. Posterior a esta etapa, os núcleos, mantas e tecidos são posicionados na quantidade necessária para obter a espessura final desejada para a estrutura. Sobre o reforço é aplicado um filme plástico que deve ser devidamente selado por um adesivo que envolve toda a parte periférica do molde (MARINUCCI, 2011).

A aplicação da bomba de vácuo é feita sobre a estrutura montada seca, e o ar que eventualmente esteja aprisionado no reforço é retirado e ocorre simultaneamente uma compactação do reforço contra o molde. Finalmente a impregnação da manta é feita pela matriz que é succionada pelo vácuo criado sob o molde (ABMACO, 2008).

O ponto de aplicação de vácuo e os pontos de injeção no molde devem ser estudados e posicionados em locais que permitam total impregnação do reforço pela matriz. Os componentes fabricados por infusão têm boa qualidade, boas propriedades mecânicas e baixo volume de vazios. Possibilitam economia de resina e reduzem quase que totalmente a emissão de produtos orgânicos voláteis no ambiente de trabalho (MARINUCCI, 2011).

2.2.4. RTM

O processo de moldagem por transferência de resina, conhecido como RTM, é um processo de deposição dos compósitos em que uma resina é injetada sob pressão através de um reforço seco. O espaço delimitado para colocação do reforço é limitado por moldes macho/fêmea (ABMACO, 2008).

No processo coloca-se o reforço seco em um dos moldes e, posteriormente, fecha-se os moldes e a resina é injetada com pressão que pode chegar a 6 bar. O

RTM é um processo recomendado para produção de componentes de pequeno e médio porte, e que necessitam de acabamento liso em ambas as faces (MARINUCCI, 2011).

Por se tratar de um processo fechado, as condições de trabalho são melhoradas, não havendo contato direto dos laminadores com resina e estireno, tornando o ambiente mais limpo e seguro ao trabalho.

2.2.5. RTM Light

Uma adaptação do processo de RTM é o RTM Light. O processo nada mais é do que uma moldagem por transferência de resina assistida por vácuo. Para um mesmo projeto, o investimento em um processo RTM Light é cerca de 10% do necessário para um processo RTM (ABMACO, 2009).

No RTM Light costuma-se aplicar 0,9 bar de pressão no fechamento a vácuo do molde e contramolde. Essa característica do processo não exige responsabilidade estrutural do molde macho/fêmea, permitindo a construção de moldes muito leve (ABMACO, 2009).

O molde e contramolde são construídos com dois canais periféricos, sendo um mais externo para fechamento do molde e outro mais interno para sucção da matriz polimérica para impregnar o reforço (MARINUCCI, 2011).

Para injetar a resina qualquer máquina de baixa pressão à base de ar comprimido é suficiente. E uma das principais vantagens do RTM Light é o fato de o vácuo atuar como facilitador do fluxo da resina, permitindo valores baixos de injeção e maior velocidade na molhabilidade dos materiais (ABMACO, 2009).

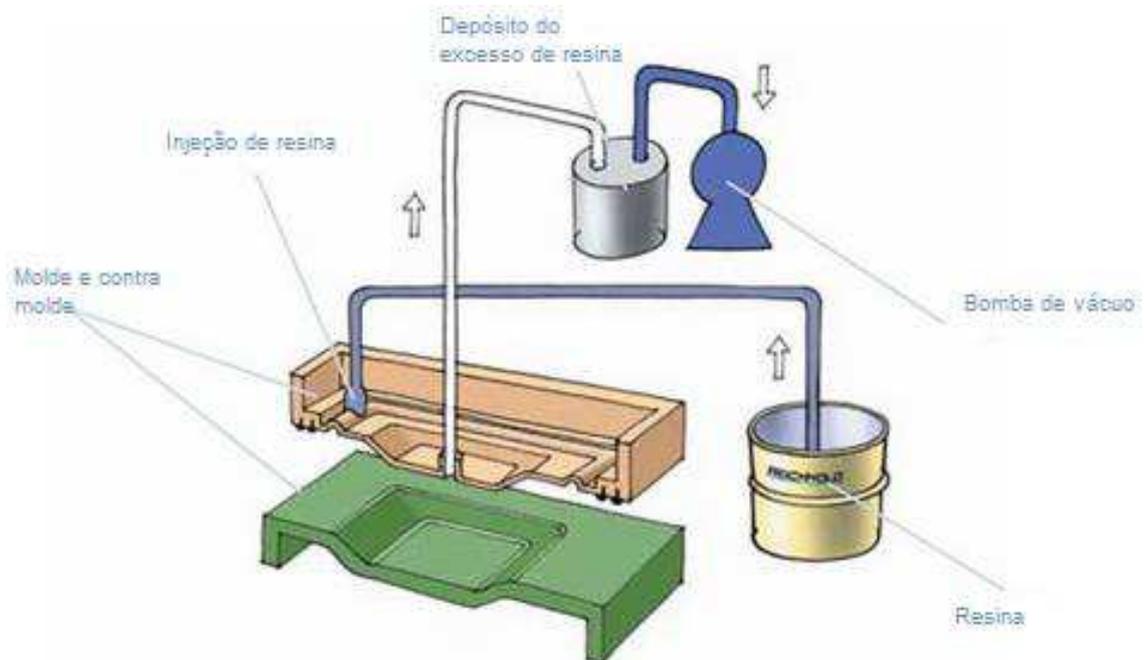
De acordo com Marinucci (2011), as vantagens do processo permitem reduzir custo, melhorar a qualidade do produto fabricado e aumentar a produtividade. Além disso, o consumo de matérias primas pode ser reduzido, qualidade superficial em ambas as faces é obtido, a presença de poros é quase eliminada, uniformidade de espessura é garantida e apresenta bom controle dimensional.

A figura 2.4 mostra o esquema do processo RTM Light. É possível verificar o molde e o contramolde, o pote armazenador de resina, a bomba de vácuo e o ponto de injeção de resina. O processo consiste em colocar o reforço fibroso seco na cavidade do molde. O molde então é fechado e através do vácuo a resina é injetada

na cavidade. Para que ocorra total preenchimento do molde, canal de distribuição é instalado na região periférica do laminado.

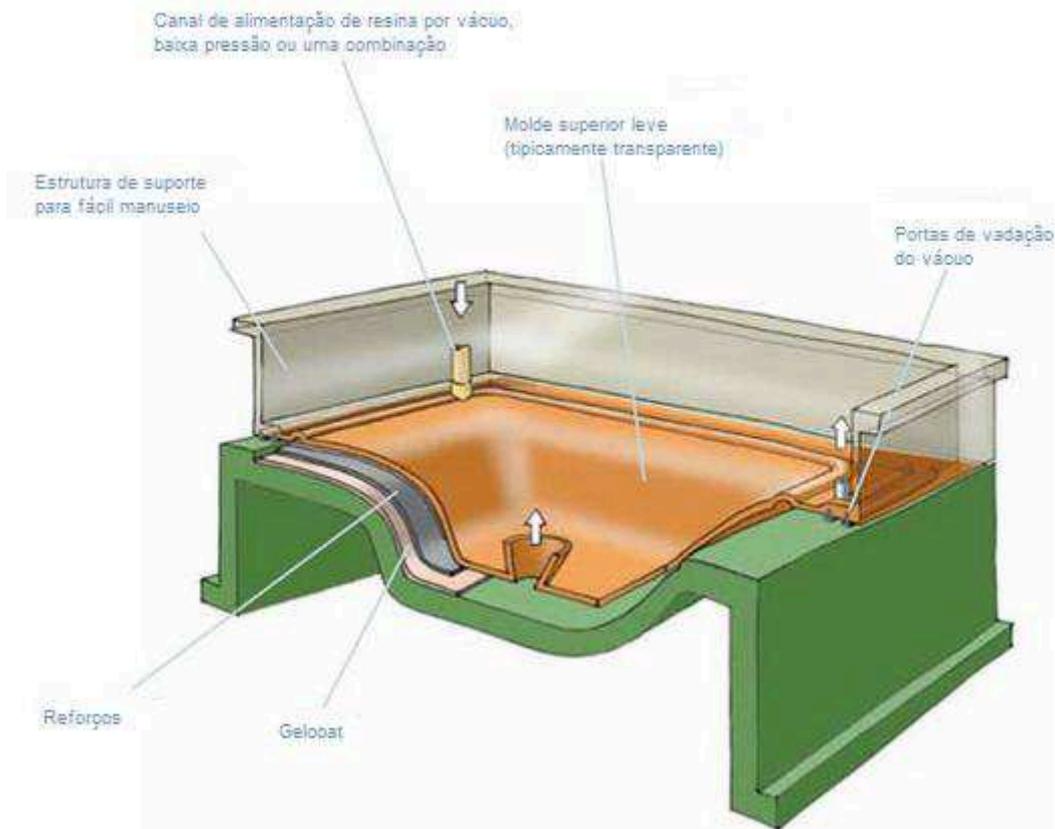
A figura 2.5 apresenta os detalhes de um molde RTM Light. Na cavidade do molde é aplicado um agente desmoldante e uma camada de *gelcoat*. Sobre o *gelcoat* são posicionados os reforços. A injeção de resina ocorre em um ponto da peça e a aplicação do vácuo é localizada na região central da cavidade do molde. Ainda estão presentes vedações para garantir o vácuo total do processo.

Figura 2. 4. Esquema do processo de RTM Light.



Fonte: HOJE (2015).

Figura 2. 5. Detalhes típicos de um molde RTM Light.



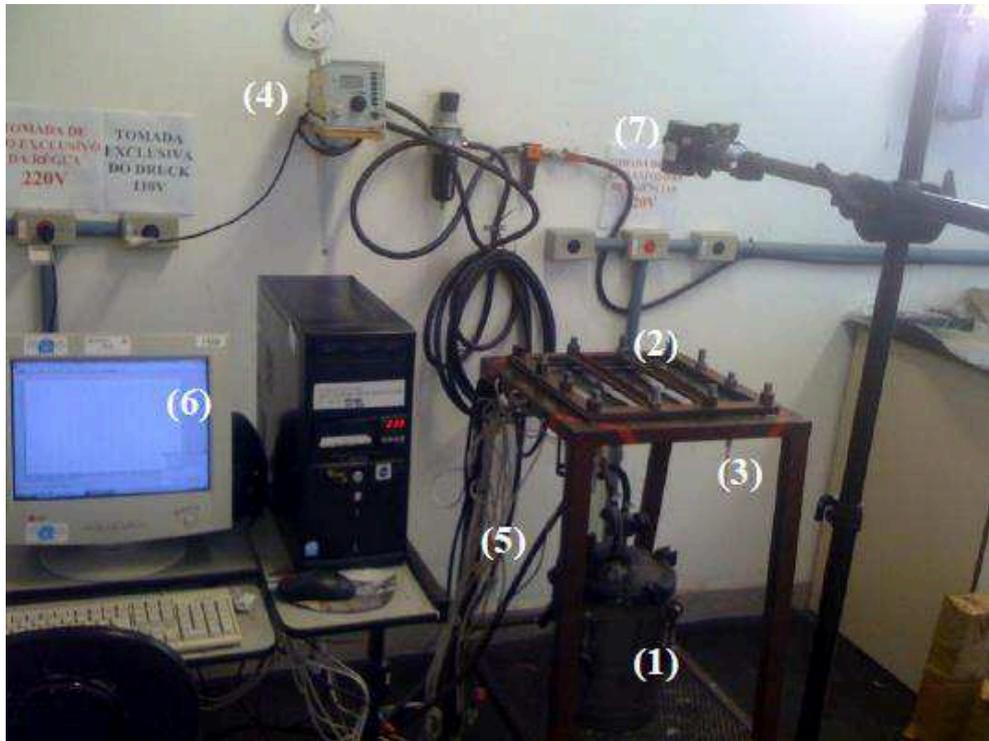
Fonte: HOJE (2015).

2.3. Equipamentos semelhantes

O estudo do processo de RTM Light é algo recente e vem sendo desbravado em todos os setores da engenharia. Alguns equipamentos semelhantes ao do projeto em questão estão disponíveis para que os estudos sejam realizados.

A universidade Federal do Rio Grande do Sul tem um equipamento semelhante disponível no Laboratório de Compósitos (LACOMP/UFRGS). A figura abaixo mostra o equipamento instalado onde (1) Vaso de pressão, (2) Molde superior em vidro reforçado, (3) Molde inferior em aço, (4) Controlador de pressão, (5) Transdutores de pressão, (6) Sistema de aquisição de dados e (7) Câmera fotográfica.

Figura 2. 6. Sistema RTM do LACOMP/UFRGS.



Fonte: SILVA (2011).

Outro equipamento foi desenvolvido e construído na Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC e está disponível no Laboratório de Compósitos do Centro de Ciências Tecnológicas da UDESC Campus Joinville. A figura a seguir mostra o projeto do molde inferior, com as duas vedações identificadas pela cor azul. Sobre o molde inferior está posicionado o molde superior em vidro com o ponto de aplicação do vácuo identificado. O molde e o contra molde estão posicionados sobre uma bancada de sustentação. Na cavidade do molde são posicionados os reforços e a matriz é injetada no ponto de injeção, identificado na figura, através da aplicação do vácuo pela bomba de vácuo. O fechamento do molde se dá pela aplicação de pressão na cavidade entre as duas vedações.

Figura 2. 7. Molde RTM Light construído no Laboratório de Compósitos do Centro de Ciências Tecnológicas da UDESC - Campus Joinville.



Fonte: TAMBOSI (2012).

Um terceiro equipamento está disponível na UNESP, Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, auxiliando nos estudos da influência dos parâmetros de processamento por RTM. A seguir é apresentada uma imagem do equipamento utilizado na UNESP, onde (a) injetora de resina e (b) o molde.

Figura 2. 8. Representação do sistema RTM disponível na UNESP.



Fonte: MONTORO (2014).

O desenvolvimento destes equipamentos auxiliam a realização de trabalhos científicos em materiais compósitos avançados. Um exemplo é a dissertação “Compósitos avançados epóxi/fibra de vidro com elevado teor de nanotubos de carbono” realizada por Laís Vasconcelos da Silva para obtenção do título de mestre em engenharia.

Estes equipamentos disponíveis servirão como base para a realização deste trabalho.

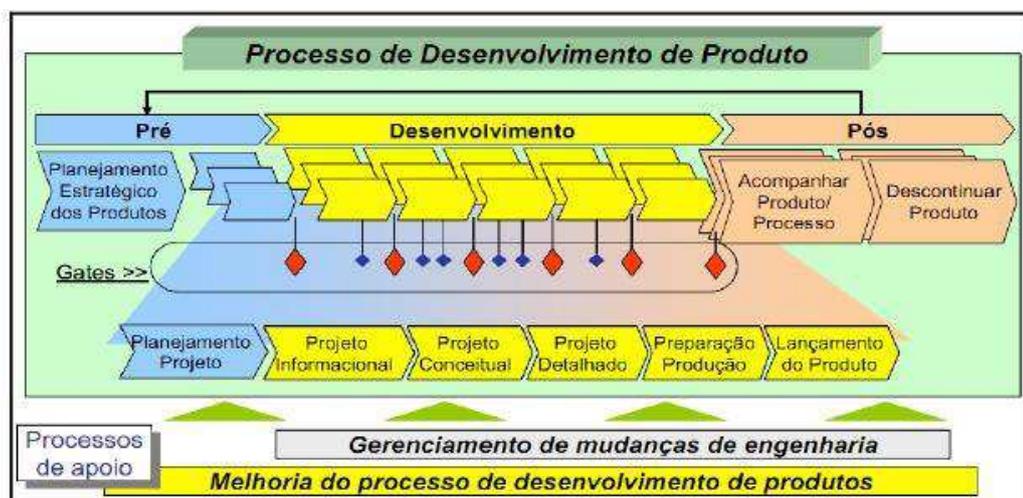
3. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de desenvolvimento de produto é essencial para atingir os resultados esperados ao fim do projeto. O gerenciamento do processo de desenvolvimento de produto não é algo simples devido a existência de diversas visões parciais do projeto que tornam o desenvolvimento difícil.

Para tornar mais simples é necessário desenvolver uma visão única e integrada do processo de desenvolvimento de produto. Uma caracterização do processo de desenvolvimento de produto é a determinação das atividades e fases do processo, os conceitos, métodos e ferramentas que podem ser aplicados.

A figura abaixo apresenta as etapas de um processo de desenvolvimento de produto adequado. Pode-se verificar que existe uma etapa de pré-processamento, que é um planejamento estratégico dos produtos e planejamento de projeto, uma etapa de desenvolvimento, abrangendo as fases de projeto informacional, conceitual, detalhado, preparação da produção e lançamento do produto, e por fim, uma etapa de pós-processamento, que nada mais é do que acompanhar o produto ou processo no mercado até a fase de retirada do produto do mercado.

Figura 3. 1. Etapas e fases do processo de desenvolvimento de produto.



Fonte: AMARAL et al. (2006).

O presente trabalho por se tratar de um projeto conceitual do molde RTM Light abordará a etapa de desenvolvimento de produto. Na etapa de desenvolvimento as fases abordadas serão projeto informacional e o projeto conceitual.

O desenvolvimento do projeto do molde será realizado com auxílio de algumas ferramentas disponíveis. A ferramenta *brainstorming* e a matriz QFD auxiliarão na tomada de decisões das etapas do projeto.

A identificação de alternativas de concepção para o molde será realizado. Posteriormente será realizado um projeto do molde no Software *SolidWorks* 2013. Essa etapa irá auxiliar a análise dos materiais mais adequados e permitirá realizar otimização de detalhes do molde.

Paralelamente a essas análises será realizado um levantamento de fornecedores e preços de materiais para verificar a viabilidade do equipamento e ter uma estimativa de custos.

4. DESENVOLVIMENTO DE PROJETO

Com o planejamento de projeto determinado no capítulo anterior, pode-se avançar para a etapa de desenvolvimento de projeto. A primeira fase abordada será o projeto informacional, seguido do projeto conceitual.

4.1. Projeto Informacional

O projeto informacional é o levantamento de todas as necessidades dos clientes e os requisitos de projeto. O projeto visa desenvolver um projeto conceitual de um molde RTM Light para implantação no Laboratório de Modelos do Centro de Engenharias da Mobilidade da Universidade Federal de Santa Catarina.

Por intermédio de um conhecimento prévio do processo RTM Light e a participação no VI *WorkShop* de Compósitos e Nanocompósitos de Matriz Polimérica, realizado no CCT-UDESC, com a presença de especialistas na área, realizou-se um *brainstorming*, permitindo identificação das seguintes necessidades dos clientes:

- Peça estrutural sem porosidade: a presença de poros torna a peça debilitada e sem função estrutural.
- Preenchimento completo do molde: este requisito permite atingir uma boa qualidade do processo.
- Facilidade de operação: é de extrema importância para o projeto que o equipamento seja de fácil operação.
- Facilidade de limpeza: a limpeza do equipamento deve ser realizada logo após o processamento e a facilidade de limpeza é um requisito importante ao projeto.
- Rápido ciclo de processamento: o tempo para a realização do processo deve ser suficiente para permitir a possibilidade de estudo do processo.
- Cura da resina após o preenchimento completo do molde: A cura deve ocorrer após toda a cavidade do molde ser preenchida por resina.

- Molde leve: o molde projetado deve apresentar um baixo peso, pois não necessita caráter estrutural devido à baixa pressão empregada no processo.
- Baixo custo: deve ser projetado um equipamento viável para a instalação do equipamento.
- Ergonomia: todo projeto de engenharia deve ser pensado no quesito ergonomia, e no presente trabalho esse requisito é essencial.

Com base nas necessidades dos clientes os principais requisitos de projeto foram estabelecidos.

- Área destinada à instalação: o projeto deve possuir dimensões suficientes para o local onde será instalado.
- Permeabilidade do reforço: deve permitir o fluxo de resina, evitando assim regiões sem preenchimento de matriz.
- Viscosidade da matriz: deve ter baixa viscosidade para permitir impregnação do reforço e enchimento da cavidade entre os moldes.
- Diâmetro de injeção de resina: o diâmetro deve ser suficiente para permitir o fluxo de resina antes que ocorra a cura da mesma.
- Espessura do laminado: a espessura deve ser uniforme.
- Peso total do equipamento: o equipamento deve ser o mais leve possível para permitir limpeza e manutenção.
- Tamanho da cavidade do molde: deve apresentar um tamanho adequado para permitir uma visualização correta do processo.
- Pressão de injeção de resina: a pressão deve ser adequada para garantir que haja fluxo de resina para o interior do molde.
- Pressão de fechamento do molde: a pressão deve ser adequada para garantir o vácuo completamente dentro do molde, evitando vazamentos.
- Tempo de preenchimento do molde: o tempo para a realização do processo deve ser suficiente para permitir a possibilidade de estudo do processo.
- Tempo de cura da resina: deve ser suficiente para garantir completamente o processo de injeção.

Algumas restrições são impostas ao projeto do molde. O espaço físico no qual será instalado limita as dimensões molde projetado. A pressão de injeção de resina e aplicação de vácuo é limitada pela bomba de vácuo.

4.1.1. Matriz QFD

O método do QFD, Desdobramento da Função de Qualidade, serve para converter as necessidades qualitativas do projeto em requisitos técnicos quantitativos definindo metas para o projeto.

Para utilizar a matriz QFD de maneira coerente é necessário ter conhecimento das necessidades dos clientes. Estas necessidades foram identificadas no capítulo anterior e serão inseridos na matriz. Nesta etapa deve-se ainda atribuir um peso de importância para cada necessidade, onde os mais importantes recebem uma pontuação maior que as de menor importância. Os valores atribuídos variam de 1 até 10.

Outra informação colocada na matriz QFD são os requisitos de projeto que permitirão obter as necessidades. Esses requisitos foram identificados no capítulo anterior.

A etapa seguinte é o desdobramento da matriz, que permite avaliar as relações entre as necessidades dos clientes e os requisitos de projeto. Estas relações são representadas pelos símbolos apresentados na Figura 4.1, com o respectivo valor para cada símbolo.

Figura 4. 1. Símbolos para avaliar as relações entre as necessidades e os requisitos de projeto.

⊖	Relação Forte	9
○	Existe Relação	3
▲	Relação Fraca	1
	Não Existe Relação	0

Fonte: Do Autor.

A matriz QFD apresenta também uma matriz de correlações, que é o teto da casa da qualidade. Esta matriz cruza os requisitos de projeto entre si, dois a dois, permitindo analisar como eles se relacionam. As relações podem ser de apoio

mútuo, quando o desempenho favorável de um requisito ajuda o desempenho favorável de outro requisito de conflito, quando o desempenho favorável de um requisito prejudica o desempenho favorável de outro requisito.

A Figura 4.2 apresenta os símbolos utilizados nesta análise, com seu respectivo significado.

Figura 4. 2. Atributos da matriz de correlação.

++	Correlação Muito Positiva
+	Correlação Positiva
	Nenhuma Correlação
-	Correlação Negativa
▼	Correlação Muito Negativa

Fonte: Do Autor.

O preenchimento da matriz foi realizado através do conhecimento a respeito do processo de RTM Light e projetos de equipamentos semelhantes.

A Figura 4.3 apresenta a matriz QFD do projeto conceitual do equipamento RTM Light. As necessidades dos clientes estão apresentadas na coluna mais a esquerda com seus respectivos pesos de importância atribuídos. Na parte superior é apresentada a matriz de correlação entre os requisitos do projeto. Abaixo na matriz de correlação estão identificados os requisitos de projeto. No centro está o desdobramento da matriz QFD, relacionando os requisitos com as necessidades. Na região inferior estão dispostos os resultados da utilização da matriz.

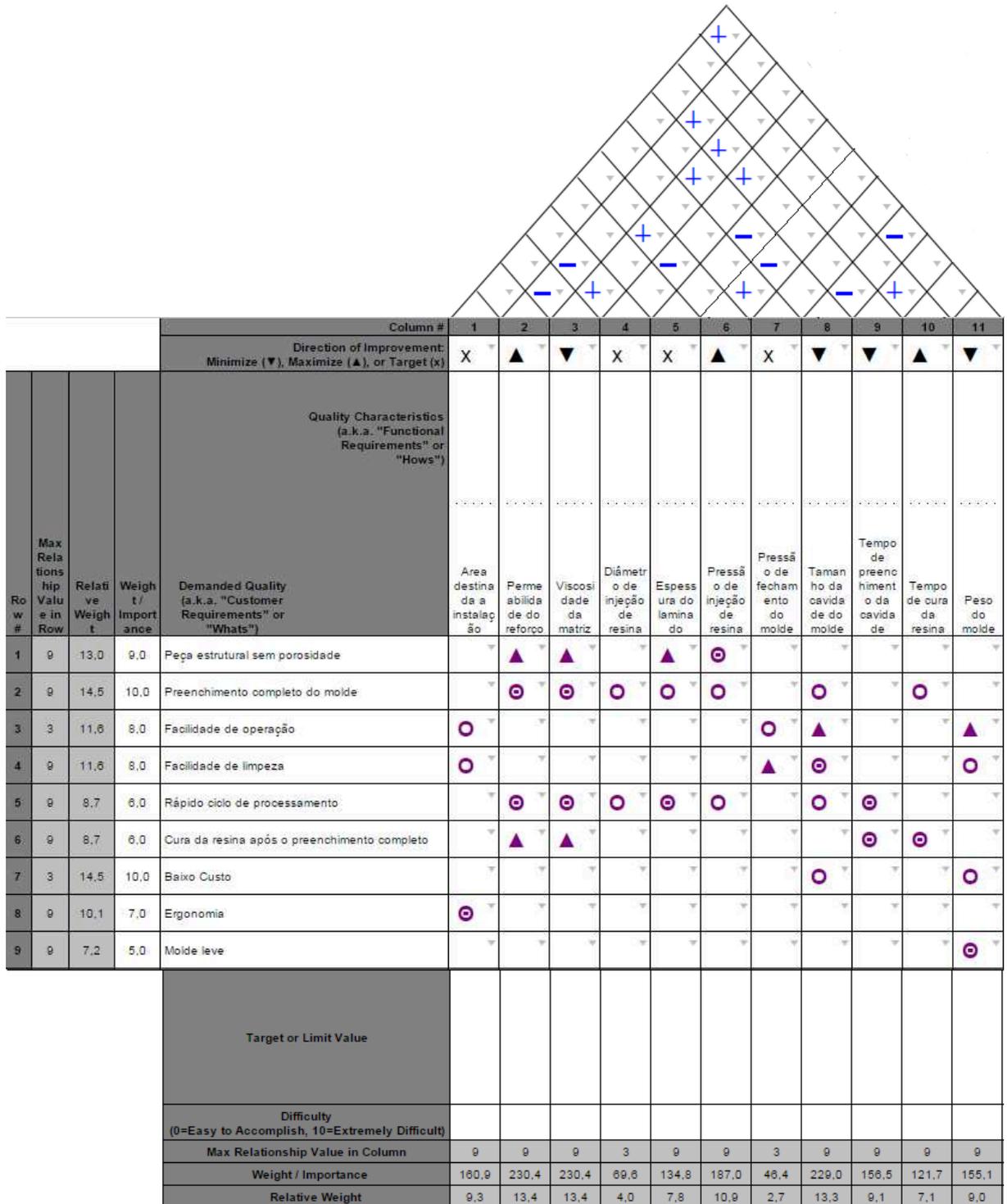
O valor atribuído aos pesos de importância de cada necessidade foi realizado com o auxílio de especialistas. Através do extenso conhecimento destes profissionais se tornou mais trivial a determinação dos pesos de importância.

Figura 4. 3. Matriz QFD do projeto conceitual do equipamento RTM Light.

Title: Matriz QFD Projeto Conceitual Molde RTM Light

Author: Leonardo Melo Burigo

Date: 5 de maio de 2015



Fonte: Do Autor.

Analisando a parte inferior da matriz QFD pode-se verificar o peso relativo que cada requisito de projeto apresenta. Verificando os valores é possível determinar quais requisitos tem uma influência maior na obtenção das necessidades dos clientes.

A permeabilidade do reforço e a viscosidade da matriz aparecem como requisitos mais críticos do projeto, apresentando um peso relativo de 13,4%,. Logo em seguida aparece o tamanho da cavidade do molde, pressão de injeção de resina, área destinada à instalação, tempo de preenchimento da cavidade do molde e peso do molde, com 13,3%, 10,9%, 9,3%, 9,1% e 9,0%, respectivamente. A espessura do lamina apresenta um peso relativo de 7,8%, tempo de cura da resina 7,1%, o diâmetro de injeção de resina 4,0%, e por fim, a pressão de fechamento do molde com 2,7%.

Abaixo está apresentada a Tabela 4.1 com a importância dos requisitos de forma ordenada.

Tabela 4. 1. Requisitos de projeto ordenados por peso relativo.

REQUISITOS DE PROJETO	PESO RELATIVO
Permeabilidade do reforço	13,4%
Viscosidade da matriz	13,4%
Tamanho da cavidade do molde	13,3%
Pressão de injeção de resina	10,9%
Área destinada a instalação	9,3%
Tempo de preenchimento da cavidade	9,1%
Peso do molde	9,0%
Espessura do laminado	7,8%
Tempo de cura da resina	7,1%
Diâmetro de injeção de resina	4,0%
Pressão de fechamento do molde	2,7%

Fonte: Do Autor.

Apenas os requisitos de projeto com peso relativo acima de 10% serão analisados com maior cautela, pois para atingir as necessidades dos clientes, o estudo detalhado se faz necessário.

Com os resultados da matriz QFD pode-se realizar um estudo dos requisitos mais críticos para o projeto conceitual do molde. Faz-se necessário este estudo para analisar a importância que a permeabilidade do reforço, viscosidade da matriz

tamanho da cavidade do molde e pressão de injeção de resina tem no desenvolvimento do projeto e na obtenção das necessidades dos clientes.

4.1.2. Especificações de projeto

Nesta subseção serão estudados os requisitos de projeto que apresentaram peso relativo acima de 10%, pois são mais influentes no processo RTM Light. Esse estudo é indispensável para o desenvolvimento de um projeto adequado e otimizado do molde RTM Light. Contudo, as especificações devem ser realizadas para todos os requisitos.

O espaço disponível no laboratório é limitado. Com isso o aproveitamento de espaço adequado é necessário para atingir necessidades como ergonomia e facilidade de operação do equipamento. A dimensão do molde deve ser determinada tendo referência a área disponível para a instalação.

A uniformidade na espessura facilita a impregnação do reforço e deve ser respeitado para garantir um projeto adequado. Espessura muito baixa, inferior a 2 mm, ocasiona dificuldade de fluxo e falhas na injeção da matriz polimérica (ABMACO, 2008). A espessura máxima será determinada pela quantidade de laminas de reforços colocados na cavidade do molde.

O tempo de preenchimento da cavidade do molde deve ocorrer em um tempo que permita a realização do processo pelos acadêmicos no período de aula. Então um tempo de até uma hora para o preenchimento do molde será considerado no projeto.

O início da cura da resina deve ocorrer após o preenchimento completo da cavidade do molde. Considerando que o tempo de preenchimento da cavidade é de até uma hora, a resina deve curar após este período. Para o projeto, o tempo de cura da resina não deve exceder 1h.

A pressão aplicada no processo RTM Light é baixa, o que possibilita a construção de molde muito leve, não necessitando apresentar caráter estrutural. Para o projeto, deve-se buscar um peso para o molde de no máximo 20 kg.

O diâmetro de injeção de resina deve ser suficiente para permitir que exista fluxo suficiente de resina preenchendo completamente o laminado em tempo adequado antes do processo de cura. Avaliando equipamentos semelhantes, um diâmetro de até 10 mm é adequado para as necessidades avaliadas.

O molde apresentará uma estrutura de no máximo 750 x 750 mm permitindo uma instalação adequada no laboratório, possibilitando realização de manutenção adequada e garantindo a visualização do processo pelos seus espectadores. Além disso, a dimensão deve ser suficiente para permitir a fabricação de um laminado com geometria adequada para a realização de estudos futuros. Buscando-se atingir um produto com caráter ergonômico, a altura do equipamento até o molde inferior foi determinado como sendo 1240 mm.

Os cantos da cavidade do molde serão arredondados com um raio de 30 mm para permitir completo preenchimento do molde e facilitar a desmoldagem. Um ângulo de saída de 1,5 graus será realizado para permitir uma desmoldagem correta do laminado.

O molde superior deve apresentar as mesmas dimensões do molde inferior, 750 x 750 mm.

4.1.2.1. Pressão de injeção de resina

A etapa de injeção de resina no molde ocorre através de diferença de pressão. A pressão de injeção de resina no laminado pode variar, sendo que a máxima aplicada pode ser 1 bar. De acordo com a ABMACO (2009), o fechamento a vácuo aplicado no RTM Light costuma ser de 0,9 bar.

Este nível de pressão aplicado permite a construção de um molde e contra molde muito leve, pois não necessitam apresentar caráter estrutural. Contudo, para evitar vazamento de resina da cavidade do molde para a cavidade de fechamento, a pressão de injeção deve ser inferior a pressão de fechamento do molde.

4.1.2.2. Viscosidade

A viscosidade nada mais é do que a resistência ao fluxo. Uma matriz polimérica deve ter baixa viscosidade para permitir impregnação do reforço e enchimento da cavidade entre os moldes. A viscosidade ideal depende do tipo de reforço e do desenho do molde. No RTM Light uma faixa entre 40 - 240 cP é adequada.

A medição da viscosidade pode ser realizada através de viscosímetros. O experimento de Copo Ford é muito utilizado para obter a viscosidade através do

escoamento. Nele é medido o tempo que leva para esvaziar o copo e a partir daí estima-se a viscosidade. Todos os experimentos para determinação da viscosidade devem atender a norma ASTM D445 97 - Método padrão de teste para viscosidade dinâmica de líquidos transparentes e opacos. A viscosidade da matriz polimérica é informada pelos fornecedores.

4.1.2.3. Permeabilidade

A determinação da permeabilidade do meio fibroso é essencial para um projeto adequado e otimizado do equipamento RTM Light. Garay (2010) define a permeabilidade como a resistência ao fluxo do fluido no reforço fibroso, sendo obtida através do método de fluxo retilíneo ou pela infiltração radial.

De acordo com Garay (2010), o método de fluxo radial apresenta vantagens em relação a retilínea, pois permite à medição simultânea das duas componentes da permeabilidade bem como as direções principais de fluxo em reforços anisotrópicos.

A Lei de Darcy é uma equação admitida para descrever o fluxo planar de um fluido Newtoniano incompressível em um meio fibroso no processo de RTM Light. Nesta equação os efeitos capilares e gravitacionais são desprezíveis.

$$\underline{u} = -\frac{1}{\mu} \cdot [K] \cdot \nabla P \quad (4.1)$$

Onde,

\underline{u} → *velocidade da frente de fluxo;*

μ → *viscosidade dinâmica;*

$[K]$ → *permeabilidade;*

∇P → *gradiente de pressão.*

O fluxo é descrito em função da diferença de pressão, da viscosidade e de uma constante K que engloba toda a informação geométrica do sistema de injeção de resina. Essa constante é considerada como a permeabilidade equivalente do sistema de injeção.

Analisando a equação verifica-se que a velocidade do fluido através do meio fibroso é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional a viscosidade do fluido.

No método de infiltração retilíneo, se a pressão de injeção for constante, então o tempo requerido para frente de fluxo avançar uma posição particular dentro do molde pode ser obtido pela equação abaixo.

$$t_{ff} = \frac{\varepsilon \cdot \mu}{2 \cdot K \cdot P_{inj}} \cdot x_{ff}^2 \quad (4.2)$$

Sendo,

$$\varepsilon = 1 - V_f \quad (4.3)$$

Onde,

$V_f \rightarrow$ fração volumétrica de fibras;

$\varepsilon \rightarrow$ porosidade do meio fibroso antes da moldagem;

$P_{inj} \rightarrow$ pressão de injeção;

$x_{ff} \rightarrow$ posição particular dentro do molde;

$t_{ff} \rightarrow$ tempo requerido para a frente de fluxo do fluido avançar uma posição.

No método radial, o tempo requerido para o fluido, que passa por uma porta de injeção com raio r_{inj} , preencher uma região de raio r_{ff} dentro do molde é dado pela equação abaixo, sendo aplicada até que a frente de fluxo atinja a parede do molde.

$$t_{ff} = \frac{\varepsilon \cdot \mu}{2 \cdot K \cdot P_{inj}} \cdot \left(r_{ff}^2 \cdot \ln \left(\frac{r_{ff}}{r_{inj}} \right) - \frac{1}{2} \cdot (r_{ff}^2 - r_{inj}^2) \right) \quad (4.4)$$

Sendo assim, em uma infiltração retilínea, a declividade da reta obtida em gráficos que relaciona o quadrado da posição da frente de fluxo do fluido com o tempo indica a permeabilidade do reforço.

As peças podem ser fabricadas com reforços em forma de tecido ou manta de fibras curtas distribuídas aleatoriamente. De acordo com Goss (s/d), a permeabilidade da manta, calculada pelo método retilíneo, para uma pressão de injeção de 0,1 bar e uma fração volumétrica de fibras de 0,30, é $k = 3,24 \times 10^{-10} m^2$. Já Montoro (2014), em sua tese de doutorado, mostra uma permeabilidade de $k = 6,311 \times 10^{-12} m^2$ para tecidos quadriaxiais de fibra de carbono e resina epóxi.

Com estas considerações, o valor da permeabilidade deve estar entre 10^{-12} e $10^{-9} m^2$.

4.1.2.4. Tamanho da cavidade do molde

A cavidade do molde não apresenta restrição em relação a dimensão, contudo, é limitado pela dimensão do molde. Deve-se ter cuidado para que as dimensões sejam suficientes para a produção de uma peça adequada. Analisando o espaço disponível no Laboratório de Modelos, e avaliando todos os componentes que serão distribuídos para a realização do processo de RTM Light, um molde com dimensões de até 750 x 750 mm é adequado. Na determinação, também foi considerado a distribuição de pessoas que participarão do processo. Com a dimensão do molde determinado é possível determinar a dimensão da cavidade do molde. Para garantir um tempo suficiente do processo, a dimensão máxima para a cavidade do molde é de 500 x 500 mm.

Após o estudo dos requisitos de projeto é possível identificar os valores especificados para cada requisito. A tabela abaixo apresenta os requisitos ordenados por peso relativos com seus respectivos valores especificados.

Tabela 4. 2. Requisitos de projeto com seus valores especificados.

REQUISITOS DE PROJETO	PESO RELATIVO	VALOR ESPECIFICADO
Permeabilidade do reforço	13,4%	10^{-12} a 10^{-9} m ²
Viscosidade da matriz	13,4%	40 - 240 cP
Tamanho da cavidade do molde	13,3%	até 500 x500 mm
Pressão de injeção de resina	10,9%	até 0,9 bar
Área destinada a instalação	9,3%	7,5 m ²
Tempo de preenchimento da cavidade	9,1%	até 1h
Peso do molde	9,0%	até 20 kg
Espessura do laminado	7,8%	superior a 2 mm
Tempo de cura da resina	7,1%	1h - 2h
Diâmetro de injeção de resina	4,0%	até 10 mm
Pressão de fechamento do molde	2,7%	superior a Pinj

Fonte: Do Autor.

Com o conhecimento destes valores obtidos será mais fácil à identificação da melhor alternativa de concepção do molde em projeto. O valor para a permeabilidade não é disponibilizado pelos fabricantes. Para determinar este valor deve-se utilizar um dos métodos de determinação descritos em 4.1.2.3.

4.2. Projeto Conceitual

O projeto do molde pode ser realizado de inúmeras possibilidades, sendo necessária uma análise das possíveis opções disponíveis. Para o estudo mais adequado das possibilidades dividiu-se o molde em sistemas. Os sistemas identificados foram: sistema de fechamento do molde, sistema de posicionamento da entrada de resina, sistema de fluxo de entrada da resina, sistema de aplicação de vácuo, sistema de cavidade, sistema de vedação. Abaixo serão descritos as opções disponíveis para cada sistema.

4.2.1. Sistema de fechamento do molde

O fechamento do molde pode ocorrer através de dobradiças, pinos com trava, ou ainda, pinos com porca.

4.2.2. Sistema de posicionamento da entrada de resina

O local de injeção de resina pode ocorrer em pontos diferenciados. A entrada da resina pode ocorrer em um ponto localizado na periferia do laminado ou na posição central do laminado. Se localizado na região periférica, pode ainda ser posicionado em algum canto ou na posição intermediária da lateral do laminado.

4.2.3. Sistema de fluxo de entrada de resina

O fluxo de entrada de resina pode ocorrer verticalmente de cima para baixo, sendo favorecido pela ação da gravidade, verticalmente de baixo pra cima, horizontalmente, ou ainda apresentar uma componente vertical e uma componente horizontal.

4.2.4. Sistema de posicionamento da aplicação do vácuo

A aplicação do vácuo pode ocorrer em uma posição periférica da cavidade ou na região central do laminado. Quando posicionado na região periférica, pode ser colocado em algum canto ou na posição intermediária da cavidade do molde. Pode ser colocado no molde superior ou no molde inferior.

4.2.5. Sistema de cavidade

O molde também pode apresentar formas diferentes. As duas formas usuais de fabricação do molde é com geometria plana, com geometria curvada. A cavidade do molde pode ser projetada de inúmeras formas geométricas diferentes e é determinado pelo formato da peça estrutural que se deseja fabricar pelo processo de RTM Light, podendo ser quadrada, retangular, circular, triangular, entre outras formas variadas.

4.2.6. Sistema de vedação

A vedação do molde é importante para evitar vazamento de resina. Pode apresentar apenas uma vedação, duas vedações, ou inúmeras vedações. Essas vedações podem ser implantadas no molde superior ou no molde inferior.

4.2.7. Sistema de material do molde superior e molde inferior

O material do molde superior e molde inferior podem ser fabricados de qualquer material. Os principais moldes apresentam molde de aço, vidro ou polímeros, mas nada impede de fazer um molde com material cerâmico. A escolha deve ser adequada para atingir as necessidades dos clientes.

4.2.8. Geração de alternativas de concepção

Para a geração das alternativas de concepção será apresentado uma matriz morfológica para melhor visualização das possibilidades que cada sistema identificado apresenta. Abaixo segue matriz morfológica, com os sistemas identificados e as possíveis alternativas de concepção para cada sistema.

Tabela 4. 3. Matriz morfológica dos sistemas do molde.

Sistemas	Possibilidades para cada sistema			
Sistema de fechamento do molde	dobradiças	pinos		
		porca	trava	
Sistema de posicionamento da entrada de resina	molde superior	molde inferior		
	central	periférica		
Sistema de fluxo de entrada de resina	cima para baixo	baixo para cima	horizontalmente	inclinado
	molde inferior		molde superior	
Sistema de posicionamento da aplicação do vácuo	central	periférica		
		intermediária	canto	
Sistema de cavidade	plana		curvada	
	quadrada	retangular	circular	triangular
Sistema de vedação	uma vedação	duas vedações	três vedações	mais vedações
Sistema de material do molde superior	aço	vidro	cerâmica	polímero
Sistema de material do molde inferior	aço	vidro	cerâmica	polímero

Fonte: Do Autor

Com auxílio da matriz morfológica será possível a geração de alternativas de concepção para o molde. Abaixo segue alternativas de concepção geradas.

4.2.8.1. Alternativa de concepção 1

A primeira alternativa de concepção gerada é a descrita a seguir. Nesta concepção o fechamento do molde ocorre através de dobradiças. A posição do ponto de injeção de resina é realizada na região central da cavidade do molde inferior. O fluxo de entrada da resina ocorre de baixo para cima. O ponto de aplicação do vácuo é posicionado no molde superior, na região periférica intermediária do laminado. O molde deve ser plano com a cavidade plana com formato retangular. Apenas uma vedação é posicionada no molde inferior. O material do molde superior é em polímero e do molde inferior em aço.

4.2.8.2. Alternativa de concepção 2

Na alternativa de concepção 2 o fechamento do molde também ocorre através de dobradiças. O posicionamento do ponto de injeção de resina ocorre na região

periférica intermediária do molde inferior. O fluxo de entrada de resina ocorre de baixo para cima. O posicionamento do vácuo é aplicado na região central do molde superior. O molde deve ser plano, com a cavidade do molde plano com formato quadrado. Duas vedações serão posicionadas no molde inferior. O material do molde superior deve ser vidro e o molde inferior feito de aço.

4.2.8.3. **Alternativa de concepção 3**

A alternativa de concepção 3 apresenta as seguintes determinações. O fechamento do molde ocorre através de pinos com porca. A posição do ponto de injeção de resina está localizada na região central do molde superior. O fluxo de entrada de resina ocorre com uma inclinação. O ponto de aplicação do vácuo está posicionado numa região periférica intermediária da cavidade do molde inferior. A cavidade do molde deve ser curvada com um formato quadrado. Duas vedações serão inseridas no molde inferior. O molde superior é feito de vidro e o molde inferior em polímero.

4.2.9. Escolha da melhor alternativa de concepção

Para a escolha da melhor alternativa de concepção será utilizado uma ferramenta de comparação entre as três alternativas geradas com os requisitos de projeto.

Cada alternativa será analisada em relação aos requisitos e será atribuída uma pontuação variando de 1 a 5. A melhor alternativa de concepção em relação ao requisito analisado receberá uma pontuação maior que as demais. A segunda melhor receberá uma pontuação intermediária e a pior receberá uma pontuação mais baixa. Abaixo segue uma tabela com os requisitos identificados, o peso relativo de cada requisito, retirado da matriz QFD, e as três alternativas de concepção com seus respectivos valores atribuídos.

Ao fim da tabela está apresentada uma pontuação para cada alternativa de concepção. A alternativa com maior pontuação deve ser a melhor concepção para o equipamento.

Tabela 4. 4. Definição da melhor alternativa de concepção.

REQUISITOS DE PROJETO	PESO RELATIVO	ALT. 1	ALT. 2	ALT. 3
Permeabilidade do reforço	13,4%	2	2	2
Viscosidade da matriz	13,4%	4	4	3
Tamanho da cavidade do molde	13,3%	1	4	3
Pressão de injeção de resina	10,9%	2	3	4
Área destinada a instalação	9,3%	3	4	4
Tempo de preenchimento da cavidade	9,1%	2	3	3
Peso do molde	9,0%	3	2	4
Espessura do laminado	7,8%	3	3	1
Tempo de cura da resina	7,1%	2	2	2
Diâmetro de injeção de resina	4,0%	3	3	3
Pressão de fechamento do molde	2,7%	1	5	4
Pontuação para cada alternativa de concepção gerada		241	312	296

Fonte: Do Autor.

Verificando a tabela acima, verificamos que a alternativa de concepção 2 atingiu maior pontuação. Com isso esta deve ser a melhor alternativa de concepção que permitirá atingir todas as necessidades dos clientes.

As dimensões do molde foram determinadas com ênfase nas necessidades dos clientes. Um projeto visando ergonomia, baixo custo de fabricação, facilidade de operação e facilidade de limpeza deve ser atingido. Além disso, deve permitir que o tempo de preenchimento do molde seja adequado para a realização do processo de forma sequenciada.

A forma do molde deve ser plano, pois permite um melhor preenchimento do molde, evitando assim espaços vazios. A facilidade de produção e limpeza de um molde plano também justifica essa escolha.

Para o projeto do molde a peça produzida não necessita apresentar uma geometria complexa, pois não precisa possuir caráter funcional. De posse destes argumentos, para garantir um preenchimento completo do molde, uma peça estrutural sem porosidade, facilidade de operação e limpeza, e um tempo de preenchimento do molde adequado, a escolha de uma geometria plana quadrada com espessura uniforme torna-se mais adequada para o projeto. Para garantir a desmoldagem correta do laminado e evitar acúmulo de resina em pontos da peça, ângulos retos e ângulos vivos devem ser evitados no projeto do molde.

Visando atingir as necessidades, a injeção de resina deve ocorrer em uma extremidade da peça e a aplicação do vácuo ocorrerá na região central da peça estrutural. Para garantir um preenchimento completo do molde e evitar espaços

vazios, um canal de distribuição de resina deve ser projetado em todas as extremidades do laminado moldado.

A pressão de fechamento do molde deve ser maior que a pressão na cavidade do molde. A baixa pressão de fechamento e as baixas forças mecânicas internas permitem o uso de moldes de baixo peso. A vedação deve ser perfeita para não ocorrer vazamentos, inclusive entre a cavidade do molde e a do fechamento, devido à diferença de pressão.

O material do molde inferior em aço é justificado, pois permite a fabricação de um laminado com excelente acabamento superficial, apresenta facilidade de limpeza e torna longa a vida útil do molde. Já a escolha do vidro para o molde superior é justificado pela necessidade de visualização do fluxo de resina dentro da cavidade do molde, e por permitir excelente acabamento superficial do laminado moldado.

Para determinar o ponto exato de aplicação de vácuo um estudo da simulação do processo, com os parâmetros do projeto, em algum software de fluidos faz-se necessário. Esses estudos permitirão garantir e validar o adequado projeto do molde.

De posse destas determinações será possível fazer um levantamento do custo dos materiais para produção do molde. Um modelo do molde em CAD também será realizado.

4.2.10. Orçamento dos materiais

Conhecendo as principais especificações do projeto do molde torna-se possível analisar todos os componentes que serão indispensáveis à produção do equipamento. Detalhado cada componente, um levantamento de preço inicial faz-se necessário para analisar a viabilidade técnica e econômica do projeto.

Nesta seção será apenas realizado um levantamento do valor dos componentes. Vale salientar que o processo de fabricação e montagem não está sendo considerado no custo inicial do projeto.

Os componentes identificados são: molde superior, molde inferior, conexões, mangueiras, vedação, abraçadeiras, colas e parafusos, bomba de vácuo, pote armazenador de resina com homogeneizador mecânico, bancada de sustentação do equipamento.

O molde superior será feito de vidro, a fim de permitir um acompanhamento do fluxo de resina e também possibilitar um excelente acabamento superficial do laminado moldado.

O molde inferior será fabricado de aço inox 304 para permitir facilidade de limpeza e garantir uma vida útil longa ao equipamento.

As conexões tem função de unir o equipamento com as mangueiras. Serão utilizadas duas conexões, uma posicionada no ponto de injeção de resina e outra no ponto de fechamento do molde. Outra conexão será posicionada no molde superior para união do compartimento de depósito de excesso de resina ao molde superior.

As mangueiras serão o caminho do fluxo de resina ou ar. Serão instaladas entre a bomba de vácuo e as conexões. As mangueiras são descartáveis, portanto deve ser adquiridos aproximadamente 40 metros . As abraçadeiras servem para unir as mangueiras em suas extremidades a fim de evitar vazamentos. Será adquirida uma quantidade de 40 unidades de abraçadeiras.

A vedação deve permitir o fechamento do molde, assim como permitir a aplicação do vácuo para a injeção de resina. Como a pressão de fechamento do molde e a pressão de injeção de resina são diferentes, deve-se garantir que existe total vedação entre a região de fechamento e a cavidade do molde, afim de evitar vazamento de resina.

A bomba de vácuo para a realização deve possibilitar a pressão de pelo menos 1 bar já que se trata de um processo RTM Light. A bancada de sustentação deve apresentar dimensões semelhantes ao molde inferior em relação a largura e comprimento. A altura deve ser suficiente para atingir o estabelecido na seção anterior.

O pote armazenador de resina com homogeneizador mecânico é outro componente essencial para o processo de RTM Light. Nele deverá ocorrer a preparação da resina que será injetada no molde. A união do molde superior e inferior ocorrerá através de dobradiças metálicas e um puxador de plástico será colocado no molde superior para facilitar o manuseio do mesmo.

Abaixo segue Tabela 4.5 com os componentes especificados, seus fornecedores, materiais e dimensões e o preço. Para a chapa de aço inox o valor refere-se a uma única chapa com a dimensão especificada. O valor disponibilizado pelo fabricante do vidro também se refere à unidade. A conexão e as abraçadeiras

também apresentam seus preços por unidade. A mangueira apresenta seu valor referente ao metro, enquanto que a vedação apresenta o valor respectivo a lata.

Tabela 4. 5. Preço dos componentes do equipamento RTM Light.

	Material	Dimensão	Preço
Molde Superior	Vidro	1000x1000x8 mm	R\$160,00
Molde Inferior	Aço Inox 304	1210x2000x2 mm	R\$856,94
Conexão	Latão	Mangueira 3/8" rosca 1/4"	R\$18,90
Mangueiras	PVC	3/8"	R\$6,90
Abraçadeiras	Aço inox	3/8"	R\$6,50
Vedação	Borracha de silicone	1,030 kg	R\$24,00
Bomba de Vácuo			R\$14.000,00
Pote armazenador de resina			R\$1.200,00
Bancada de sustentação	Aço	750x750x1240 mm	R\$2.000,00
Dobradiça metálica	Aço inox	4" x 3"	R\$74,00
Puxador	Aço	40 cm	R\$125,90
Custo total aproximado do equipamento			R\$19.033,54

Fonte: Do Autor.

Conhecendo a quantidade exata de cada componente necessário para a construção do equipamento é possível ter uma estimativa do custo de material do projeto conceitual do molde RTM Light.

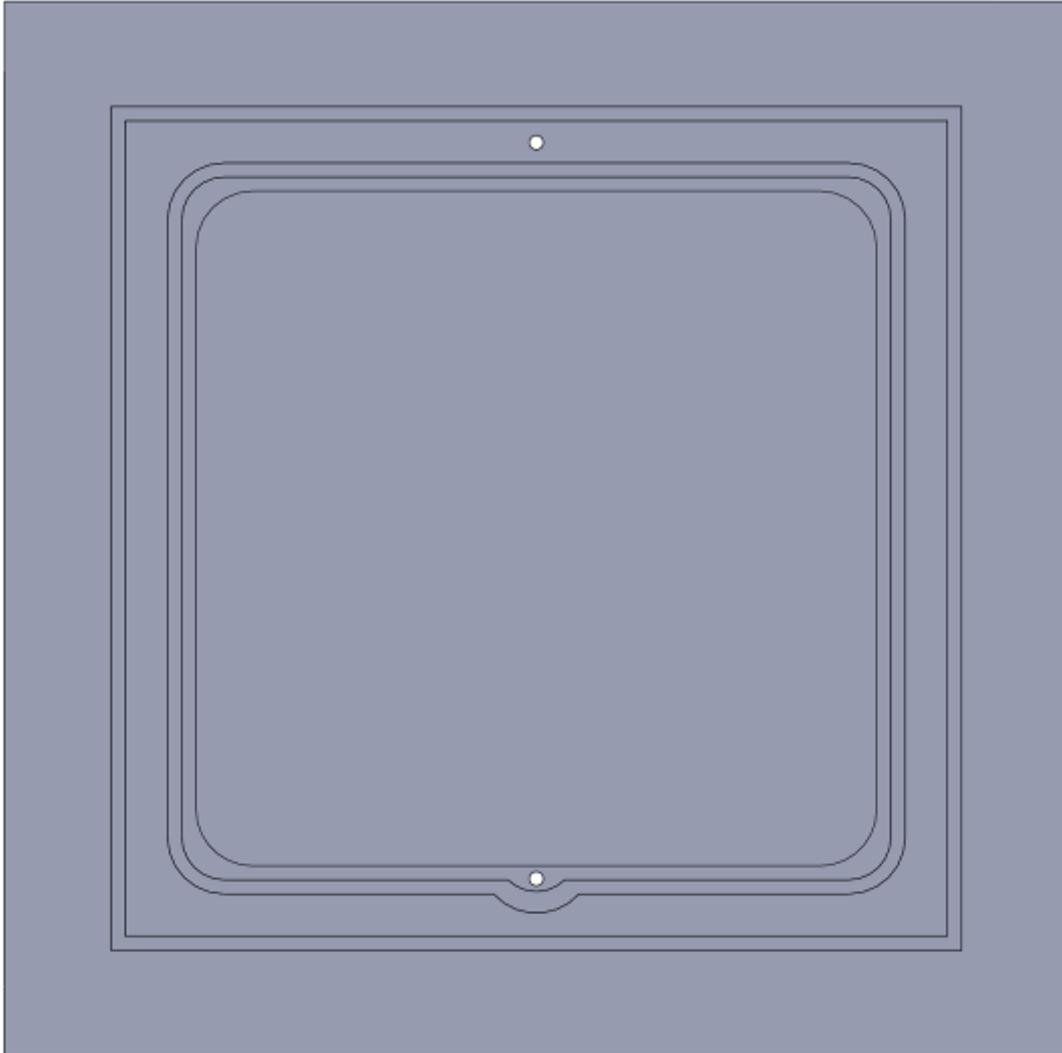
Novamente, o custo de processo de fabricação e montagem não está sendo considerados neste estudo, apenas os gastos de material de consumo e permanente. Ao final da tabela está expresso o valor final previsto para o desenvolvimento do equipamento. Vale salientar que o valor pode sofrer alterações devido a oscilação da economia.

4.2.11. Concepção do Projeto

De acordo com o conhecimento adquirido até a presente etapa de projeto, o modelo do molde foi desenvolvido em CAD para detalhamento do produto. Para a realização utilizou-se o software *SolidWorks* 2013.

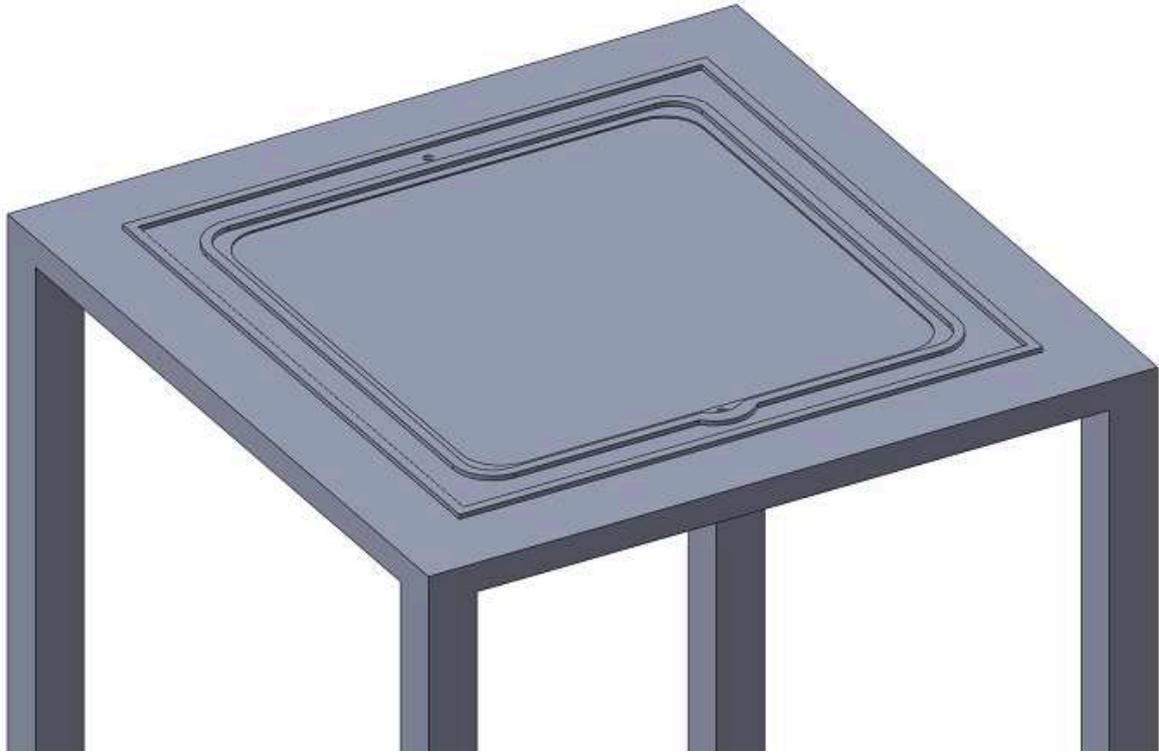
A vista do molde e contramolde pode ser observada abaixo. Os demais desenhos, vistas, dimensões do projeto detalhado encontram-se no Anexo A.

Figura 4. 4. Vista superior do molde inferior. Visualização da cavidade do molde, borrachas de vedação e ponto de injeção de resina.



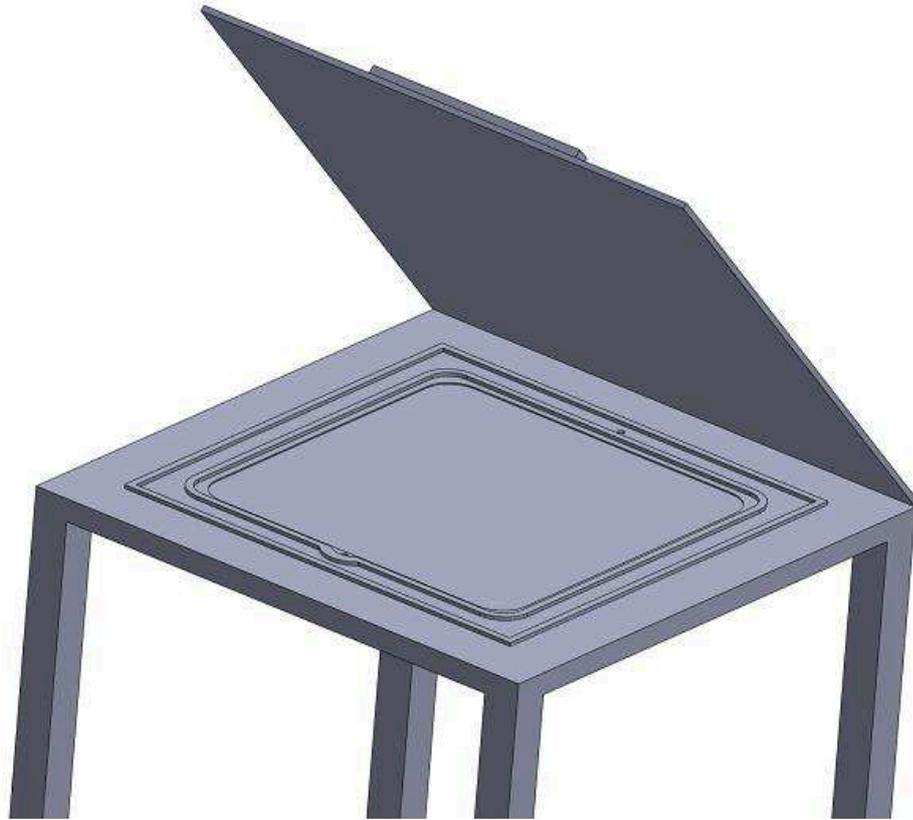
Fonte: Do Autor.

Figura 4. 5. Vista em perspectiva do molde inferior posicionado sobre a bancada de sustentação. Possível verificar a cavidade do molde e as borrachas de vedação.



Fonte: Do Autor.

Figura 4. 6. Vista em perspectiva do molde superior, molde inferior e bancada de sustentação unidos.



Fonte: Do Autor

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizado o desenvolvimento de um projeto conceitual de um molde RTM Light para implantação no Laboratório de Modelos do Centro de Engenharias da Mobilidade da Universidade Federal de Santa Catarina. O equipamento deverá permitir estudos em materiais compósitos avançados qualificando a formação acadêmica dos estudantes.

Em todo o desenvolvimento do projeto buscou-se, através de ferramentas de projeto, uma configuração ótima do molde, otimizando da melhor maneira possível as etapas do projeto.

Primeiramente, no projeto informacional, um levantamento das necessidades dos clientes e requisitos de projeto fez-se necessário para verificar quais os pontos críticos deveriam ser estudados com maior cautela.

Posteriormente, foi possível determinar quais as possíveis concepções que o molde em projeto poderia adquirir, chegando-se a uma configuração que melhor atendia as necessidades.

Após um estudo das etapas descritas acima, foi possível criar um desenho tridimensional do molde e realizar um levantamento de preços dos componentes para estimar o custo de material de consumo e permanente do projeto.

A configuração do molde inferior foi determinada a fim de obter um laminado com dimensões adequadas e possível de ser fabricado. O material metálico é o mais adequado pensando-se em vida útil, facilidade de manutenção e limpeza, e acabamento superficial. O molde superior em vidro foi determinado para possibilitar a visualização do processo de laminação e para o melhor acabamento superficial das peças.

O RTM Light apresenta vantagens em relação a outros processos de fabricação de compósitos. Baixa mão de obra, reduzida emissão de estireno devido o sistema ser fechado durante a injeção, controle de tolerância da peça, tempo de ciclo de produção reduzido, são alguns diferenciais que justificam os avanços nos estudos a respeito do processo.

A principal limitação do molde fabricado é a posição de aplicação do vácuo. Para o futuro, o estudo da simulação do processo de RTM Light em algum software

será interessante para avaliar os pontos de injeção de resina e aplicação do vácuo. Esse estudo faz-se necessário para garantir que a resina preencha toda a cavidade do molde, evitando assim regiões de vazios e validando o projeto.

Após esta validação, a fabricação do molde poderá ser realizada e instalada no Laboratório de Modelos permitindo assim estudos das propriedades mecânica, física e química dos corpos de prova obtidos com o equipamento RTM Light.

REFERÊNCIAS

ABMACO. Compósitos I: Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências. [S.I.], 2008.

ABMACO. Compósitos II: Tecnologia de Processos. [S.I.], 2009.

AMICO, S.; LEKAKOU, C.. An experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer moulding. IN: **ELSEVIER - Composites Science and Technology**, 5 July 2001, Surrey, UK.

ALMEIDA, Francisco José de. Estudo e Escolha de Metodologia para o Projeto Conceitual. **Revista de Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 8, n. 16, p.31-42, dez. 2000.

AMARAL, Daniel Capaldo et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos**: Uma Referência para a Melhoria do Processo. São Paulo: Saraiva, 2006.

CALLISTER JR., William D. Introdução. In: William D. Callister Jr.. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma Introdução. Salt Lake City: Wiley, 1999a. p. 1 - 5.

CALLISTER JR., William D. Compósitos. In: William D. Callister Jr.. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma Introdução. Salt Lake City: Wiley, 1999b. p. 358 - 383.

GARAY, André Cechin. **Efeito da Adição de Carbonato de Cálcio em Compósitos Poliméricos Moldados por RTM e RTM Light**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

HAN, K. K.; LEE, C. W.; RICE, B. P.. Measurements of the permeability of fiber preforms and applications. IN: **ELSEVIER - Composites Science and Technology**, Dayton, OH, USA.

HILLER, G. R.; FILLA JR, J. L.; SCHMIDT, T. M.; AMICO, S. C.. Influência das condições de moldagem por transferência de resina (RTM) no comportamento mecânico de compósitos poliméricos. IN: **17º CBECIMat - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS**, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

HOJE, Indústria. **O processo de Moldagem RTM Light**. Disponível em: <<http://www.industriahoje.com.br/o-processo-de-moldagem-rtm-light>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

MARINUCCI, Gerson. Materiais compósitos poliméricos: Fundamentos e tecnologia. Local: Artliber, 2011.

MONTORO, Sérgio Roberto. **Influência dos Parâmetros de Processamento por RTM no Volume de Vazios em Compósitos Carbono/Epóxi**. 2014. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

NAIK, N. K.; SIRISHA, M.; INANI, A.. Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM. IN: **ELSEVIER - Progress in Aerospace Sciences**, 23 November 2013, Mumbai, Índia.

NETO, Flávio Levy; PARDINI, Luiz Claudio. Compósitos Estruturais: Ciência e tecnologia. Local: Blucher, 2006.

OLIVEIRA, Iran Rodrigues de et al. Resin transfer molding process: a numerical and experimental investigation. **Int. Jnl. Of Multiphysics**. Campina Grande, p. 125-135. abr. 2013.

SILVA, Humberto Sartori Pompeo da. **Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras de Carauá e Híbridos com Fibras de Vidro**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de

Materials – PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SILVA, Laís Vasconcelos da. **Compósitos Avançados Epóxi/Fibra de Vidro com Elevado Teor de Nanotubos de Carbono**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

TAMBOSI, Petrus Paulo. **Projeto e Construção de um Molde de RTM Light**. 2012. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2012.

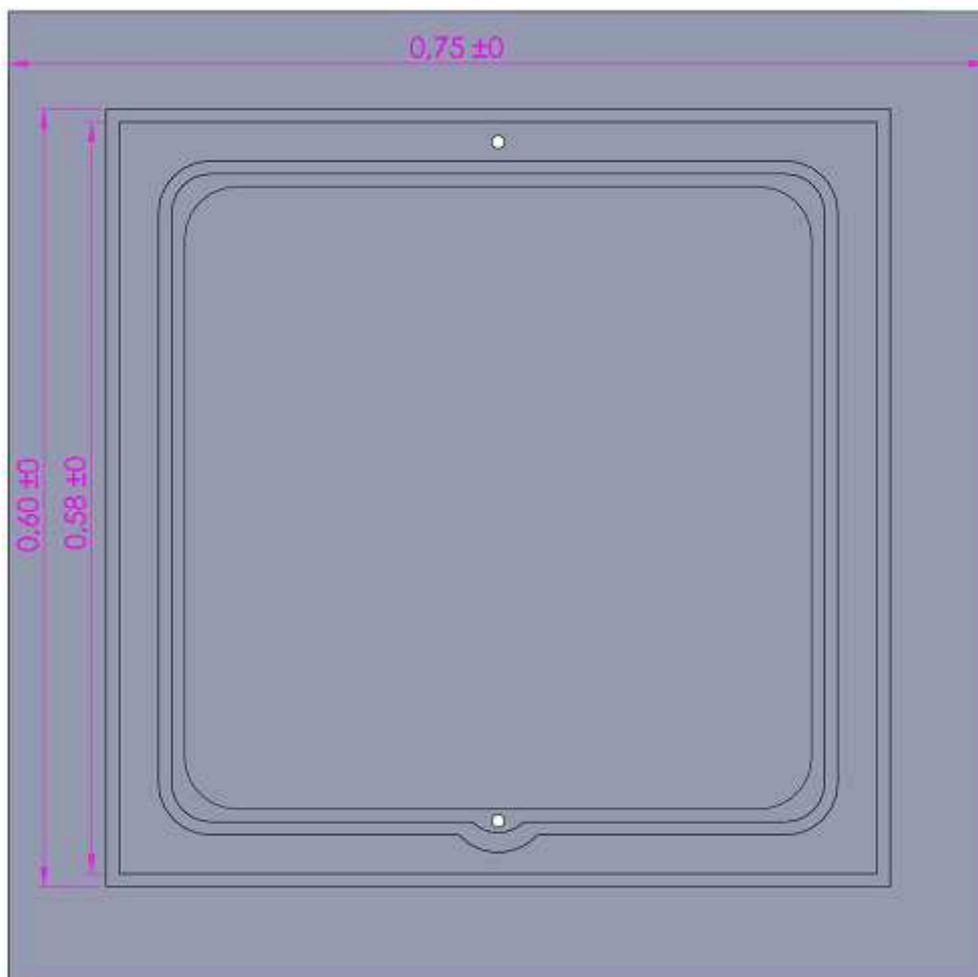
VI WORKSHOP DE COMPÓSITOS E NANOCOMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA, 6., 2015, Joinville. Anais: Joinville: CCT-UDESC, 2015.

©2013 Dassault Systèmes. SolidWorks Corp.

ANEXO A

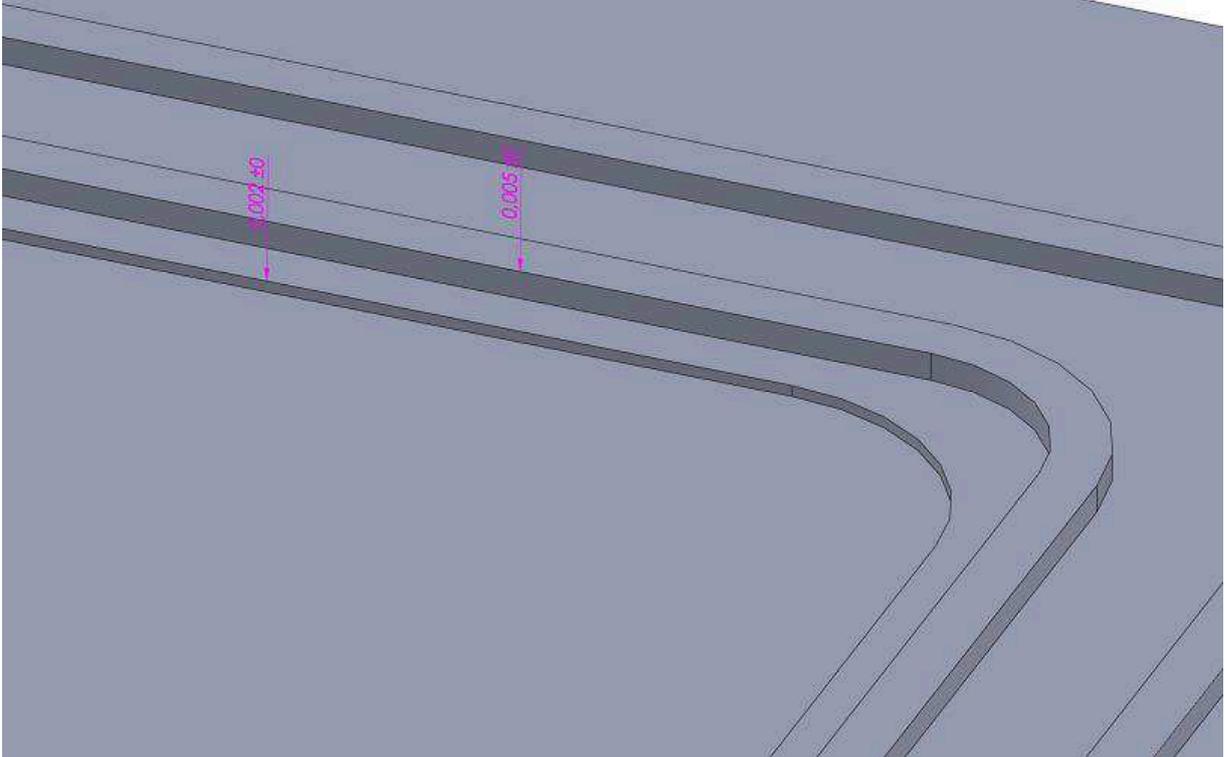
DESENHOS, VISTAS E DIMENSÕES DO PROJETO CONCEITUAL DO MOLDE NO SOFTWARE SOLIDWORKS 2013

Figura A. 1. Vista superior do molde inferior. Possível verificar a dimensão da borracha de vedação externa com 10 mm de largura e 5 mm de espessura. Cavidade do molde com dimensão de 500 x 500 mm e local da posição dos reforços com dimensão de 480 x 480 mm.



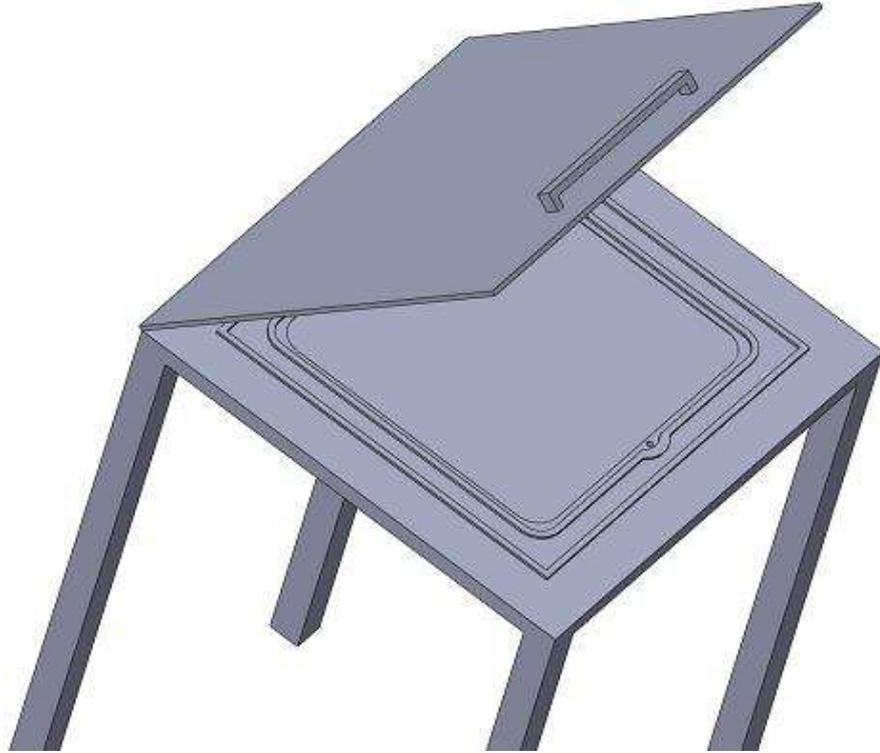
Fonte: Do Autor.

Figura A. 2. Vista em perspectiva da cavidade do molde. Posição dos reforços com espessura de 2 mm e espessura da borracha interna de 5 mm.



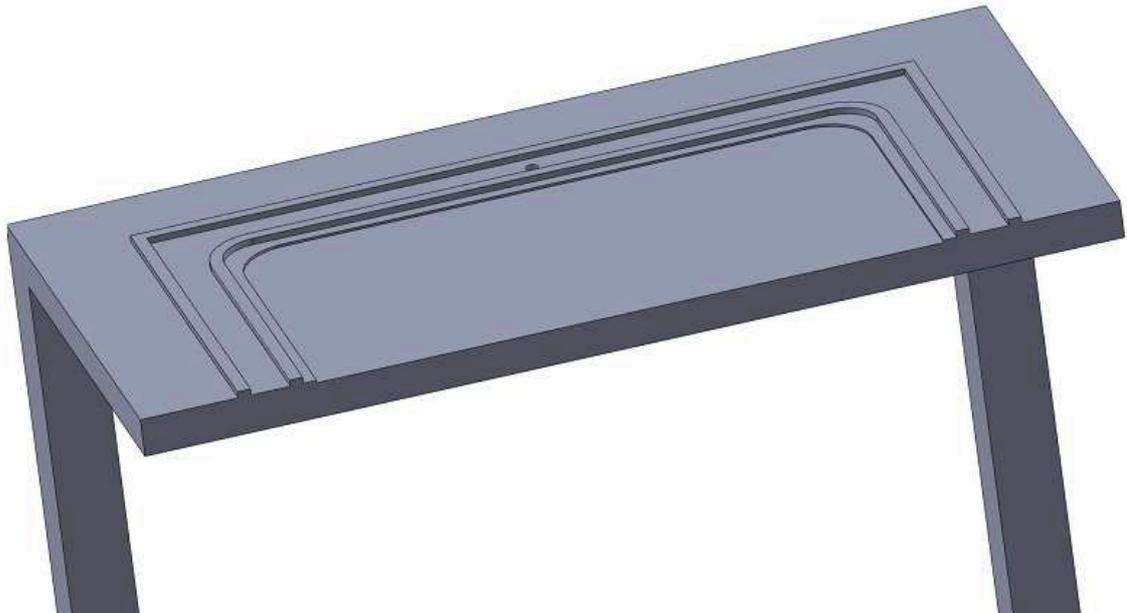
Fonte: Do Autor.

Figura A. 3. Vista em perspectiva do molde RTM Light. Molde inferior unido na bancada de sustentação. Montagem do molde superior no molde inferior.



Fonte: Do Autor.

Figura A. 4. Vista em perspectiva da cavidade do molde cortada.



Fonte: Do Autor.