

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE MOLDES EM PLÁSTICO  
REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO UTILIZANDO A  
TECNOLOGIA DE FERRAMENTAL RÁPIDO POR  
ESTEREOLITOGRAFIA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

**JÚLIO LONGHI**

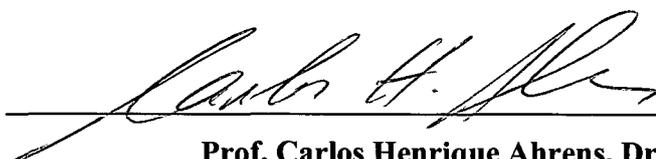
FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 2002.

**DESENVOLVIMENTO DE MOLDES EM PLÁSTICO REFORÇADO COM  
FIBRA DE VIDRO UTILIZANDO A TECNOLOGIA DE FERRAMENTAL RÁPIDO  
POR ESTEREOLITOGRAFIA**

**JÚLIO LONGHI**

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**MESTRE EM ENGENHARIA**

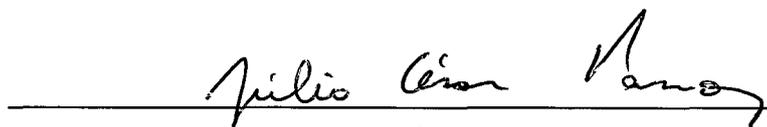
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM  
FABRICAÇÃO E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



---

**Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr.Eng.**

**Orientador**



---

**Prof. JÚLIO CÉSAR PASSOS, Ph.D.**

**Coordenador do Curso**

**BANCA EXAMINADORA**



---

**Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing. – PRESIDENTE**



---

**Prof. Áureo Campos Ferreira, Ph. D.**



---

**Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.**

Meus sinceros agradecimentos a Deus, aos meus irmãos, aos meus pais pela confiança, educação e experiência, ao professor Ahrens pela visão, objetividade e certeza do trabalho, ao amigo Armando pelas boas idéias, reflexões e risadas, a todos os colegas do CIMJECT com louvor aos amigos Valter pelas lições de companheirismo, autodisciplina e auto-suficiência, Clênio pelas trocas de informações educacionais, não educacionais e pela amizade e Marcelo pela lição de velocidade de resposta, a toda equipe da GHIPOL do Brasil Ltda. em especial ao Rodrigo, ao Cristiano e à Marisa pela competência, ao amigão Eduardo pelas conversas, batalhas e sonhos comuns e um agradecimento especial a Tuilara pela paciência que eu sei que já está acabando. Agradeço a todos vocês, pois tenho convicção de que nunca deixarão de fazer parte da minha vida. Obrigado.

**“O segundo colocado é o primeiro entre os perdedores.”**

**(Ayrton Senna da Silva)**

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>SIMBOLOGIA.....</b>	<b>xiv</b>
<b>TERMINOLOGIA.....</b>	<b>xvi</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xix</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. ENFOQUE E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>4</b>
<b>2. TECNOLOGIA DO PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO</b>	
<b>(PRFV).....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. AS FIBRAS DE VIDRO.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. AS RESINAS.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2.1. Resinas de poliéster insaturado.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.2. Resinas epóxi.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3. PRODUTOS COMPLEMENTARES.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3.1. Cargas.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3.2. Aditivos.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3.3. Desmoldantes.....</b>	<b>12</b>
<b>2.4. PROPRIEDADES DO PRFV.....</b>	<b>13</b>
<b>2.5. CONSTRUÇÃO TRADICIONAL DE MOLDES DE PRFV.....</b>	<b>16</b>

2.5.1.	Construção do modelo.....	16
2.5.2.	Construção do molde.....	17
2.6.	<b>CLASSIFICAÇÃO DOS MOLDES DE PRFV.....</b>	<b>19</b>
2.6.1.	Moldes abertos.....	21
2.6.2.	Moldes fechados.....	21
2.7.	<b>PROCESSOS DE MANUFATURA DO PRFV.....</b>	<b>22</b>
2.7.1.	Laminação manual ou por contato ( <i>Hand lay up</i> ).....	23
2.7.2.	Laminação por projeção à pistola ( <i>Spray up</i> ).....	24
2.7.3.	Moldagem de carga composta ( <i>Bulk Molding Compound - BMC</i> ).....	26
2.7.4.	Moldagem de placa composta ( <i>Sheet Molding Compound - SMC</i> ).....	26
2.7.5.	Moldagem por transferência de resina ( <i>Resin Transfer Molding - RTM</i> ).....	27
2.7.6.	Moldagem a vácuo ( <i>Vacuum Molding</i> ).....	28
2.7.7.	Moldagem por injeção reativa reforçada ( <i>Reinforced Reaction Injection Molding - RRIM</i> ).....	29
2.7.8.	Moldagem por injeção reativa estrutural ( <i>Structural Reaction Injection Molding - SRIM</i> ).....	30
3.	<b>TECNOLOGIA DO FERRAMENTAL RÁPIDO POR ESTEREOLITOGRAFIA.....</b>	<b>31</b>
3.1.	<b>EMBASAMENTO CONCEITUAL.....</b>	<b>31</b>
3.2.	<b>PRINCIPAIS ETAPAS DA TECNOLOGIA DO FERRAMENTAL RÁPIDO POR ESTEREOLITOGRAFIA.....</b>	<b>32</b>

<b>3.3.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES PARA O PROJETO.....</b>	<b>34</b>
3.3.1.	Dimensões, contração, pós-cura e temperatura de transição vítrea.....	34
3.3.2.	Ângulos de saída e raios de concordância.....	35
3.3.3.	Resolução do CAD.....	35
<b>4.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DOS ESTUDOS DE CASO.....</b>	<b>36</b>
4.1.	ESTUDO DE CASO PRELIMINAR.....	36
4.1.1.	Objetivos específicos e critério de avaliação.....	37
4.1.2.	Testes de contato.....	37
4.1.3.	Definição da peça.....	39
4.1.4.	Confecção do modelo e fabricação do molde.....	40
4.1.5.	Manufatura da peça.....	42
4.2.	ESTUDO DE CASO 2.....	44
4.2.1.	Objetivos específicos e critérios de avaliação.....	44
4.2.2.	Definição da peça.....	45
4.2.3.	Método direto de ferramental rápido por estereolitografia.....	48
4.2.4.	Método indireto de ferramental rápido por estereolitografia.....	50
4.2.5.	Método tradicional (artesanal).....	53
4.2.6.	Método por fresamento CNC convencional.....	55
4.2.7.	Manufatura das peças.....	59
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>61</b>
5.1.	ESTUDO DE CASO PRELIMINAR.....	61
5.1.1.	Quanto ao critério testes de contato.....	61
5.1.2.	Quanto ao critério aspecto visual.....	62

<b>5.2.</b>	<b>ESTUDO DE CASO 2.....</b>	<b>64</b>
5.2.1.	Quanto ao critério aspecto visual.....	64
	Método direto de ferramental rápido.....	65
	Método indireto de ferramental rápido.....	66
	Método tradicional (artesanal).....	67
	Método por fresamento CNC convencional.....	67
5.2.2.	Quanto ao critério desvio-padrão.....	68
5.2.3.	Quanto ao critério tempo de fabricação.....	72
	Método direto de ferramental rápido.....	72
	Método indireto de ferramental rápido.....	73
	Método tradicional (artesanal).....	74
	Método por fresamento CNC convencional.....	75
5.3.	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	76
6.	CONCLUSÃO.....	78
6.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
6.2.	SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....	80
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
<b>ANEXO A - SOFTWARES, EQUIPAMENTOS E MATERIAIS</b>		
	<b>UTILIZADOS.....</b>	<b>92</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b> - Propriedades orientativas para resinas epóxi com reforço de fibra de vidro.....	11
<b>TABELA 2</b> - Setores que utilizam o PRFV [70].....	15
<b>TABELA 3</b> - Etapas da construção tradicional de moldes em PRFV [5].....	20
<b>TABELA 4</b> - Investimento em processo.....	22
<b>TABELA 5</b> - Propriedades da resina SL 5170 utilizada na máquina SLA-250/30.....	36
<b>TABELA 6</b> - Resinas em contato com fragmentos de resina Ciba® SL 5170.....	38
<b>TABELA 7</b> - Solventes em contato com fragmentos de resina Ciba® SL 5170.....	38
<b>TABELA 8</b> - Desmoldantes em contato com fragmentos de resina Ciba® SL 5170.....	39
<b>TABELA 9</b> - Iniciadores em contato com fragmentos de resina Ciba® SL 5170.....	39
<b>TABELA 10</b> - Aceleradores em contato com fragmentos de resina Ciba® SL 5170.....	39
<b>TABELA 11</b> - Propriedades da resina SOMOS 7110 utilizada na máquina SLA-250/30.....	44
<b>TABELA 12</b> - Propriedades da resina RESAPOL 33-411 (*).....	52
<b>TABELA 13</b> - Propriedades da resina RESAPOL 10-228 (*).....	53
<b>TABELA 14</b> - Principais propriedades do material RENSHAPE® 350.....	55
<b>TABELA 15</b> - Propriedades da placa de modelagem RENSHAPE® 460.....	57
<b>TABELA 16</b> - Parâmetros utilizados na usinagem do bloco de RENSHAPE 460® .....	57

<b>TABELA 17</b> - Estudos de caso realizados neste trabalho.....	60
<b>TABELA 18</b> - Média, desvio-padrão, intervalo de confiança e máximos / mínimos observados na largura.....	70
<b>TABELA 19</b> - Média, desvio-padrão, intervalo de confiança e máximos / mínimos observados no comprimento.....	71
<b>TABELA 20</b> - Comparativo entre as dimensões dos moldes concebidos a partir do CAD e as dimensões modeladas no CAD.....	71
<b>TABELA 21</b> - Comparativo entre as dimensões do molde e do modelo artesanal.....	72

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> - Tipos de fibras de vidro [25].....	6
<b>FIGURA 2</b> - Processo de fibragem das fibras de vidro [45].....	7
<b>FIGURA 3</b> - Microestrutura de tecidos de fibra [11].....	8
<b>FIGURA 4</b> - Resistência específica à tração de diferentes materiais.....	15
<b>FIGURA 5</b> - Seqüência de construção de um modelo em madeira.....	17
<b>FIGURA 6</b> - Modelo após ter sido pulverizado com camadas de <i>gelcoat</i> .....	19
<b>FIGURA 7</b> - Classificação dos tipos de moldes de PRFV [45].....	20
<b>FIGURA 8</b> - Processo de laminação manual [26].....	24
<b>FIGURA 9</b> - Processo de laminação por projeção à pistola [26].....	25
<b>FIGURA 10</b> - Pistola laminadora em serviço [33].....	25
<b>FIGURA 11</b> - Processo de moldagem de carga composta [26].....	26
<b>FIGURA 12</b> - Processo de moldagem de placa composta [26].....	27
<b>FIGURA 13</b> - Processo de moldagem por transferência de resina [26].....	28
<b>FIGURA 14</b> - Etapas do processo de moldagem por transferência de resina [11].....	28
<b>FIGURA 15</b> - Etapas do processo de estereolitografia.....	33
<b>FIGURA 16</b> - Etapas dos métodos direto e indireto de ferramental rápido por estereolitografia.....	33
<b>FIGURA 17</b> - Malha de triângulos representando o molde usado no estudo de caso 2.....	35

<b>FIGURA 18 - Modelo construído por estereolitografia e usado no estudo</b>	
Preliminar.....	40
<b>FIGURA 19 - Imagem da orientação espacial do modelo e seus suportes.....</b>	41
<b>FIGURA 20 - Molde de PRFV confeccionado para o estudo preliminar.....</b>	43
<b>FIGURA 21 - Peça de PRFV produzida pelo processo de laminação manual.....</b>	43
<b>FIGURA 22 - Vista tridimensional da peça a ser produzida por quatro alternativas</b>	
diferentes de ferramental (imagens do CAD).....	46
<b>FIGURA 23 - Deflexões máximas definidas no projeto da peça.....</b>	47
<b>FIGURA 24 - Corte 3D a 9 mm do topo da peça, mostrando as dimensões medidas</b>	
nas peças de PRFV.....	47
<b>FIGURA 25 - Orientação espacial do molde de SL durante sua fabricação.....</b>	49
<b>FIGURA 26 - Molde de SL obtido pelo método direto de ferramental.....</b>	50
<b>FIGURA 27 - Imagens do modelo de SL geradas em CAD.....</b>	51
<b>FIGURA 28 - Aplicação de <i>gelcoat</i> sobre o modelo de SL (a) e molde de PRFV</b>	
aguardando a cura para separá-lo do modelo de SL (b).....	51
<b>FIGURA 29 - Molde de PRFV obtido pelo método indireto de ferramental.....</b>	52
<b>FIGURA 30 - Modelo artesanal (destruído ao separá-lo do molde).....</b>	54
<b>FIGURA 31 - Molde de PRFV (negativo do modelo artesanal).....</b>	55
<b>FIGURA 32 - Fresadora 3D Roland PNC-2300A.....</b>	56
<b>FIGURA 33 - Imagem da simulação da usinagem por fresamento CNC realizada</b>	
no <i>software</i> CAMM-2.....	58
<b>FIGURA 34 - Molde obtido pelo fresamento da cavidade em um bloco de</b>	
RENSHAPE® 460.....	58
<b>FIGURA 35 - Peças de PRFV produzidas pelo processo de laminação manual.....</b>	59
<b>FIGURA 36 - Moldes confeccionados para o estudo de caso 2.....</b>	60

<b>FIGURA 37</b> - Marcas das linhas de construção do modelo de SL geradas pela trajetória do feixe de laser e reproduzidas pelo molde de PRFV.....	64
<b>FIGURA 38</b> - Evolução da profundidade das marcas de trajetória na superfície do molde de estereolitografia reproduzidas pelas peças moldadas.....	65
<b>FIGURA 39</b> - Marcas da trajetória de construção do modelo de estereolitografia reproduzidas pelo molde de PRFV.....	66
<b>FIGURA 40</b> - Aspecto visual do molde artesanal após ter sido usado para produzir as peças.....	67
<b>FIGURA 41</b> - Aspecto visual do molde obtido pelo fresamento em RENSHAPE® 460 da cavidade e detalhe de sua região de falha.....	68
<b>FIGURA 42</b> - Tempo de confecção do ferramental direto (em horas).....	73
<b>FIGURA 43</b> - Tempo de confecção do modelo de estereolitografia (em horas).....	73
<b>FIGURA 44</b> - Tempo de confecção do ferramental indireto (em horas). As legendas laminação e cura, realizadas intercaladamente duas vezes, representam o total despendido nestas etapas.....	74
<b>FIGURA 45</b> - Tempo de confecção do modelo tradicional (em horas).....	75
<b>FIGURA 46</b> - Tempo de elaboração do molde tradicional (em horas). As legendas laminação e cura, realizadas intercaladamente duas vezes, representam o total despendido nestas etapas.....	75
<b>FIGURA 47</b> - Tempo de confecção do molde obtido pelo fresamento da cavidade (em horas).....	76
<b>FIGURA 48</b> - Tempo total de confecção dos modelos (em horas).....	77
<b>FIGURA 49</b> - Tempo total de confecção dos moldes (em horas).....	77

## SIMBOLOGIA

<b>SIGLA</b>	<b>SIGNIFICADO</b>
<b>ACES</b>	<i>Accurate Clear Epoxy Solid</i> , um estilo de construção da estereolitografia
<b>BMC</b>	Moldagem de Carga Composta ou <i>Bulk Molding Compound</i>
<b>CAD</b>	Projeto Auxiliado por Computador ou <i>Computer Aided Design</i>
<b>CAE</b>	Engenharia Auxiliada por Computador ou <i>Computer Aided Engineering</i>
<b>CAM</b>	Manufatura Auxiliada por Computador ou <i>Computer Aided Manufacturing</i>
<b>CNC</b>	Comando Numérico Computadorizado ou <i>Computerized Numerical Control</i>
<b>FDM</b>	Modelagem por Fusão e Deposição ou <i>Fused Deposition Modeling</i>
<b>HSC</b>	Usinagem a alta velocidade ou <i>High Speed Cutting</i>
<b>PRFV</b>	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro
<b>RP</b>	Prototipagem Rápida ou <i>Rapid Prototyping</i>
<b>RRIM</b>	Moldagem por Injeção Reativa Reforçada ou <i>Reinforced Reaction Injection Molding</i>
<b>RT</b>	Ferramental Rápido ou <i>Rapid Tooling</i>
<b>RTM</b>	Moldagem por Transferência de Resina ou <i>Resin Transfer Molding</i>
<b>SL</b>	Estereolitografia ou <i>StereoLithography</i>
<b>SLA</b>	Máquina de Estereolitografia ou <i>StereoLithography Apparatus</i>
<b>SMC</b>	Moldagem de Placa Composta ou <i>Sheet Molding Compound</i>
<b>SRIM</b>	Moldagem por Injeção Reativa Estrutural ou <i>Structural Reaction Injection Molding</i>

<b>STL</b>	Formato padrão de arquivos para Prototipagem Rápida ou <i>StereoLithography Files</i>
<b>Tg</b>	Temperatura de transição vítrea
<b>UV</b>	Ultravioleta

## TERMINOLOGIA

<b>TERMO</b>	<b>SIGNIFICADO</b>
<b>Acelerador</b>	Elemento químico que acelera a cura de polímeros termoeestáveis.
<b>Contração</b>	Diferença percentual das dimensões do modelo em relação ao molde, após sua cura completa.
<b>Cura</b>	Reação de polimerização que solidifica uma matriz termofixa inicialmente em estado líquido.
<b>Ensimagem</b>	Conjunto de substâncias aplicadas sobre os filamentos de vidro durante a fibragem <sup>1</sup> , para protegê-los e promover uma melhor adesão à resina.
<b>Exotermia</b>	Calor liberado durante uma reação química.
<b>Iniciador</b>	Substância química responsável pela velocidade do endurecimento de certos grupos de resinas. Também denominado de <b>iniciador de reação</b> ou de <b>peróxido orgânico</b> . Erroneamente denominado de <b>catalisador</b> [4, 123].
<b>Tempo de cura</b>	Tempo necessário, a partir da aplicação, para que a matriz termofixa atinja as máximas propriedades termomecânicas indicadas pelos fabricantes.

---

<sup>1</sup> **Fibragem:** estiramento mecânico a alta velocidade de fios de vidro fundido.

- Tempo de endurecimento** Tempo necessário, a partir da aplicação, para que a matriz termofixa adquira estabilidade mecânica mínima para desmoldagem.
- Tempo de uso** Também conhecido como *Pot Life*, é o tempo decorrido desde o início da mistura de uma matriz termofixa e seu iniciador, até atingir um aumento de viscosidade que impossibilita sua aplicação.
- Tempo de gelificação** Também chamado Tempo de *Gel* ou *Gel Time*, é o tempo decorrido, a partir da mistura de uma matriz termofixa e seu iniciador, até que estes adquiram consistência entre líquido altamente viscoso e sólido.
- Tixotropia** Diferença de viscosidade entre uma massa móvel e uma massa estacionária. Quando se agita uma massa tixotrópica a sua viscosidade é reduzida por alguns instantes.
- Viscosidade** Mede a resistência de uma massa ao movimento. Quanto maior a viscosidade maior será a dificuldade para fluir.

## RESUMO

Os moldes são uma importante ferramenta para o setor do plástico reforçado termofixo. Contudo, este setor ainda apresenta dificuldades para obtê-los com precisão e rapidez. Uma possibilidade para reduzir tais limitações é através da prototipagem rápida e do ferramental rápido. Neste trabalho, o objetivo foi investigar o uso de um novo método de construção de moldes para este setor: o ferramental rápido por estereolitografia. O estudo desenvolveu moldes fabricados por estereolitografia e moldes produzidos através de processos consagrados de ferramental (tradicional e por usinagem), observando o aspecto visual. Na seqüência, através do processo de laminação manual, foram produzidas peças em material composto investigando o desvio-padrão das peças produzidas com cada molde e seus tempos de construção. Os resultados obtidos apresentaram menores tempos de confecção e maior precisão dos moldes dentro de uma dispersão aceitável para o processo de laminação manual empregado, independente do método de construção do molde.

## **ABSTRACT**

The mold is an important tool for reinforced plastic transformers. Nowadays, this industrial segment has difficulties to manufacture molds quickly and with accuracy. Rapid Prototyping and Rapid Tooling could be an option to reduce these limitations. In this work the objective was to investigate the use of rapid tooling by stereolithography to manufacture molds for glass fiber reinforced plastics (GFRP) industries. Molds made by stereolithography and molds produced through hallow tooling process (traditional and rough) were developed observing surface aspect. After this, parts were molded in composite material using the hand lay up process evaluating their standard deviation and manufacturing time. As a result of this study it was possible to manufacture molds with lower manufacturing time, higher accuracy and acceptable standard deviation, independent of the mold manufacturing technique.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. ENFOQUE E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Durante a Segunda Guerra Mundial ocorreram grandes avanços tecnológicos. As indústrias bélica e aeronáutica eram as que mais absorviam tecnologias, inventos e novos conhecimentos de diversos setores como, por exemplo, químico e siderúrgico. Em 1940 surgiu, dentre os avanços tecnológicos daquela época, um material composto denominado plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV).

Segundo Rezende e Botelho [50], após décadas de uso restrito em alguns setores da indústria, devido ao seu custo de obtenção, os compostos poliméricos estruturais, também denominados avançados, têm ampliado a sua utilização em diferentes setores da indústria moderna, com um crescimento de 5% ao ano. Mais recentemente, o setor do plástico reforçado tem buscado correlacionar suas elevadas propriedades e o seu desempenho estrutural com a redução de custo para tornar o seu segmento mais competitivo. Para isso, processos que permitem maior produtividade e qualidade a menores custos, passaram a ser investigados com maior intensidade. Com isso, o plástico reforçado tem ampliado mundialmente suas aplicações em diversas áreas de engenharia [18, 50, 51]. Com essa ampliação de mercados, o desenvolvimento tecnológico das empresas de pequeno e médio porte nacionais, fabricantes de peças de PRFV tem evoluído bastante, mas continua atrasado em comparação às empresas equivalentes estrangeiras.

Aproximadamente 80% dos processos produtivos instalados em empresas nacionais são de laminação manual e projeção à pistola, restando somente 20% dissolvidos entre semimecanizados (RTM, Moldagem a Vácuo etc.) e mecanizados (SMC, BMC, Laminação Contínua, Pultrusão etc.) [1]. Diante da necessidade de reverter este quadro frente à

competitividade industrial cada vez maior, melhorar a qualidade dos produtos e reduzir a velocidade de resposta ao mercado tornam-se cada vez mais importantes. Neste contexto, principalmente no que tange aos pequenos e médios transformadores do setor de PRFV, que utilizam o processo de laminação manual, são duas as principais dificuldades que devem ser resolvidas: o elevado tempo para a confecção dos moldes e sua imprecisão. Uma forma de minimizar estes problemas e que tem sido empregada para desenvolver protótipos em material composto de estruturas de veículos e aeronaves, é a usinagem CNC de blocos de material polimérico, tais como epóxi ou poliuretano, os quais apresentam cada um suas vantagens e limitações de custo e desempenho para a prototipagem [42]. No Brasil essa técnica também é utilizada, mas é mais intensa nas grandes corporações, pois nos pequenos e médios transformadores a modelagem manual ainda é o padrão, devido ao alto custo desta tecnologia se comparada à modelagem tradicional. Com exceção das possibilidades de usinagem CNC, todos os detalhes de um modelo ou molde ainda são executados artesanalmente. Por exemplo, um molde de PRFV seja ele aberto ou fechado, é obtido a partir de um modelo padrão, feito manualmente com gabaritos de controle e remoção de material até atingir a dimensão nominal. A construção de moldes abertos é mais simples do que a construção de moldes fechados. Neste último caso, a construção da cavidade, do ponto de injeção, dos respiros e das bordas de fechamento através do processo tradicional, é complicada e imprecisa.

Uma outra alternativa para minimizar as dificuldades mencionadas anteriormente pode ser a utilização da tecnologia de prototipagem rápida (RP) e ferramental rápido (RT) por estereolitografia (SL). O ferramental rápido vem sendo aplicado, principalmente, na confecção de moldes protótipo por SL para o processamento de termoplásticos e ceras [8, 9, 13, 16], no entanto, essa tecnologia também poderia ser avaliada, visando otimizar o processo de desenvolvimento de moldes de PRFV [23, 24]. A partir de um protótipo (modelo padrão) construído pela tecnologia de prototipagem rápida, um ou mais moldes de PRFV poderiam ser construídos copiando sua geometria através da tecnologia denominada de ferramental rápido

ou mais rapidamente ainda, confeccionar o próprio molde empregando a tecnologia de prototipagem rápida.

Embora a tecnologia do PRFV tenha sua maior utilização na confecção de peças de grande volume, um percentual próximo de 20% é utilizado para confeccionar pequenas e médias peças de material composto [1, 18, 47, 62]. Diante disso, um estudo mais aprofundado, empregando a tecnologia de prototipagem rápida para a produção de peças em PRFV de médio volume, em torno de 500 mm x 500 mm x 500 mm, torna-se justificável.

Acredita-se que com a disseminação da tecnologia de RP, seus custos se tornem menores e possivelmente seus volumes úteis de trabalho possam aumentar, viabilizando suas aplicações para moldes de maiores dimensões. Portanto, com os atuais recursos dos sistemas CAD, da usinagem CNC e da estereolitografia, é esperado que modelos, moldes e peças de PRFV, possam ser obtidos mais rapidamente e com melhor precisão dimensional e de forma, sem utilizar processos artesanais de construção, geralmente demorados e de baixa exatidão.

## 1.2. OBJETIVOS

Com base no exposto, este trabalho tem como **objetivo geral** investigar a possibilidade de **aplicação da estereolitografia, na fabricação de moldes para a produção de peças laminadas em plástico reforçado com fibra de vidro**, sob moldes abertos, utilizando o processo de laminação manual.

Por ser um primeiro trabalho no CIMJECT relacionado com o setor de PRFV, tem como **objetivos específicos**:

1. Efetuar uma revisão bibliográfica sobre a tecnologia do plástico reforçado com fibra de vidro buscando:

- descrever sucintamente os principais materiais e processos deste setor, apresentando suas características, propriedades e aplicações;
  - classificar sistematicamente os processos e os tipos de moldes do segmento do PRFV;
  - contribuir com uma nomenclatura em português para o tema pesquisado.
2. Desenvolver estudos de caso visando comparar moldes confeccionados pela tecnologia de estereolitografia, usinagem por fresamento CNC e pelo processo tradicionalmente usado pelo setor de PRFV, bem como comparar peças em PRFV produzidas com estes moldes.

### 1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho foi organizado em seis capítulos. A seguir descrevem-se sumariamente seus conteúdos, excetuando a introdução.

- **Capítulo 2.** Apresentam-se os **fundamentos da tecnologia do plástico reforçado com fibra de vidro**, delineando sobre seus materiais, sua forma tradicional de construção de moldes e os processos mais utilizados por este segmento de indústria.
- **Capítulo 3.** Neste capítulo, faz-se uma **sistematização dos fundamentos importantes para a obtenção de peças de PRFV empregando as tecnologias de RP e RT**, desde o projeto do objeto em CAD até a produção da peça, dando ênfase à construção do molde através da estereolitografia.
- **Capítulo 4.** Segundo as orientações do Capítulo 3, este capítulo **descreve o desenvolvimento de estudos de caso**, bem como seus objetivos específicos, onde moldes fabricados pelo processo tradicional, por usinagem e por estereolitografia, foram testados em ensaios práticos, utilizando o processo de laminação manual de plástico reforçado com fibra de vidro, produzindo diferentes tipos de peças em

material composto. A concepção dos moldes pela técnica tradicional e por usinagem foi realizada para comparar com maior abrangência os recursos da prototipagem rápida (RP) e do ferramental rápido (RT) por estereolitografia (SL).

- **Capítulo 5.** Os resultados dos estudos de caso são apresentados e discutidos neste capítulo, bem como possíveis soluções para as limitações observadas em cada uma das alternativas de concepção dos moldes.
- **Capítulo 6.** Com base nos resultados obtidos dos estudos de caso, neste último capítulo são apresentadas **considerações sobre o uso da estereolitografia na fabricação direta e indireta de moldes para a indústria do plástico reforçado termoestável**. Adicionalmente, é discutido como este segmento pode se beneficiar desta tecnologia. Além disso, são propostas sugestões para novas pesquisas relacionadas ao assunto pesquisado.

## 2. TECNOLOGIA DO PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (PRFV)

### 2.1. AS FIBRAS DE VIDRO

O PRFV enquadra-se na categoria de material composto. Trata-se de uma combinação heterogênea de dois ou mais materiais (elementos de reforço e aglutinantes), diferenciando entre si em forma ou composição. Esta combinação resulta em um material que maximiza propriedades de desempenho específicas [11, 45]. Por serem materiais combinados, podem ser projetados para proporcionar várias propriedades incluindo resistência à tensão, à flexão, ao impacto e à compressão, e, diferentemente dos materiais tradicionais, podem ter suas resistências orientadas para atingir requisitos específicos de projeto. As fibras de vidro, responsáveis por essa função, atuam como elementos de reforço das resinas (poliéster, vinílicas, epóxi etc.), melhorando consideravelmente suas propriedades mecânicas, principalmente a resistência ao impacto e o módulo de elasticidade. São comercializadas basicamente na forma de **fios contínuos**, **manta** (fios de vidro emaranhados), **tecido** (obtido pela tecelagem bidirecional do roving) ou **moídas**, como mostra a figura 1 [1].

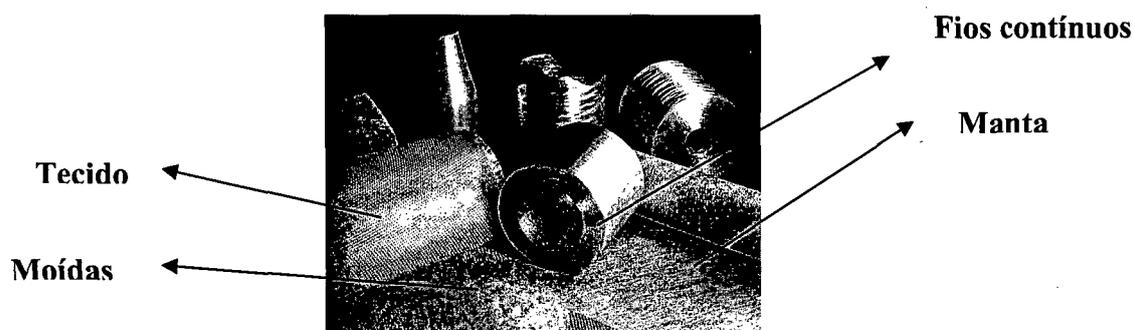


FIGURA 1 - Tipos de fibras de vidro [25].

As fibras de vidro são produzidas a partir do processo denominado de fibragem. Neste processo (ver figura 2), o vidro fundido escoar por uma placa com diversos orifícios. Após escoar pelos orifícios, os fios de vidro são estirados mecanicamente a alta velocidade e agrupados por um cilindro coletor. Os cilindros subseqüentes regulam a coleta e enrolam os fios de vidro em bobinas. Durante o processo, um sistema pneumático agrega aos fios de vidro um tratamento químico denominado de ensimagem<sup>2</sup>. O resfriamento do vidro dá-se, principalmente, pela perda de energia térmica para o ambiente e as propriedades mecânicas são agregadas ao vidro no instante do estiramento. Dessa maneira o vidro fundido é transformado em fibras de vidro contínuas. Estas fibras podem ser submetidas a processos de entrelaçamento para incrementar sua rigidez estrutural. A figura 3 ilustra possíveis microestruturas de tecidos de fibra de vidro. Tais disposições são executadas através de máquinas, no intuito de orientar as fibras para proporcionar resistência mecânica otimizada na direção do esforço [3, 45, 51].

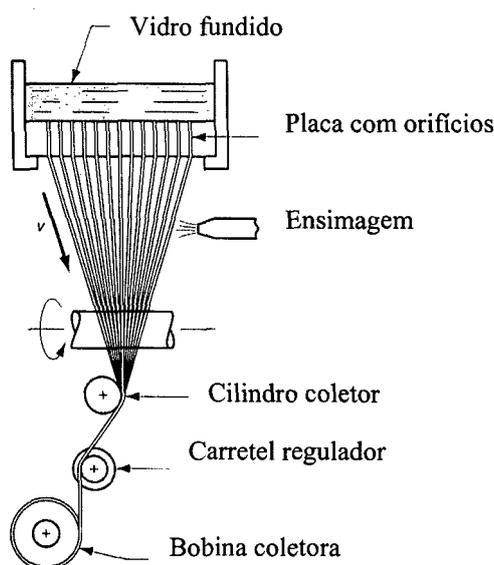


FIGURA 2 - Processo de fibragem das fibras de vidro [45].

<sup>2</sup> **Ensimagem:** tratamento químico que agrega propriedades adesivas aos fios de vidro, para permitir a ancoragem da resina.

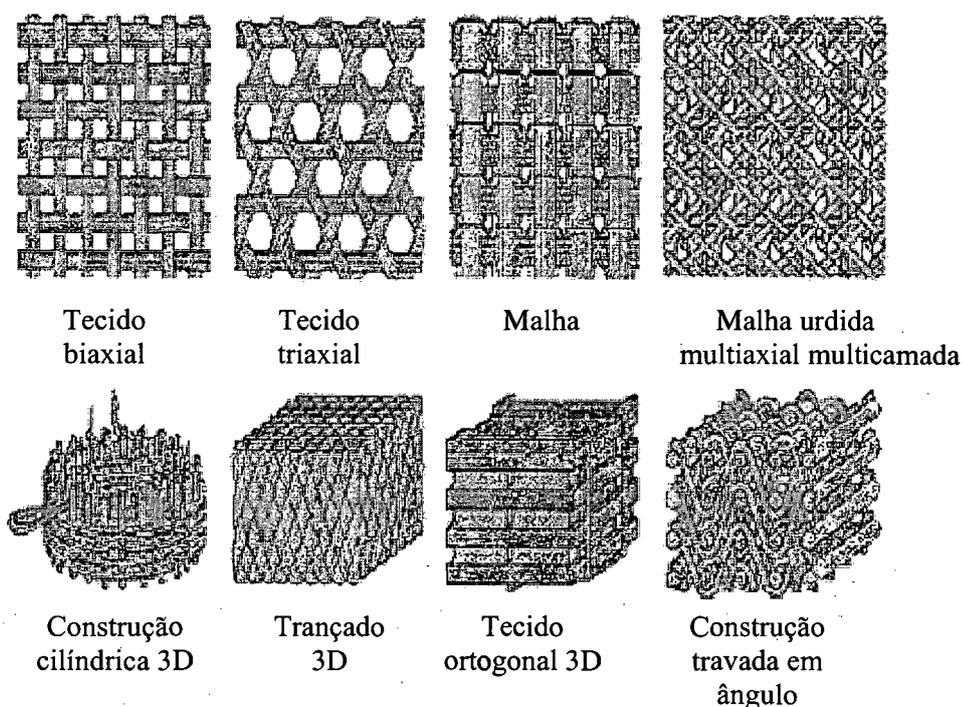


FIGURA 3 - Microestrutura de tecidos de fibra [11].

## 2.2. AS RESINAS

Inicialmente o termo resina era reservado a certas substâncias naturais, de origem vegetal e de aparência vítrea. Com a similaridade de determinados produtos sintéticos, geralmente no estado intermediário entre cristalino e amorfo, tais resinas naturais deram origem ao termo resinas sintéticas ou simplesmente resinas [4]. Também conhecidas como plásticos termofixos, são materiais encadeados desordenadamente e suas moléculas se mantêm unidas por ligações atômicas. Para estes plásticos passarem do estado líquido para o estado sólido é necessário que ocorra uma reação química entre a resina e o iniciador. Essa reação (irreversível) é exotérmica e conhecida como reação de cura [2]. As resinas têm a função de envolver o composto, transferir o carregamento para as fibras, mantê-las orientadas e protegê-las das intempéries e o iniciador, de iniciar o mecanismo de solidificação da resina.

Existem diversos tipos de resinas disponíveis comercialmente e para se confeccionar um molde de PRFV são empregadas, basicamente, as mesmas resinas utilizadas para construir

um modelo (quando é o caso) ou fabricar uma peça. Dentre as resinas mais utilizadas, destacam-se as de poliéster insaturado e as resinas epóxi, utilizadas na pesquisa e que serão descritas a seguir.

### 2.2.1. RESINAS DE POLIÉSTER INSATURADO

Apresentam-se na forma de líquidos incolores ou coloridos translúcidos e numa ampla gama de viscosidades. Sua composição básica engloba um polímero insaturado, um monômero insaturado e um inibidor<sup>3</sup>. Essas resinas endurecem a temperatura ambiente ou, mais rapidamente, quando lhes é fornecido calor e podem ser moldadas ou estratificadas<sup>4</sup> sem pressão ou com pressões muito reduzidas (inferiores a 10 kg/cm<sup>2</sup>). Esse grupo de resinas apresenta um mecanismo de cura com duas etapas distintas: na primeira ocorre a gelificação<sup>5</sup> da resina e na segunda o seu endurecimento. O tempo de duração destas etapas pode variar de minutos a horas e alcançar temperaturas de até 240 °C devido à intensidade exotérmica da reação química [4, 19, 21, 28, 34, 52, 60]. Na construção do molde é importante manter uma baixa exotermia, pois o calor gerado durante a cura provoca a expansão molecular da resina e quanto maior sua expansão, maior sua contração após seu resfriamento, ocasionando alterações dimensionais no molde [30, 31, 32].

Segundo D'Arsié [4], a temperatura gerada na reação de um sistema<sup>6</sup> termofixo é uma função entre a velocidade de polimerização e a velocidade de condução de calor mais as perdas causadas por irradiação. Ou seja, a quantidade total de calor liberado durante a cura,

---

<sup>3</sup> **Inibidor:** substância química adicionada à resina para prolongar seu tempo de armazenamento sob estado líquido e controlar o ciclo de polimerização.

<sup>4</sup> **Estratificação:** ato de formação de uma peça de PRFV, qualquer que seja o procedimento utilizado. Também denominado de laminação.

<sup>5</sup> **Gelificação:** passagem do estado líquido de uma resina, para o aspecto de um *gel* pegajoso.

<sup>6</sup> **Sistema:** na química, sistema significa uma reação química entre produto e reagente.

por uma determinada quantidade de resina, depende do seu grau de reatividade<sup>7</sup> e é uma constante para cada formulação de resina poliéster.

Além da temperatura e da quantidade de iniciador, outros fatores também influem sobre o tempo de cura das resinas como, por exemplo, o volume de resina utilizado (maior massa de resina menor tempo de gelificação<sup>8</sup>), presença de certos agentes que podem atuar como inibidores do processo normal de endurecimento, tais como, determinados aditivos e desmoldantes, dentre outros.

As resinas poliéster contraem com a cura. Como a gama de resinas poliéster disponíveis é muito grande, os valores dessa contração variam nas literaturas consultadas, de 2% a 6% em volume. As peças projetadas devem sempre levar em conta essa contração [3, 4, 24]. Segundo os fabricantes de resinas poliéster, essa alta dispersão dos percentuais de contração tem reduzido bastante [7].

### 2.2.2. RESINAS EPÓXI

As resinas epóxi também se apresentam no estado líquido e com diversas viscosidades. Utilizam um endurecedor<sup>9</sup> (geralmente 10% em peso) para realizar a cura da resina e possuem algumas propriedades superiores às resinas poliéster como, por exemplo, baixa contração (menos de 1%), alta adesão sobre outros materiais, inclusive metais, vidros e outros plásticos, melhores propriedades mecânicas e resistência ao desgaste abrasivo. Embora de custo superior, permitem construir moldes de durabilidade geralmente triplicada se comparadas a moldes de poliéster e resistem a temperaturas próximas a 200 °C sob serviço constante [4, 14, 46]. A tabela 1 mostra um referencial das principais propriedades desta família de resinas.

---

<sup>7</sup> **Reatividade:** grau de insaturação dos componentes de uma resina. Depende de sua composição química e pode ser medido através de gráficos de curvas exotérmicas.

<sup>8</sup> **Tempo de Gelificação:** tempo decorrido, a partir da mistura de um polímero termofixo e seu iniciador, até que este adquira consistência entre líquido altamente viscoso e sólido.

<sup>9</sup> **Endurecedor:** substância responsável pela cura das resinas epóxi.

TABELA 1 - Propriedades orientativas para resinas epóxi com reforço de fibra de vidro.

Propriedades após a cura	Norma	A 150 °C
Resistência à tração (kg/mm <sup>2</sup> )	VSM-77101	16-18
Resistência à pressão (kg/mm <sup>2</sup> )	VSM-77102	19-21
Resistência à flexão (kg/mm <sup>2</sup> )	VSM-77103	23-25
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	VSM-77109	1,3-1,4
Coefficiente de dilatação térmica linear (10 <sup>-6</sup> °C)	VSM-77110	20-30
Modulo de elasticidade (kg/mm <sup>2</sup> )	VSM-77111	1.150-1.300
Dureza Shore D (Unidades)	ISO 868	85-90
Estabilidade dimensional: Martens (°C)	Din-53458	140-150 (1)
Métodos de aplicação		Laminação manual Moldagem a vácuo

Fonte: Ciba Especialidades Químicas Ltda. FAB/IV - SET / 99 – 2000.

(1) Tg de uso intermitente até 180 °C.

## 2.3. PRODUTOS COMPLEMENTARES

Esse grupo de produtos engloba basicamente as **cargas** (*fillers*), os **aditivos** e os **desmoldantes**, produtos comercialmente disponíveis que facilitam o processamento e melhoram certas propriedades do PRFV.

### 2.3.1. CARGAS

As **cargas** geralmente são pós que adicionados à resina a ser empregada no PRFV, melhoram determinadas propriedades como, por exemplo, dureza, resistência mecânica e resistência ao impacto. Contribuem também para minimizar os custos por unidade moldada, já que ocuparão um percentual do espaço que seria preenchido com resina pura (mais cara) e para reduzir a contração dos moldes e das peças moldadas, uma vez que são quimicamente inertes à reação de cura.

### 2.3.2. ADITIVOS

Uma família bastante abrangente de produtos químicos que visam facilitar, principalmente, o processamento dos plásticos reforçados. Os principais são os **aditivos desaerantes** que eliminam bolhas de ar aprisionadas no *gelcoat*<sup>10</sup> e no laminado, os **aditivos umectantes** que facilitam a impregnação das fibras de vidro pela resina de laminação, suprimindo a barreira de ar existente entre os fios de vidro e a resina, os **aditivos modificadores de reologia (tixotropia)** que dão dupla característica aos *gelcoats* e resinas: fluidez quando em movimento e estabilidade quando inerte.

### 2.3.3. DESMOLDANTES

Todo material apresenta na sua superfície uma energia de adesão denominada energia de superfície [12]. Em um molde, se essa energia não for minimizada, a peça a ser fabricada terá forte adesão ao molde inviabilizando a desmoldagem e danificando o molde. O que permite essa redução é a película de **desmoldante** existente entre a peça e o molde, a qual gera uma superfície de baixa adesão entre eles.

No caso de **desmoldantes de sacrifício** como, por exemplo, ceras à base de carnaúba, essa película não é homogênea e requer nova aplicação a cada desmoldagem, onerando o ciclo produtivo sob vários aspectos: tempo improdutivo, adesão do desmoldante na peça, mão-de-obra acentuada, durabilidade do molde reduzida etc.

Recentemente disponíveis no mercado nacional, há os **desmoldantes** denominados **semipermanentes** (polímeros reativos dissolvidos em solventes ou água) que aderem à superfície do molde formando uma camada de baixa adesão, proporcionando dessa maneira desempenho superior aos desmoldantes de sacrifício e apresentando várias vantagens como,

por exemplo, múltiplas desmoldagens por aplicação, não dissolvem em contato com o monômero de estireno presente na resina e no *gelcoat*, não é transferido ao produto moldado, aumentam a vida útil do molde, somente são removidos da superfície do molde por abrasão, podem ser aplicados com pistola a ar comprimido, menor custo por unidade moldada etc. [10, 14].

## 2.4. PROPRIEDADES DO PRFV

Os plásticos reforçados são consumidos por vários segmentos de mercado e transformados em diversos produtos. Quando baixo peso, resistência mecânica, química, térmica e durabilidade são requisitos do projeto de um produto, os compostos proporcionam, na maioria das aplicações, um desempenho elevado e devem participar do processo de seleção, junto com materiais consagrados como aço, concreto, alumínio, madeira e outros [4, 45].

Seus valores de resistência à tração ( $18 \text{ kg/mm}^2$ ) combinados com a possibilidade de orientar as fibras segundo a direção de maior esforço, permitem alcançar relações **resistência / peso** bastante superiores à do aço, ligas de alumínio, algumas ligas especiais e outros metais e utilizando-se processos mais elaborados seu custo passa a ser relevante [4, 50, 63]. A indústria aérea, por exemplo, projeta seus aviões com a máxima resistência mecânica e o mínimo peso possível, pois são propriedades que otimizam seus produtos. Da mesma forma atua a indústria de carros de Fórmula 1 e de passeio. Embora esses setores costumem usar mais a fibra de carbono como reforço da matriz polimérica, não deixam de fazer o mesmo também com o PRFV. Um material composto pode substituir até mesmo um conjunto de componentes, metálicos ou não, em diversas aplicações, permitindo versatilidade no projeto de peças complexas e propriedades específicas em pontos localizados do componente, como é o caso das atuais carcaças de caminhões e ônibus.

---

<sup>10</sup> *Gelcoat*: Camada sem reforço de fibra que gera a superfície de modelos, moldes e peças de PRFV.

Os materiais compostos são versáteis. Sua baixa condutividade térmica, por exemplo, pode ser otimizada pela inserção de elementos condutores de calor durante sua composição tais como: grafite ou alumínio em pó, pó de ferro etc. A versatilidade do PRFV permite que determinados processos possam fabricar suas peças da mesma maneira que confeccionam seus moldes, utilizando basicamente as mesmas ferramentas e materiais.

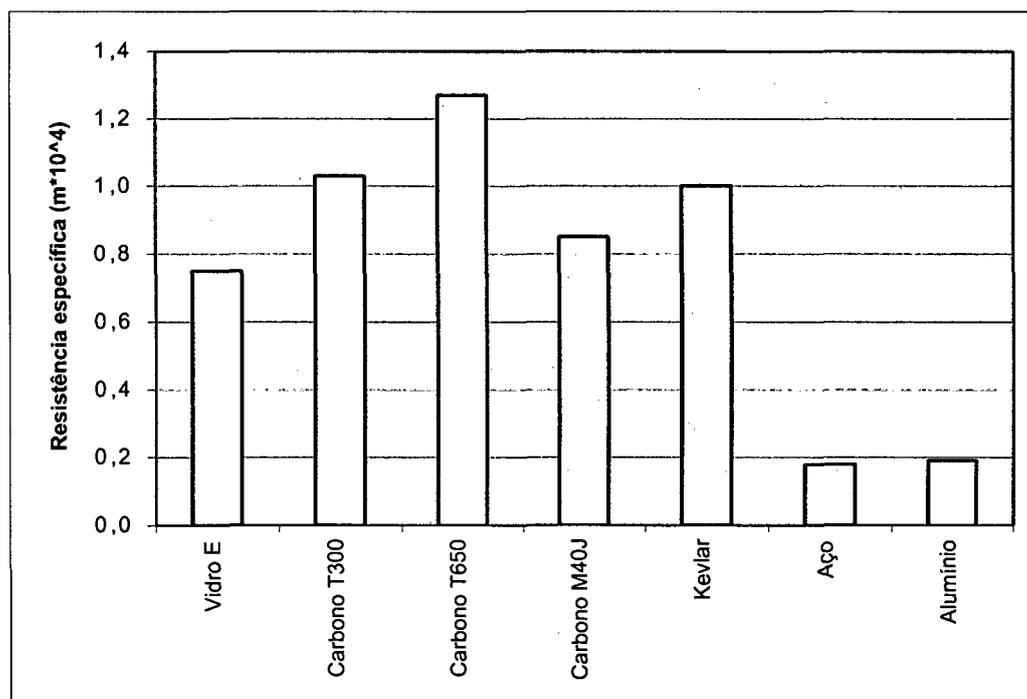
Como vantagens, podem ser enrijecidos quando e onde requerido, uniões e articulações são eliminadas ou simplificadas. Como limitações, permitem somente uma moldagem; os métodos de projeto e manufatura ainda não são bem explorados, nem desenvolvidos; se um dos elementos do composto é suscetível a solventes do meio, o composto não pode ser usado, dentre outras.

Os compostos já ocupam diversos segmentos de mercado, como mostra a tabela 2. No que tange ao PRFV, existem diversas aplicações registradas deste material composto [15] e as suas características destacam seu uso, principalmente, quando são necessárias elevadas propriedades, aliadas a baixo peso (ver figura 4). A seguir citam-se as principais características deste material: resistência à corrosão, à combustão, às altas temperaturas, às intempéries e à hidrólise; baixo peso, reduzindo os custos de transporte, manuseio e instalação; estabilidade dimensional; resistência ao impacto; durabilidade elevada; facilidade para moldar geometrias grandes e pequenas, simples ou complexas, possibilitando a redução do número de partes de um produto, diminuindo os tempos e custos de produção e de projeto; permite acabamento superficial elevado; baixa condutividade elétrica e térmica.

TABELA 2 - Setores que utilizam o PRFV [70].

Tipo de setor	Aplicação
Agrícola	Reservatórios de sementes e adubos;
Automotivo	Chassis e carcaças;
Elétrico	Casas de motores de partida, contactores de cabos elétricos;
Equipamentos esportivos	Skis, varas de pescar, tacos de <i>golf</i> , estruturas de motos e bicicletas.
Médico	Próteses, cadeiras de roda;
Náutico	Iates, barcos, lanchas esportivas.

Quanto maior a quantidade de fibra em uma peça, maior é sua resistência mecânica. Os reforços unidirecionais são os que permitem maior concentração de reforço por volume e apresentam o maior módulo, entretanto suportam os esforços somente em uma direção. Já os multidirecionais suportam esforços isotropicamente, porém a um módulo menor [3].

FIGURA 4 - Resistência específica<sup>11</sup> a tração de diferentes materiais.

Fonte: WTEC Hyper-Librarian publicado em abril de 1994.

## 2.5. CONSTRUÇÃO TRADICIONAL DE MOLDES DE PRFV

Geralmente o molde feito de PRFV é copiado de modelos de argila, gesso, madeira, poliuretano, do próprio PRFV, ou de peças já existentes, fazendo uso de procedimentos manuais. As etapas da construção tradicional de moldes de PRFV englobam **projeto, modelo e molde** [3]. A peça é projetada com todos os requisitos funcionais e de acabamento, em seguida é elaborado o modelo que reproduz fielmente os requisitos de projeto e, finalmente, sobre esse modelo é laminado o molde de PRFV, que irá copiar todos os seus detalhes. Na construção do modelo, a habilidade e o conhecimento do modelista são muito importantes, visto que as etapas de construção são manuais e demandam tempo. Por sua vez, a construção do molde também exige conhecimentos específicos para concebê-lo com exatidão [3, 4, 5]. A seguir descrevem-se as etapas usuais para a construção do modelo e em seguida, do molde de PRFV.

### 2.5.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO

O modelo serve como padrão para a confecção do molde. Como o molde irá reproduzir o formato do modelo, é necessário construí-lo o mais próximo possível da forma desejada.

Existem diversas técnicas de construção de modelos que partem de blocos de gesso, madeira (ver figura 5) ou outros materiais, para através da remoção de material chegar à forma final, porém com a disseminação de materiais expansíveis como o poliuretano, tornou-se prática comum realizar o modelo de uma maneira um pouco mais rápida se comparado às anteriores. Neste caso, inicialmente constrói-se uma caixa emoldurada contendo a estrutura

---

<sup>11</sup> **Resistência específica:** resistência mecânica dividida pelo peso do material correspondente.

interna do modelo e em seguida preenche-se a caixa com poliuretano expandido. Abre-se a moldura, trabalha-se em seu formato, envolve-se todo o modelo por uma camada de PRFV para evitar distorções por ação da umidade e finaliza-se vaporizando sobre essa última camada de PRFV uma película de *gelcoat*. Sobre o *gelcoat* efetuam-se as etapas de acabamento superficial, como por exemplo lixamento e polimento de toda a superfície do modelo. Indiferentemente da técnica selecionada, busca-se obter um elevado acabamento superficial do modelo e sobre esta superfície aplica-se o agente desmoldante apropriado [22, 28, 33].

A partir desse momento a etapa de construção do modelo está finalizada e pode-se iniciar a laminação do molde sobre ele da forma descrita no item a seguir.



FIGURA 5 - Sequência de construção de um modelo em madeira.

### 2.5.2. CONSTRUÇÃO DO MOLDE

Presumindo-se que o **modelo** já esteja construído e munido de agente desmoldante adequado, vaporiza-se sobre este, em camadas e via pistola, uma espécie de “tinta” (constituída de resina e aditivos denominada de *gelcoat*), até que toda sua superfície esteja coberta (ver figura 6).

Costuma-se diferenciar as colorações das camadas para identificar o desgaste do molde e aguardar a cura completa entre cada camada aplicada, prevenindo assim ondulações oriundas da exotermia entre camadas. O *gelcoat* utilizado deve suportar temperaturas em torno de 400°C e ser resistente ao aparecimento de trincas superficiais, já que o processo de moldagem desgasta a camada de *gelcoat*. Esse desgaste ocorre porque, além do atrito durante a

desmoldagem, a reação de cura da peça moldada libera calor e voláteis que agredem o molde química e termicamente [16]. Em seguida inicia-se a adição das camadas de reforço de fibra de vidro com resina, que irão se unir ao *gelcoat* gerando uma espessura (casca) do **molde** suficientemente rígida. Estas camadas costumam ser depositadas com elevada concentração de fibra (50% ou mais) e são executadas, em intervalos de tempo, aguardando o resfriamento de cada camada aplicada para depositar a camada seguinte. Estes procedimentos contribuem para reduzir a exotermia e a contração presente na cura de resinas poliéster (se o molde for feito com resina epóxi, a contração é menor), que poderia “marcar” a superfície do molde [4].

Concluídas estas etapas, inicia-se o nervuramento do molde para estruturá-lo, garantir sua estabilidade dimensional e confeccioná-lo de forma leve, rígida e barata. As nervuras podem ser construídas com o próprio PRFV envolvendo, por exemplo, núcleos de madeira, poliuretano ou semicírculos de papelão [5].

Costuma-se deixar o molde em repouso durante aproximadamente 7 dias ou realizar uma pós-cura<sup>12</sup> para permitir que as ligações atômicas residuais sejam concluídas, prevenindo alterações dimensionais e maximizando suas propriedades termomecânicas antes de introduzi-lo em linha de produção até o fim de sua vida [3, 4, 5].

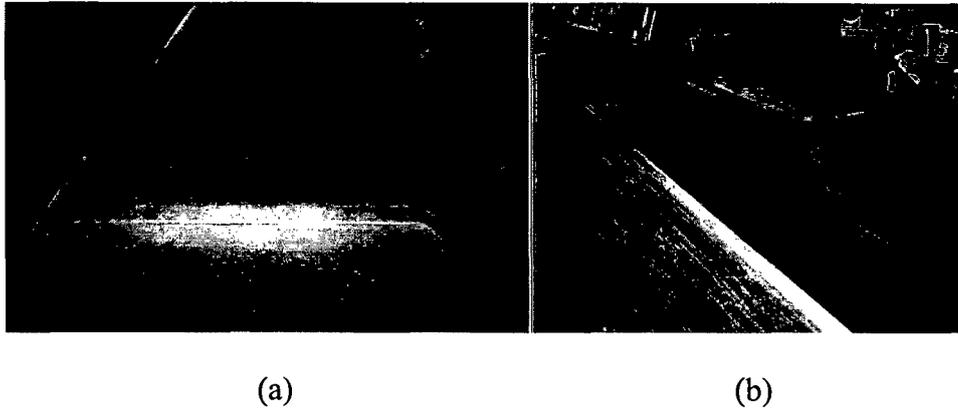
Se a camada de *gelcoat* do molde é danificada, sua vida útil é drasticamente reduzida. Por isso, é correto não realizar nenhum acabamento posterior sobre essa superfície até que seja necessário e, mesmo assim, limitando a operações de polimento e reaplicação de agente desmoldante.

Se o molde tiver grandes dimensões, pode se agregar ao mesmo suportes para facilitar sua movimentação. O passo seguinte é separar o **molde** do **modelo** (desmoldagem). Nessa etapa é muito comum a utilização de ar comprimido, pinos extratores, gelo etc. Por último, deve-se realizar os acabamentos finais no molde que são a remoção de eventuais resíduos e a aplicação do agente desmoldante apropriado. A tabela 3 sumariza estas etapas.

---

<sup>12</sup> **Pós-cura:** tratamento térmico que aumenta a reticulação da estrutura molecular de um sistema, tornando-o mais estável e rígido, térmica e mecanicamente.

Tendo o molde e conservando-o adequadamente através de manutenções periódicas, o mesmo poderá gerar centenas de peças. Se o molde for confeccionado em resina epóxi a durabilidade geralmente triplica se comparada a moldes de resina poliéster [14].



**FIGURA 6** - Modelo após ter sido pulverizado com camadas de *gelcoat*.

## 2.6. CLASSIFICAÇÃO DOS MOLDES DE PRFV

A principal ferramenta do setor do PRFV é o molde. Através dele são transformados todos os componentes que essa indústria fornece para outros mercados. Como o PRFV é utilizado por diversas indústrias transformadoras e cada uma delas faz uso de moldes para fabricar suas peças, existe então, uma grande quantidade de moldes nesse setor. Para facilitar a análise, os moldes serão classificados em **abertos** e **fechados** seguindo a classificação sugerida por Groover [45] e mostrada na figura 7.

TABELA 3 - Etapas da construção tradicional de moldes em PRFV [5].

Fases de construção de moldes em PRFV	
1.	Aplicar gelcoat com pistola.
2.	Aplicar uma ou duas camadas de manta fina ( $225 \text{ g/m}^2$ ) com alto teor de vidro (50% em peso). Aguardar a cura completa entre as camadas.
3.	Aplicar diversas camadas de manta intermediária ( $450 \text{ g/m}^2$ ) com alto teor de vidro, até atingir a espessura desejada. Aguardar resfriamento da reação exotérmica de polimerização entre camadas.
4.	Realizar o nervuramento do molde (rigidez estrutural).
5.	Acoplar suportes de movimentação, se necessário.
6.	Realizar a pós-cura.
7.	Desmoldar o molde do modelo.
8.	Aplicar desmoldante e iniciar produção.

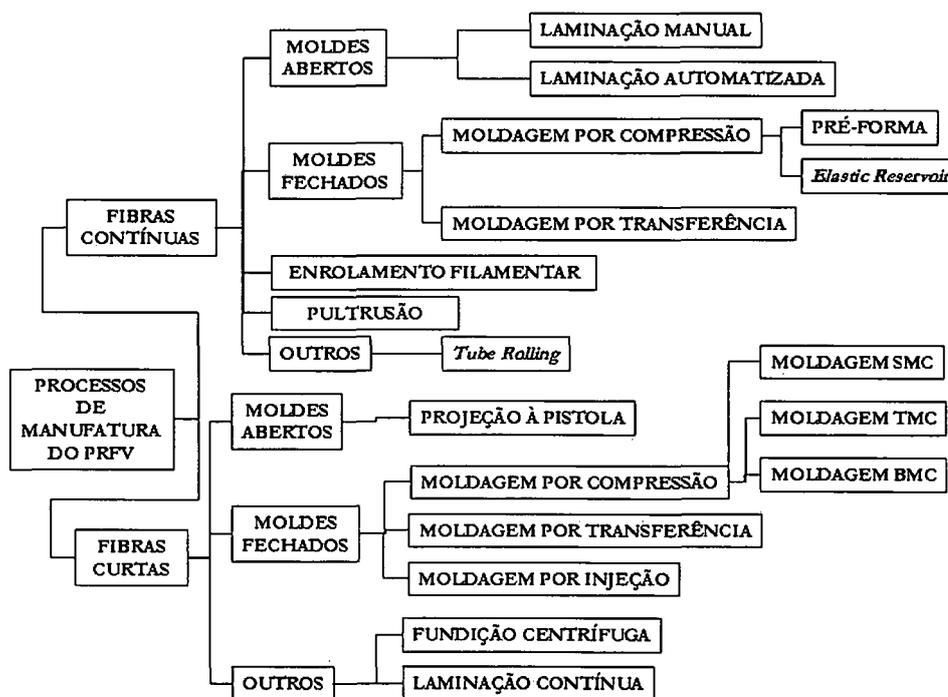


FIGURA 7 - Classificação dos tipos de moldes de PRFV [45].

### 2.6.1. MOLDES ABERTOS

Os moldes abertos têm a característica de permitir ao componente moldado reproduzir a superfície de somente um de seus lados, normalmente, o externo. O outro lado da peça apresenta acabamento ruim, pois o reforço de fibra de vidro aparece. Procura-se conceber a peça de forma que este lado, sempre que possível, fique interno ao produto, apresentando do lado externo a face “lisa” que tem funcionalidade não só estética, mas também de resistência à corrosão, às intempéries e a fluidos, ácidos ou não. Uma desvantagem apresentada pelos processos que utilizam moldes abertos, é que durante a etapa de cura da resina ocorre a emissão de monômero de estireno. Trata-se de um elemento químico poluente, o que força cada vez mais o emprego de processos via moldes fechados, uma vez que aprisionam os voláteis até o término do processo de cura da peça [45, 48].

### 2.6.2. MOLDES FECHADOS

Os moldes fechados permitem moldar peças de forma que todas as superfícies apresentam baixa rugosidade, porém se a peça não contém uma camada de *gelcoat* ou não é pintada, as fibras de vidro aparecem na superfície da peça apresentando um aspecto esteticamente não-uniforme. Por isso, o *gelcoat* também tem importância nesse tipo de molde. Entretanto os ciclos de moldagem aumentam, visto que será necessário aguardar o *gelcoat* atingir o tempo de gelificação para acomodar o reforço de fibra de vidro dentro do molde, fechá-lo e injetar ou derramar a resina, dependendo do processo. Quando se utilizam moldes fechados, a produtividade do setor de PRFV aumenta bastante (se comparado a moldes abertos) e a tolerância dimensional da peça é reduzida.

Outra variante é não aplicar *gelcoat* e pintar a peça após sua extração. Em função da aderência das tintas, pode ser necessária uma camada inicial de *primer*<sup>13</sup> sobre toda a superfície, antes da pintura. As tintas à base de poliuretano proporcionam superfícies de alto brilho e boa resistência química [20, 22, 45].

## 2.7. PROCESSOS DE MANUFATURA DO PRFV

Uma das grandes barreiras no uso de materiais compostos é a utilização de um eficiente processo de produção em massa. Técnicas de manufatura tradicional como a de laminação manual, são lentas e de trabalho intensivo e mesmo processos mais mecanizados, como por exemplo o de enrolamento filamental, permitem somente a construção de geometrias relativamente simples. Por outro lado, processos como a moldagem por transferência de resina (RTM), moldagem de carga composta (BMC) e a moldagem por injeção reativa estrutural (SRIM) têm o potencial para produzir desde dezenas até centenas ou milhares de peças [36, 61].

A tabela 4 representa o cenário mundial dos processos utilizados no segmento do PRFV e uma tendência a ser implantada no mercado nacional.

**TABELA 4 - Investimento em processo.**

Método de produção	Quantidade mínima	Custo do equipamento	Custo do ferramental	Taxa de produção
Autoclave	100 a 1.000	Baixo	Baixo	Alta
Moldagem por compressão	1.000 a 10.000	Moderado	Baixo	Alta
Enrolamento filamental	100 a 1.000	Moderado	Moderado	Moderada
Laminação manual	100 a 1.000	Baixo	Baixo	Baixa
Pultrusão	1.000 a 10.000	Alto	Alto	Alta
RTM	100 a 1.000	Baixo a Moderado	Baixo a Moderado	Alta

Fonte: WTEC Hyper-Librarian publicado em abril de 1994.

<sup>13</sup> *Primer*: promotor de aderência.

Existem vários processos para fabricar peças de PRFV. Os processos RTM e moldagem a vácuo não estão amplamente difundidos no país, porém sua utilização está crescendo bastante [1, 15, 47, 61]. Os processos comumente utilizados pela indústria nacional são:

### **2.7.1. LAMINAÇÃO MANUAL OU POR CONTATO (*Hand lay up*)**

A Laminação por contato assemelha-se muito ao procedimento de construção do molde já descrito no item 2.5.2.. Caracteriza-se por ser artesanal e de baixa produção, mas permite produzir peças de grandes dimensões. A laminação ou estratificação é o processo de adição sucessiva de camadas de **resina e fibra de vidro** que geram a espessura desejada na peça. Inicialmente se aplica a resina e depois a manta de fibra de vidro, manualmente. Em seguida se removem as bolhas de ar compactando essa mistura com roletes ou pincel (ver esquema da figura 8). Esta operação fará a resina impregnar no reforço de fibra de vidro e deve ser feita do centro para as bordas do molde. Regiões que serão mais solicitadas podem ter pedaços de manta posicionados convenientemente pelo laminador (pessoa).

O *gelcoat* (camada de superfície) normalmente é apostado antes de qualquer camada de reforço e pode ser aplicado com pincel, rolo de pintura ou preferencialmente à pistola, pois tanto o rolo como o pincel deixam marcas que comprometem o acabamento superficial. Sua espessura pode variar entre 0,3 e 0,6 mm e é obtida por uma ou mais camadas de aplicação do mesmo. Sua cura inicia imediatamente após sua formulação e quando atinge seu estado de gelificação (estado de toque), pode receber a resina de laminação sem reagir quimicamente com o monômero de estireno nela contido. O estado de toque (identificado tocando o *gelcoat* com o dedo) é importante, pois não é aconselhável iniciar a laminação antes do *gelcoat* atingir

consistência quase sólida. Isso porque o monômero de estireno contido na resina pode danificar a camada de *gelcoat* insuficientemente curada ou pouco espessa.

A laminação manual faz uso de equipamentos simples e facilmente encontrados no mercado tais como: roletes para compactação do laminado (moldado ou peça); facas e espátulas; pistola para aplicação de *gelcoat*; pincéis; baldes; tesouras; rolos de pintura; dosadores e balança.

Assim como o **molde**, determinadas peças necessitam de maior rigidez. Para isso incorporam-se após a cura do laminado, nervuras de reforço dispostas sobre uma forma de papelão ou poliuretano, núcleos de reforço metálico ou de madeira ou nervuras pré-moldadas, coladas ao laminado [5, 6, 22, 33].

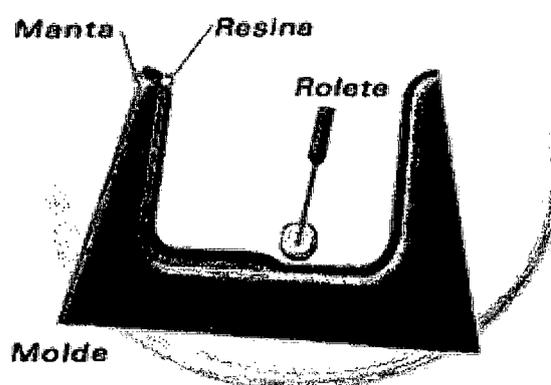


FIGURA 8 - Processo de laminação manual [26].

### 2.7.2. LAMINAÇÃO POR PROJEÇÃO À PISTOLA (*Spray up*)

O processo de laminação por projeção à pistola (ver esquema da figura 9) deriva do processo de laminação manual e consiste na aplicação simultânea de fibras de vidro e resina sobre o molde. Essa aplicação é feita por equipamentos conhecidos como pistolas laminadoras (ver figura 10) que cortam as fibras de vidro em comprimentos pré-determinados, misturam a resina ao iniciador (mistura interna ou externa à pistola) e projetam simultaneamente esse composto sobre o molde. Em seguida são compactadas com roletes, semelhantemente ao

processo manual. Sua vantagem fica evidente na moldagem de peças grandes e complexas onde a conformação com mantas e tecidos apresenta dificuldades. Seus custos são geralmente menores pois é um processo mais rápido, mais eficiente e os materiais usados são mais baratos. A peça também é bem acabada de um lado e áspera do outro [5, 6, 22, 33]. Os equipamentos necessários são: um compressor, uma pistola laminadora e os mesmos equipamentos do processo manual.

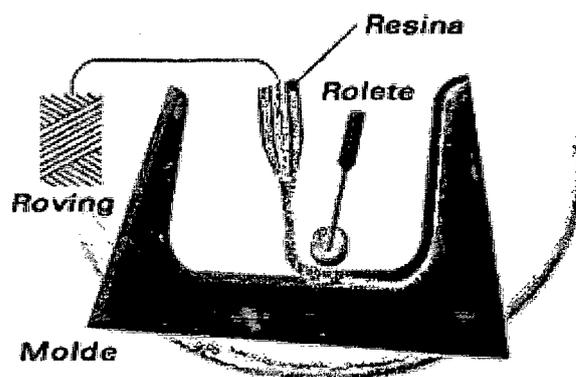


FIGURA 9 - Processo de laminação por projeção à pistola [26].

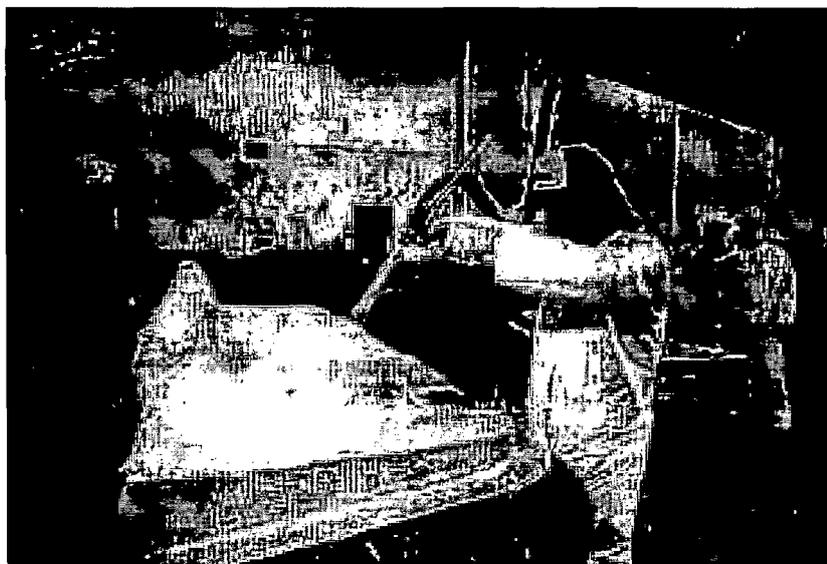


FIGURA 10 - Pistola laminadora em serviço [33].

### 2.7.3. MOLDAGEM DE CARGA COMPOSTA (*Bulk Molding Compound - BMC*)

Processo mecanizado utilizado para compostos termofixos constituídos de fibra de vidro picada, resina e carga. O composto é utilizado em grãos, apresenta maior grau de reforço e é injetado sob pressão para dentro do molde aquecido onde é conformado (ver esquema da figura 11). A cura da resina ocorre rapidamente e as peças apresentam bom acabamento em ambas as faces [12].

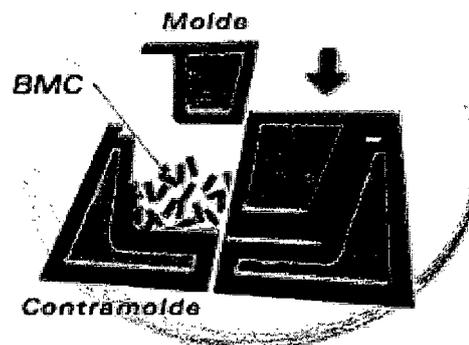


FIGURA 11 - Processo de moldagem de carga composta [26].

### 2.7.4. MOLDAGEM DE PLACA COMPOSTA (*Sheet Molding Compound - SMC*)

Processo mecanizado utilizado em linhas de alta produção. Neste processo prepara-se um laminado que possa ser moldado e curado dentro do molde, aquecido e sob pressão (ver esquema da figura 12). A resina deve apresentar viscosidade elevada, as fibras devem ser picadas, podendo-se acrescentar cargas que melhoram a moldagem e o acabamento. O SMC é prensado a uma temperatura de 150°C, aplicando sobre o molde uma pressão em torno de 4,5 MPa durante 1 a 5 minutos [12, 47].

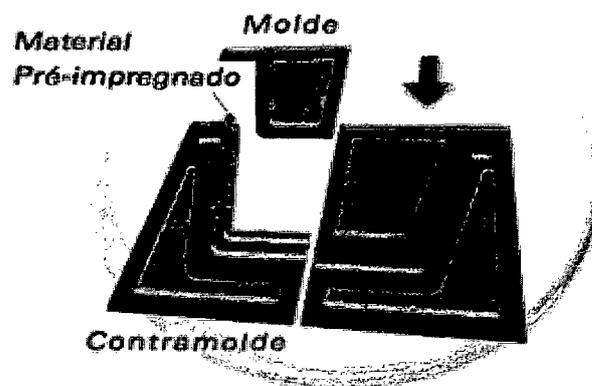


FIGURA 12 - Processo de moldagem de placa composta [26].

### 2.7.5. MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA (*Resin Transfer Molding - RTM*)

O RTM é um processo de moldagem de baixa pressão, no qual uma resina reativa é injetada em um molde fechado contendo um reforço (manta ou tecido). Após preencher completamente a cavidade do molde, expulsando o ar e impregnando o reforço, aguarda-se a cura do composto e em seguida efetua-se sua desmoldagem (ver esquema das figuras 13 e 14). As peças são extraídas apresentando bom acabamento nas duas faces. Pode-se também aplicar *gelcoat* nas faces do molde antes do fechamento. Esse processo é adequado para moldagens desde simples formas de PRFV até componentes estruturais complexos usados pelo setor automotivo e aeroespacial. As dimensões das peças variam desde poucos centímetros quadrados até próximo de 20 m<sup>2</sup> e uma grande quantidade de resinas pode ser utilizada incluindo poliéster, éster-vinílica, epóxi, fenólica etc., combinadas ou não com pigmentos e cargas incluindo a alumina tri-hidratada e o carbonato de cálcio, se necessário. As fibras podem ser de vidro, carbono ou aramida ou uma combinação destas [4, 10, 12, 14, 19, 21, 34, 35, 53, 62].

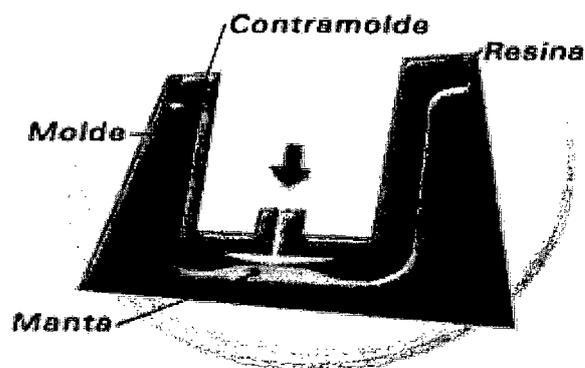


FIGURA 13 - Processo de moldagem por transferência de resina [26].

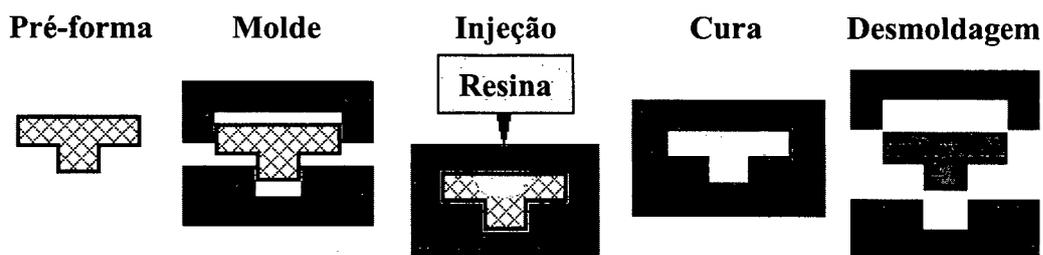


FIGURA 14 - Etapas do processo de moldagem por transferência de resina [11].

#### 2.7.6. MOLDAGEM A VÁCUO (*Vacuum Molding*)

Utiliza-se o vácuo nesse processo para retirar o ar aprisionado dentro do molde e expulsar o excesso de resina através da pressão exercida sob o composto pelo molde quando efetuado o fechamento. Gerado vácuo no molde, aguarda-se a cura e em seguida extrai-se o moldado [3, 4, 19]. O processo apresenta a vantagem de menor custo comparado ao processo RTM, pois pode dispensar o equipamento de injeção da resina tendo como custo de desenvolvimento somente o molde. A pressão de fechamento é a pressão atmosférica (1 atm). Além disso, esse processo permite utilizar reforços não-tecidos (mais baratos) e vazar a resina dentro da cavidade do molde antes do fechamento. Como desvantagem, a resistência mecânica da peça é reduzida, limitando sua aplicação a componentes de estrutura de menor exigência estrutural. Pode-se contornar essa limitação aplicando tecidos como reforço, porém o custo da peça

aumenta. As dificuldades desse processo são: controlar a vazão de vácuo para evitar o surgimento de bolhas no moldado e manter o molde nivelado para preencher corretamente a cavidade. O nivelamento é necessário porque a tendência do polímero termofixo ainda em estado líquido é escoar para a região mais baixa da cavidade, criando excesso de resina em um lado do molde e escassez no outro, ocasionando o preenchimento indevido da cavidade e resultando no refugo da peça.

Os processos a seguir possuem características básicas que também permitem a aplicação das tecnologias de RP e RT na confecção de moldes. A principal diferença comparado aos processos anteriores é que utilizam como matéria-prima para o preenchimento da cavidade, diversas composições de poliuretanos, expansíveis ou não, utilizando, quando conveniente, material de reforço como, por exemplo, fibras de vidro [34, 38].

#### **2.7.7. MOLDAGEM POR INJEÇÃO REATIVA REFORÇADA (*Reinforced Reaction Injection Molding - RRIM*)**

A moldagem por injeção reativa reforçada envolve dois líquidos reativos de baixa viscosidade (poliol + isocianato) pré-misturados com cargas e reforços de fibra de vidro em um cabeçote, antes de serem injetados num molde de temperatura controlada, onde ocorrerá a cura do composto com o formato da cavidade. Devido à abrasividade dos reforços, os cabeçotes de mistura e as unidades de bombeamento exigem alta resistência ao desgaste abrasivo. Pode ser considerado uma das evoluções do processo RIM.

### **2.7.8. MOLDAGEM POR INJEÇÃO REATIVA ESTRUTURAL (*Structural Reaction Injection Molding - SRIM*)**

A moldagem por injeção reativa estrutural é um processo similar ao RTM. A principal diferença é que esse processo utiliza um dispositivo para misturar e ativar a reação dos dois componentes sob alta pressão antes de injetá-los no molde que já contém o reforço de fibra. Sua utilização se justifica para altos volumes de produção, pois seus moldes são metálicos e montados em prensas hidráulicas. Uma descrição mais detalhada pode ser encontrada em [38].

### 3. TECNOLOGIA DO FERRAMENTAL RÁPIDO POR ESTEREOLITOGRAFIA

#### 3.1. EMBASAMENTO CONCEITUAL

A prototipagem rápida por estereolitografia permite fabricar rapidamente um objeto. O objeto pode ser um **modelo** ou um **molde**. Um modelo não pode ser usado como ferramenta, mas o ferramental rápido pode construir um molde reproduzindo a geometria deste modelo. Entretanto, a RP e certos tipos de RT são tecnologias recentes e, de certa forma, faltam informações relacionadas ao seu uso na construção de ferramentas (moldes).

A própria classificação e sistematização do conhecimento ainda é desordenada. Uma maneira aceita está na forma como a ferramenta é obtida, por isso cabe ressaltar que existem duas possibilidades básicas para se obter uma ferramenta através do ferramental rápido por estereolitografia: **métodos diretos** ou **métodos indiretos** [8, 13, 17, 29, 40, 41]. O método direto faz uso da SL para criar um molde e o método indireto, emprega a SL para fabricar um modelo que servirá de padrão para construir o molde, usando, neste caso, a técnica tradicional do PRFV.

Quando o objeto é um molde, este é denominado de **ferramental direto** e quando o objeto é um modelo padrão, denomina-se o mesmo de **ferramental indireto**. Uma descrição mais detalhada pode ser encontrada em [8, 9, 13, 16, 23, 29].

A seguir, citam-se as principais etapas para a produção de um molde, seja ele, direto ou indireto.

### 3.2. PRINCIPAIS ETAPAS DA TECNOLOGIA DO FERRAMENTAL RÁPIDO POR ESTEREOLITOGRAFIA

Segundo Gomide [8], as etapas iniciam com o projeto e o modelamento do objeto em CAD 3D. Na seqüência, o objeto CAD é convertido em um arquivo no formato STL. Com este arquivo, através de um *software* específico realiza-se a verificação de sua integridade, a orientação e o posicionamento do objeto na plataforma, geram-se os suportes e o programa NC da trajetória a ser percorrida pelo feixe de laser da máquina. Com esses parâmetros definidos, a máquina inicia a fabricação do objeto que, após concluído, passa por outra etapa denominada de pós-processamento. Nesta etapa, remove-se o excesso de resina em contato com o objeto, submete-se o mesmo a uma pós-cura em forno UV e, finalmente, realiza-se o acabamento superficial com lixas e polimento, quando requerido (ver esquema da figura 15). Dessa forma, o modelo ou o molde em resina fotocurável à base de epóxi estará acabado [8, 9, 23, 24, 37, 40, 41, 43, 44, 55, 57, 58, 59, 66, 67, 68].

No caso do método direto, a ferramenta está pronta, no entanto, para o método indireto ainda faltam algumas etapas que, neste caso, são as mesmas etapas do método tradicional de construção de moldes em PRFV já citado no Capítulo 2 (aplicar desmoldante; aplicar *gelcoat*; laminar camadas de reforço; executar a pós-cura; separar o molde do modelo e aplicar desmoldante para produzir as peças).

O esquema da figura 16 mostra as principais etapas para se produzir moldes através dos dois métodos de ferramental rápido por estereolitografia.



FIGURA 15 - Etapas do processo de estereolitografia.

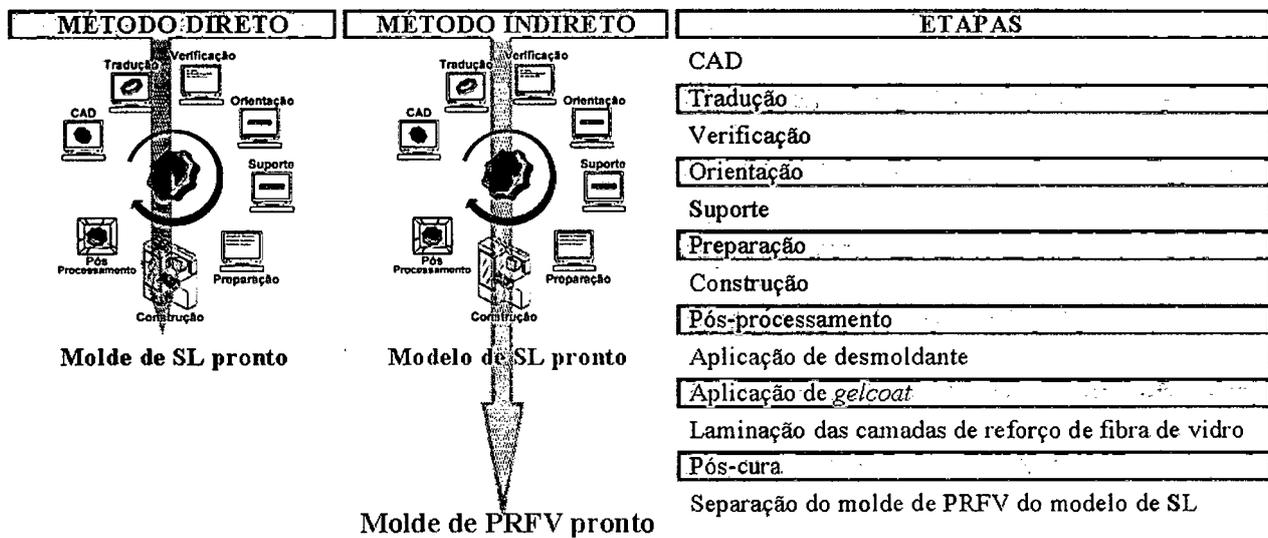


FIGURA 16 - Etapas dos métodos direto e indireto de ferramental rápido por estereolitografia.

### 3.3. CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES PARA O PROJETO

#### 3.3.1. DIMENSÕES, CONTRAÇÃO, PÓS-CURA E TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA

Sabendo-se que os polímeros termofixos contraem, o projeto do objeto deve prever esta contração volumétrica na solidificação. Todavia, isto é difícil, visto que o percentual da contração em materiais termofixos ainda não é completamente dominado [39, 64, 65, 69]. É prática comum a este segmento, consultar o percentual de contração da resina junto ao fabricante, adicionar cargas inertes ao composto, manter a temperatura de exotermia abaixo da temperatura de resistência térmica, entre outras, no intuito de minimizar este fator.

Todos os materiais plásticos apresentam baixa condutividade térmica. Esta característica dificulta que o calor gerado no interior do componente seja dissipado para a atmosfera e, por isso, o polímero dilata antes de contrair. Esta dilatação tem relação direta com o calor gerado durante a cura e quanto maior for a temperatura nesta etapa, maior será a expansão do plástico. Posteriormente, quando ocorrer o resfriamento do sistema, a contração também será maior.

Além da contração, dois outros fatores influenciam sobre as dimensões de uma peça: a pós-cura e a temperatura de transição vítrea<sup>14</sup>. A pós-cura (natural ou forçada) pode alterar as dimensões da peça enquanto estiver realizando ligações cruzadas entre seus elementos químicos e a temperatura de transição vítrea, se não respeitada em regime de serviço, pode amolecer a peça permitindo a alteração de suas dimensões [64, 65].

---

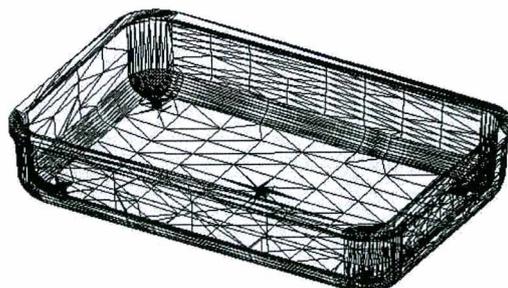
<sup>14</sup> **Temperatura de Transição Vítrea:** (*glass-transition temperature - Tg*): faixa de temperatura abaixo da qual um material termofixo é rígido e frágil e acima da qual, amolece e em seguida, se continuar recebendo calor, degrada.

### 3.3.2. ÂNGULOS DE SAÍDA E RAIOS DE CONCORDÂNCIA

Segundo a literatura especializada, quanto maior for o ângulo de saída, mais fácil se torna a desmoldagem da peça e mais vida útil se proporciona ao molde, porém a peça vai perdendo sua forma original. Seguindo as recomendações de projeto indicadas na literatura, uma faixa mínima de 1° a 3° de ângulo de saída é suficiente para atender tanto a durabilidade do molde, permitindo uma fácil desmoldagem, quanto à preservação da geometria original [4, 19, 22, 27].

### 3.3.3. RESOLUÇÃO DO CAD

Os sistemas CAD normalmente disponibilizam distintas maneiras de exportar uma geometria CAD de forma a ser interpretada por uma máquina CNC ou semelhante. O formato de arquivo interpretável pela máquina de estereolitografia é conhecido como arquivo “STL”. Este tipo de arquivo não representa exatamente a geometria da peça e sim uma aproximação de sua superfície, através de uma malha de triângulos (ver figura 17). Para amenizar este efeito é importante aumentar a resolução do CAD quando o modelo eletrônico final for gerado no formato STL.



**FIGURA 17** - Malha de triângulos representando o molde usado no estudo de caso 2.

## 4. DESENVOLVIMENTO DOS ESTUDOS DE CASO

Visando avaliar a possibilidade de aplicação da tecnologia de ferramental rápido por estereolitografia na construção de moldes em PRFV foram desenvolvidos dois estudos de caso.

### 4.1. ESTUDO DE CASO PRELIMINAR

Neste estudo de caso empregou-se a resina Ciba<sup>®</sup> SL 5170 para fabricar o modelo. Suas principais propriedades são mostradas na tabela 6.

**TABELA 5** - Propriedades da resina SL 5170 utilizada na máquina SLA-250/30.

Material (*)	SL 5170
Fornecedor	Ciba <sup>®</sup>
Módulo de tensão (MPa)	2400-2500
Resistência à tração (MPa)	59-60
Elongação até a ruptura (%)	7-19
Resistência à flexão (MPa)	107-108
Módulo de flexão (MPa)	2920-3010
Resistência ao impacto (J/m)	27-30
Dureza (Shore D)	85
Temperatura de transição vítrea (°C)	65-90
Temperatura de deflexão térmica (°C)	55 (66 psi)
Sensível à umidade?	Sim

(\*) Dados obtidos após a resina ter sido pós-curada com luz ultravioleta [8]

#### **4.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS E CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO**

O estudo de caso preliminar teve como objetivo principal identificar possíveis limitações técnicas e dificuldades para se obter um molde de PRFV, partindo de um modelo de estereolitografia, substituindo dessa maneira a etapa tradicional de confeccionar o modelo manualmente. O modelo de SL foi construído conforme metodologia apresentada por Gomide [8] e a partir do molde de PRFV, foi produzida uma peça, também de PRFV.

Neste estudo, o modelo de SL, o molde de PRFV e a peça de PRFV foram avaliados qualitativamente sob o critério denominado de aspecto visual. Sob este critério foram observados os aspectos do tipo: aparência estética, simetria, ondulações superficiais, marcas, bolhas de ar e aspereza. Este critério foi adotado em função da qualidade superficial de um molde de PRFV ser um dos fatores mais importantes para qualquer processo de moldagem termofixa que venha a utilizá-lo, pois influi diretamente na durabilidade do molde, na estética da peça, no índice de refugo ou retrabalho de componentes, no intervalo de manutenção dos moldes, no fluxo da resina sob as paredes de um molde do tipo fechado etc.

Contudo, antes de construir o modelo e desenvolver o estudo, foram realizados testes de contato entre fragmentos sólidos da resina de estereolitografia (considerados como sendo corpos de prova) e elementos químicos ou materiais, usualmente empregados no setor do PRFV. Estes testes tiveram o objetivo de tentar identificar, visualmente, se estas matérias-primas não danificariam os corpos de prova.

#### **4.1.2. TESTES DE CONTATO**

As tabelas 7, 8, 9, 10 e 11 resumem os testes de contato realizados. Diferentes resinas, solventes, desmoldantes, iniciadores e aceleradores foram empregados.

No processo de construção de uma peça de PRFV, para que esta adquira todas as suas propriedades, recomenda-se deixá-la repousar por pelo menos 7 dias, ou então, submetê-la a uma pós-cura [4, 14]. Seguindo tal recomendação, os elementos químicos e os materiais permaneceram em contato com os corpos de prova durante 10 dias (aproximadamente 40% a mais do que o tempo recomendado, com exceção do solvente acetona que permaneceu em contato por 24 horas). Após o contato de 10 dias, as resinas da tabela 7 foram submetidas a uma etapa de cura dentro dos recipientes que as continham, para observar se nesta etapa não ocorreriam danos aos corpos de prova.

**TABELA 6** - Resinas em contato com fragmentos de resina Ciba® SL 5170.

MATERIAL / TESTE	RESINA POLIÉSTER ORTOFTÁLICA	RESINA POLIÉSTER ISOFTÁLICA	RESINA VINIL ÉSTER	RESINA EPÓXI
Tempo de contato (dias)	10	10	10	10
Submetido à reação de cura?	Sim	Sim	Sim	Sim
Resultado	Nenhuma alteração visível a olho nu.			

**TABELA 7** - Solventes em contato com fragmentos de resina Ciba® SL 5170.

MATERIAL / TESTE	ACETONA	MONÔMERO DE ESTIRENO
Tempo de contato	24 horas	10 dias
Observação	Apresentou leve "amolecimento" da resina SL 5170 após 2 horas.	Nenhuma alteração visível a olho nu.

**TABELA 8** - Desmoldantes em contato com fragmentos de resina Ciba® SL 5170.

MATERIAL / TESTE	DESMOLDANTE SEMIPERMANENTE	DESMOLDANTE DE SACRIFÍCIO
Tempo de contato (dias)	10	10
Observação	Nenhuma alteração visível a olho nu.	Nenhuma alteração visível a olho nu.

**TABELA 9** - Iniciadores em contato com fragmentos de resina Ciba® SL 5170.

MATERIAL / TESTE	MEC <sup>15</sup>	DMA <sup>16</sup>
Tempo de contato (dias)	10	10
Observação	Nenhuma alteração visível a olho nu.	Nenhuma alteração visível a olho nu.

**TABELA 10** - Aceleradores<sup>17</sup> em contato com fragmentos de resina Ciba® SL 5170.

MATERIAL / TESTE	OCTOATO DE COBALTO
Tempo de contato (dias)	10
Observação	Nenhuma alteração visível a olho nu.

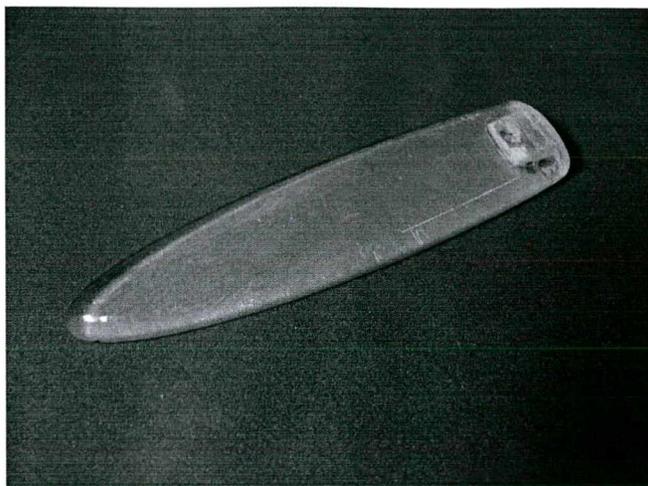
### 4.1.3. DEFINIÇÃO DA PEÇA

Com base nos resultados satisfatórios apresentados pelos testes de contato, foi definida no estudo de caso preliminar, a construção de uma peça cuja forma geométrica é considerada típica do setor do PRFV: simples para os atuais recursos de CAD e CNC, porém difícil de concebê-la manualmente. A geometria da peça selecionada está representada na figura 18. Trata-se de uma geometria de base plana e superfície convexa.

<sup>15</sup> **MEC**: peróxido de metil-etil-cetona. Um tipo de iniciador de reação.

<sup>16</sup> **DMA**: dimetil anilina. Um tipo de iniciador de reação.

<sup>17</sup> **Acelerador**: elemento químico que acelera a cura de polímeros termoestáveis.



**FIGURA 18** - Modelo construído por estereolitografia e usado no estudo preliminar.

No projeto do molde de PRFV foi prevista a extração manual da peça, para observar a dificuldade de desmoldagem sem o auxílio de um sistema de extração.

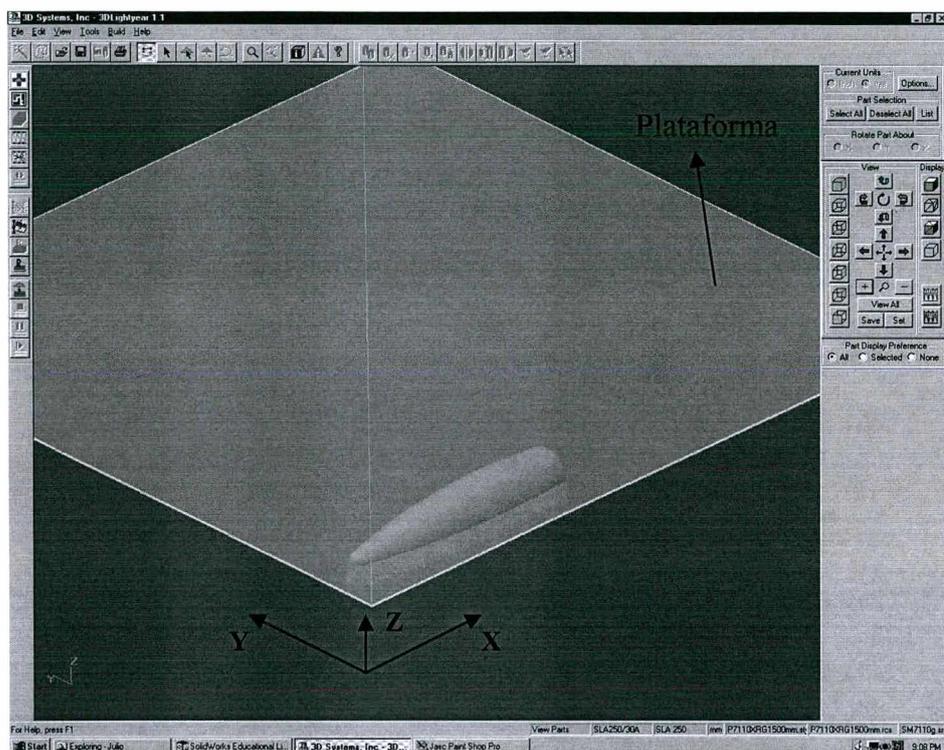
Como a forma geométrica da peça usada neste estudo facilita sua extração, não foram adicionados ângulos de saída e não foi considerada a contração da resina, porque tal mecanismo não é alvo deste estudo.

O último passo da etapa de projeto e modelagem do modelo no CAD foi criar o arquivo STL com resolução padrão (*default*) para o sistema *SolidWorks*. O valor usado para o parâmetro desvio total da qualidade foi de 0,01 mm e para o parâmetro tolerância angular foi de 5°.

#### **4.1.4. CONFECÇÃO DO MODELO E FABRICAÇÃO DO MOLDE**

Para a fabricação do modelo de SL, foi estabelecida a orientação espacial do modelo virtual dentro do volume de trabalho disponível na máquina de estereolitografia, conforme mostrado na figura 19 e os suportes foram gerados automaticamente com o auxílio do *software 3D Lightyear*. Os parâmetros de construção utilizados foram os usualmente

empregados, tendo sido selecionados automaticamente pelo *software* para o estilo de construção ACES e fabricando o objeto em torno de 10 horas [8].



**FIGURA 19** - Imagem da orientação espacial do modelo e seus suportes.

Na etapa de pós-processamento os suportes foram removidos manualmente e a lavagem do excesso de resina foi efetuada com álcool isopropílico. A pós-cura em forno ultravioleta ocorreu durante 1 hora e o acabamento superficial do modelo foi realizado com lixas desde a granulação n.º 100 até a n.º 2000, utilizadas com água, seguido de polimento com massas n.º 2 e n.º 3.

A partir de então, foi elaborado o molde de PRFV sobre o modelo de estereolitografia, já protegido com desmoldante semipermanente. Para isso, primeiro foi aspergido *gelcoat* e em seguida foram adicionadas sucessivas camadas de manta de fibra de vidro impregnadas com resina de poliéster insaturado. Os materiais utilizados foram: *gelcoat* e laminado isoftálico com 1% de acelerador e 1,5% de iniciador e gramatura do reforço de 450g/m<sup>2</sup>, conforme recomendações dos fabricantes [5, 14].

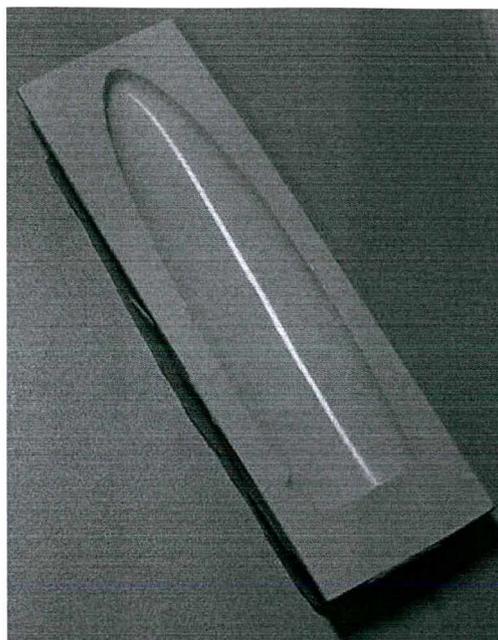
Após a cura, o molde foi separado do modelo, manualmente e com o auxílio de uma pequena cunha. O esforço foi desprezível e a desmoldagem não apresentou problemas. Em seguida, foi aplicado o desmoldante semipermanente sobre a superfície do molde, para que fosse possível produzir a peça de plástico reforçado com fibra de vidro, reproduzindo dessa maneira a forma geométrica do modelo de estereolitografia.

#### 4.1.5. MANUFATURA DA PEÇA

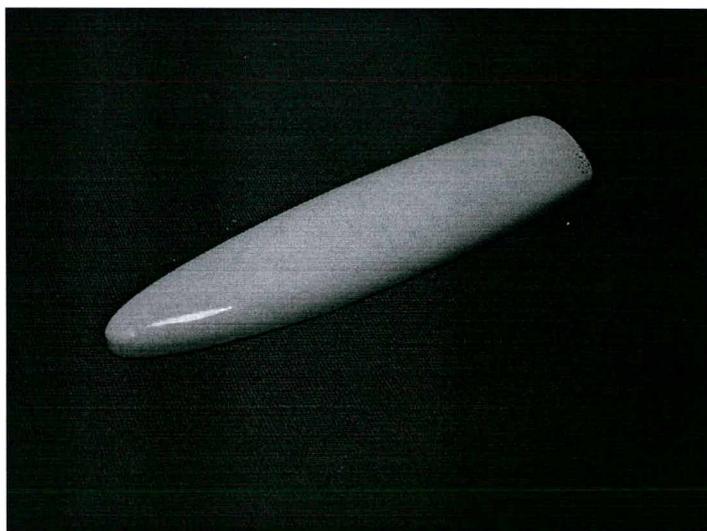
A peça foi produzida na empresa GHIPOL do Brasil Ltda., utilizando o processo de laminação manual comentado no capítulo 2. Adotou-se a extração manual, foi aplicado desmoldante semipermanente DEXTER<sup>®</sup> na superfície do molde e os materiais para fabricar a peça foram manta 450g/m<sup>2</sup>, resina poliéster ortoftálica pré-acelerada (o acelerador é adicionado à resina pelo fabricante) para o *gelcoat* e para o laminado e 1,5% de MEC (iniciador). A temperatura ambiente, medida por um termômetro digital, (-40 a 200 °C) indicou 25°C e o pico exotérmico ficou próximo dos 37°C. A temperatura ambiente e a temperatura gerada durante a cura resultam na temperatura total que o molde irá absorver e temperaturas acima de 200°C causam distorções no molde e na peça [4].

O molde (ver figura 20), classificado como aberto, apresenta uma única cavidade em forma de casca representando a face externa da peça e mostrada na figura 21.

Foi utilizada acetona para diluir o *gelcoat* aplicado com uma pistola de ar comprimido.



**FIGURA 20** - Molde de PRFV confeccionado para o estudo preliminar.



**FIGURA 21** - Peça de PRFV produzida pelo processo de laminação manual.

## 4.2. ESTUDO DE CASO 2

Para o estudo de caso 2 empregou-se a resina SOMOS 7110 cujas principais propriedades são mostradas na tabela 13. Suas propriedades são semelhantes às da SL 5170 e apresenta a vantagem de não absorver umidade, minimizando as possibilidades de alterações dimensionais por absorção de água.

**TABELA 11** - Propriedades da resina SOMOS 7110 utilizada na máquina SLA-250/30.

Material (*)	SOMOS 7110
Fornecedor	DuPont / DSM
Módulo de tensão (MPa)	2117
Resistência à tração (MPa)	56
Elongação até a ruptura (%)	5,4-7,1
Resistência à flexão (MPa)	85
Módulo de flexão (MPa)	2434
Resistência ao impacto (J/m)	27,8
Dureza (Shore D)	82
Temperatura de transição vítrea (°C)	-
Temperatura de deflexão térmica (°C)	59-72
Sensível à umidade?	Não

(\*) Dados obtidos após a resina ter sido pós-curada com luz ultravioleta [8].

### 4.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Este estudo de caso foi desenvolvido com o intuito de aprofundar os conhecimentos da tecnologia de ferramental rápido por estereolitografia, orientada para o segmento do PRFV.

Foram construídos 4 moldes por diferentes métodos, visando estabelecer comparações visuais, dimensionais e de tempo de fabricação. Dois deles foram obtidos pela tecnologia de estereolitografia, um foi obtido pelo processo tradicional (artesanal) e o último por fresamento CNC convencional.

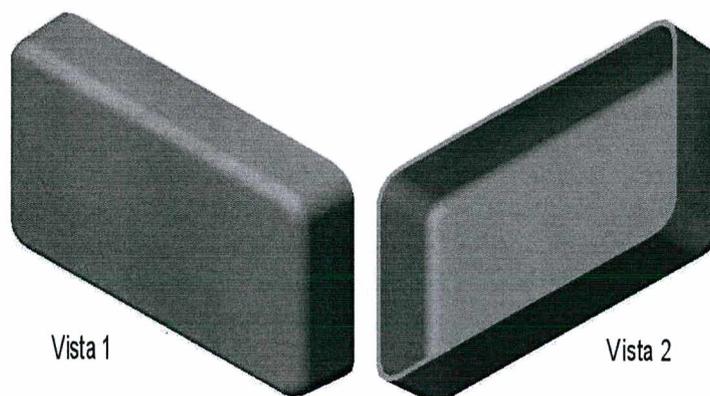
A seguir resumem-se as intenções deste estudo:

- **Observar qualitativamente** o aspecto visual dos moldes, usando os modelos e as peças como referência, se necessário.
- **Investigar quantitativamente** o desvio-padrão dos 4 métodos de construção do molde no processo de laminação manual e comparar as dimensões dos moldes com suas respectivas dimensões nominais. Adicionalmente, computar os tempos de fabricação dos quatro ferramentais.

O modelo e o molde produzidos por estereolitografia foram construídos conforme metodologia apresentada por Gomide [8].

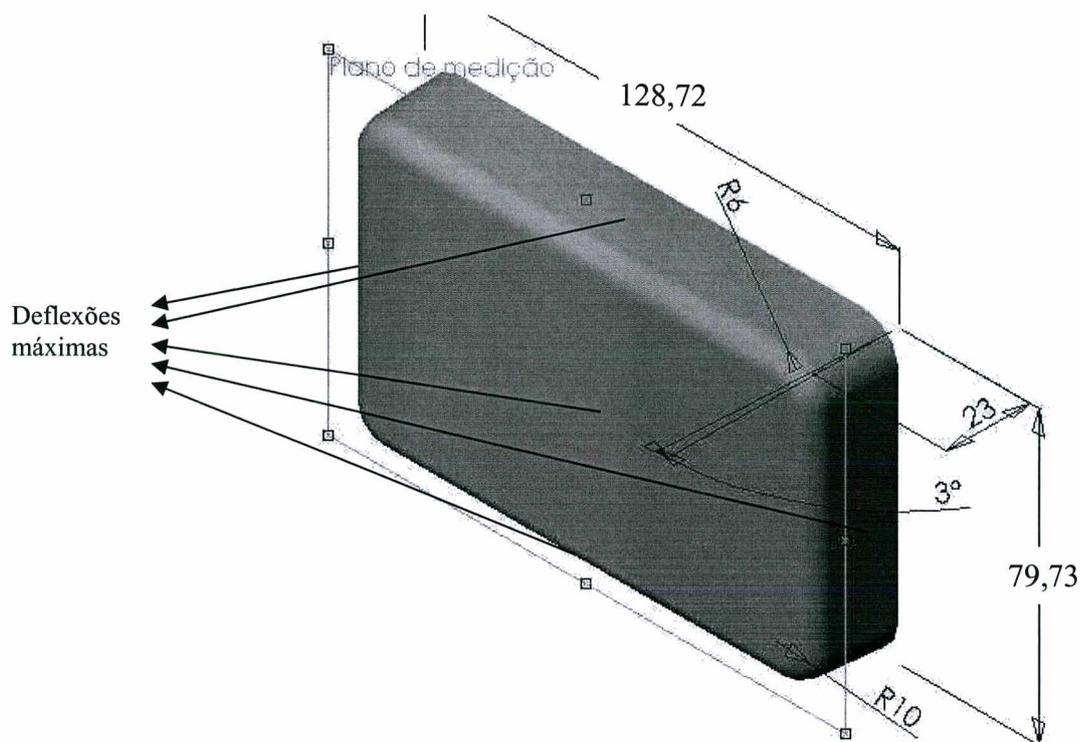
#### **4.2.2. DEFINIÇÃO DA PEÇA**

Para facilitar a comparação dos resultados foi selecionada outra geometria simples, contudo típica do setor do PRFV como a anterior (ver figura 22), definindo-se a fabricação de 10 peças por molde.

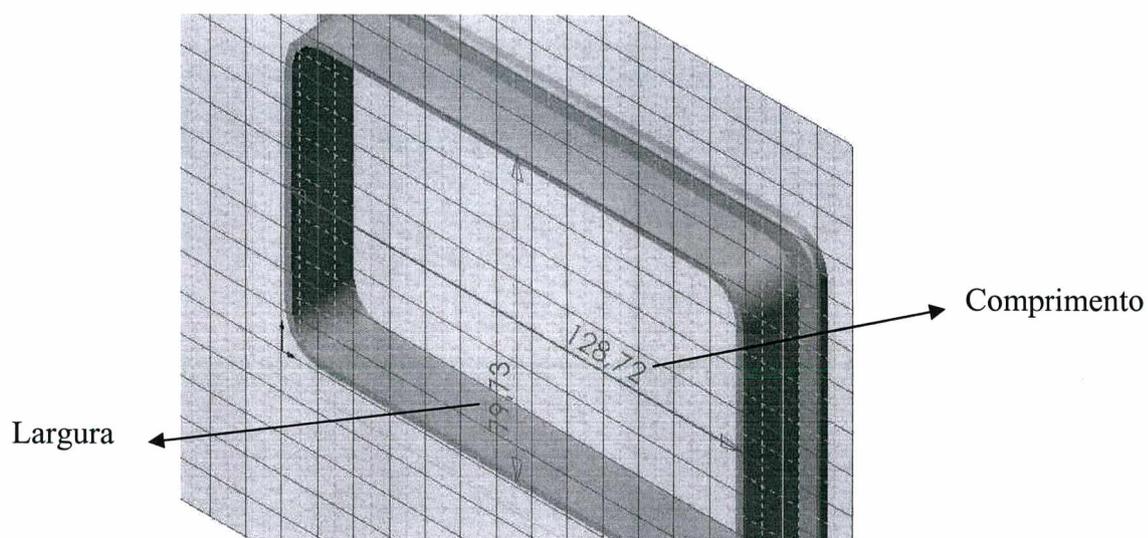


**FIGURA 22** - Vista tridimensional da peça a ser produzida por quatro alternativas diferentes de ferramental (imagens do CAD).

No projeto dos moldes foi considerado que todas as faces da peça deveriam apresentar deflexões máximas de 1 mm nas regiões indicadas na figura 23. Como raio mínimo de concordância foi adotado o valor de 6 mm, recomendado para o processo de laminação manual e o valor adotado para os ângulos de saída dos moldes foi de 3°. Para realizar o controle dimensional das peças foram determinados pontos de referência nas suas faces externas, visando medir as dimensões de comprimento e de largura (ver figura 24). Ambos os pontos de referência se situam a 9 mm do topo da peça e foram medidos com o auxílio de um gabarito de posicionamento para o paquímetro (incerteza  $\pm 0,02$  mm), com o intuito de obter resultados estatísticos a partir das medições. A espessura de parede não foi controlada, em virtude do processo de laminação manual gerar peças de espessura irregular, com tolerância dimensional de  $\pm 0,5$  mm. Todos os parâmetros adotados seguiram as recomendações das literaturas especializadas [4, 14, 19, 22, 27] e utilizadas pela empresa GHIPOL do Brasil Ltda., onde as peças foram fabricadas.



**FIGURA 23** - Deflexões máximas definidas no projeto da peça.



**FIGURA 24** - Corte 3D a 9 mm do topo da peça, mostrando as dimensões medidas nas peças de PRFV.

Para que as peças moldadas não danificassem durante a etapa de desmoldagem, definiram-se no projeto do molde cinco furos de 3 mm de diâmetro cada, para a conexão de

um bico de ar comprimido pela parte de trás dos moldes, de maneira a extrair a peça sem a utilização de cunhas ou esforço manual. Para vedar os furos durante a aplicação de *gelcoat* foi utilizada fita adesiva ou massa de modelar (plastilina).

O acabamento superficial dos modelos (dos métodos indireto e tradicional) e dos moldes (dos métodos direto e por fresamento) foi realizado com lixas, desde a granulação n.º 100 até a n.º 2000, utilizadas com água, seguido de polimento com massa de polir n.º 2 e n.º 3.

Os próximos tópicos apresentam separadamente os quatro métodos usados na fabricação dos moldes.

#### **4.2.3. MÉTODO DIRETO DE FERRAMENTAL RÁPIDO POR ESTEREOLITOGRAFIA**

Neste método, o objeto virtual representava o molde que foi produzido pela máquina de estereolitografia. Depois de fabricado, o molde de SL foi submetido a uma etapa denominada de pós-processamento. Esta etapa proporcionou um acabamento mais refinado do molde e englobou os seguintes procedimentos: remover com álcool isopropílico o excesso de resina em contato com o molde, remover manualmente seus suportes de sustentação, submeter o molde a uma pós-cura para torná-lo mais resistente mecanicamente e realizar o acabamento superficial para diminuir sua rugosidade.

Concluídos estes procedimentos, restou uma única etapa necessária para introduzir o molde em linha de produção: aplicar o desmoldante apropriado sobre a superfície da cavidade para permitir a desmoldagem da peça de PRFV. Para isso, foi usado um desmoldante semipermanente à base de polímeros, pois como já citado na introdução deste trabalho, este tipo de desmoldante agrega diversas vantagens ao ciclo produtivo do PRFV.

Através deste método fabricou-se a ferramenta com a superfície moldante orientada contra a plataforma da máquina SLA 250/30 (ver figura 25). Esta posição de construção foi

selecionada para evitar o efeito conhecido por “volume retido”, que ocasionaria o acúmulo de resina dentro da cavidade comprometendo sua construção, caso fosse orientada no sentido inverso. Os parâmetros para construção na máquina foram os usualmente empregados e selecionados automaticamente pelo *software 3D Lightyear* para o caso da resina Somos<sup>®</sup> 7110. A figura 26 apresenta uma fotografia do ferramental direto fabricado neste estudo de caso, após ter sido usado para produzir as peças.

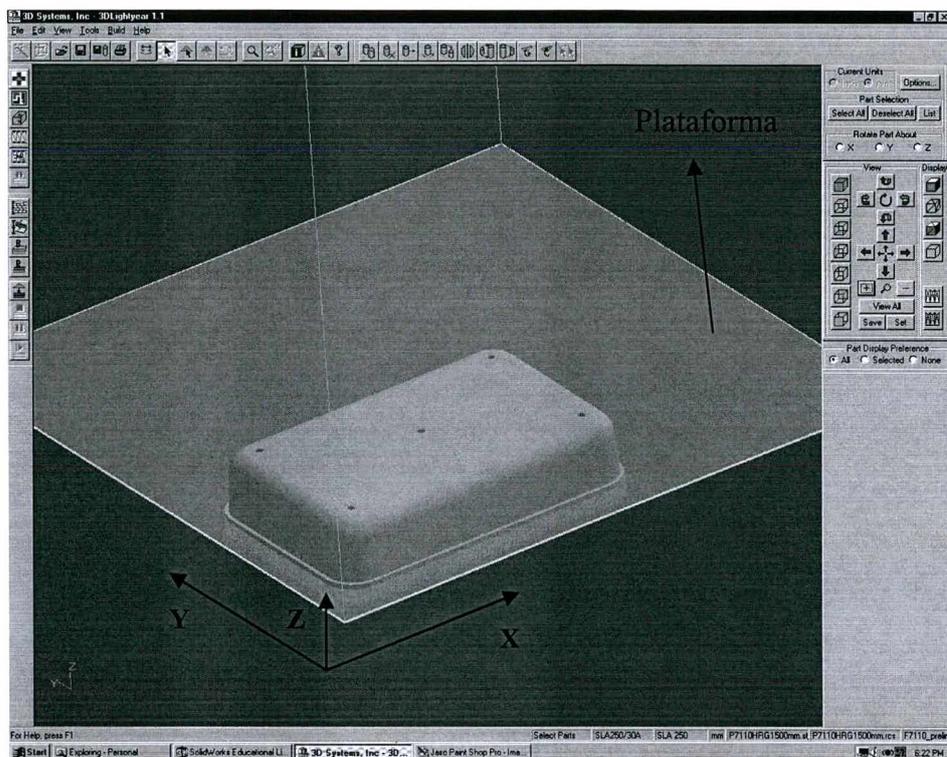
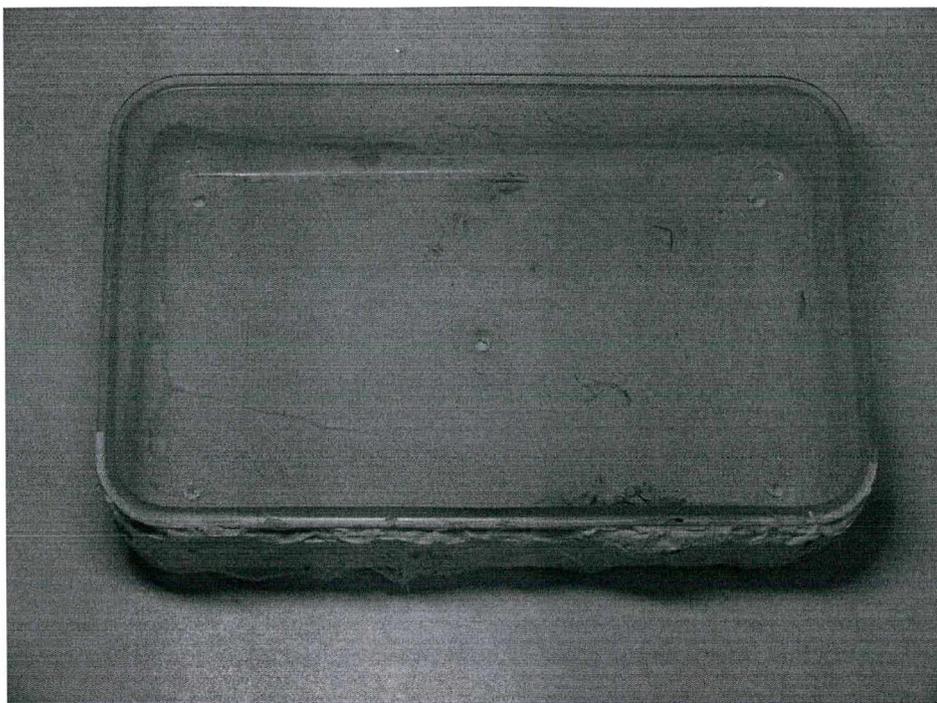


FIGURA 25 - Orientação espacial do molde de SL durante sua fabricação.



**FIGURA 26** - Molde de SL obtido pelo método direto de ferramental.

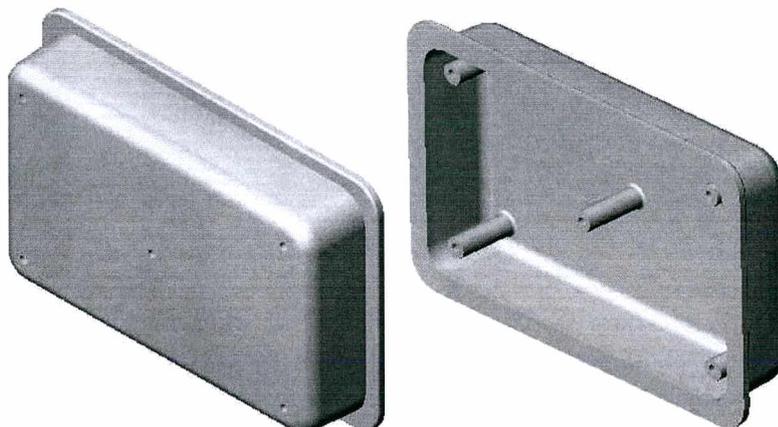
#### **4.2.4. MÉTODO INDIRETO DE FERRAMENTAL RÁPIDO POR ESTEREOLITOGRAFIA**

Conforme citado no Capítulo 3, o método indireto de construção de um molde, neste caso de PRFV, requer um modelo de estereolitografia, cuja forma geométrica é mostrada na figura 27.

Sob o modelo foi aplicado *gelcoat*, aguardada sua gelificação e laminadas as camadas de fibra de vidro com resina, até alcançar uma espessura de casca considerada suficientemente rígida (espessura da ordem de 4 mm). Após a cura, o molde foi separado do modelo e recebeu o desmoldante semipermanente para iniciar a produção. O esquema da figura 28 ilustra o supracitado e a figura 29 mostra o ferramental indireto (molde de PRFV) depois de ter sido usado para produzir as peças.

As primeiras camadas do molde de PRFV foram laminadas com a resina isoftálica de código RESAPOL 33-411 e suas camadas externas com a resina ortoftálica de código

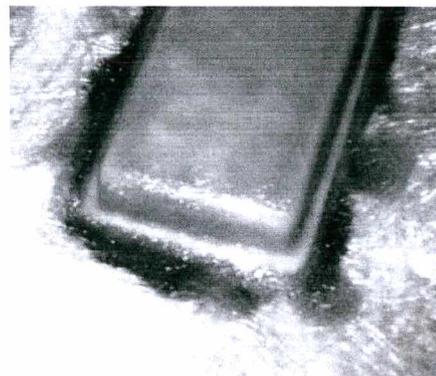
RESAPOL 10-228. Este procedimento é comum no setor do PRFV, pois reduz o custo do molde empregando resinas “nobres” somente nas camadas iniciais [14]. As tabelas 14 e 15 ilustram as principais propriedades de tais resinas.



**FIGURA 27** - Imagens do modelo de SL geradas em CAD.

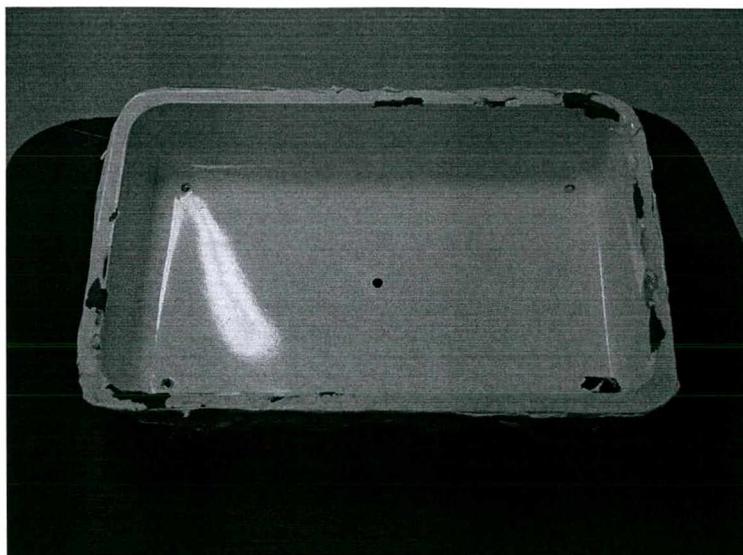


(a)



(b)

**FIGURA 28** - Aplicação de *gelcoat* sobre o modelo de SL (a) e molde de PRFV aguardando a cura para separá-lo do modelo de SL (b).



**FIGURA 29** - Molde de PRFV obtido pelo método indireto de ferramental.

**TABELA 12** - Propriedades da resina RESAPOL 33-411 (\*).

Características	Método de análise	Valores típicos
Resistência máxima à tração (MPa)	PP 09 – 035	60
Módulo de elasticidade em tração (MPa)	PP 09 – 035	3.200
Elongação máxima (%)	PP 09 – 035	2,0
Resistência máxima à flexão (MPa)	PP 09 – 039	115
Módulo de elasticidade em flexão (MPa)	PP 09 – 039	3.500
Deformação máxima (%)	PP 09 – 039	3,0
Contração linear (%)	PP 09 – 050	1,0
Temperatura de distorção térmica (°C)	PP 09 – 030	110
Resistência ao impacto (método IZOD) com entalhe (J/m)	PP 09 – 078	19

(\*) Sem reforço de fibras de vidro.

Sistema de cura: Octoato de Cobalto / MEC.

Pós-cura: 48 h à 60°C.

Fonte: boletim técnico RESANA / REICHHOLD®.

**TABELA 13** - Propriedades da resina RESAPOL 10-228 (\*).

Propriedades	Método de análise	Valores típicos
Resistência máxima à tração (MPa)	PP 09 – 035	50
Módulo de elasticidade em tração (MPa)	PP 09 – 035	2400
Elongação máxima (%)	PP 09 – 035	1,1
Resistência máxima à flexão (MPa)	PP 09 – 039	50
Módulo de elasticidade em flexão (MPa)	PP 09 – 039	3.800
Deformação máxima (%)	PP 09 – 039	1,6
Contração linear (%)	PP 09 – 050	2,0
Temperatura de distorção térmica (°C)	PP 09 – 030	85

(\*) Sem reforço de fibras de vidro.

Sistema de cura: MEC.

Pós-cura: 48 h à 60°C.

Fonte: boletim técnico RESANA / REICHHOLD®.

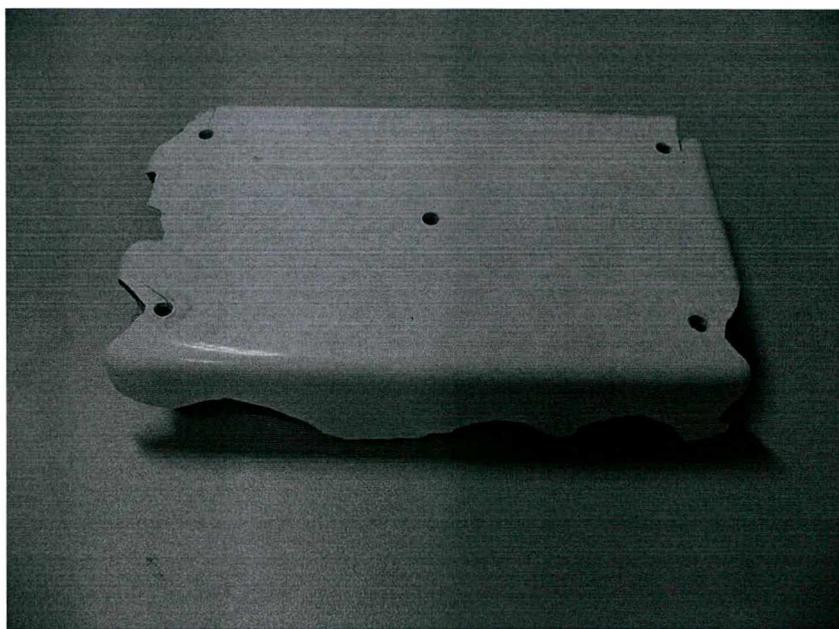
#### 4.2.5. MÉTODO TRADICIONAL (artesanal)

O método tradicional de construção de moldes de PRFV diferencia-se do ferramental indireto somente na forma de elaboração do modelo. Esta etapa fica suscetível à experiência e habilidade do modelista e emprega ferramentas manuais como, por exemplo, lixadeiras, retificadoras, furadeiras, gabaritos etc., como já referido no Capítulo 2 deste trabalho.

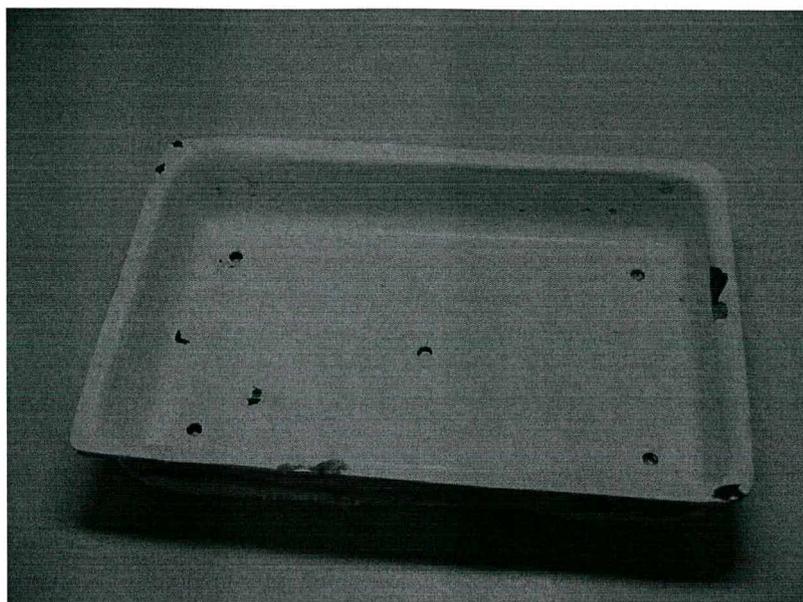
Para elaborar o modelo deste estudo de caso, um bloco polimérico de RENSHAPE® 350 foi desbastado com uma retificadora manual até próximo da dimensão nominal e na seqüência, lixado até alcançar as dimensões desejadas, com lixas de granulometria desde o n.º 60 até o n.º 100. Em seguida o modelo recebeu uma camada de *gelcoat* sobre a qual realizou-se o acabamento superficial mais acurado realizado com lixas, desde a granulação n.º 100 até a n.º 2000, utilizadas com água, seguido de polimento com massa de polir n.º 2 e n.º 3. Tais

dimensões foram controladas com um paquímetro de incerteza  $\pm 0,02$  mm e gabaritos de controle feitos de MDF (um tipo de madeira), impregnados com resina poliéster para não absorverem umidade. Para construir o molde de PRFV, foram usados os mesmos materiais e procedimentos do método indireto descrito no item 4.2.4. A figura 30 mostra o modelo destruído, a figura 31 mostra o molde de PRFV depois de ter sido usado para produzir as peças e a tabela 15 mostra as principais propriedades do material RENSHAPE<sup>®</sup> 350.

O modelo, elaborado manualmente, precisou ser destruído para extrair o molde, porque sua geometria não permitiu a separação dos dois objetos de modo adequado. Este problema é uma constante nas indústrias de PRFV, porque a baixa precisão, em virtude do fator humano, está presente durante todo o processo construtivo.



**FIGURA 30** - Modelo artesanal (destruído ao separá-lo do molde).



**FIGURA 31** - Molde de PRFV (negativo do modelo artesanal).

**TABELA 14** - Principais propriedades do material RENSHAPE® 350.

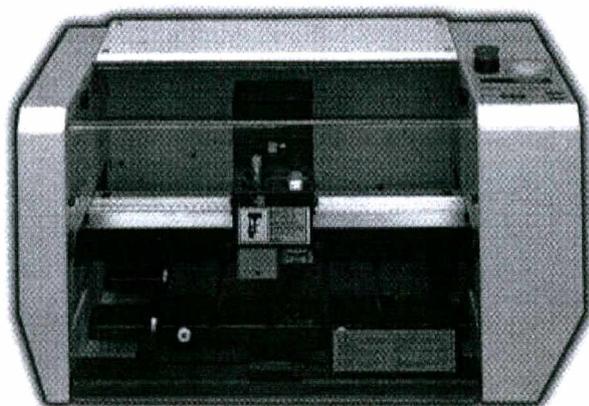
REN SHAPE®	350
Cor	Cinza
Aplicação	Modelos de estilo, testes de programas etc.
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,42
Coefficiente de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	60 ~ 75
Coefficiente de expansão linear (°C)	-30 a + 30
Resistência à flexão (N/mm <sup>2</sup> )	4 ~ 5
Resistência à compressão (N/mm <sup>2</sup> )	4 ~ 5
Dureza (Shore D)	30 ~ 35
Resistência térmica (°C)	60 ~ 70

#### 4.2.6. MÉTODO POR FRESAMENTO CNC CONVENCIONAL

A cavidade foi fresada em um bloco de material polimérico fabricado pela indústria Ciba® sob a designação RENSHAPE® 460. Este material, devido às suas propriedades (ver tabela 16), é indicado pelo fabricante para a construção de protótipos.

A máquina empregada para usinar o bloco polimérico (ver figura 32) possui volume de trabalho com dimensões (305 x 230 x 30 mm), próximas às da máquina de SL. Pode usinar com três eixos simultâneos, possui *software* de CAM, exporta a trajetória de corte do computador para a fresadora via interface serial da impressora, permite somente uma ferramenta durante a usinagem, apresenta incerteza de  $\pm 0,01$  mm e está classificada como uma máquina de prototipagem rápida [54, 56].

Os parâmetros de usinagem usados seguiram as recomendações do fabricante da fresadora e do fabricante do material a ser usinado e são mostrados na tabela 17. A figura 33 mostra uma simulação da usinagem do bloco e a figura 34, uma fotografia do molde depois de ter sido usado para produzir as peças.



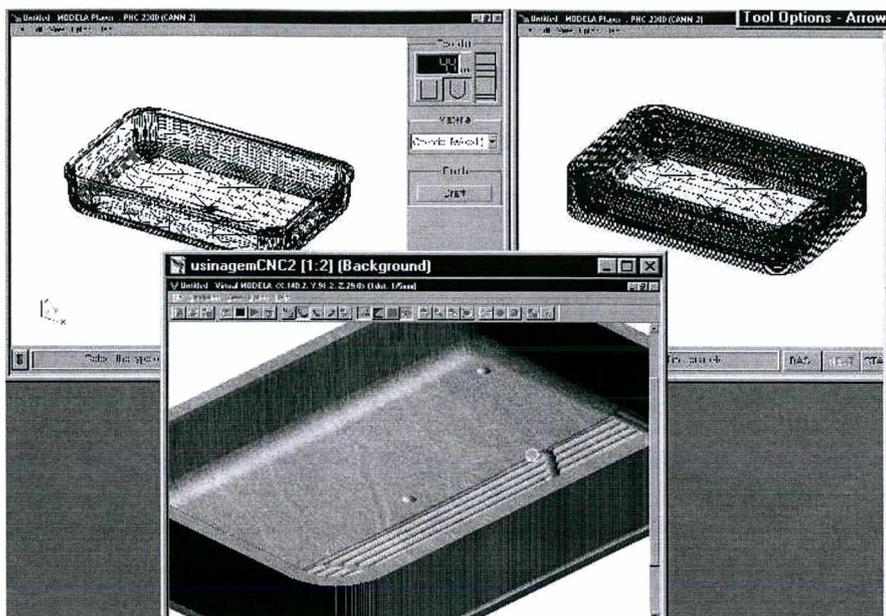
**FIGURA 32** - Fresadora 3D Roland PNC-2300A.

**TABELA 15** - Propriedades da placa de modelagem RENSHAPE<sup>®</sup> 460.

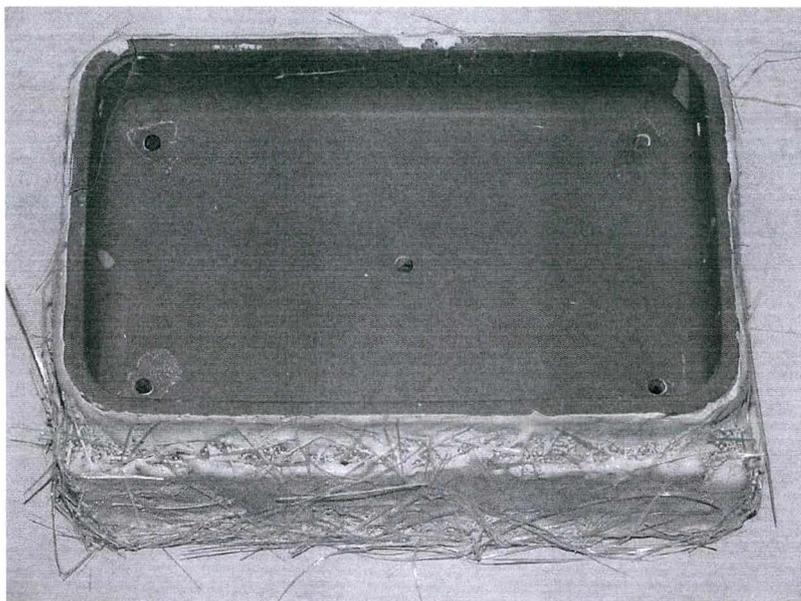
REN SHAPE <sup>®</sup>	460
Cor	Marrom claro
Aplicação	Modelos padrão, maquetes etc.
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,70 ~ 0,75
Coefficiente de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	50 ~ 55
Coefficiente de expansão linear (°C)	-30 a + 30
Resistência à flexão (N/mm <sup>2</sup> )	25 ~ 30
Resistência à compressão (N/mm <sup>2</sup> )	20 ~ 25
Dureza (Shore D)	60 ~ 65
Resistência térmica (°C)	75 ~ 80

**TABELA 16** - Parâmetros utilizados na usinagem do bloco de RENSHAPE 460<sup>®</sup>.

Parâmetro	Desbaste	Acabamento
Velocidade de penetração da fresa em Z (mm/s)	10	10
Velocidade de avanço e deslocamento no plano XY (mm/s)	18	18
Profundidade de corte (mm)	23	
Profundidade do passe em Z (mm)	0,65	Passe único em 3D
Velocidade (RPM)	10.000	
Sistema CAM utilizado / Fabricante	CAMM-2 / Roland	
Estratégia de usinagem utilizada	Contornando (Contouring)	Varredura em linha eixo X (X scan line)
Distância entre passes (mm)	2,2	0,3
Sobrematerial para o acabamento (mm)	0,3	-
Utilizado fluido de refrigeração?	Não	Não
Ferramenta (φ mm / Material / Tipo da ponta)	4,4 / Widea / Bola	



**FIGURA 33** - Imagem da simulação da usinagem por fresamento CNC realizada no *software* CAMM-2.



**FIGURA 34** - Molde obtido pelo fresamento da cavidade em um bloco de RENSHPA®

460.

#### 4.2.7. MANUFATURA DAS PEÇAS

De posse dos 4 moldes obtidos pelos distintos métodos de concepção, iniciou-se a produção de 10 peças de PRFV por molde, usando o processo de laminação manual.

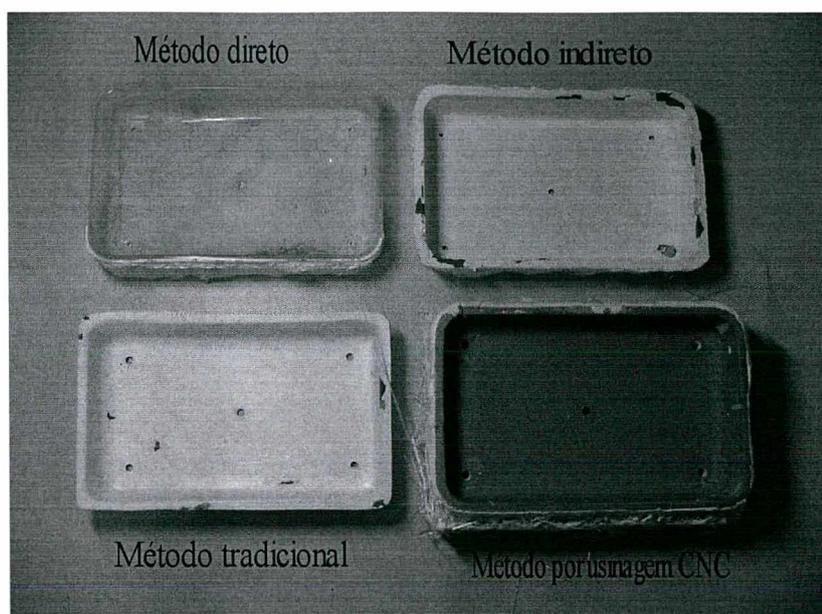
Os materiais utilizados na produção das peças foram: resina RESAPOL 10-228 (ortoftálica e pré-acelerada) e manta de fibra de vidro com gramatura 450 g/m<sup>2</sup>. As propriedades desta resina já foram mostradas na tabela 14.

Adotou-se a extração com ar comprimido, agente desmoldante semipermanente entre o molde e a peça e 1,5% de MEC (iniciador de reação). A temperatura ambiente foi medida com um termômetro digital e oscilou entre 20 e 35 °C e os picos exotérmicos (durante a cura), entre 35 e 105°C. Semelhantemente ao estudo preliminar, adicionou-se acetona no *gelcoat*.

A figura 35 mostra uma fotografia das peças fabricadas, a figura 36 mostra os moldes produzidos para o estudo de caso 2 e a tabela 18 ilustra as quantidades de modelos, moldes e peças usados nos dois estudos de caso realizados neste trabalho.



**FIGURA 35** - Peças de PRFV produzidas pelo processo de laminação manual.



**FIGURA 36** - Moldes confeccionados para o estudo de caso 2.

**TABELA 17** - Estudos de caso realizados neste trabalho.

Estudo de Caso	Critério de avaliação	Tipo de comparação	Quantidade de modelos	Quantidade de moldes	Quantidade de peças
Preliminar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aspecto visual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nenhuma</li> </ul>	1	1	1
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aspecto visual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tolerância dimensional</li> <li>• Tempo de fabricação</li> </ul>	2	4	40

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1. ESTUDO DE CASO PRELIMINAR**

#### **5.1.1. QUANTO AOS TESTES DE CONTATO**

Nos testes de contato realizados no estudo de caso preliminar, dentre todos os materiais empregados, o único produto que modificou as propriedades e características da resina SL 5170 foi o solvente denominado acetona.

Entretanto, a influência causada por este solvente pode ser considerada irrelevante, pois este é aplicado em pequenas quantidades e por tempo reduzido. No teste realizado, o tempo e a quantidade de solvente em contato com a resina foram exagerados para induzir possíveis reações e, mesmo assim, durante aproximadamente 2 horas a resina manteve suas características, tempo suficiente para ocorrer a gelificação, curar completamente a peça e toda a acetona evaporar antes de causar qualquer dano ou modificação na resina SL 5170. Outro aspecto interessante a ressaltar é que a resina em contato possuía somente uma casca de 5 mm<sup>2</sup> de área com 0,1 mm de espessura. Sabendo que a acetona reage proporcionalmente ao volume de material em contato, uma peça de maiores dimensões e espessura, resistiria mais de 2 horas antes de apresentar alterações. Outra observação importante foi que após as 2 horas de contato entre o corpo de prova de estereolitografia e a acetona, o mesmo adquiriu flexibilidade, porém não dissolveu. O teste prosseguiu até completar 24 horas de imersão do fragmento dentro do solvente. Como a acetona é altamente volátil, era adicionado constantemente mais solvente para manter a casca de resina imersa. Após as 24 horas, interrompeu-se a adição de solvente e observou-se que o fragmento de resina voltou a enrijecer, aparentemente mais frágil e apresentando aspecto ressecado. O teste não

prosseguiu, em virtude da acetona ser normalmente empregada em pequenas quantidades e por tempo reduzido quando utilizada. Além disso, a tendência é eliminar este solvente do processo produtivo devido a diversos fatores negativos causados por ele (porosidade na peça, defeitos no *gelcoat*, perda de propriedades mecânicas na peça etc.). Outra observação relacionada também à acetona foi referente à sua inserção no *gelcoat* aplicado sobre o modelo de estereolitografia. Embora o *gelcoat* já contenha solvente em sua composição (monômero de estireno), as cargas adicionadas para melhorar determinadas características (acrescentar cor, aumentar tixotropia, incrementar propriedades mecânicas etc.), tornam o *gelcoat*, não raro, muito denso, dificultando a passagem do composto pela pistola. Para facilitar esta etapa, é comum, porém não recomendado, diluir o *gelcoat* em acetona, pois sendo um solvente altamente volátil, espera-se que logo após sua projeção a alta velocidade, o mesmo evapore antes de atingir a superfície do substrato (modelo ou molde). Mesmo que algumas partículas deste solvente alcancem o anteparo, este terá poucas chances de inibir a solidificação da película de *gelcoat*. Entretanto, se depositado em demasia sobre o substrato - e isso ocorre com frequência, devido ao fator humano que geralmente não controla a distância mínima de projeção recomendada (600 mm) [4] -, sua composição química pode danificar a película de *gelcoat* de diversas maneiras, como já mencionado [59].

### **5.1.2. QUANTO AO CRITÉRIO ASPECTO VISUAL**

O critério de avaliação utilizado, foi observar o aspecto visual do molde, usando o modelo e a peça como referência, se necessário.

No modelo de estereolitografia foi realizado o acabamento superficial com lixas, seguido de polimento. Até este momento, a superfície do modelo apresentava um bom aspecto visual e as linhas de construção geradas pela trajetória do feixe de laser não eram mais visíveis a olho nu. Ao produzir-se o molde, através do método indireto, tais linhas tornaram-se

visíveis, tanto no modelo de estereolitografia, quanto no molde de PRFV (ver figura 37), ou seja, o molde reproduziu a geometria do modelo, mas também reproduziu suas linhas de construção, provenientes da tecnologia de estereolitografia. Da mesma forma ocorreu o defeito na peça fabricada, uma vez que o molde curou reproduzindo o formato das linhas.

Possíveis causas desta limitação são apresentadas a seguir: pode ter ocorrido uma reação química entre o modelo à base de epóxi e o molde de PRFV à base de poliéster insaturado; a temperatura de cura do molde de PRFV pode ter sido mais alta que a  $T_g$  da resina de estereolitografia, amolecendo o modelo; a contração do molde pode ter pressionado o modelo de estereolitografia marcando o modelo e o molde; a pós-cura do modelo de estereolitografia pode ter sido incompleta; a diferença de rigidez entre a região fotocurada pela incidência direta do feixe de laser e a região curada somente pela incidência da luz ultravioleta do forno pode ter ocasionado o defeito.

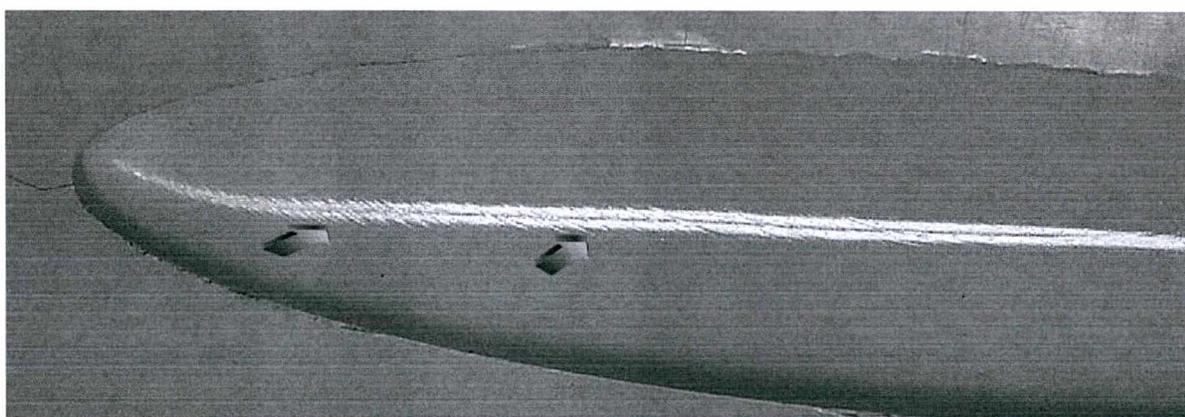
Como possíveis soluções, poder-se-ia se usar resinas de estereolitografia com  $T_g$  acima do pico exotérmico de cura do molde, manter a temperatura de cura do molde abaixo da  $T_g$ , realizar uma pós-cura apropriada (2 horas ou mais) no modelo de SL antes de iniciar o molde ou executar um novo polimento sobre a superfície do molde, ciente do declínio de precisão e redução de sua vida útil. Contudo, tal limitação deveria ser mais investigada para descobrir sua real causa.

Além das marcas da trajetória do feixe de laser, foram constatadas bolhas de ar aprisionadas no modelo que geraram pontos de fragilidade no mesmo, mas como neste método o modelo é usado somente uma vez, ou poucas vezes (quando é o caso de necessitar mais de um molde), tal limitação não é tão relevante.

Pela característica de baixa resistência ao desgaste abrasivo dos materiais plásticos em geral e por necessitar de intervenção humana durante o acabamento superficial, o aspecto visual do modelo ficou comprometido. Como a todo instante o operador oscilava a

intensidade do esforço manual sobre o modelo, pequenas ondulações de superfície foram constatadas. Essas ondulações foram reproduzidas pelo molde e pelas peças.

Ondulações podem ser causadas por variações de espessura durante a laminação da peça, por maior ou menor concentração de resina, fibra de vidro ou cargas e pela má mistura do iniciador de reação dentro da resina. Todavia, o modelo de SL apresenta as mesmas ondulações que a peça, indicando que a provável causa das ondulações é a oscilação do esforço durante o acabamento manual e não os fatores supracitados.



**FIGURA 37** - Marcas das linhas de construção do modelo de SL geradas pela trajetória do feixe de laser e reproduzidas pelo molde de PRFV.

## **5.2. ESTUDO DE CASO 2**

### **5.2.1. QUANTO AO CRITÉRIO ASPECTO VISUAL**

O critério de avaliação utilizado foi observar o aspecto visual dos moldes, comparando-os entre si e usando os modelos e as peças como referência, se necessário.

A seguir, as observações constatadas estão sistematizadas por tipo de método de construção do molde.

## - MÉTODO DIRETO DE FERRAMENTAL RÁPIDO

Sendo que o molde foi construído com a superfície moldante orientada contra a plataforma da máquina de SL, ao remover-se os suportes, permaneceram marcas na região moldante. Além das marcas dos suportes, também foram observadas marcas da trajetória do feixe de laser e do “efeito escada” citado por Gomide [8]. O procedimento de lixamento e polimento foi realizado e igualmente ao estudo de caso preliminar, nenhuma marca permaneceu visível a olho nu. No instante em que a primeira peça produzida foi desmoldada, todas as marcas (dos suportes e da trajetória de construção) tornaram-se novamente visíveis. A cada nova moldagem a profundidade das marcas aumentava, piorando cada vez mais o aspecto visual do molde e consequentemente das peças (ver esquema da figura 38).

Foram constatadas bolhas de ar aprisionadas no interior do molde de SL. Este defeito causa pontos de fragilidade e compromete o acabamento superficial, caso a bolha se localize próximo à superfície de moldagem, fato este ocorrido em três posições do molde.

Da mesma forma que o estudo de caso preliminar, a superfície do molde e consequentemente das peças, apresentaram-se onduladas.



(a) 2ª peça moldada.

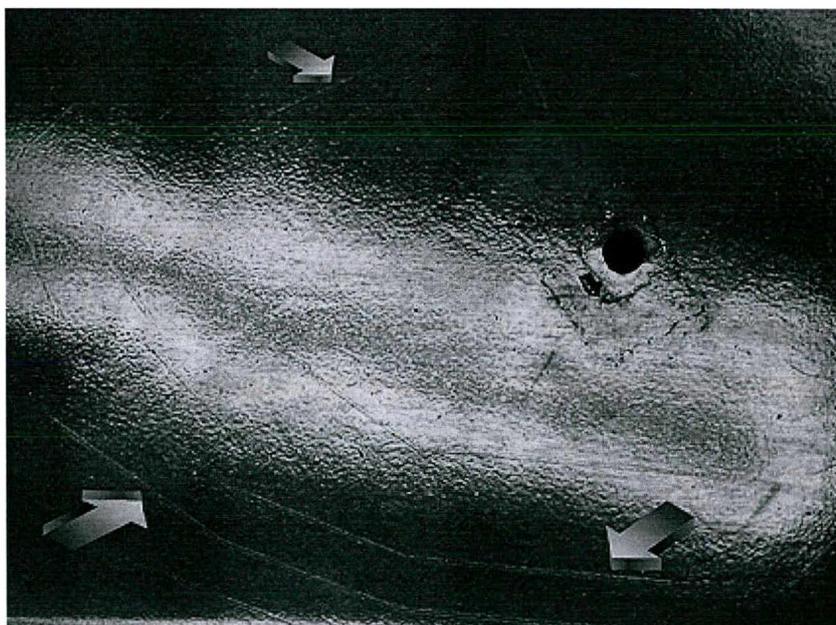
(b) 10ª peça moldada.

**FIGURA 38** - Evolução da profundidade das marcas de trajetória na superfície do molde de estereolitografia reproduzidas pelas peças moldadas.

## - MÉTODO INDIRETO DE FERRAMENTAL RÁPIDO

Da mesma forma que os casos anteriores, as linhas de construção da superfície, geradas pela trajetória do feixe de laser, foram reproduzidas pelo molde de PRFV (ver figura 39). Um dos motivos pode ter sido a pós-cura inadequada, pois o modelo de SL poderia receber mais energia de cura adquirindo com isso maior rigidez para suportar a contração e impedir que o molde se deformasse. Provavelmente uma pós-cura adequada resolveria esta limitação, entretanto este mecanismo deveria ser mais pesquisado para compreender a sua causa.

Além disso, foram constatadas bolhas de ar aprisionadas no modelo de SL e no molde de PRFV. No modelo, esta limitação não é muito relevante, pois como já citado é usado só uma vez; já no molde, compromete a moldagem, porque vai produzir várias peças. Como, neste caso, o molde é de PRFV, o defeito poderia ter sido minimizado furando as bolhas durante a sua construção ou empregando aditivos desaerantes na sua composição.



**FIGURA 39** - Marcas da trajetória de construção do modelo de estereolitografia reproduzidas pelo molde de PRFV.

### - MÉTODO TRADICIONAL (artesanal)

A forma geométrica do modelo tradicional não representou tão bem a geometria do projeto da peça quanto o modelo e o molde de SL. Conseqüentemente o molde de PRFV também não. Isso era esperado em função do modelo ser manualmente construído.

Além disso, é estado da técnica o modelo suportar as contrações do molde. Estes dois fatores permitiram que o modelo fosse reproduzido pelo molde de PRFV sem apresentar as marcas de trajetória constatadas nos métodos anteriores (ver figura 40).

Foram constatadas bolhas de ar no molde de PRFV que poderiam ter sido evitadas, furando-as durante a sua confecção ou empregando aditivos desaerantes na sua composição.



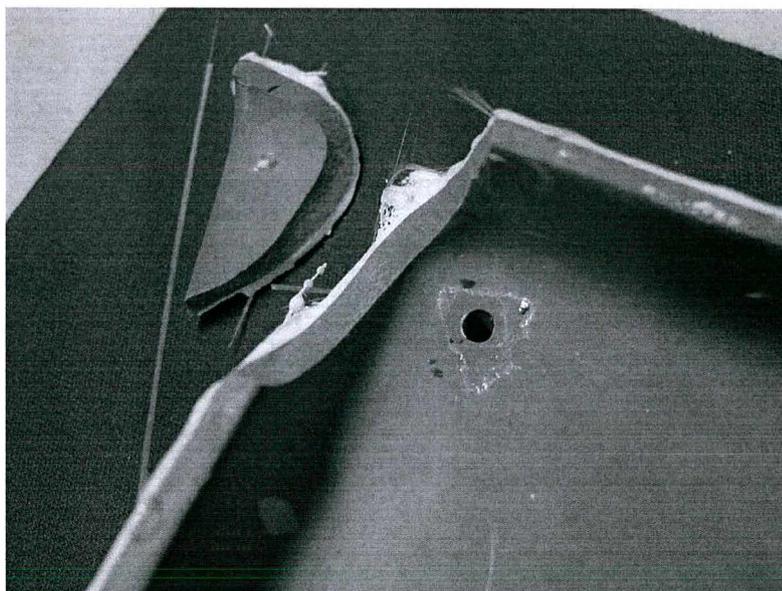
**FIGURA 40** - Aspecto visual do molde artesanal após ter sido usado para produzir as peças.

### - MÉTODO POR FRESAMENTO CNC CONVENCIONAL

Com relação ao aspecto visual o molde obtido por fresamento CNC convencional foi o pior dentre os quatro moldes (ver figura 41) e conseqüentemente das peças, como era esperado. Obviamente, tal resultado não foi causado pelo método empregado, mas sim pela porosidade do material utilizado na usinagem (RENSHAPE<sup>®</sup> 460), a qual foi reproduzida nas

peças, tornando-as opacas. Cabe ressaltar que se o material usinado fosse, por exemplo, aço, alumínio ou uma placa de outro material de maior densidade, o aspecto visual seria melhor.

Cabe ressaltar que neste método, os dutos do sistema de extração não orientaram eficientemente a pressão de ar contra a peça, dissipando parte dela, entre os poros do material do molde. Além disso, a porosidade do molde proporcionou maior atrito entre o molde e a peça. O molde quebrou durante a extração da 3ª peça. Porém o motivo não se deve ao comentado, mas sim ao acabamento manual após a usinagem, pois observando o molde, constatou-se um ângulo de saída negativo (gerado pelo acabamento manual) na região onde ocorreu a falha (ver figura 41). O molde foi reparado e mais 10 peças foram produzidas.



**FIGURA 41** - Aspecto visual do molde obtido pelo fresamento em RENSHAPE® 460 da cavidade e detalhe de sua região de falha.

### **5.2.2. QUANTO AO CRITÉRIO DESVIO-PADRÃO**

Para avaliar o desvio-padrão das 10 peças produzidas com cada molde, usou-se o mesmo processo produtivo (laminação manual), a mesma resina, o mesmo tipo de fibra de vidro (*roving* picado) e o mesmo iniciador de reação.

Os resultados das dimensões medidas nas peças produzidas são apresentados por tipo de molde, nas tabelas 19 e 20, onde se pode constatar através da dispersão, que todas as peças, independentemente do método de construção do molde, apresentaram valores usualmente obtidos e aceitáveis para o processo de laminação manual (de 0,18 mm a 0,37 mm para a largura e de 0,18 mm a 0,32 mm para o comprimento) segundo a empresa onde as peças foram moldadas. Nas tabelas 21 e 22 apresentam-se as comparações entre as dimensões dos moldes e suas dimensões originais. É importante esclarecer que para os moldes concebidos a partir do CAD, o padrão é a medida nominal do CAD e para o molde tradicional o padrão é o modelo artesanal.

Na tabela 21 é mostrada uma comparação entre as dimensões dos moldes concebidos a partir do CAD e as dimensões nominais do CAD. No caso do RT direto, justifica-se o incremento dimensional em função da etapa de acabamento à qual o molde foi submetido. Com relação ao RT indireto, a largura se apresentou menor e o comprimento maior que a dimensão nominal. Possíveis razões para tal disparidade são a contração da resina e o fato de não ter sido realizado nenhum tipo de preenchimento da casca do modelo de SL, visando elevar sua resistência mecânica como em estudos anteriores [8, 9]. Outra possível justificativa seria ter ocorrido uma reação química entre o modelo de SL e o molde de PRFV, mas a mais provável justificativa é que neste método o molde é de PRFV e como a pós-cura do molde ocorreu a temperatura ambiente e sem contato com o modelo de SL, suas ligações cruzadas remanescentes podem ter causado uma alteração nas dimensões do molde. Ou seja, podem ter “distorcido” o molde de PRFV.

Quanto ao molde usinado, justifica-se o aumento das dimensões, da mesma forma que para o RT direto, ou seja, o acabamento manual ao qual a cavidade foi submetida após o fresamento CNC. Um fato importante a ressaltar é que as dimensões do molde obtido por fresamento se distanciaram bastante da medida nominal (1,77 mm para a largura e 2,68 mm

para o comprimento), devido à porosidade do material do molde (RENSHAPE<sup>®</sup> 460). Esta etapa deveria ter sido executada mais cuidadosamente.

A respeito do molde artesanal, a tabela 22 mostra que suas dimensões diminuíram em relação ao modelo (padrão de comparação). Como a pós-cura do molde ocorreu a temperatura ambiente e separada do modelo, as ligações cruzadas remanescentes podem ter causado uma redução nas dimensões do molde, da mesma forma que no RT indireto.

**TABELA 18** - Média, desvio-padrão, intervalo de confiança e máximos / mínimos observados

na largura.

Medidas (mm)	RT direto	RT indireto	Molde artesanal	Molde usinado
Largura das peças	80,42	79,52	80,88	82,00
	80,38	80,00	80,36	81,58
	80,00	79,98	80,02	82,24
	79,96	79,90	80,00	81,74
	80,06	79,92	80,20	81,74
	79,94	80,28	80,84	82,50
	80,32	79,92	80,34	81,80
	80,68	79,94	80,04	81,82
	81,12	79,92	80,04	82,24
	80,46	79,90	80,60	82,26
Média	80,33	79,93	80,33	81,99
Desvio-padrão	0,3719	0,1826	0,3377	0,3011
Intervalo de confiança a 95%	± 0,0793	± 0,0389	± 0,0720	± 0,0642
Máximo	81,12	80,28	80,88	82,50
Mínimo	79,94	79,52	80,00	81,58

**TABELA 19** - Média, desvio-padrão, intervalo de confiança e máximos / mínimos observados

no comprimento.

Medidas (mm)	RT direto	RT indireto	Molde artesanal	Molde usinado
Comprimento das peças	129,60	128,90	132,26	131,48
	129,62	129,00	131,54	130,78
	129,48	128,98	132,10	130,98
	129,42	129,20	131,84	130,78
	129,54	129,32	131,48	130,70
	129,70	129,40	132,24	131,18
	129,50	129,00	131,52	130,48
	129,94	129,32	132,12	130,50
	129,92	129,22	131,86	130,98
	129,72	129,00	131,50	130,94
Média	129,64	129,13	131,85	130,88
Desvio-padrão	0,1775	0,1776	0,3197	0,3037
Intervalo de confiança a 95%	± 0,0378	± 0,0378	± 0,0681	± 0,0647
Máximo	129,94	129,40	132,26	131,48
Mínimo	129,42	128,90	131,48	130,48

**TABELA 20** - Comparativo entre as dimensões dos moldes concebidos a partir do CAD e as dimensões modeladas no CAD.

Dimensões (mm)	Largura	Comprimento	Variação em relação a medida nominal do CAD	
			Largura	Comprimento
Nominal do CAD	79,73	128,72	Largura	Comprimento
RT direto	80,00	129,30	+ 0,27	+ 0,58
RT indireto	79,20	128,84	- 0,53	+ 0,12
Molde usinado	81,50	131,40	+ 1,77	+ 2,68

**TABELA 21** - Comparativo entre as dimensões do molde e do modelo artesanal.

Dimensões (mm)	Largura	Comprimento	Variação em relação a medida nominal do modelo artesanal	
			Largura	Comprimento
Modelo artesanal (nominal)	80,90	131,92		
Molde artesanal	80,40	131,70	- 0,50	- 0,22

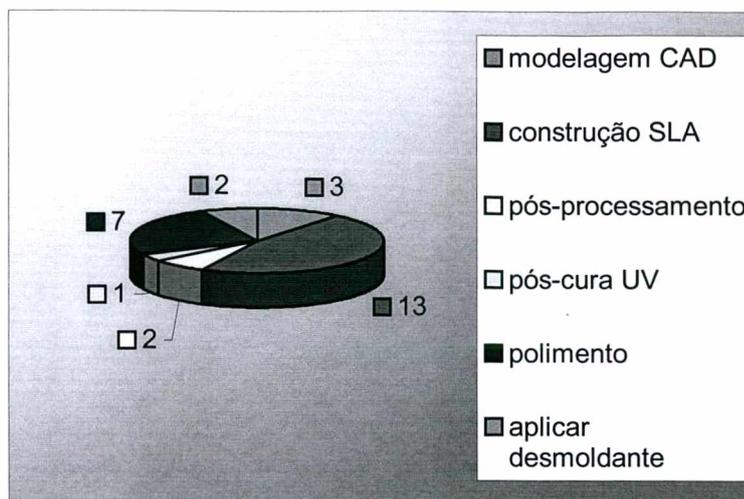
### 5.2.3. QUANTO AO CRITÉRIO TEMPO DE FABRICAÇÃO

O critério tempo de fabricação computou o tempo total despendido para se obter cada molde desde a modelagem, até a sua conclusão e serviu para se obter um valor aproximado dos tempos de confecção de cada método estudado.

A seguir, os resultados e as constatações estão sistematizadas por tipo de método de construção do molde.

#### - MÉTODO DIRETO DE FERRAMENTAL RÁPIDO

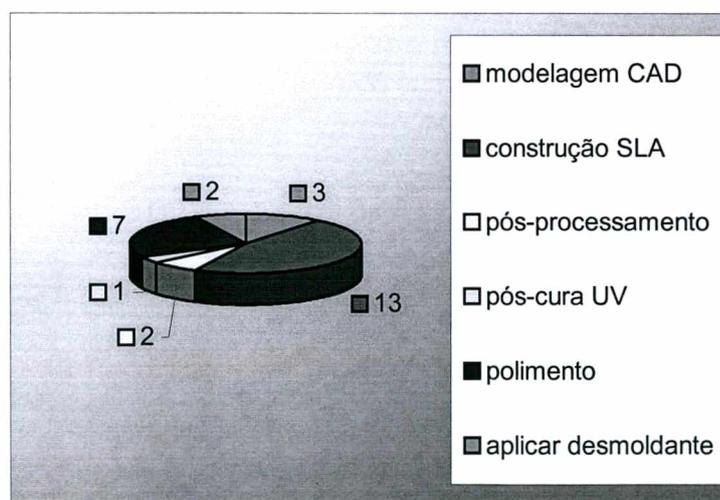
O tempo consumido na confecção do molde foi computado desde o modelamento CAD até a aplicação de desmoldante para iniciar a produção, onde se despendeu em torno de 3 horas para modelar virtualmente o ferramental, 13 horas para construir o molde protótipo com os parâmetros usuais da máquina SLA, 2 horas para remover o excesso de resina, 1 hora de pós-cura UV, 7 horas para o polimento e 2 horas para aplicar o desmoldante. Por este método, o molde foi construído em 28 horas, como mostra a figura 42.



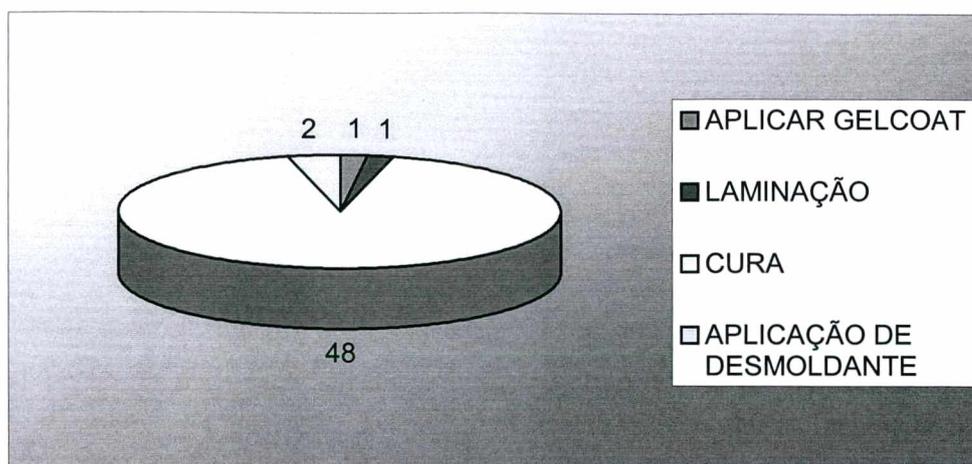
**FIGURA 42** - Tempo de confecção do ferramental direto (em horas).

#### - MÉTODO INDIRETO DE FERRAMENTAL RÁPIDO

Neste método, o modelo de SL foi construído em 28 horas (ver figura 43), seguindo as mesmas etapas do método direto. Como foi necessário confeccionar o molde de PRFV, a partir do modelo de SL, foram gastas adicionalmente mais 52 horas (ver figura 44), totalizando 80 horas até a conclusão do molde.



**FIGURA 43** - Tempo de confecção do modelo de estereolitografia (em horas).

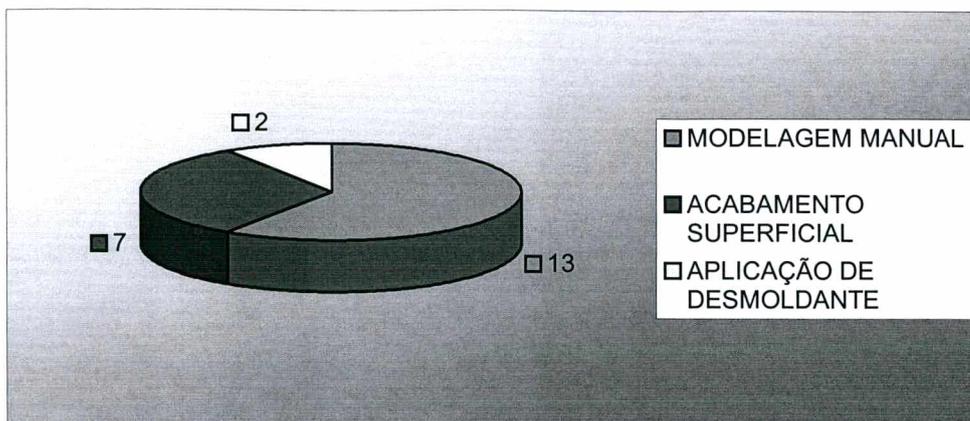


**FIGURA 44** - Tempo de confecção do ferramental indireto (em horas). As legendas laminação e

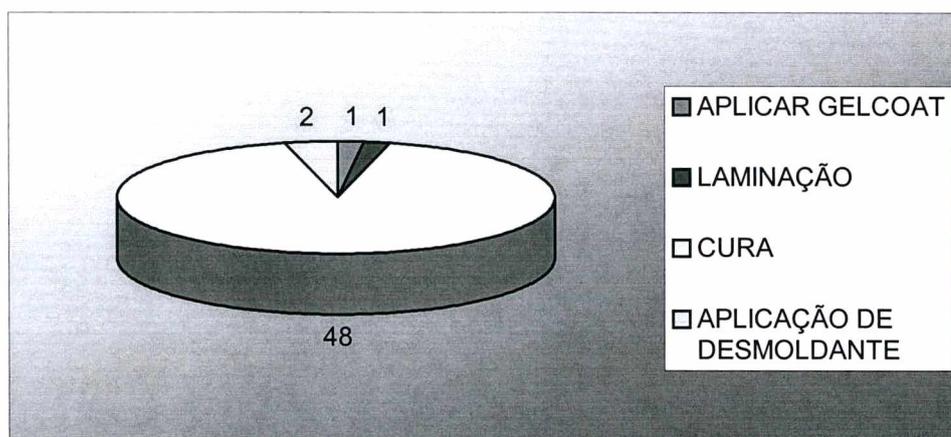
cura, realizadas intercaladamente duas vezes, representam o total despendido nestas etapas.

#### - MÉTODO TRADICIONAL (artesanal)

Neste método, o modelo exigiu 22 horas para ser artesanalmente construído, o que representou um curto tempo de desenvolvimento do modelo (ver figura 45). Em contrapartida, a forma geométrica não ficou tão bem representada como nos métodos anteriores. Além disso, se a complexidade geométrica fosse maior, os métodos mecanizados (estereolitografia ou usinagem) executariam a tarefa mais rapidamente que o método tradicional, mantendo a precisão. Como foi necessário confeccionar o molde de PRFV, a partir do modelo manualmente confeccionado, foram despendidas mais 52 horas (ver figura 46), totalizando 74 horas para o molde ser concluído.



**FIGURA 45** - Tempo de confecção do modelo tradicional (em horas).

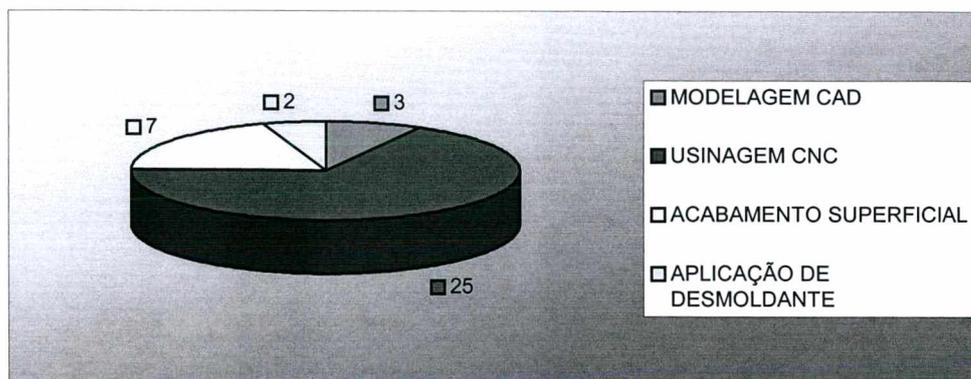


**FIGURA 46** - Tempo de elaboração do molde tradicional (em horas). As legendas laminação e cura, realizadas intercaladamente duas vezes, representam o total despendido nestas etapas.

#### - MÉTODO POR FRESAMENTO CNC CONVENCIONAL

Optou-se pelo fresamento da cavidade com um material polimérico à base de epóxi. A usinagem foi realizada com uma única ferramenta durante ambas estratégias empregadas, já ilustradas na tabela 17 sob as designações, “contornando” para o desbaste e “varredura em linha eixo X” para o acabamento.

Neste método, o molde foi produzido em 37 horas, distribuídas entre as etapas mostradas na figura 47.

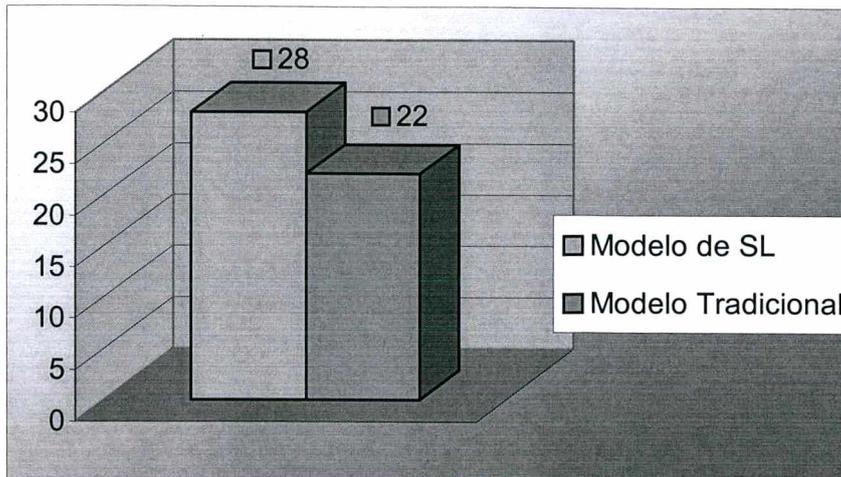


**FIGURA 47** - Tempo de confecção do molde obtido pelo fresamento da cavidade (em horas).

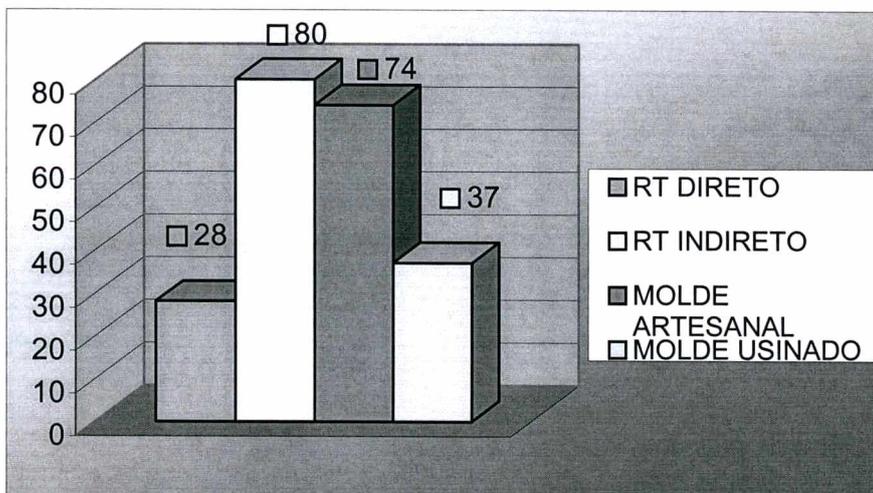
### 5.3. CONSIDERAÇÕES GERAIS

As figuras 48 e 49 apresentam o tempo total investido na construção dos modelos e moldes. O modelo de estereolitografia, embora tenha exigido maior tempo de fabricação que o modelo tradicional, representou melhor a forma geométrica da peça (ver figura 48).

Pela figura 49, neste estudo de caso, o método direto mostrou ser o de produção mais rápida, sugerindo ser mais vantajoso quando a complexidade geométrica do molde for maior. Quanto ao método indireto, a maior parte do tempo de desenvolvimento está relacionada ao tempo de cura do molde, neste caso 48 horas. É importante salientar que para dimensões maiores, este tempo permanecerá praticamente o mesmo, trazendo vantagens para esta técnica. Já o método tradicional, bastante conhecido pelo setor do PRFV é barato e dificilmente será substituído por outro método, se não houver vantagens, apesar de ser lento e de baixa precisão e o método por usinagem, usa uma tecnologia mais explorada. O resultado foi bastante rápido, no entanto apresentou limitações (já comentadas).



**FIGURA 48** - Tempo total de confecção dos modelos (em horas).



**FIGURA 49** - Tempo total de confecção dos moldes (em horas).

## 6. CONCLUSÃO

### 6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos através dos estudos de caso realizados neste trabalho, mostraram que é possível utilizar a estereolitografia como recurso tecnológico para auxiliar na construção de moldes de precisão para o setor do plástico reforçado. É importante salientar que o atual volume útil das máquinas de prototipagem limita sua aplicação. Entretanto, se a prototipagem rápida continuar a se disseminar, será uma alternativa tecnológica bastante útil para este setor. A durabilidade dos moldes poderá aumentar em virtude desta tecnologia utilizar resinas epóxi de desempenho superior às de poliéster insaturado e o processo permitir repetibilidade o que reduziria a baixa precisão e a baixa velocidade, atuais fatores limitantes de grande parte das indústrias de polímeros reforçados.

Alguns mecanismos exigirão maiores estudos para minimizar as limitações da estereolitografia quando orientada para este setor. O principal deles são as linhas de construção geradas pelo feixe de laser, durante a fabricação do objeto, que se agravam a cada desmoldagem, sendo reproduzidas pela peça de PRFV. Acredita-se que este inconveniente possa ser eliminado empregando resinas com temperatura de transição vítrea mais elevada, empregando técnicas de revestimento superficial mais resistentes que o *gelcoat* utilizado nos estudos de caso ou realizando uma pós-cura mais apropriada nas resinas de estereolitografia. As resinas de estereolitografia utilizadas foram a Ciba<sup>®</sup> SL 5170 e DuPont<sup>®</sup> Somos 7110, apresentando temperatura de transição vítrea entre 60°C e 90°C, quando pós-curadas durante 2 horas em forno UV. Existem resinas epóxi fotossensíveis que atingem temperaturas de transição vítrea acima de 150°C se pós-curadas. Essas resinas possuem estruturas moleculares com ligações rígidas (*Rigid-rod*), as quais formam ligações cruzadas de elevada intensidade.

Como resultado, apresentam elevada temperatura de transição vítrea e propriedades físicas e mecânicas elevadas [39, 49]. Acredita-se que essa solução seja a mais indicada por não exigir retrabalho no molde, o que reduziria sua vida útil.

Outro problema inerente ao processo de estereolitografia é o aprisionamento de bolhas de ar que também deve ser eliminado por criar uma região de fragilidade no molde e por danificar o acabamento superficial do mesmo, caso a bolha se localize próximo à superfície da cavidade.

Um aspecto interessante do estudo é que não foi necessário realizar nenhum tipo de preenchimento da casca do molde de SL visando elevar a resistência mecânica como em estudos anteriores [8, 9], embora isso possa ser feito, quando necessário, tomando os devidos cuidados com relação às contrações dos materiais de preenchimento. O mais apropriado é utilizar materiais de baixa contração, misturados com cargas inertes e gerar os dutos de desmoldagem durante a prototipagem, caso sejam muito complexos. É importante ressaltar que qualquer acúmulo de material logo atrás da casca como alternativa de reforço, terá sua forma reproduzida pelo molde de PRFV. Nervuras, furos, pontos de apoio terão suas seções copiadas pelo molde e, conseqüentemente, marcas visíveis na peça. É prática comum agregar tais detalhes após a moldagem ou fabricar o molde maciço como realizado no estudo de caso preliminar, ciente que, nesse caso, o custo e o tempo de fabricação serão maiores.

Algumas vantagens foram observadas durante os estudos de caso desenvolvidos neste trabalho: o “**brilho**” superficial obtido nos modelos e moldes de SL e de PRFV agrega vantagens ao processo de desenvolvimento de ferramental rápido como, por exemplo, proporciona moldes mais duráveis, peças de aparência visual atraente e reduzem os custos de manutenção do molde; a **velocidade** e a **precisão** aumentam se empregadas tecnologias de estereolitografia ou de usinagem CNC; a **flexibilidade para projetar** aumenta consideravelmente. Peças de difícil concepção passam a ser mais facilmente fabricadas em

virtude do ambiente virtual propiciado pelos sistemas CAD, CAM e outros; a **vida útil** dos moldes, dependendo do material utilizado, também pode aumentar.

A estereolitografia é rápida e precisa, porém recente. Sua tecnologia não é profundamente dominada, muito menos o ferramental rápido por estereolitografia aplicado ao segmento do PRFV. Por outro lado, processos como o fresamento de topo em 3 eixos ou o método artesanal, quando usados como meio para conceber uma ferramenta rápida, normalmente requerem longos períodos de fabricação, mas já são bem explorados e desenvolvidos.

Finalmente, mas não menos importante, fica evidente que o “nicho” atual da estereolitografia, no setor do PRFV, está na fabricação de pequenos e médios moldes de geometria complexa, onde sua tecnologia e ambiente virtual proporcionam diversos recursos para o projeto e a manufatura, de maneira versátil, precisa e rápida.

## 6.2. SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Buscando dar continuidade a novas pesquisas relacionadas ao tema em questão, expõe-se a seguir algumas sugestões para futuros trabalhos na área.

- Desenvolver e avaliar técnicas de recobrimento superficial diferentes do *gelcoat*, com o intuito de aumentar a resistência ao desgaste, melhorar o acabamento superficial e a tolerância dimensional.
- Avaliar a viabilidade de utilizar a estereolitografia na concepção de moldes fechados como, por exemplo, RTM, BMC e moldagem a vácuo. Isso permitiria moldar peças com incerteza dimensional reduzida e acabamento superficial em ambas as faces da peça.
- Investigar a possibilidade de montar diferentes modelos obtidos por estereolitografia permitindo dessa forma, ampliar o tamanho das peças e, conseqüentemente, o interesse do setor do PRFV por essa tecnologia.

- Investigar qual seria a vida útil de um molde de estereolitografia ao ser colocado em produção no setor do plástico reforçado com fibra de vidro.
- Pesquisar mais sobre as ondulações e marcas de trajetória do laser, buscando uma forma de eliminar esta limitação.
- Investigar a possibilidade de construir moldes utilizando outras tecnologias de prototipagem rápida, que tragam outros benefícios ao segmento do PRFV como, por exemplo, construir moldes de material termoplástico e aproveitar a característica "antiadesiva" de determinadas blendas. Uma alternativa seria a prototipagem rápida por FDM (*Fusion Deposition Modeling*).
- Investigar a contração das resinas de poliéster insaturado fazendo uso de várias formas geométricas tais como: esfera, cilindro, cubo e paralelepípedo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OKIMOTO, M. L. L. R. **Estudo do Setor de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro no Estado de Santa Catarina.** Dissertação de Mestrado UFSC, Santa Catarina, 1994.
  
- [2] MICHAELI, W, et al GREIF, H, KAUFMANN, H, VOSSEBÜRGER F. **Tecnologia dos Plásticos.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1995.
  
- [3] BLASS, A. **Processamento de Polímeros.** 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1988.
  
- [4] D'ARSIÉ, D. **Los Plásticos Reforzados con Fibras de Vidrio.** 7.ed. Buenos Aires: America-Lee, 1980.
  
- [5] OWENS CORNING. **Compósitos: Guia de Laminação Manual e a Pistola.** São Paulo. 1996.
  
- [6] PARKIN, B. **Glass Reinforced Plastics.** London: Iliffe Books, 1970.
  
- [7] OMETTO L. **Contração de Resinas** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <tecnico@cromitec.com.br> em 15 set. 2000.

- [8] GOMIDE, R. B. **Fabricação de Componentes Injetados em Insertos Produzidos por Estereolitografia**. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- [9] GRELLMANN, D. A. **Avaliação do Uso de Modelos de Estereolitografia na Fabricação de Peças Metálicas Obtidas pelo Processo de Microfusão**. Projeto de Dissertação, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- [10] CHECHETTO, R; MOREIRA, W; VALESE, L. et al. Agentes Desmoldantes. **Revista do Plástico Reforçado**. São Paulo: Editora do Administrador, ano II, n. 8, p. 42 – 46, jul / ago, 1999.
- [11] TUTORIAL ON POLYMER COMPOSITE MOLDING. **Definition of Composite**. Disponível em: <[http://islnotes.cps.msu.edu/trp/back/bas\\_cmp.html](http://islnotes.cps.msu.edu/trp/back/bas_cmp.html)> Acesso em: 29 nov. 1999.
- [12] MODERN PLASTICS ENCYCLOPEDIA HANDBOOK. USA: McGraw Hill, 1994.
- [13] PHAM, D.T., DIMOV, S and LACAN, F. Firm Tooling – Bridging the Gap between Hard and Soft Tooling, **Prototyping Technology International'98**, England: UK & Int. Press, pp. 196-203, 1998. ISSN 1367-2436.
- [14] **FABRICAÇÃO DE MOLDES PARA LAMINAÇÃO DE PLÁSTICO REFORÇADO**, 2000, Sorocaba. Editora do Administrador, 2000.

- [15] VETROTEX WEB SITE. **Algumas das Principais Propriedades dos Compósitos.**  
Disponível em: <<http://www.vetrotex.com.br>> Acesso em: 17 jun. 2000.
- [16] MYERS, Y. and NORTON, J. Rapid Manufacturing with Rapid Tooling.  
**Prototyping Technology International '98**, England, UK & Int. Press, , pp. 30-34,  
1998. ISSN 1367-2436.
- [17] BARALDI, U., DORMAL T and DAM, J. Choices for Injection Moulding.  
**Prototyping Technology International '98**, England, UK & Int. Press, pp. 164 -  
169, 1998. ISSN 1367-2436.
- [18] SARTOR, A. B. **Materiais Compósitos / Polímeros.** Relatório de Estágio  
Profissional em Engenharia Mecânica. Friedrich-Alexander Universität - Erlangen-  
Nürnberg Lehrstuhl für Kunststofftechnik e Universidade Federal de Santa Catarina,  
1998.
- [19] VETROTEX América do Sul. **RTM: Resin Transfer Moulding.** Capivari , SP,  
1999.
- [20] GOMIDE, R. B. GRELLMANN D. A.; AHRENS, C. H.; e FERREIRA, A. C.  
**Influência da Pós-Cura na Resistência Mecânica de Peças de Estereolitografia  
Fabricadas com Fotopolímero à Base de Epóxi.** In: 5º CONGRESSO  
BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 1999 Águas de Lindóia, SP. Anais.
- [21] WRIGHT, R. E. **Molded Thermosets: A Handbook for Plastics Engineers,  
Molders and Designers.** New York: Hanser Publishers, 1991.

- [22] VETROTEX América do Sul. **Laminação Manual e por Projeção**. Capivari, SP, 1999.
- [23] TSANG, H. and BENNETT G. **Rapid Tooling – Direct Use of SLA Moulds for Investment Casting**. Proceedings of the First National Conference on Rapid Prototyping and Tooling Research, Great Missenden, England, November 6-7, pp. 237-247, 1995.
- [24] MALE, J. C.; LEWIS, N. A. B. and BENNETT, G. R. **The Accuracy and Surface Roughness of Wax Investment Casting Patterns from Resin and Silicon Rubber Tooling Using a Stereolithography Master**. Centre for Rapid Design and Manufacture, Buckinghamshire College of Higher Education, UK, pp. 1-10,1996.
- [25] OWENS CORNING Web Site. **Tipos de fibras de vidro**. Disponível em: <<http://www.owenscorning.com.br>> Acesso em: 23 jun. 1999.
- [26] VETROTEX WEB SITE. **Processos de Transformação do PRFV**. Disponível em: <<http://www.vetrotex.com.br>> Acesso em: 12 ago. 1999.
- [27] MALLOY, R. A. **Plastic Part Design for Injection Molding – An Introduction**. New York: Hanser, 1994.
- [28] TIRANTI, J. **Glass Fibre for Schools: hand lay up with poliester resin**. London: 1972.

- [29] VOLPATO, N., Prototipagem Rápida / Ferramental Rápido no Processo de Desenvolvimento de Produto. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, SP, p. 76-88, jun. 1999.
- [30] CIBA® ESPECIALIDADES QUÍMICAS. **Peças em Minutos®**: guia de seleção de poliuretanos. Brasil, 2000.
- [31] CIBA® ESPECIALIDADES QUÍMICAS. **Materiais para Modelagem Rápida: CibaTool® RenShape®**. Brasil, 2000.
- [32] CIBA® DIVISÃO POLÍMEROS. **Catálogo de Produtos para Modelação e Ferramentaria: araldite – resinas epóxi para ferramentas**. Brasil, 2000.
- [33] REICHHOLD® RESANA. **Manual de Construção de Ferramentas com Resina Poliéster PolyLite® Profile**, Brasil, 2000.
- [34] WRIGHT, R. E. **Injection/Transfer Molding of Thermosetting Plastics**. New York: Hanser, 1995.
- [35] POTTER, K. **Resin Transfer Moulding**. London: Chapman & Hall, 1997.
- [36] **Liquid Moulding Technologies - Composite Materials Date 06-22-98.htm**.  
Endereço eletrônico: <http://composite.about.com/industry/composite> . Acessado em outubro de 1999.
- [37] NETO, A. B. Prototipagem Rápida agiliza o Desenvolvimento de Produtos. **Revista Metal Mecânica**, São Paulo, p. 08 – 17, ago. - set. 1999.

- [38] MACOSKO, C. W. **RIM: fundamentals of reaction injection molding**. New York: Hanser Publishers, 1989.
- [39] BRYANT, E., CHARTOFF, R. **Crosslink Density and the Glass Transition in Thermosetting Polymers**. Disponível em: [http://www.udri.udayton.edu/rpdl/Paper\\_CROSDENS/Figures.html](http://www.udri.udayton.edu/rpdl/Paper_CROSDENS/Figures.html) Acesso em 17 out. 2000
- [40] LAFRATTA, F. H. **Avaliação da Viabilidade do Uso de Líquidos Refrigerantes sob Alta Pressão no Processo de Injeção de Termoplásticos Utilizando Técnicas de “Rapid Tooling”**. Proposta de Tese, Curso de Engenharia Mecânica da UFSC. Florianópolis, 1997.
- [41] VANDRESEN, M. **Avaliação da Viabilidade do Uso da Técnica do Núcleo Perdido na Injeção de Peças Complexas, em Moldes de “Rapid Tooling”, a partir da Estereolitografia**. Proposta de Tese, Curso de Engenharia Mecânica da UFSC, Florianópolis, 1999.
- [42] POTTS, A. **Real Prototypes at Realistic Cost. Prototyping Technology International’98**, England: UK & Int. Press, p. 204 – 208, 1998. ISSN 1367-2436.
- [43] SIMS, A. A. **Rapid prototyping steaming ahead**. Reimpresso por Design News, out. 1994.

- [44] LIMA, J.L.G., GERCK, E. **Fabricação de Molde para Hélice de Geradores de Energia Eólica com 20 metros de Raio**. São Paulo: SOBRACON, 1995.
- [45] GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing**. Prentice Hall. 1996.
- [46] WOEBCKEN, W. **Saechtling International Plastics Handbook for the Technologist, Engineer and User**. 3. ed. Ohio: Hanser, 1995.
- [47] RODRIGUES, D. O SMC no Mundo. **Revista do Plástico Reforçado**, São Paulo: Editora do Administrador, ano III, n 14, p. 70 – 74, jul. - ago. 2000.
- [48] CARVALHO, A. Emissão de Estireno. **Revista do Plástico Reforçado**, São Paulo: Editora do Administrador, ano III, n 14, p. 28 – 30, jul. - ago. 2000.
- [49] SCHULTZ J.W.; ULLETT, J.S. and CHARTOFF, R.P. Novel Resins for Stereolithography. **Prototyping Technology International'98**, England: UK & Int. Press, p. 178 - 181, 1998. ISSN 1367-2436.
- [50] REZENDE, M. C., BOTELHO, E. C. O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. São Carlos: Associação Brasileira de Polímeros, ano X, v. 2, p. 4 – 10, abr. - jun. 2000.
- [51] PARDINI, L. C. Preformas para Compósitos Estruturais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. São Carlos: Associação Brasileira de Polímeros, ano X v. 2, p. 100 – 109, abr. - jun. 2000.

- [52] Market Development Alliance of the FRP Composites Industry. **FRP Overview: Definition, Materials, Manufacturing, Glossary, Links.** Disponível em: <<http://www.mdacomposites.org>> Acesso em: 27 nov. 2000.
- [53] RESENDE, V. O. M. Crescer com o RTM. **Revista do Plástico Reforçado.** São Paulo: Editora do Administrador, ano II, n. 8, p. 34 – 37, jul. - ago. 1999.
- [54] DOLENC, A. The Art of CAD/CAM. **Prototyping Technology International'98,** England: UK & Int. Press, , p. 20 - 24, 1998. ISSN 1367-2436.
- [55] WYATT, M., DISHART, K. Choosing a Solvent to Clean Stereolithography Parts. **Prototyping Technology International'98,** England: UK & Int. Press, p. 107 - 109, 1998. ISSN 1367-2436.
- [56] THORN, P. CNC Modelling is Affordable. **Prototyping Technology International'98,** England: UK & Int. Press, p. 170 - 172, 1998. ISSN 1367-2436.
- [57] MÜLLER, J. F. New Ways in RP. **Prototyping Technology International'98,** England: UK & Int. Press, p. 174 - 175, 1998. ISSN 1367-2436.
- [58] CASTILHO, I., GALLO, J. Seleção de Cargas Minerais. **Revista do Plástico Reforçado.** São Paulo: Editora do Administrador, ano II, n. 12, p. 28 - 30, mar./abr. 2000.

- [59] CARVALHO, A. Ondulações e Marcações no Gelcoat. **Revista do Plástico Reforçado**. São Paulo: Editora do Administrador, ano III, n. 13, p. 36 - 37, mai./jun. 2000.
- [60] **Orientação da Fibra**. Disponível em: <<http://www.m-base.de>> Acesso em: 8 ago. 2000.
- [61] NETO, E. M. Escolha do Processo Produtivo para Materiais Compostos. **Revista do Plástico Reforçado**. São Paulo: Editora do Administrador, ano II, n. 7, p. 35 - 40, mai./jun. 1999.
- [62] ARLT, E. F. RTM: Crescimento Contínuo. **Revista do Plástico Reforçado**. São Paulo: Editora do Administrador, ano II, n. 9, p. 64 - 66, set./out. 1999.
- [63] ESPECIAL. É Nessa Corrente que Eu Vou. **Revista do Plástico Reforçado**. São Paulo: Editora do Administrador, ano III, n. 13, p. 38 - 46, mai./jun. 2000.
- [64] SCHULTZ, J.W. and CHARTOFF, R.P. **Photopolymerization of Nematic Liquid Crystal Monomers for Structural Applications: Linear Viscoelastic Behaviour and Cure Effects**. J. Polym. Sci.: Part B, Polym. Phys., 36, Dayton, Ohio, 45469 – 0130, USA, 1998. ISSN 1081 – 1089.
- [65] COLTON, J. and BLAIR, B. Experimental Study of Post-Build Cure of Stereolithography Polymers for Injection Molds. **Rapid Prototyping Journal**, v. 5 n. 2, p. 72 – 81, MCB University Press, 1999. ISSN 1355 – 2546.

- [66] GUERREIRO, A. R. **Materiais Compostos Melhoram o Desempenho de Aeronaves. Plástico Industrial.** São Paulo: Aranda Editora Técnica Cultural Ltda., ano II, n. 24, p. 86 – 99, agosto, 2000.
- [67] SANTOS, R.C.T. BARBOSA, R.N. AQUINO, F.M.F. de. et al. Uma Análise do Comportamento Mecânico de Reservatórios Moldados a Vácuo. **Plástico Industrial.** São Paulo: Aranda Editora Técnica Cultural Ltda., ano II, n. 25, p. 104 - 109, setembro, 2000.
- [68] FERREIRA, A.C. AHRENS, C.H.; LAFRATTA, F.H. e GOMIDE R.B. Vantagens e Limitações do Uso de Estanho como Material de Preenchimento em Ferramental Rápido. **Plástico Industrial.** São Paulo: Aranda Editora Técnica Cultural Ltda., ano II, n. 25, p. 110 - 117, setembro, 2000.
- [69] ESCHL. J., DUSEL, K.-H., EYERER, P. **Evaluation of Stereolithography Resins – Investigation into the Photopolymerization.** Institute for Polymer Testing and Polymer Science Department of Polymer Engineering, IKP – University of Stuttgart, Böblinger Straße 78 D – 70199 Stuttgart Germany. Endereço eletrônico: [http://www.ikp2.uni-stuttgart.de/RP\\_IKP/Shrinkage/Shrinkagemodels.html](http://www.ikp2.uni-stuttgart.de/RP_IKP/Shrinkage/Shrinkagemodels.html)
- [70] HUGH, J. **Fiber Reinforced Plastics (FRP).** Disponível em: <[http://www.internet/1\\_1FIBER REINFORCED PLASTICS \(FRP\).htm](http://www.internet/1_1FIBER_REINFORCED_PLASTICS_(FRP).htm)> Acessado em: 03 jun. 2000.

## ANEXO A - *SOFTWARES*, EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

### *SOFTWARES*

- **Sistema CAD 3D:**
  - *SolidWorks*;
- **Sistema CAM para estereolitografia:**
  - *3D Lightyear*;
  - *Maestro*;
- **Sistema CAM para usinagem CNC:**
  - Fabricante: ROLAND      Tipo: CAMM-2
  - Fabricante: ROLAND      Tipo: *Virtual Model* (simulador gráfico)

### EQUIPAMENTOS

- **Máquina de Estereolitografia:**
  - Fabricante: 3D Systems Inc. (Califórnia, EUA);
  - Modelo: SLA-250/30;
  - Laser: Hélio-Cádmio (comprimento da onda de 325 nm, potência de 30 mW e diâmetro do feixe de 0,25 mm);
  - Computador: *PC Pentium® 166 Mhz, 16Mb RAM, sistema NFS-DOS*;
  - Volume de trabalho: 250 x 250 x 250 mm.

- **Câmara de cura por ultravioleta:**
  - Fabricante: desenvolvido no CIMJECT;
  - Volume de trabalho: 500 x 400 x 700 mm;
  - Potência máxima: 400W (10 lâmpadas ultravioleta TLK40W/05).
- **Fresadora CNC 3 eixos** (usada na usinagem da cavidade do molde de RENSHAPE® 460)
  - Fabricante: ROLAND          Modelo: PNC-2300A
- **Compressor de ar;**
- **Balança de precisão (1g);**
- **Termômetro digital (-40 a 200°C);**
- **Pistola de ar comprimido;**
- **Máquina picotadora de Roving;**
- **Lixadeira orbital elétrica;**
- *Dremel.*

## MATERIAIS

- **Resina fotocurável para confecção dos modelos e moldes em estereolitografia**
  - Fabricante: Ciba - 3D Systems Inc.          Tipo: Cibatool® SL-5170
  - Fabricante: DuPont          Tipo: 7110
- **Resina de poliéster insaturado isoftálico para confecção dos moldes e modelos**
  - Fabricante: Resana- Reichhold          Tipo: RESAPOL 33-411
- **Resina de poliéster insaturado ortoftálico para confecção das peças**
  - Fabricante: Resana- Reichhold          Tipo: RESAPOL 10-228
  - Fabricante: Cromitec          Tipo: 20-310

