

LEONARDO MACARRÃO JUNIOR

**IMPORTÂNCIA DO USO DE MOCK-UPS E DE TÉCNICAS DE
PROTOTIPAGEM E FERRAMENTAL RÁPIDO NO PROCESSO DE
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Automotiva
(Mestrado Profissionalizante)

**CONSULTA
FMP-26**

São Paulo

2004

OK

LEONARDO MACARRÃO JUNIOR

**IMPORTÂNCIA DO USO DE MOCK-UPS E DE TÉCNICAS DE
PROTOTIPAGEM E FERRAMENTAL RÁPIDO NO PROCESSO DE
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Automotiva
(Mestrado Profissionalizante)

Área de Concentração:
Engenharia Automotiva
(Mestrado Profissionalizante)

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Carlos Kaminski

São Paulo

2004

FICHA CATALOGRÁFICA

Macarrão Júnior, Leonardo

Importância do uso de *mock-ups* e de técnicas de prototipagem e ferramental rápido no processo de desenvolvimento de produto na indústria automotiva / L. Macarrão Júnior. – São Paulo, 2004.

141 p.

Trabalho de conclusão de curso (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

1. Desenvolvimento de produto 2. Processos de fabricação (Protótipo) 3. Prototipagem rápida 4. Carroceria automotiva I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. II. t.

À minha filha Isabelle e
à minha esposa Denise

AGRADECIMENTOS

Ao meu amigo, professor e orientador Dr. Paulo Carlos Kaminski que com inteligência soube orientar-me, no verdadeiro sentido da palavra, direcionando-me nos momentos certos. Capaz de transmitir com sutileza as mensagens, as quais foram naturalmente se esclarecendo, por si só, à medida que as idéias foram compondo este trabalho, o que muito contribuiu para o meu aprendizado.

À minha querida filha Isabelle, pela pessoa maravilhosa e compreensiva que é, razão de minha vida e grande motivação para minhas realizações.

À minha querida esposa Denise, pela compreensão e incansável incentivo, fundamental para que eu pudesse me dedicar à realização deste trabalho.

Aos meus pais Leonardo e Lourdes, pela minha formação e pelos valores ensinados, que muito contribuíram para o meu constante crescimento.

À General Motors do Brasil e à Diretoria da Engenharia de Produtos e da Engenharia Experimental, pela possibilidade de aprendizado e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Aos meus amigos modeladores da Modelagem Experimental da General Motors do Brasil, que muito me ensinaram sobre materiais e processos utilizados na fabricação de mock-ups e protótipos. Em especial, a Elcio Ezellner, que indiretamente despertou meu interesse para o aprendizado no desenvolvimento e fabricação de mock-ups em materiais não metálicos.

Ao meu amigo Jose Flavio Braga, da Huntsman do Brasil, pelas informações fornecidas para o desenvolvimento deste trabalho.

A Deus pelo dom da vida.

RESUMO

O Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) é um processo caro para qualquer empresa, pois são utilizadas muitas horas de mão de obra especializada. Nesta fase são encontrados muitos problemas, dificuldades ou oportunidades de melhoria. Quanto mais cedo forem detectadas estas necessidades, menos onerosas serão as alterações, necessárias para que o produto ou o processo de fabricação em série esteja dentro do planejamento da empresa, considerando prazo, custo, qualidade e design.

Este trabalho mostra como a utilização de modelos físicos preliminares – mock-ups e prototipagem rápida podem facilitar o PDP. Suas características principais são reduzir o prazo, identificar precocemente os problemas de projeto, de montagem e também as dificuldades do processo de fabricação. Assim são evitados os altos custos na correção de um eventual problema em uma fase adiantada do projeto, próximo ao início de produção. Muitas vezes o PDP requer várias unidades de uma mesma peça protótipo. Por este motivo, outro aspecto abordado neste trabalho é a utilização de ferramental rápido, que reduz o tempo de fabricação e o custo por unidade protótipo fabricada, permitindo que o produto seja desenvolvido e analisado de uma forma confiável e consistente. É mostrado como o investimento no uso de prototipagem rápida e de ferramental rápido, que é relativamente alto, reduz o risco de encontrar surpresas no início da produção. Desta forma, são apresentados alguns processos de fabricação de mock-ups, de prototipagem rápida e de ferramental rápido, acessíveis à maior parte das empresas e aplicáveis não só à indústria automobilística, mas também a outros tipos de indústria.

ABSTRACT

The Product Development Process (PDP) is an expensive process to any company, because many specialized manpower are required. In this phase, many problems and difficulties are faced but also improvement opportunities are identified. As soon as these requirements are being detected, less onerous these changes will be effective, in order to the serial fabrication process be according to the company planning, considering lead time, cost, quality and design.

This job shows how the mock-ups and rapid prototyping utilization make the PDP easily. Their main characteristics are reducing the lead-time, previously identification of the project and assembly problems, and also the process fabrication troubles. This way, high correction costs are avoided in eventual problems in an advanced project phase, next to the start of production. Many times the PDP requires several units of the same prototype part. Due to this reason, another mentioned issue in this job is the rapid tooling utilization, which can reduce the fabrication time and the cost per fabricated prototype unit, also allowing to the product be developed and analyzed in a trusty and consistent way. It is shown how the rapid prototyping and rapid tooling investment, that is relatively high, can reduce the risk to face any surprise in the start of production. This way, some mock-up fabrication, rapid prototyping and rapid tooling processes are presented, which is accessible to most of companies and are applicable not only to automobile industry but to the other kinds of companies too.

LEONARDO MACARRÃO JUNIOR

IMPORTÂNCIA DO USO DE MOCK-UPS E DE TÉCNICAS DE PROTOTIPAGEM E FERRAMENTAL RÁPIDO NO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

ERRATA

PÁGINA	LINHA	ONDE SE LÊ	LEIA-SE
2	5 e 6	Isso evitará que o mock-up construído não atenda plenamente	Isso permitirá que o mock-up construído atenda plenamente
18	3	subseqüente do teste físico.	subseqüente, o teste físico.
56	20	híbrido-RP	híbrido RP-CNC
75	20 e 22	pressão negativa	pressão relativa negativa
77	1 e 8	pressão negativa	pressão relativa negativa
89	18 e 19	entre 70 a 90 psi	entre 4,9 e 6,3 kg/cm ²
122	Figura 5.1	fabricação do mock-up de	fabricação do mock-up e/ou do protótipo de
123	Figura 5.2	fabricação do mock-up de	fabricação do mock-up e/ou do protótipo de
123	Figura 5.3	fabricação do mock-up de	fabricação do mock-up e/ou do protótipo de

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1	INTRODUÇÃO	1
2	UM BREVE HISTÓRICO DO PDP DE UM VEÍCULO AUTOMOTIVO	3
2.1	Formação de modeladores	4
2.2	Evolução dos desenhos	6
2.3	O design de um veículo	9
2.4	Desenvolvimentos de engenharia	17
2.5	Conceito de mock-up	22
2.6	Conceito de protótipo	26
2.7	Conceito de ferramental rápido	30
2.8	Conceito de manufatura rápida	34
3	ALGUNS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE MOCK-UPS E DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA	36
3.1	Fabricação manual	37
3.2	Fabricação de mock-ups em cartolina	41
3.3	Prototipagem rápida	42
3.3.1	"Estereolitografia" – <i>Stereolithography</i> (SLA)	45
3.3.2	Sinterização Seletiva a Laser – <i>Selective Laser Sintering</i> (SLS)	46
3.3.3	Modelagem por Deposição de Material Fundido – <i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM)	47
3.3.4	Impressão em 3D – <i>3D Printing</i>	49
3.4	Usinagem de modelos em máquinas CNC	51
3.5	Comparação simplificada entre RP e usinagem CNC	54
3.6	Montagem de modelos usinados por máquinas CNC	57

3.7	Fabricação de um mock-up utilizando mais de um processo.....	60
4	ALGUNS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAL RÁPIDO E DE PEÇAS PROTÓTIPO EM PEQUENOS LOTES	63
4.1	Resinas – Polímeros.....	67
4.2	Molde laminado por processo manual	70
4.2.1	Fabricação de peças laminadas em fibra de vidro ou de carbono.....	73
4.2.2	Invólucro para vácuo – <i>Vacuum Bagging</i>	75
4.2.3	Aplicação de peças laminadas em fibra de vidro ou de carbono.....	78
4.3	Molde para injeção de resina.....	80
4.3.1	Molde rígido	81
4.3.2	Molde flexível.....	83
4.3.3	Fabricação de peças em resina injetada em molde rígido	85
4.3.4	Aplicação de peças em resina injetada em molde rígido	88
4.3.5	Fabricação de peças em resina injetada em molde flexível	89
4.3.6	Aplicação de peças em resina injetada em molde flexível.....	90
4.4	Molde para termo formação de peças plásticas.....	90
4.4.1	Fabricação de peças termo formadas	93
4.4.2	Aplicação de peças termo formadas	95
4.5	Ferramenta para conformação de peças em chapa metálica	96
4.5.1	Conformação de peças em chapa metálica.....	100
4.5.2	Aplicação de peças metálicas conformadas	102
5	ANÁLISE DO USO DE MOCK-UPS E PROTÓTIPOS	104
5.1	Uso de mock-ups no PDP da carroceria de um veículo.....	105
5.2	Exemplos de aplicação de mock-ups – Análise de tempo e custo	108
5.2.1	Estudo de caso 1 – Mock-up de fabricação manual.....	109
5.2.2	Estudo de caso 2 – Mock-up em cartolina	110
5.2.3	Estudo de caso 3 – Mock-up em prototipagem rápida.....	112
5.2.4	Estudo de caso 4 – Mock-up usinado em máquina CNC.....	112
5.3	Uso de peças protótipo no PDP da carroceria de um veículo	113
5.3.1	Estudo de caso 5 – Peça laminada em fibra de vidro.....	115
5.3.2	Estudo de caso 6 – Peça em resina injetada	116

5.3.3 Estudo de caso 7 – Peça termo formada.....	116
5.3.4 Estudo de caso 8 – Peça conformada em chapa metálica	117
5.4 Aplicação dos processos	118
6 CONCLUSÃO	125
6.1 Cenário futuro.....	128
6.2 Trabalhos futuros.....	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Custo de mudanças de engenharia em várias etapas do PDP.....	19
Tabela 3.1 – Quadro comparativo entre RP e CNC.....	55
Tabela 4.1 – Quadro comparativo de alternativas para fabricação de lote de 20 peças protótipo.....	65
Tabela 4.2 – Quadro comparativo de horas trabalhadas na fabricação da ferramenta de uma longarina	99
Tabela 5.1 – Quadro comparativo de custo e prazo entre a fabricação de uma pinça de solda a ponto e seu mock-up em cartolina.	110
Tabela 5.2 – Aplicação dos processos de fabricação de mock-ups e de peças protótipo.....	118
Tabela 5.3 – Aplicações mais comuns dos processos de fabricação de mock-ups...	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Vista lateral de uma picape com as coordenadas em X e Z	8
Figura 2.2 – Vista superior de uma picape com as coordenadas em X e Y	8
Figura 2.3 – Ilustrações de várias propostas de design	11
Figura 2.4 – Modelo parcial em escala reduzida do lado esquerdo de um veículo para utilização com espelho plano	12
Figura 2.5 – Esquema em corte do modelo construído sobre a base e a estrutura	14
Figura 2.6 – Deposição de resina formulada sobre uma base	15
Figura 2.7 – Modelo em <i>clay</i> sobre elevador	15
Figura 2.8 – Montagem virtual da mangueira do radiador com interferência.....	17
Figura 2.9 – Mock-up físico de um cockpit	18
Figura 2.10 – As fases de desenvolvimento de produto, processo e mercado	21
Figura 2.11 – Influência do protótipo em atividade subsequente.....	22
Figura 2.12 – (a) Mock-up em poliuretano da parte traseira de um radiador e ventiladores; (b) Parte dianteira do radiador em diferente fase de montagem.....	23
Figura 2.13 – Mock-up de um pára-choque em material flexível	24
Figura 2.14 – Mock-up em papelão de uma pinça de solda	25
Figura 2.15 – Ilustração do dispositivo de montagem da estrutura do assoalho do compartimento de carga de uma picape.....	29
Figura 2.16 – Molde para laminação da parte traseira do painel lateral interno de uma carroceria	32
Figura 2.17 – Molde de injeção pelo método direto	33
Figura 2.18 – Alocação dos processos RP, RT e RM às fases fundamentais do desenvolvimento do produto	35
Figura 3.1 – (a) Bloco de poliuretano recortado; (b) Modelo em fase intermediária de fabricação; (c) Mock-up de um <i>canister</i> concluído.....	38
Figura 3.2 – Peça de produção em série modificada a mão	40

Figura 3.3 – (a) Mock-up em cartolina de região traseira direita da caçamba de uma picape; (b) Mock-up em cartolina montada em forma de engradado da região traseira esquerda da caçamba de uma picape	42
Figura 3.4 – Esquema do processo de " <i>estereolitografia</i> " – SLA	46
Figura 3.5 – Esquema do processo de sinterização seletiva a laser – SLS	47
Figura 3.6 – Esquema do processo de deposição de material fundido – FDM	48
Figura 3.7 – (a) Linha de ar condicionado em FDM com o seu suporte; (b) mesma peça sem o suporte sobre um dispositivo em cartolina.....	49
Figura 3.8 – Seqüência de impressão para formação do modelo pelo processo 3D <i>Printing</i>	50
Figura 3.9 – Modelo usinado de um motor completo com um suporte montado.....	52
Figura 3.10 – Mock-up parcial de um pára-choque dianteiro fabricado em partes pelo processo FDM	55
Figura 3.11 – Posições dos processos RP e CNC conforme suas características.....	57
Figura 3.12 – <i>Cubing</i> do farol esquerdo.....	58
Figura 3.13 – <i>Cubing</i> desmontado do farol esquerdo	59
Figura 3.14 – Modelo modificado de um <i>cubing</i> da lanterna traseira	60
Figura 3.15 – (a) Mock-up do compartimento de carga de uma picape; (b) Vista superior do mesmo mock-up com uma motocicleta.....	61
Figura 3.16 – Mock-up de perua constituído de peças metálicas e várias técnicas de fabricação	62
Figura 4.1 – Trava do capô em poliuretano.....	65
Figura 4.2 – Máquina de injeção de resina.....	69
Figura 4.3 – Modelo usinado do painel interno do capô.....	71
Figura 4.4 – Molde usinado em negativo do painel externo da tampa traseira	72
Figura 4.5 – (a) Vista externa de molde laminado em 4 partes da frente parcial de um veículo; (b) Vista interna do mesmo molde	73
Figura 4.6 – (a) Pára-choque laminado em fibra de vidro montado na carroceria; (b) Detalhe da adaptação dos pontos de fixação do farol auxiliar	74
Figura 4.7 – Invólucro do processo <i>vacuum bagging</i>	76
Figura 4.8 – Molde de um pára-lama dianteiro dentro do invólucro sob pressão negativa	77

Figura 4.9 – Gabarito ou berço para cura de um pára-choque em resina.....	78
Figura 4.10 – (a) Molde sobre o modelo em <i>clay</i> de uma carroceria; (b) Mesmo molde após desmoldagem	79
Figura 4.11 – Frente protótipo em fibra de vidro de uma picape para teste dinâmico de arrefecimento do motor	79
Figura 4.12 – Metade do molde de um pára-choque dianteiro com a peça	82
Figura 4.13 – Segunda metade do molde de um pára-choque dianteiro	83
Figura 4.14 – (a) Caixa com o modelo; (b) Corte para abertura do molde; (c) Molde de silicone aberto com a peça extraída	85
Figura 4.15 – Molde fechado de um pára-choque dianteiro durante a injeção de resina.....	85
Figura 4.16 – Pára-choque dianteiro injetado em resina de poliuretano.....	87
Figura 4.17 – Painel de instrumentos em PETG	91
Figura 4.18 – Molde da metade de um reservatório de fluido	92
Figura 4.19 – Duas diferentes tecnologias de <i>vacuum forming</i>	94
Figura 4.20 – Carroceria parcial fabricada em PETG pelo processo <i>vacuum forming</i>	95
Figura 4.21 – Operações manuais de conformação de chapa metálica.....	96
Figura 4.22 – Ferramenta de conformação de peças pequenas em chapa metálica....	97
Figura 4.23 – (a) Usinagem do punção em resina; (b) Ferramenta de conformação usinada em resina; (c) Peça metálica moldada.....	98
Figura 4.24 – Operação de corte a laser de peça sobre dispositivo de posicionamento .	101
Figura 5.1 – Gráfico comparativo de custo e prazo entre os vários processos de fabricação do mock-up de um reservatório de fluido	122
Figura 5.2 – Gráfico comparativo de custo e prazo entre os vários processos de fabricação do mock-up de um pára-choque	123
Figura 5.3 – Gráfico comparativo de custo e prazo entre os vários processos de fabricação do mock-up de um pára-lama dianteiro	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> – Acrilonotrila Butadieno Estireno
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – Desenho Assistido por Computador
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> – Controle Numérico por Computador
CLAY	Argila ou barro de cor marrom utilizado para modelagem de superfícies e fabricação de modelos de design
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> – Modelagem por Deposição de Material Fundido
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> – Amplificação de Luz por Radiação Estimulada
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
PETG	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i> – Polietileno Tereftalato modificado com Glicol
PP	<i>Polypropilene</i> – Polipropileno
PRFV	Plástico Reforçado por Fibra de Vidro
PUR	<i>Poliurethane</i> – Poliuretano
PVC	<i>Polyvinil Chloride</i> – Cloreto de Polivinila
RIM	<i>Reaction Injection Molding</i> – Moldagem por Injeção e Reação
RM	<i>Rapid Manufacturing</i> – Manufatura Rápida
RP	<i>Rapid Prototyping</i> – Prototipagem Rápida
RT	<i>Rapid Tooling</i> – Ferramental Rápido
RTV	<i>Room Temperature Vulcanized</i> – Vulcanizado à Temperatura Ambiente
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
STL	Formato de arquivo para Prototipagem Rápida
SLA	<i>Stereolithography</i> – "Estereolitografia"
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> – Sinterização Seletiva a Laser
SMP	<i>Seamless Modeling Paste</i> – Modelagem de Revestimento sem Emenda
UMR	Unidade Monetária de Referência, especialmente criada para este trabalho

VG	Verdadeira Grandeza
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo apresentar a importância da aplicação de modelos físicos preliminares – mock-ups, da prototipagem rápida e de ferramental rápido no Processo de Desenvolvimento do Produto (PDP) na indústria automotiva. Segundo Sánchez e Pérez (2002), companhias com produtos complexos e de alta tecnologia são as que mais cooperam com o desenvolvimento tecnológico e também utilizam importantes práticas para desenvolverem seus produtos.

A indústria automotiva investe no desenvolvimento de seus produtos buscando melhoria de qualidade do produto e do processo de fabricação. Além disso, objetiva a redução de custos e principalmente do prazo de desenvolvimento. Avanços tecnológicos como a Prototipagem Rápida (PR) – *Rapid Prototyping* (RP) – ou o mock-up virtual têm espaço cada vez maior nas várias fases do PDP.

Os fatores tempo e custo tornam o PDP muito dinâmico, pois a competitividade requer capacidade de reagir rápida e adequadamente aos estímulos do mercado. As empresas precisam estar tecnicamente aptas a atender a estes requisitos. Apesar dos orçamentos enxutos, o projeto precisa ser desenvolvido com qualidade, para que o resultado final do produto esteja dentro do esperado. Isso motivou a escolha do tema deste trabalho.

Os desenvolvimentos tecnológicos ocorrem rápida e continuamente. Devido a este motivo, a maior parte da literatura utilizada neste trabalho é recente, com ênfase para as publicações apresentadas nos últimos cinco anos. É comum encontrar literatura que aborde separadamente apenas pequenas partes do desenvolvimento do produto. Artigos publicados em congressos e periódicos específicos foram selecionados e analisados na mesma seqüência em que o produto é desenvolvido. Esta é a seqüência utilizada neste trabalho.

Um quadro comparativo é elaborado com o propósito de facilitar a escolha do melhor processo de fabricação dos mock-ups. De acordo com a necessidade das avaliações preliminares da engenharia de produtos, o melhor processo será indicado. Portanto, serão analisados simultaneamente os critérios técnicos, de custo e prazo para determinar a escolha do melhor processo de fabricação do mock-up. Isso evitará que o mock-up construído não atenda plenamente ao propósito para o qual foi fabricado.

Os resultados aqui apresentados também são úteis para outros ramos da indústria. Em geral são aplicados a processos de fabricação em série ou sempre que houver necessidade de avaliação física, seja ela visual, dimensional ou de montagem durante o desenvolvimento do produto.

Este trabalho apresenta também os principais motivos da necessidade da utilização de mock-ups durante o PDP e uma análise comparativa entre o uso de mock-ups e de protótipos. Mostra seus custos, benefícios, as formas mais simples de obtenção, alguns dos materiais empregados e seus respectivos processos de fabricação. A prototipagem rápida é abordada de uma forma prática e simplificada, mostrando uma relação comparativa entre os principais recursos disponíveis no Brasil.

Também são apresentados alguns recursos mais acessíveis para a obtenção de ferramental rápido e fabricação de peças protótipo em pequenos lotes, seu uso e sua aplicação na indústria automotiva e na de autopeças.

Como conclusão, este trabalho apresenta a importância de utilizar mock-ups, prototipagem rápida e ferramental rápido no desenvolvimento de produtos com maior rapidez e qualidade. Mostra como a aplicação de recursos financeiros nesta fase será revertida na forma de redução de custo no processo de fabricação e na garantia de cumprimento do prazo estabelecido para o início da produção em série. Provavelmente ganhos no custo final do produto também serão obtidos devido à oportunidade de melhoria no projeto proporcionado por estes recursos físicos.

2 UM BREVE HISTÓRICO DO PDP DE UM VEÍCULO AUTOMOTIVO

Segundo Kaminski (2000), o processo de desenvolvimento de produtos engloba projeto, fabricação e avaliação do produto pelo consumidor, com o objetivo de transformar a necessidade do mercado em produtos economicamente viáveis.

O PDP como um todo e a validação de um veículo automotivo passam por um caminho relativamente longo. Isso ocorre devido ao grande número de componentes, subsistemas e testes envolvidos. O desenvolvimento de todos os subsistemas nem sempre pode acontecer simultaneamente. Alguns deles precisam estar praticamente concluídos para que outros sejam projetados.

Este estudo está focado principalmente na carroceria, pára-choques, peças de acabamento interno, como painel de instrumentos e alguns itens pertencentes ao motor, como mangueiras e reservatórios de fluidos.

A carroceria é a estrutura do veículo. Nela são montados todos os subconjuntos mecânicos como suspensão, freios, motor, câmbio entre outros, painéis e componentes de acabamento internos e externos, bancos e tapeçaria. A carroceria, portanto, possui papel fundamental. Define o tamanho externo e o espaço interno destinado ao motor, aos ocupantes e ao compartimento de carga. É o item de maior responsabilidade pela sua aparência visual, um dos principais atributos avaliados pelo consumidor no momento da compra de um veículo.

O principal cuidado de uma empresa, em especial de uma montadora do setor automotivo, é o sigilo sobre o lançamento de seus produtos. O interesse da imprensa especializada e dos consumidores em saber antecipadamente os lançamentos de veículos sempre é maior quando há alterações externas na carroceria.

Quando a informação é divulgada pouco tempo antes do lançamento de um novo veículo, o consumidor demonstra interesse e a concorrência tem pouco tempo para

reagir. Por este motivo, o desenvolvimento do design de um veículo, que é a primeira etapa do PDP, é um processo sigiloso. Apenas poucas pessoas têm envolvimento ou acesso à informação.

O PDP de um veículo automotivo necessita de várias máquinas e equipamentos, muitos deles de última geração, como o sistema de desenho eletrônico e máquinas de prototipagem rápida, entre outras. Porém, estas operações individualizadas são apenas pequenas partes do processo. Estes recursos somente poderão ser bem utilizados por mão-de-obra especializada e treinada.

O PDP somente é realizado no prazo esperado e com sucesso se o recurso humano estiver apto a realizar as atividades que lhe são atribuídas. Segundo Kaminski (2000), “a criatividade se faz necessária em qualquer fase do desenvolvimento de um produto”. Assim sendo, conhecimento, habilidade e criatividade são atributos indispensáveis àqueles que planejam, organizam e executam o PDP.

2.1 Formação de modeladores

A necessidade de reduzir o prazo de lançamento de um produto (*time to market*) fez com que as indústrias buscassem novas tecnologias para desenvolver o seu produto com maior rapidez e qualidade. Nas últimas décadas, as atividades que antecedem o início da produção foram gradativamente se adequando à nova realidade.

Segundo SENAI (2002), baseado na Lei Orgânica de Ensino Industrial de 1942 foi criado o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI. Entre os cursos estava o de Modelador de Fundição que, segundo Mange (1945), já era ministrado em 1945 como um curso ordinário para aprendizes de ofício de 14 a 18 anos.

Este foi o principal e mais importante curso de formação e desenvolvimento de profissionais que executam a fabricação de protótipos, modelos e demais meios de fabricação destinados às atividades de desenvolvimento de produto.

Apesar da profissão de modelador ser antiga, a maioria destes profissionais atuava no processo de manufatura construindo modelos em poliestireno celular rígido – isopor. Estes modelos são utilizados para fundição em aço para a usinagem de ferramentas de estampagem de peças metálicas.

Em outra etapa do processo, modeladores fabricavam modelos em madeira, que aos poucos deu lugar às resinas, que são mais fáceis de serem trabalhadas e proporciona maior rapidez ao processo. Estes modelos eram utilizados como padrão no controle de qualidade de peças fabricadas em série, modelos para máquinas operatrizes do tipo copiadoras, e modelos para ajuste de ferramentas de estampagem.

Algumas destas aplicações existem até hoje. Outras entretanto, tornaram-se obsoletas e atualmente são utilizadas em casos específicos. Posteriormente, novos materiais e processos foram desenvolvidos com o objetivo de tornar o processo de fabricação mais ágil.

Apenas uma parte destes modeladores trabalhava no desenvolvimento do produto, no design de novos produtos, construindo modelos em argila, mais conhecida por *clay*. Nas últimas décadas, o trabalho do modelador foi direcionado com maior ênfase à fabricação de modelos e peças protótipo, principalmente na indústria automotiva.

O processo de fabricação, que era basicamente manual e utilizava ferramentas específicas, passou a ser, na maioria dos casos, mecanizado com a utilização de máquinas fresadoras de Controle Numérico por Computador – *Computer Numerical Control* (CNC). Este recurso foi fundamental para a modernização da profissão de modelador.

Segundo SENAI (2002), de acordo com a última reformulação ocorrida em 2002, o curso de formação de modeladores recebe agora o nome de Modelador Industrial e tem carga horária total de 1600 horas.

Na primeira metade do curso, além de desenvolver as habilidades manuais, inclui em seu currículo desenho técnico, iniciação à informática, desenho assistido por computador, técnicas de usinagem, de modelagem e conhecimentos básicos sobre materiais como resinas, madeira e metais, entre outras disciplinas. Na segunda metade, ocorre a prática profissional, complementando assim a formação do modelador.

Com esta formação, os modeladores são capazes de ler e interpretar os detalhes e vistas apresentados nos desenhos, construir manualmente modelos, moldes e outros ferramentais rápidos e fabricar peças protótipo a partir do ferramental desenvolvido.

Para a construção de um modelo utilizando uma máquina CNC são necessárias várias operações. O desenho precisa ser realizado em computador. A máquina precisa ser programada para a operação específica, baseado na programação eletrônica do caminho a ser percorrido pela ferramenta de corte. Estas atividades requerem formação específica diferenciada e geralmente cada uma delas é executada por um profissional.

2.2 Evolução dos desenhos

Os desenhos de produto eram executados manualmente em pranchetas e apresentados em papel. Estes desenhos continham as projeções ortogonais em duas ou três vistas e alguns cortes em regiões estratégicas. As vistas e cortes eram em escala natural e continham as linhas das coordenadas de seu plano, a fim de fornecer subsídio ao modelador para construir o modelo manualmente. Na indústria

automotiva, a maioria dos desenhos utilizava também a geometria descritiva para representar secções em Verdadeira Grandeza – (VG), projetadas em planos não ortogonais.

Desta forma, os desenhos ou cópias heliográficas, que na maioria das vezes eram realizados em escala natural, continham as vistas e os cortes necessários para entendimento completo do produto. Assim, uma cópia com a vista lateral e alguns cortes tinha mais de 5 metros de comprimento. Este tipo de situação era comum nas modelagens e oficinas de fabricação de peças metálicas e o manuseio destas cópias não era uma tarefa simples.

Devido ao tamanho de um veículo, outro recurso fundamental, até hoje utilizado, é a aplicação de linhas coordenadas nos planos X, Y e Z. Normalmente, o eixo X é designado para o comprimento, o eixo Y para a largura e o eixo Z para a altura do veículo. O ponto central destas coordenadas varia de montadora para montadora. Estas linhas coordenadas são apresentadas geralmente de 100 em 100 milímetros e são identificadas com a letra X, Y ou Z, do plano que representam, e o número que corresponde à distância entre cada coordenada e o ponto de origem.

Em muitos casos, o centro das coordenadas em X ou em Z fica fora do veículo, porém, não deixa de ser a referência para localização de todas as peças da carroceria. Na grande maioria dos casos, o centro da coordenada Y coincide com a linha central longitudinal da carroceria. Isso representa um efeito prático de grande utilidade, pois boa parte das peças existe nos dois lados da carroceria. Assim, as peças são desenhadas individualmente apenas uma vez, normalmente o lado esquerdo. Devido à sua simetria, o lado direito é construído de forma invertida (em espelho) em relação ao desenho. Quando não há simetria, os dois lados são desenhados.

Quando houver modificação parcial na peça de um lado em relação ao outro, como é o caso da abertura do gargalo de combustível em um painel lateral, apenas a região modificada é desenhada. O modelador que construirá o modelo que dará origem à peça, localizará a região modificada pela coordenada representada no desenho. Para facilitar a identificação de qual lado que o desenho está representando, a coordenada

Y recebe sinal negativo para o lado esquerdo, o lado do motorista. Observa-se nas figuras 2.1 e 2.2 a representação das coordenadas em dois planos, nos desenhos das vistas lateral e superior de um veículo picape.

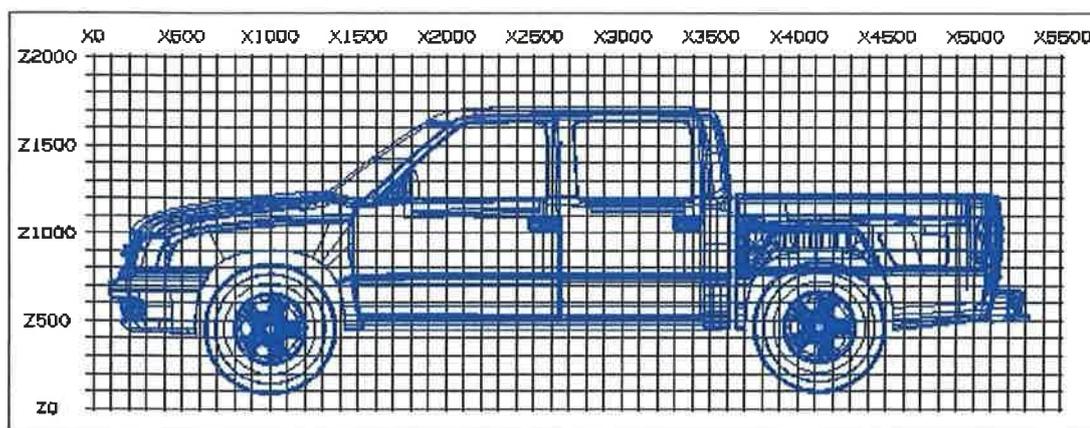


Figura 2.1 – Vista lateral de uma picape com as coordenadas em X e Z. (Macarrão, 2004).

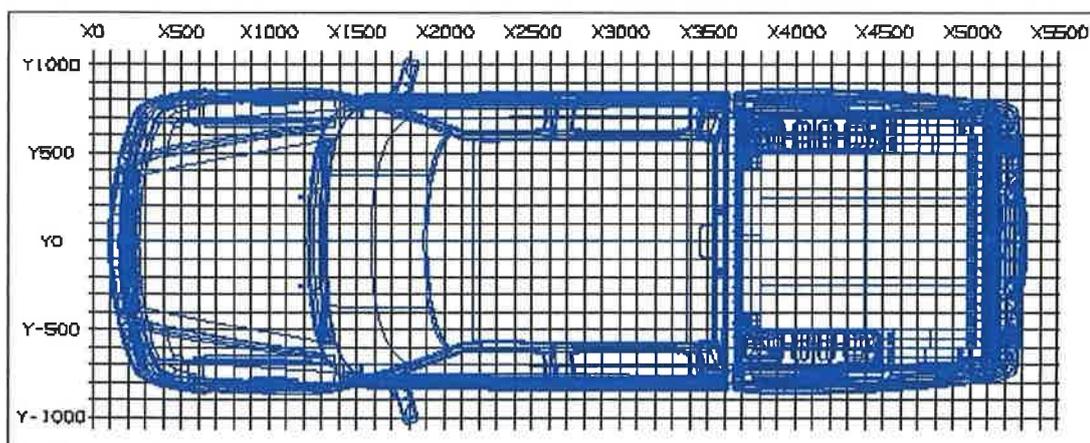


Figura 2.2 – Vista superior de uma picape com as coordenadas em X e Y. (Macarrão, 2004).

Na montagem de uma carroceria, a utilização de linhas coordenadas é um recurso fundamental para a localização da qualquer peça no conjunto. Para isso, as linhas coordenadas são traçadas em cada peça. Automaticamente a localização da peça em relação à carroceria também é conhecida. A montagem de um conjunto é feita pelo alinhamento das coordenadas de cada peça. Este recurso permite analisar a

montagem e ao mesmo tempo identificar qualquer problema de assentamento de superfície entre as peças. Além disso, facilita identificar qual peça deve ser corrigida.

A utilização de linhas coordenadas, associada ao desenho de cortes, facilita o trabalho dos usuários do desenho. Normalmente os cortes são realizados exatamente sobre uma coordenada. Cada corte realizado é identificado com a letra, X, Y ou Z, correspondente ao plano em que este foi feito e o número da coordenada onde foi realizado.

Para o modelador, que utilizará basicamente os cortes para a construção manual de um modelo, a identificação da coordenada permitirá a idéia exata de qual parte da peça se trata. Neste tipo de construção de modelos, regiões ricas em detalhes exigem maior número de cortes, todos eles paralelos às coordenadas, porém a intervalos de distância menores. Isso permite que o modelador faça um modelo com melhor qualidade de superfície e maior precisão dimensional. Em alguns casos, são necessários cortes realizados fora dos planos coordenados. Estes cortes são representados em VG.

Posteriormente, foi desenvolvido o sistema de desenho eletrônico, Desenho Assistido por Computador – *Computer Aided Design* (CAD) – o que agilizou o trabalho de execução dos desenhos. Além disso, possibilitou a execução dos desenhos tridimensionais (3D) com rapidez, que era praticamente impossível ser realizados manualmente no intervalo de tempo disponível.

2.3 O design de um veículo

O trabalho do departamento de design de uma montadora é focado na superfície da carroceria, incluindo todas as peças externas e aparentes, assim como nas superfícies aparentes, visíveis por seus ocupantes, das peças que compõem o interior do veículo.

Nesta etapa do trabalho, ainda não há a preocupação com os elementos de fixação e montagem das partes, que ficará a cargo da equipe de engenharia.

A idéia do aspecto externo de um veículo começa com desenhos realizados a partir de diretrizes determinadas pela direção da empresa. Estas diretrizes baseiam-se em um conjunto de informações consolidadas pela área de marketing, obtidas por intermédio de pesquisas junto a usuários, consultores, fornecedores e público em geral.

Segundo Siqueira (1992), a pesquisa de marketing, como instrumento auxiliar de decisão, é utilizada no Brasil desde 1965. Embora seja uma técnica de obtenção de dados “dependente da confiança dos que dela participam”, é uma importante fonte de informação para o projeto de novos produtos. Foi impulsionada por fatores como a concorrência, o rápido desenvolvimento tecnológico, novos métodos de produção, transformações sócio-culturais dos mercados consumidores e estratégias de crescimento, entre outros.

Baseado nas tendências do mercado, com o intuito de aumentar a sua penetração no mercado, a montadora toma a decisão de iniciar o projeto de um veículo que supostamente irá agradar ao maior número possível de pessoas.

Uma vez definido qual tipo de veículo será produzido e a qual faixa de mercado ele atenderá, deve ser definido qual será o primeiro modelo a ser desenvolvido. Estas informações são passadas ao departamento de design, que inicia a fase de ilustrações das propostas do novo veículo.

Nesta etapa são realizadas ilustrações, representando várias alternativas para o novo veículo, conforme mostrado na figura 2.3. Estas ilustrações são submetidas a uma avaliação interna à companhia, as quais são analisadas minuciosamente para a escolha do design do novo veículo. É comum que ocorram modificações parciais na ilustração aprovada.

Eventualmente, a empresa pode submeter suas ilustrações a uma avaliação pública. A avaliação externa geralmente é realizada por uma empresa de pesquisa, ficando em sigilo o nome da companhia e informações que identifiquem a intenção da montadora com relação ao novo veículo.



Figura 2.3 – Ilustrações de várias propostas de design. (Livingstone, 2003).

A primeira etapa que ocorre após a definição dos desenhos preliminares do veículo é a construção de um modelo em *clay*. Esta argila, geralmente na cor marrom, é um material de fácil modelagem, que não necessita de equipamentos ou ferramentas sofisticadas. As superfícies em *clay* podem ser feitas manualmente ou por usinagem. Podem ser modificadas facilmente, sem deixar indícios de que a área foi remodelada.

A finalidade principal do primeiro modelo tridimensional do veículo é a avaliação visual do produto. Ele é executado ainda na fase de definição do design do veículo. Modificações durante a construção do modelo também são comuns.

Segundo Yamada (1993), na fase inicial são construídos alguns modelos sólidos em *clay* de um mesmo veículo em escala reduzida. Cada modelo construído pode mostrar uma alternativa diferente. O autor afirma que as escalas mais utilizadas são 1:10, 1:8, 1:5, 1:4, 3:8 ou 1:1.

Como não existe uma regra específica para esta fase, alguns recursos são utilizados a fim de reduzir o custo e principalmente o prazo. Além da utilização da escala reduzida, pode ser fabricada apenas uma metade do modelo. Neste caso, exatamente na linha zero longitudinal do modelo, ou seja, em $Y=0$, é colocado um espelho plano. Assim, o modelo é fabricado praticamente na metade do prazo. O observador, ao posicionar-se adequadamente a partir da dianteira ou da traseira do modelo, com a ajuda do espelho tem o visual do modelo do veículo completo.

A figura 2.4 mostra um modelo parcial em escala reduzida ainda em fase de construção.



Figura 2.4 – Modelo parcial em escala reduzida do lado esquerdo de um veículo para utilização com espelho plano. (Macarrão, 2004).

Outro recurso utilizado é a construção de um mesmo modelo com duas propostas de design diferentes também utilizando a linha zero ($Y=0$), onde cada metade do modelo apresenta uma proposta diferente. Este recurso é ótimo para comparação de propostas.

Yamada (1993) afirma que os modelos de design possuem três funções principais. Primeiro, nestes modelos são feitos todos os estudos de design necessários durante este estágio de desenvolvimento, sobre o qual é realizado o aperfeiçoamento das formas, suavizando as linhas da carroceria. Segundo, quando o modelo já foi totalmente aperfeiçoado e concluído, é utilizado para apresentar o novo veículo ao

corpo diretivo da companhia. Sua terceira função principal é fornecer informações para o processo de manufatura do veículo.

Para construir um modelo em escala natural em *clay*, é necessária uma estrutura, que pode ser fabricada em madeira, geralmente em chapas de madeira compensada ou em alumínio, montado em módulos ajustáveis. A madeira possui um custo menor, se comparado ao alumínio, porém, ao contrário da madeira, o alumínio pode ser reaproveitado em projetos futuros.

É necessário que se tenha idéia do tempo que o modelo em *clay* deverá ficar disponível. Neste período pode haver a necessidade de reutilização da estrutura em alumínio em um novo projeto, antes que seja concluído o trabalho de análise do modelo em utilização. Em certas ocasiões, o modelo em *clay* em escala natural é mantido como referência mesmo após a definição do design.

A finalidade da estrutura, segundo Yamada (1993), é garantir a precisão dimensional, reduzir o peso e facilitar a movimentação do modelo para outros locais de exibição. A estruturação rígida impedirá deformações e movimentações do material do modelo devido ao seu peso próprio ou durante o seu transporte para fora do estúdio onde estiver sendo trabalhado, pois a avaliação à luz do dia também é importante.

Sobre a estrutura, é colocada uma camada de um material que servirá de base para o apoio do *clay*, que pode ser espuma rígida de Poliuretano – *Poliurethane* (PUR ou comercialmente chamado de PU) – ou chapas de madeira compensada, entre outros. Para facilitar a construção, o material é cortado em partes pré-dimensionadas a partir do desenho de design e coladas sobre a estrutura.

Nesta etapa do trabalho, o sistema de coordenadas do desenho facilita o trabalho, pois com a seção em cada coordenada, obtém-se a dimensão exata da carroceria. A partir desta medida, subtrai-se a espessura do *clay* e obtém-se a medida da base. Além de servir de apoio, uma base bem montada facilitará a aplicação do *clay*, tornando a espessura da camada razoavelmente uniforme. Yamada (1993) recomenda a aplicação de aproximadamente 25 mm de espessura de *clay* sobre a base. A figura

2.5 mostra esquematicamente um exemplo em corte com a estrutura em alumínio, a base em espuma rígida e a camada de *clay*.

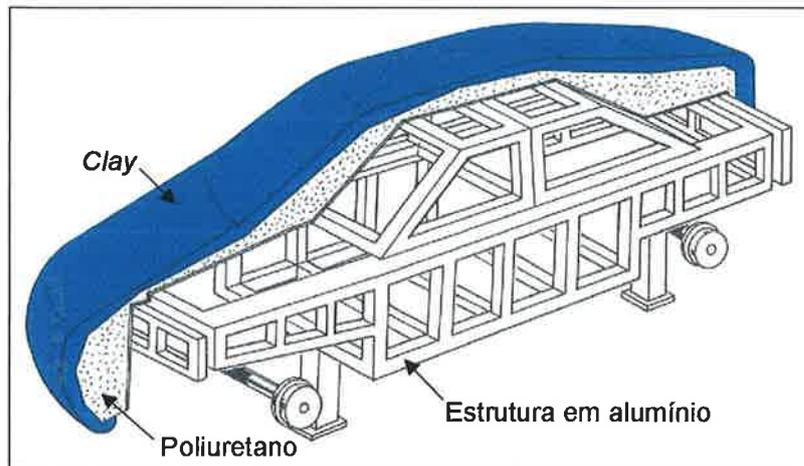


Figura 2.5 – Esquema em corte do modelo construído sobre a base e a estrutura. (adaptado de Yamada, 1993).

Atualmente já é possível utilizar resina de poliuretano para este tipo de modelagem. Neste caso, o modelo é feito por usinagem. A resina de poliuretano pode ser montada em placas, que são cortadas e coladas sobre a base do modelo.

Segundo Braga (2001), na década de 90, foi desenvolvido o processo de Modelagem de Revestimento sem Emenda – *Seamless Modeling Paste* (SMP). Neste processo dois componentes, a resina e o endurecedor, são misturados na proporção correta. A mistura pastosa resultante é bombeada antes que ocorra a reação química de endurecimento, através de um tubo flexível manipulado por um modelador. Uma camada de aproximadamente 30 mm de espessura é aplicada sobre uma superfície base, conforme mostrado na figura 2.6.

Tanto equipamento, quanto resina são importados, porém já estão disponíveis no Brasil. Este processo vem sendo utilizado quando se deseja usinar o modelo em fresadoras CNC. Como resultado, obtém-se ganho no tempo de preparação para a usinagem do modelo. Braga (2001) afirma que em 12 horas é possível aplicar a resina sobre uma base para que seja usinado o modelo de um veículo completo em escala natural. É necessário, entretanto, que o desenho tenha sido executado

eletronicamente, para que os dados matemáticos do desenho sejam convertidos em caminho de ferramenta para a fresadora.



Figura 2.6 – Deposição de resina formulada sobre uma base. (Braga, 2001).

Alguns recursos podem ser utilizados, a fim de melhorar a ergonomia do trabalho dos modeladores, como por exemplo, a utilização de um elevador, conforme mostrado na figura 2.7. O elevador oferece condições para que o modelador apresente superfícies de boa qualidade em regiões inferiores do modelo.



Figura 2.7 – Modelo em *clay* sobre elevador. (Livingstone, 2003).

As máquinas de medição tridimensional, também conhecidas por *layout machines*, são utilizadas para garantir que o modelo seja fiel ao desenho. No caso da modelagem manual, auxiliam a construção da superfície. O modelador determina a posição de vários pontos em cada região do modelo e a partir destes pontos, cria a

superfície conforme o desenho. Quando o modelo for usinado, a medição é efetuada para conferir a superfície na busca de um possível erro na escolha de um diâmetro de fresa ou algum problema na programação da máquina.

Estas máquinas de medição tridimensionais podem medir por apalpamento, com movimentação manual ou automática do apalpador ou ser dotada de sistema ótico, como o laser, que faz a medição sem tocar na superfície. Para Werner et al. (1998), a técnica de medição por coordenada é a única maneira de obtenção de dados necessários para a descrição da superfície do objeto.

Quando o modelo for alterado para suavizar linhas, raios, contornos ou detalhes em uma condição diferente do desenho que gerou a superfície usinada, é realizado o caminho inverso à fabricação do modelo. A partir do modelo modificado são medidos vários pontos na superfície das regiões alteradas. Um software específico cria uma superfície a partir dos pontos medidos. Esta nova superfície é aplicada ao desenho, atualizando-o conforme o novo modelo para utilização nas etapas seguintes do PDP. Também pode ser utilizado o recurso da digitalização que, por intermédio de um equipamento e um software específicos, cria o desenho eletrônico do sólido da superfície a partir da identificação dos pontos da superfície física analisada.

Werner et al. (1998) e Corbo, Germani e Mardoli (2004) chamam este processo de engenharia reversa. Para que o processo seja concluído, um novo modelo pode ser construído. Os autores têm a mesma opinião com relação à conclusão do processo. Para eles, um novo modelo ou produto deve ser fabricado a partir da superfície modificada a fim de validar todo o processo.

Entretanto, o custo e o tempo da fabricação de um novo modelo não podem ser desprezados. Deve ser analisado o tamanho da modificação realizada e se a região é considerada crítica para efeitos visuais ou de montagem. A partir desta análise, pode-se tomar a decisão de não fabricar o novo modelo, a menos que surja algum problema relacionado à área alterada. Assim, para os casos de pequena importância, é possível economizar tempo e dinheiro sem afetar a qualidade ou onerar o custo do projeto além da verba prevista.

2.4 Desenvolvimentos de engenharia

Após a definição do design, a engenharia de produtos será responsável pela continuidade do PDP. Todas as partes da carroceria com seus pontos de fixação, folgas e montagens são desenhadas. Os painéis de acabamento interno passam pelo mesmo processo. A análise estrutural de todas as peças metálicas da carroceria é realizada, definindo a espessura das peças, adição de reforços ou modificações.

Em seguida, é possível realizar uma análise virtual de montagem. As peças são colocadas no espaço virtual, de acordo com suas referências baseadas nas coordenadas do veículo. Desta forma, as peças vão se “montando” automaticamente. Se houver folgas ou interferências, estas serão observadas nesta análise virtual, conforme mostrado na figura 2.8.

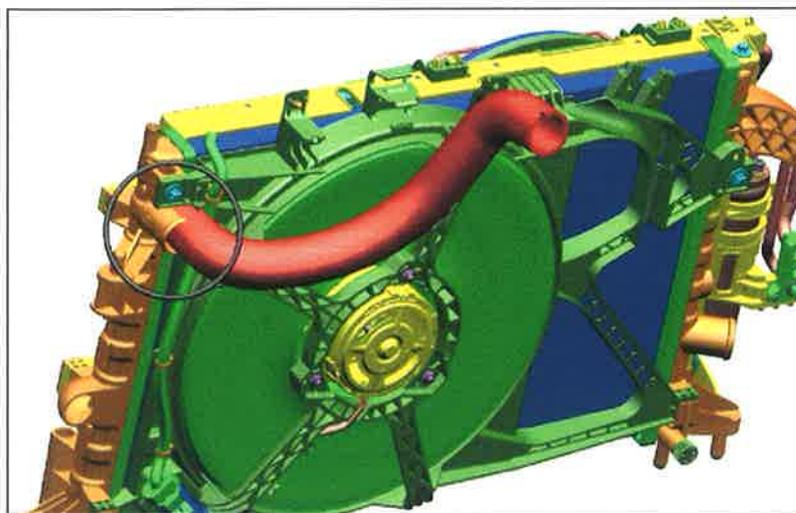


Figura 2.8 – Montagem virtual da mangueira do radiador com interferência. (Macarrão, 2004).

Muitas simulações virtuais podem ser feitas, inclusive com peças que se movimentam com o uso do veículo, como é o caso da suspensão. Entretanto, nem todos os problemas de montagem podem ser detectados. Isso auxilia o PDP, porém não elimina a necessidade de construção de mock-ups ou protótipos.

Zwaanenburg (2002) argumenta que deve haver integração entre testes com protótipos físicos e virtuais. Isso significa que o resultado obtido com testes virtuais deve ser utilizado na etapa subsequente do teste físico. Da mesma forma, o resultado físico alimentará o teste virtual da terceira etapa, e assim sucessivamente.

Para Meerkamm e Wartzack (2001), o recurso da visualização virtual serve como apoio ao projeto durante a fase do processo construtivo. Como para eles cerca de 70% dos custos do produto são determinados no projeto, “entre o projeto e a manufatura deve existir uma troca intensiva de informações nos planos de estrutura construtiva, escolha de materiais e configuração das peças”. Segundo os autores, o engenheiro projetista pode reduzir o custo do produto, principalmente nas fases iniciais do processo de construção, pois “com o progresso do produto, diminuem as chances de influenciar os custos”.

Macarrão e Kaminski (2003) afirmam que “algumas avaliações somente apresentarão um resultado confiável quando realizadas fisicamente”. Como exemplo citam a avaliação do cockpit de um veículo, conforme mostrado na figura 2.9. Com um mock-up físico, o usuário pode realizar, sentando-se no banco, uma avaliação completa de manuseio de comandos, visualização dos instrumentos do painel, posição dos braços em relação ao volante, manuseio da alavanca do câmbio e, principalmente, a sensação de estar dentro do veículo. Esta avaliação não pode ser substituída, em sua plenitude, por um mock-up virtual.



Figura 2.9 – Mock-up físico de um cockpit. (Livingstone, 2003).

Para Volpato (1999), as principais finalidades dos protótipos no PDP são aprendizagem, comunicação, integração, redução de tempo, de custo e dos riscos da inovação, encurtando assim as etapas do PDP. Com isso, são alcançados importantes progressos, pois questões de projeto são respondidas. “A representação física de um produto é muito mais fácil de ser entendida do que um desenho técnico ou uma descrição verbal”. O custo de um protótipo é justificado com a economia no tempo de desenvolvimento do produto e no ganho de qualidade do produto final. Também proporcionará “grandes economias em estágios mais avançados” deste processo. Na tabela 2.1, Volpato (1999) mostra o custo médio de uma modificação do produto necessária em cada uma das fases do PDP.

Tabela 2.1 – Custo de mudanças de engenharia em várias etapas do PDP. (Volpato, 1999).

Etapas do PDP	Descrição	Custo médio por mudança (dólar EUA)
1	Fase de simulação preditiva	\$ 1.000 – 4.0000
2	Fase de testes, antes da liberação do produto	\$ 20.000
3	Depois da liberação do produto	\$ 100.000

Qualquer modificação no produto tem um custo. Este custo compreende, além do tempo gasto em projeto, todos os custos referentes às modificações de ferramental de produção, dispositivos de montagem e demais necessidades identificadas, dependendo da fase em que estiver o PDP. Fica claro nesta tabela que, quanto mais cedo for identificada a necessidade de uma modificação de produto, menor será o seu custo de implementação.

Para Smith (1999), embora haja um custo envolvido na fabricação de protótipos, os benefícios da prototipagem no PDP não podem ser quantificados com exatidão, porém, agregam maior valor estratégico para a empresa, comparado ao seu custo.

Segundo Kaminski (2000), durante o desenvolvimento do produto, à medida que o projeto vai evoluindo, os “aspectos antes abstratos vão se tornando concretos, e características qualitativas adquirem forma quantitativa”. Nesta fase, segundo o autor, o produto é representado por modelos, “criados com a finalidade de auxiliar na análise e/ou previsão de determinado fenômeno ou processo”.

No desenvolvimento das ferramentas de fabricação, o uso de mock-ups ou protótipos permite um estudo pormenorizado da maneira como será fabricada e a análise da melhor maneira de fabricação em função da sua forma, ora visualizada fisicamente. Também, facilita o desenvolvimento de dispositivos de montagem mais eficientes, com maior rapidez de acionamento e utilização, proporcionando melhor análise das condições ergonômicas e de segurança ao seu operador.

Estas não são as únicas vantagens que um protótipo proporciona, mas são suficientes para garantir um produto melhor projetado e concebido. Volpato (1999) afirma que “o reconhecimento imediato de problemas de projeto já é responsável pela redução do tempo total de desenvolvimento de um produto”. Quanto mais inovador for o projeto, maior será a probabilidade de que problemas de projeto sejam encontrados. No entanto, o autor alerta para que seja avaliado o custo de fabricação e avaliação dos protótipos, comparando-o aos seus benefícios, para que uma relação custo/benefício adequada seja obtida.

Siqueira (1992) mostra no gráfico da figura 2.10 “as fases de desenvolvimento do produto, do processo e de mercado, e os esforços necessários em cada fase”. Para ele, no estágio de desenvolvimento do produto, logo após o início das pesquisas de marketing e de produto, deve ocorrer o início dos testes com os clientes, os quais fornecerão informações importantes para o desenvolvimento do produto e tomada de decisões.

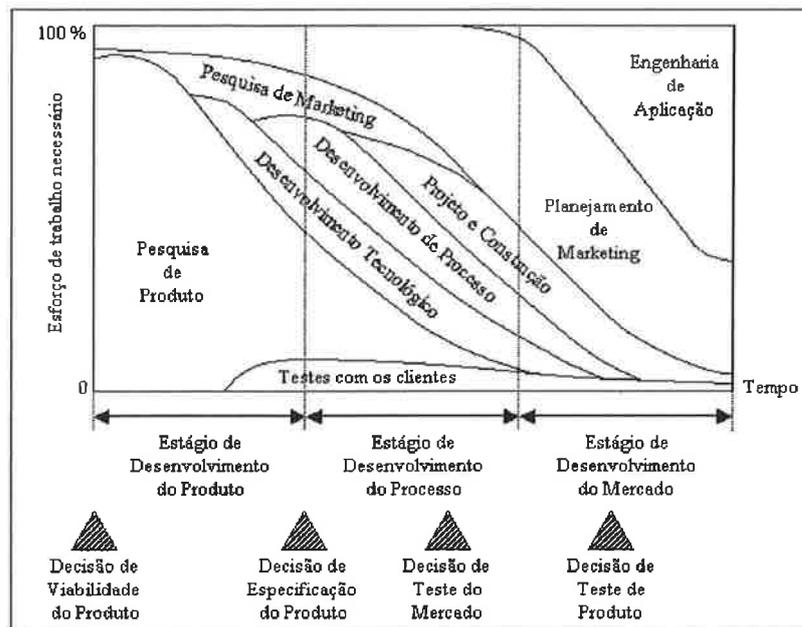


Figura 2.10 – As fases de desenvolvimento de produto, processo e mercado. (adaptado de Siqueira, 1992).

Analisando a linha do tempo representada neste gráfico, observa-se que os testes com os clientes ocorrem antes que sejam concluídas as pesquisas que auxiliarão a definir o produto. Para que isso seja possível, considerando que nesta fase o PDP está praticamente começando, fica clara a necessidade do uso de mock-ups para que seja possível a avaliação executada pelos clientes. Como o público avaliador normalmente é heterogêneo, não é esperado que possam opinar com convicção tendo como base de dados apenas desenhos.

Para Volpato (1999), “atividades de engenharia, gerenciamento, marketing e manufatura podem ser consideravelmente beneficiadas com o uso de protótipos como base para o aprendizado rápido, unificação do time e chegada a um consenso sobre as características do produto”. O autor afirma que “algumas atividades podem ser realizadas mais rapidamente se um protótipo for inserido ao PDP”. A figura 2.11 Volpato (1999) ilustra esta afirmação.

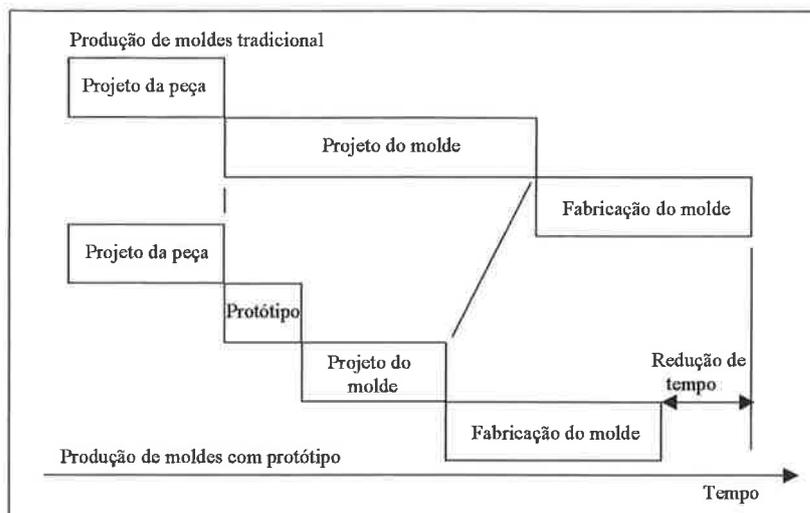


Figura 2.11 – Influência do protótipo em atividade subsequente. (Volpato, 1999).

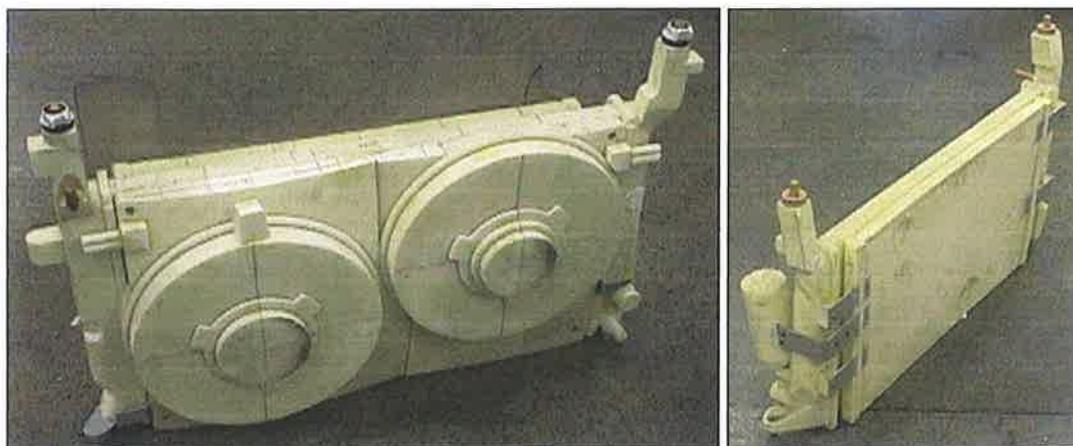
Uma situação comum, onde este efeito é facilmente visualizado, é na etapa de projeto de um molde de injeção. A visualização e o projeto de uma ferramenta, para uma peça de geometria complexa, podem ser realizados mais rapidamente se um protótipo da peça é fornecido à ferramentaria junto com o desenho técnico bidimensional (2D), ao invés de somente o desenho 2D.

2.5 Conceito de mock-up

Segundo Ferreira (1999) no dicionário Novo Aurélio Século XXI, mock-up é um “modelo preliminar, em tamanho natural e dimensões precisas, geralmente de madeira, feito para testes e estudo de aparência final de máquina, equipamento ou veículo, esp. aeronave.”

Para Tolstedt (2002), mock-up é um desenho tridimensional, que oferece o benefício adicional de análise, verificação e teste do tamanho do produto, sua forma, posicionamento e ajustes com as demais peças que compõem o ambiente onde o produto será aplicado. Mesmo que ainda seja apenas um conceito do produto,

permitirá ao projetista analisar como será o produto final, conforme mostrado na figura 2.12.



(a)

(b)

Figura 2.12 – (a) Mock-up em poliuretano da parte traseira de um radiador e ventiladores; (b) Parte dianteira do radiador em diferente fase de montagem. (Macarrão, 2004).

Entretanto, muitos autores chamam qualquer modelo tridimensional de protótipo, sem citar se este deve necessariamente ser em escala natural, mesmo que não seja funcional ou construído em material representativo. O próprio termo prototipagem rápida é amplamente utilizado para representar um processo de fabricação de peças. Porém, cada máquina de prototipagem rápida, dentro de seu processo, é capaz de fabricar peças sempre no mesmo material para o qual foi projetada, independente do material especificado pelo projeto da peça ora fabricada.

Ao longo deste trabalho, será utilizada a mesma nomenclatura coloquial utilizada pelos profissionais de desenvolvimento de produto. O termo mock-up, portanto, será empregado para se referir a qualquer modelo tridimensional em escala natural construído fisicamente, independente do material utilizado para construí-lo e não funcional.

O material e o processo empregados na fabricação de um mock-up são justificados pela sua necessidade. Como um mock-up é utilizado na maioria das vezes nas fases

iniciais de um projeto, seu objetivo é estar pronto o mais rápido possível a fim agilizar o trabalho do projetista, que ao ver seu projeto, poderá identificar potenciais melhorias e corrigir erros não detectados no desenho.

Por este motivo, não se espera que um mock-up seja bonito ou preciosamente acabado, com pintura ou outro acabamento, salvo quando um acabamento superficial específico seja solicitado, a fim de atender às necessidades do usuário do mock-up. Isso tornaria seu processo de fabricação muito moroso e poderia fazer o projetista parar para esperar que o mock-up fique pronto, para então continuar seu trabalho. Neste caso, o mock-up não estaria executando a sua função.

Por outro lado, quando for necessário montá-lo ou posicioná-lo, deve-se utilizar um material capaz de suportar tal operação. Por exemplo, na construção de uma peça que tenha extremidades flexíveis, em forma de cunha para encaixe, conforme mostrado na figura 2.13, não se deve utilizar materiais rígidos, pois à primeira montagem, estas partes se quebrariam, invalidando a análise.

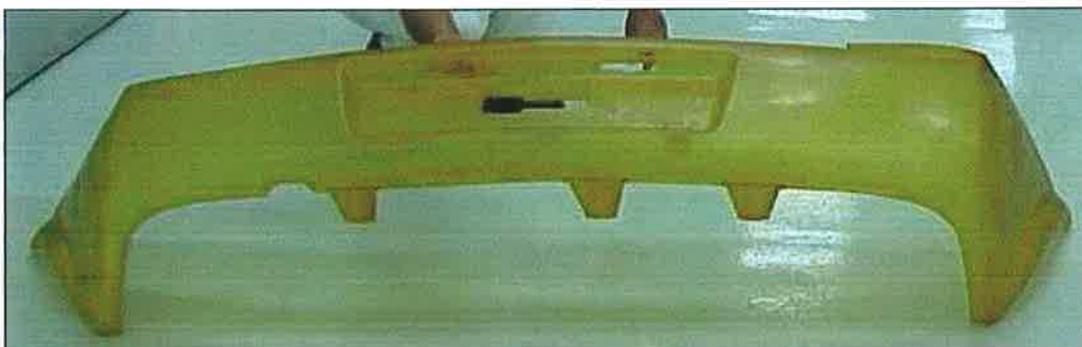


Figura 2.13 – Mock-up de um pára-choque em material flexível. (Macarrão, 2004).

Esta aplicação permite a utilização de uma peça mock-up como um protótipo para determinadas avaliações. É possível avaliar a montagem e concordância com as demais peças ao seu redor. Além disso poderá ser montado em um veículo funcional. Assim, este mock-up permitirá análise de tomadas de ar para arrefecimento do motor, funções desempenhadas por um protótipo. Entretanto, mesmo que a peça tenha montagem semelhante à do produto final, esta não poderá ser utilizada em todos os testes. Testes de impacto ou de durabilidade, por exemplo, não poderão ser

realizados devido à diferença de características mecânicas entre o material utilizado neste processo e o material especificado para o produto.

Quando sua construção é solicitada pelo engenheiro projetista, ele sabe exatamente o que vai fazer com o mock-up. Portanto, ele deve informar se vai apenas fazer uma análise visual, se vai realizar um teste de montagem. Se esta montagem deverá suportar algum tipo de esforço ou ainda se haverá necessidade de acabamento superficial.

Assim será possível definir o melhor processo de fabricação para a ocasião, que deve ser o mais rápido, o que apresente melhor qualidade, que tenha menor custo e principalmente que atenda à necessidade de análise. O material está diretamente relacionado com o processo de fabricação adotado e, em consequência, com o custo e o tempo de fabricação do mock-up.

A aplicação de mock-ups não deve ficar restrita ao produto. Pode também ser aplicada ao processo de fabricação. A figura 2.14 mostra um mock-up de uma pinça de solda a ponto construído em papelão, a fim de analisar o seu manuseio perante o produto, verificando assim o seu acesso às regiões onde serão aplicados os pontos de solda na carroceria.

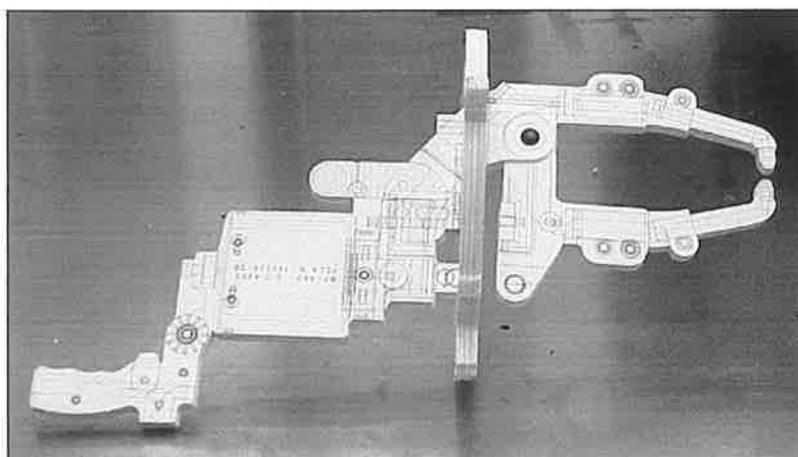


Figura 2.14 – Mock-up em papelão de uma pinça de solda. (Macarrão, 2004).

2.6 Conceito de protótipo

A divergência no sentido do uso e aplicação do termo protótipo entre os diversos autores e profissionais de desenvolvimento de produto é, de certa forma, entendida perante a definição de Ferreira (1999), no dicionário Novo Aurélio Século XXI. Ele define protótipo como “1. Primeiro tipo ou exemplar; original, modelo”. Isso explica as diferentes posturas perante o termo.

Um modelo, em geral, representa apenas uma face da peça. Ilustrando, o modelo de um pára-lama dianteiro de um veículo, é apenas a superfície externa da peça, ou seja, aquela que podemos ver ao olharmos para um veículo. Pode ser fabricado manualmente ou usinado e neste caso, é denominado modelo positivo.

Contudo, na continuação da sua definição, Ferreira (1999) diz que “3. Tecnologia. Produto fabricado individualmente ou de modo artesanal, e segundo as especificações de um projeto para fabricação em série, com o propósito de servir de teste antes da fabricação em escala industrial, ou da comercialização.”

Esta definição é clara, de onde se pode concluir que o termo protótipo, a rigor, deveria ser empregado somente a produtos que tivessem a capacidade de funcionar e ser testado, ou seja, deveriam ser construídos preferencialmente no mesmo material que o de fabricação em série ou em material representativo. Para ser mais abrangente, em veículos, a condição ideal é que, além do material especificado, os processos de obtenção e de montagem dos componentes devam ser similares ao processo de fabricação em série.

Tolstedt (2002), concorda com a definição apresentada em dicionários, mas acrescenta que talvez esta seja uma definição limitada. Considera que um protótipo “pode ser qualquer tipo de modelo de um produto ou sistema, desde um desenho tosco feito em um guardanapo de papel, até um modelo completamente funcional preparado no ambiente planejado”.

Neste trabalho, o termo protótipo será utilizado para as peças ou produtos que foram fabricados com materiais especificados em desenho, ou materiais com características mecânicas semelhantes, capazes de funcionar e serem testados. São os chamados protótipos funcionais.

À medida que o PDP vai evoluindo, cada protótipo fabricado deveria estar atualizado com as correções dos problemas encontrados nos protótipos anteriores. Entretanto, como este processo é sequenciado, muitas vezes quando um problema é identificado, o veículo seguinte já está parcialmente construído, não havendo, portanto, tempo hábil para a correção.

Por este motivo, é comum que a programação da fabricação dos protótipos seja planejada e dividida em grupos de protótipos, justificando, desta forma, a incorporação das melhorias identificadas nos protótipos anteriores. Assim, o processo de montagem e posterior avaliação dos protótipos não fica comprometido.

Baseado neste conceito, Daneshgari e Fletcher (2002) citam a divisão da fabricação de veículos protótipo em quatro fases distintas. Segundo eles, porém, estas fases estão sofrendo alterações devido à grande necessidade de redução de custos e prazo pela engenharia de produto na indústria automotiva. Para Barroco (2002), a evolução deste processo permite o desenvolvimento de projetos cada vez mais rápidos e criativos, com o aprimoramento da qualidade, dentro dos objetivos estabelecidos.

Na primeira fase, normalmente ocorre o desenvolvimento do conjunto motor e câmbio do veículo e, dependendo do projeto, de alguns subsistemas específicos, que começam a ser testados. Para isso, é utilizado um veículo oriundo da linha de produção, compatível com o novo projeto, adaptado para receber os novos componentes. Esta fase, normalmente é chamada de fase mula.

Como a maioria das peças modificadas encontra-se em locais que não são visíveis externamente, muitas vezes estes veículos rodam pelas ruas sem que estas modificações sejam percebidas pelo público. Enquanto esta fase se desenvolve, o

projeto dos demais sistemas do veículo vai sendo concluído, dando início ao projeto e construção dos dispositivos de montagem e à fabricação das novas peças.

Na segunda fase, os protótipos são fabricados por completo segundo o novo projeto. O aprendizado desta fase é muito importante para as fases seguintes. A fabricação das peças não precisa ser necessariamente no material especificado pelo desenho.

Muitas peças são fabricadas manualmente, como é o caso da maioria das peças metálicas da carroceria. As peças plásticas são fabricadas em fibra de vidro ou em resinas. Devido às características das peças utilizadas, alguns tipos de testes não podem ser executados. Assim, o benefício desta fase não é proporcional ao seu custo. Por estes motivos, o uso desta fase praticamente foi eliminado e as atividades foram transferidas para os mock-ups. Por sua vez, o benefício proporcionado nesta segunda fase referente ao aprendizado do processo de fabricação, passou a ser realizado na fase posterior.

Na terceira fase de fabricação de protótipos, as peças são provenientes de ferramental rápido, cujo conceito será explicado adiante, em capítulo específico. O material utilizado na fabricação das peças deve ser o material especificado em desenho. O processo de fabricação das peças procura ser o mais parecido possível com o processo de fabricação definitivo, embora certas alterações no processo são admissíveis a fim de viabilizar o projeto.

Um exemplo claro disso se dá no processo de fabricação de peças metálicas da carroceria. Muitas vezes, uma peça em chapa de aço estampada, que para a produção em série utiliza várias ferramentas e vários estágios de conformação e recorte, em ferramental rápido é fabricada em um ou dois estágios para conformação. Neste caso, menor velocidade de estampagem e outros recursos manuais são aplicados, sem que haja interferência no resultado final da peça. O recorte dos contornos e furos é feito a laser ou manualmente. A quantidade de peças protótipo produzidas não justificaria o investimento em tantas ferramentas.

As peças plásticas também são produzidas em ferramental rápido, no material especificado em desenho, com a utilização de máquinas injetoras de material plástico. Sua construção também é simplificada, tornando a operação de extração da peça mais demorada em troca da redução de custo na fabricação do molde, sem perda da qualidade do produto. Os demais componentes também são produzidos de maneira similar.

Para a montagem da carroceria, são fabricados dispositivos de montagem, conforme mostrado na figura 2.15, os quais garantirão a repetição da operação de montagem de uma carroceria para outra. Os veículos provenientes desta fase, são muito semelhantes aos veículos que sairão da linha de montagem em série. Os testes realizados com eles serão representativos e os resultados alcançados servem para a definição dos parâmetros do novo veículo.

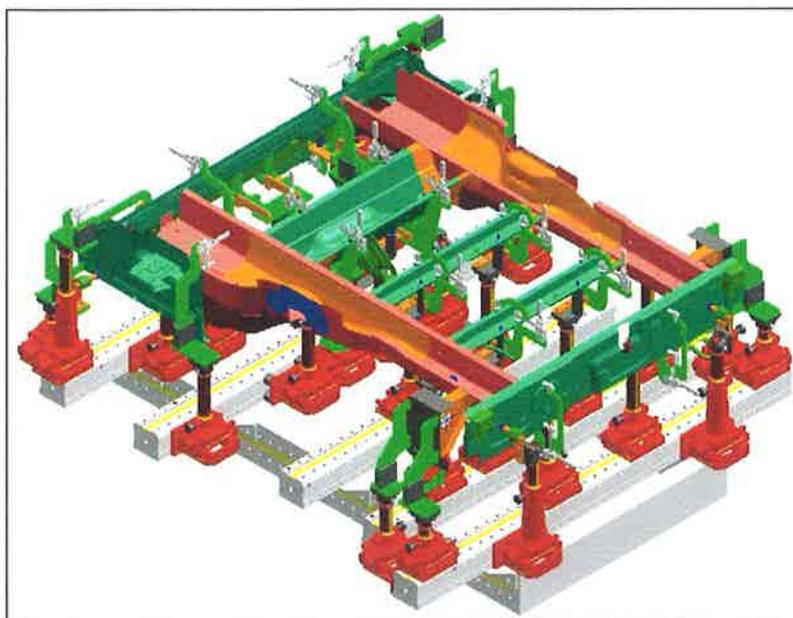


Figura 2.15 – Ilustração do dispositivo de montagem da estrutura do assoalho do compartimento de carga de uma picape. (Macarrão, 2004).

Na quarta e última fase de montagem de carrocerias protótipo, as peças utilizadas nestas carrocerias são as primeiras produzidas pelo ferramental definitivo de produção em série. Portanto, além destas peças serem no material especificado pelo

desenho, são obtidas rigorosamente pelo mesmo processo de fabricação, avaliando assim o projeto definitivo das peças individualmente.

A montagem se dá nos mesmos dispositivos utilizados na fase anterior, porém, todos os pontos de localização e montagem são medidos, verificados e, se necessário, corrigido o seu posicionamento ou forma.

Embora estes veículos ainda não sejam produzidos na linha de montagem de produção em série, são representativos. Com eles são realizados todos os testes finais, inclusive o de durabilidade e os ensaios destinados à obtenção de dados reais para a homologação junto aos órgãos governamentais e companhias de seguro.

2.7 Conceito de ferramental rápido

Ferramental Rápido – *Rapid Tooling* (RT) – são ferramentas para produção de peças em pequenos lotes. Na construção destas ferramentas são utilizados materiais e processos mais baratos e mais rápidos de serem construídos, se comparados com o ferramental definitivo de produção de peças.

Segundo Wohlers (1999), as empresas estão desenvolvendo métodos de RT para uso próprio, sem que haja a preocupação de licenciar o processo ou torná-lo comercialmente viável, como uma vantagem estratégica no mercado cada vez mais competitivo. Para o autor, o interesse é reduzir custo e tempo no desenvolvimento de ferramentas e fabricação de peças.

Em Wohlers (2001), o autor afirma que métodos, processos e sistemas para RT também estão em desenvolvimento, muitos dos quais são novos e ainda não são bem entendidos. Como uma tecnologia emergente, a definição de RT é frequentemente

debatida e não claramente definida, porém, a maioria concorda que é derivada dos processos de RP e são sinônimos de fabricação rápida.

A RT pode ser aplicada a diferentes processos de fabricação, como por exemplo, para estampagem de peças metálicas, fabricação de peças em resina injetada, laminação de peças em plástico reforçado com fibra de vidro, formação de peças plásticas a vácuo, entre outros.

Como exemplo, Groth e Grimm (2002) citam que os moldes de silicone são a solução ideal para a produção de pequena quantidade de peças plásticas, devido à rapidez na obtenção de peças e ao custo acessível do processo.

Outro fator que impulsionou a RT foi o fato de que as peças provenientes dos processos de RP, segundo Nasser (2001a), são incapazes de serem totalmente funcionais. Em decorrência desta deficiência, o autor afirma que a grande competição na indústria automotiva obriga as montadoras a reduzir o seu tempo de desenvolvimento de novos produtos, buscando processos mais rápidos e a menor custo para obtenção de pequenos lotes de peças.

Para fabricação de peças de forma simples, cujo processo de fabricação requeira apenas recorte, furos e dobras retas, é possível fabricá-las com dispositivos manuais simples. Para as demais peças em aço estampado, é impossível obtê-las sem uma ferramenta de conformação, mesmo para a fabricação manual. Para suprir esta necessidade, como alternativa ao ferramental confeccionado em aço, que geralmente é fundido e usinado, desenvolveram-se técnicas de fabricação de ferramentas em resinas de alta resistência mecânica para conformação de metais. Para Gatto e Iuliano (2001), este processo proporciona ganhos em termos de redução de custo e prazo.

Analisando a questão de uma forma mais abrangente do que a realizada por Wohlers (2001), conclui-se que os vários processos de RT destinados à obtenção de pequenos lotes de peças são mais antigos do que as tecnologias RP.

Isso é decorrente da necessidade de evitar o custo elevado de um ferramental capaz de produzir milhares de peças, em ocasiões em que eram necessárias apenas algumas dezenas de peças em todo o período de fabricação do produto.

Nesta época, buscava-se prioritariamente a redução de custos no processo. Nas últimas décadas, novos materiais foram desenvolvidos com esse propósito. Os processos de fabricação de ferramental também evoluíram. Hoje, no mercado brasileiro, existem resinas para fabricação de ferramentas de conformação de chapas de aço capazes de produzir milhares de peças estampadas sem perda de qualidade. A ferramenta não sofre desgaste significativo nem se quebra, mesmo nas regiões mais críticas como os cantos vivos.

Dickens, Hague e Wohlers (2000) dividem os métodos de RT em duas grandes categorias. O método indireto de fabricação é mostrado na figura 2.16.



Figura 2.16 – Molde para laminação da parte traseira do painel lateral interno de uma carroceria. (Macarrão, 2004).

Nesta categoria, o método indireto de fabricação utiliza um modelo para produzir um molde. Neste caso, o molde foi obtido a partir de um modelo em *clay* e não pode produzir individualmente as portas, capô, pára-malas, etc. Pode apenas produzir a

carroceria completa. Por este motivo, possui apenas três partes para permitir a desmoldagem da peça. Modelos pequenos podem ser obtidos por RP.

Na outra categoria, o método direto, a máquina de RP fabrica o molde, sem a necessidade de um modelo como padrão. A figura 2.17 mostra um molde fabricado pelo método direto, aberto e com uma peça em seu interior. O molde, fabricado em uma máquina de RP, é bi-partido e serve para injetar peças em resina de poliuretano. Como detalhe, observa-se que para que a peça apresente os furos na parte superior, foi introduzida uma peça cilíndrica em aço, cujo alojamento de localização foi planejado no projeto do molde.

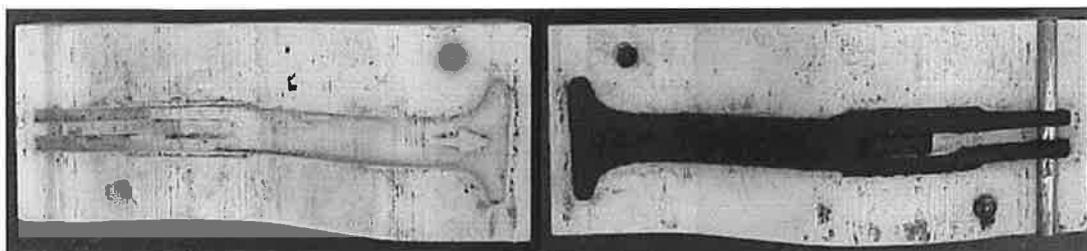


Figura 2.17 – Molde de injeção pelo método direto. (Macarrão e Kaminski, 2003).

Dickens, Hague e Wohlers (2000) também afirmam que a demanda por ferramental de construção mais rápida e de menor custo resultou no desenvolvimento de grande quantidade de métodos de RT em todas as partes do mundo. Muitas empresas estão se estruturando para desenvolver e comercializar a RT, devido ao mercado existente.

Grimm (2000) afirma que o usuário deste serviço não está preocupado como será feito o trabalho. A preocupação é em receber o serviço rapidamente com a qualidade e o valor solicitado, embora muitas vezes, o usuário aceite algumas limitações decorrentes do processo utilizado em troca de ganhos de tempo. Para o autor, RT está relacionado com a rapidez com que os resultados são alcançados. O sucesso não é obtido apenas com a utilização de tecnologia de ponta, mas com a combinação de ferramentas, métodos, processos e pessoas na obtenção de soluções rápidas, independente do processo utilizado.

2.8 Conceito de manufatura rápida

As técnicas de RT têm se desenvolvido de forma consistente. Hoje, em muitos casos quando é prevista uma quantidade limitada de peças durante toda a vida do produto, este tipo de ferramental já é utilizado para a fabricação de peças para produção. Desta forma, o baixo custo do ferramental é facilmente amortizado nas peças produzidas, enquanto o custo de ferramental definitivo, diluído em pequena quantidade de peças produzidas, aumentaria o custo unitário do produto. Este recurso, aplicado à fabricação de peças destinadas à produção, é chamado de Manufatura Rápida – *Rapid Manufacturing* (RM). Nestes casos, o ferramental definitivo deixa de existir.

Wohlers (2000) cita que vários fatores podem tornar viável a aplicação destas técnicas na RM, tais como: peças pequenas, em pequenas quantidades, com alto custo de produção, que não requeiram grande qualidade de acabamento de superfície ou que não sejam aparentes no produto. Materiais de construção foram desenvolvidos a fim de permitir o uso cada vez maior do ferramental rápido na manufatura rápida.

No processo de manufatura rápida, para a fabricação de ferramentas, o aço fundido deu lugar a resinas e a ligas de metais não ferrosos, como o *zamac* ou o *kirksite*, entre outros. No caso das resinas, estas são formuladas no momento da fabricação da ferramenta e é um processo rápido. Em muitos casos, a resina formulada é vazada sobre um modelo, dispensando a operação de usinagem. Além disso, qualquer alteração na forma do produto pode ser incorporada à ferramenta. Para isso, basta remover por usinagem a área a ser modificada e preencher a região modificada com resina sobre um modelo modificado.

Kaufeld e Morbitzer (2000) acreditam que, devido aos ciclos de vida dos produtos cada vez mais curtos, os processos de ferramental rápido e de manufatura rápida terão importância cada vez maior. Os autores representam a associação dos três

processos RP, RT e RM, às etapas básicas do PDP na figura 2.18. Observa-se que a RM inicia após a conclusão do desenvolvimento do produto e é utilizada durante todo o período estiver em produção.

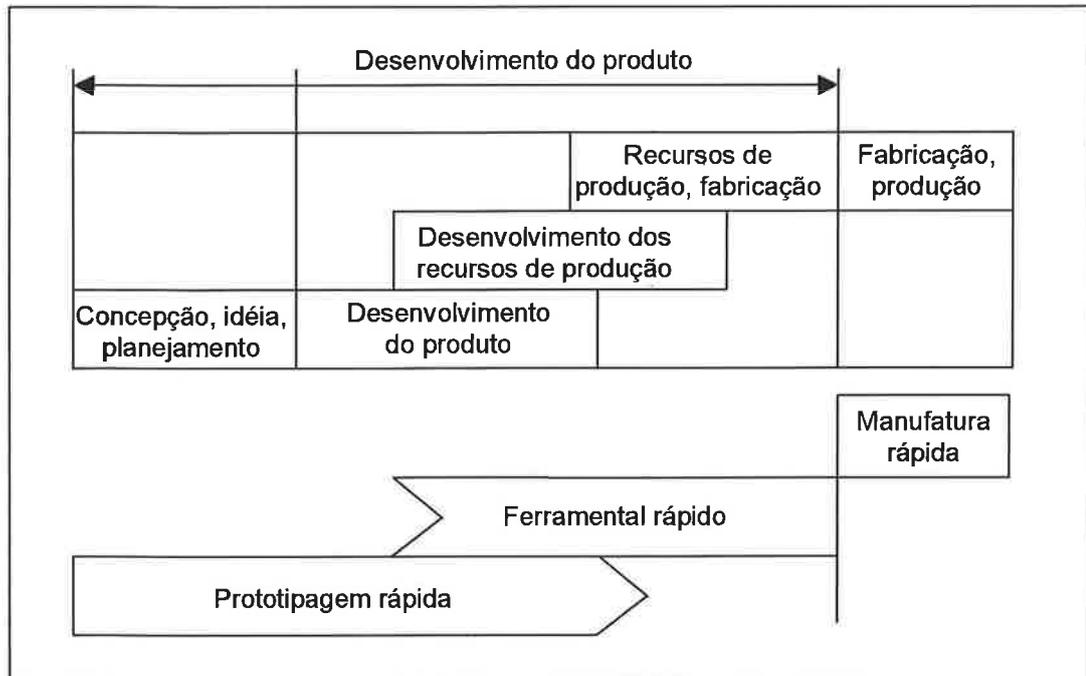


Figura 2.18 – Alocação dos processos RP, RT e RM às fases fundamentais do desenvolvimento do produto. (Kaufeld e Morbitzer, 2000).

3 ALGUNS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE MOCK-UPS E DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Existem muitos processos de fabricação de mock-ups, e várias tecnologias desenvolvidas e empregadas no processo de prototipagem rápida. A cada técnica ou processo de fabricação está associado um material, custo, prazo e qualidade, que são diferentes de um processo para outro.

Segundo Kotnis (1999), o tipo e a quantidade de protótipos a serem fabricados dependem especificamente da fase de desenvolvimento em que o novo produto estiver. O autor afirma que peças em poliuretano ou provenientes de prototipagem rápida são utilizadas para verificações nas fases iniciais do projeto, enquanto peças produzidas no mesmo material em que será produzido em série, são utilizadas para testes funcionais e de validação do produto nas fases avançadas do desenvolvimento do produto.

Se as necessidades do PDP fossem sempre as mesmas, bastaria utilizar o recurso de menor custo, maior rapidez e de melhor qualidade. Entretanto, como cada necessidade tem sua particularidade, é fundamental que cada empresa tenha desenvolvido algumas técnicas de fabricação de mock-ups e protótipos. Estas técnicas atenderão aos seus requisitos de avaliação suprimindo a maioria das necessidades dos projetistas de produto e processo. Além disso, é comum precisar recorrer a fornecedores que sejam especializados em determinadas técnicas ou para atender a situações de grande volume de trabalho. Nestes casos, é fundamental que se tenha fornecedores capazes de atender a estas necessidades.

Não existem técnicas melhores ou piores. Deverá ser utilizada a técnica ou processo que melhor atender às necessidades específicas de cada momento do PDP, para cada tipo de componente ou avaliação, e que estiver disponível. Por este motivo, algumas técnicas de fabricação de mock-ups são apresentadas e discutidas. Estas técnicas atendem à maioria das necessidades que surgem durante o desenvolvimento dos

componentes de carroceria e de acabamento de um veículo para a indústria automotiva. São também apresentados quatro dos processos de prototipagem rápida comercialmente disponíveis no Brasil.

Quando se tratar de compra de uma peça em prototipagem rápida, imediatamente se pensa na compra de um protótipo rápido fabricado no Brasil, a fim de evitar o trâmite de importação, que pode ser mais demorado do que a fabricação da peça. Além disso, o processo de cotação e negociação, assim como o tempo requerido pelo transporte e desembaraço na alfândega, o que pode inviabilizar o uso deste recurso no PDP, se a peça for fabricada no exterior.

Entretanto, algumas empresas vendem no mercado brasileiro serviços que são executados por empresas conveniadas sediadas no exterior. Para isso, enviam o desenho da peça por correio eletrônico e a peça concluída é recebida via correio.

Nesta fase de desenvolvimento, o departamento de compras deve estar alerta para que a negociação seja o mais breve possível. Em empresas de grande porte, o processo é mais demorado ainda. Não basta considerar apenas o tempo de fabricação requerido pelo fornecedor. Desde o momento em que a necessidade do protótipo rápido é detectada pelo engenheiro de produto, até a conclusão do negócio propriamente dito, podem se passar dias ou até semanas. Além disso, o tempo de transporte e entrega do protótipo rápido precisa ser levado em consideração.

3.1 Fabricação manual

O mais antigo método de fabricação de modelos é o processo manual. É um processo que apesar de parecer rudimentar, é até hoje utilizado em casos que, se empregado outro processo mecanizado, teria como resultado acréscimo de custo ou perda de

qualidade. Independente de qualquer outro fator, sempre é uma alternativa a outros processos, na redução de prazo quando não houver carga de máquina disponível.

Segundo SENAI (2002), no curso de formação de modelador industrial um modelador aprende a utilizar máquinas como serra de fita, serra circular e lixadeiras, ferramentas manuais de corte e desbaste e a criar superfícies construindo manualmente modelos em vários materiais.

A qualidade dimensional e de superfície de um modelo ou mock-up fabricado manualmente está diretamente ligada à habilidade do modelador. Um modelo fabricado manualmente por um modelador habilidoso apresenta alta qualidade da superfície, mesmo em superfícies curvas.

Um profissional experiente, a partir da análise do desenho, escolherá o melhor material a ser utilizado. É comum a utilização de mais de um tipo de material na confecção de um modelo ou mock-up. A fabricação normalmente se dá a partir de um bloco sólido de material. O modelador recorta o bloco aproximando-o à forma do modelo a ser construído. A seguir, lixando manualmente, com o auxílio de instrumentos de medição, dá forma ao modelo conforme desenho de produto.

A figura 3.1 mostra um mock-up de um dispositivo de retenção e direcionamento de vapores de combustível – *canister*, fabricado pelo processo manual. Nesta figura, também são mostradas duas fases intermediárias da fabricação manual.

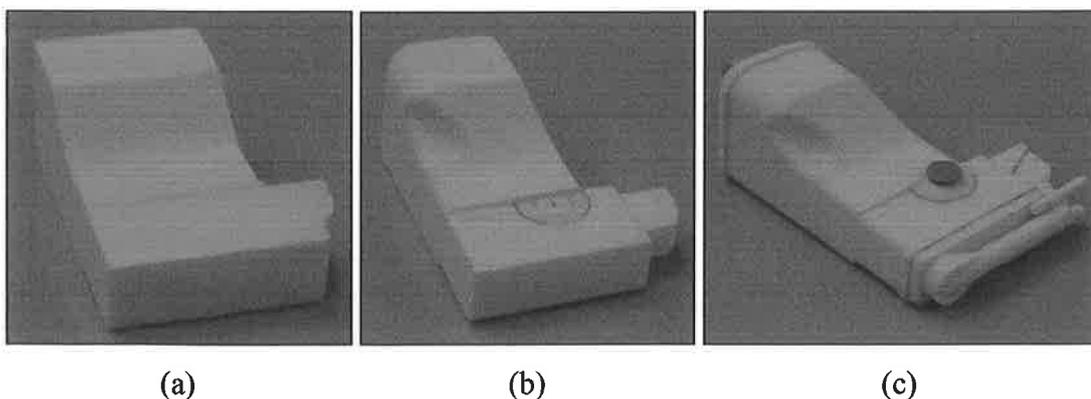


Figura 3.1 – (a) Bloco de poliuretano recortado; (b) Modelo em fase intermediária de fabricação; (c) Mock-up de um *canister* concluído. (Macarrão, 2004).

Na primeira figura, o bloco de espuma rígida de poliuretano já cortado conforme as formas externas da peça. Na segunda, o modelo parcial após 4 horas de trabalho. Na mesma figura, o modelo concluído após 8 horas de trabalho de um modelador. Neste caso, foram utilizados três tipos de espuma rígida de poliuretano. A branca no corpo do modelo, a amarela na construção do ponto de fixação na parte posterior e a cinza na região superior.

Antigamente, os modelos geralmente eram fabricados em madeira. Com o desenvolvimento de novos materiais, a madeira deu lugar, na maioria dos trabalhos, a materiais como espuma rígida de poliuretano de diversas densidades, resinas de poliéster com encorpante sólido, isopor, entre outros.

Apesar de mais caros do que a madeira, estes materiais são suficientemente rígidos para o fim a que se destinam. São mais fáceis de serem removidos manualmente com formões, lixas ou mesmo em máquinas como a serra de fita. Isso torna a fabricação do modelo mais rápida.

A referência da fabricação manual é uma cópia do desenho do modelo. A fim de reduzir o tempo de fabricação, o desenho utilizado é em escala 1:1. Assim, a tomada de medidas é imediata, praticamente eliminando a possibilidade de um erro de cálculo na conversão de escala de medidas tomadas diretamente do desenho, e de detalhes não cotados. Por este motivo, são utilizadas cópias heliográficas ou cópias produzidas por impressora, a chamada *plotter*, cujos sistemas de cópias oferecem deformação ou distorção desprezível para peças de carroceria.

Dependendo da finalidade do modelo ou mock-up, este pode receber acabamento como verniz ou pintura. Para melhor apresentação do trabalho, pode ser aplicada uma camada de resina de poliéster, a qual, após o endurecimento, é lixada, dando aspecto plástico ao mock-up.

Toda operação de acabamento leva tempo e tem um custo envolvido com material e principalmente com mão de obra, aumentando seu prazo de execução. Esta operação é adicional e deve ser utilizada somente quando necessária. Com exceção da fase de

definição do design do veículo, o aspecto visual, nas fases iniciais do PDP não tem relevância. Assim, para se evitar aumento no custo ou no prazo de conclusão dos modelos, a operação de acabamento não é realizada.

Em muitos casos, quando um modelo fabricado por um processo mecanizado ou por prototipagem rápida precisa ser modificado, é possível, a partir de uma peça ou um modelo já fabricado, executar a modificação manualmente. Isso é aplicado quando não for possível retornar o modelo à máquina ou quando houver perda de produtividade da máquina para realização da modificação.

Uma modificação manual também pode ser aplicada sobre uma peça em produção conforme mostrado na figura 3.2. O conjunto de cobertura da coluna de direção, em polipropileno, foi modificado mediante a remoção do material na região que se encontrava fora do novo desenho, e com aplicação de resina de poliéster e talco, a massa plástica, na região modificada. A pequena área de contato dificulta a ancoragem do material aplicado. Para haver melhor fixação, foi necessária a abertura de pequenos rasgos na área de contato, que funcionam como trava mecânica.



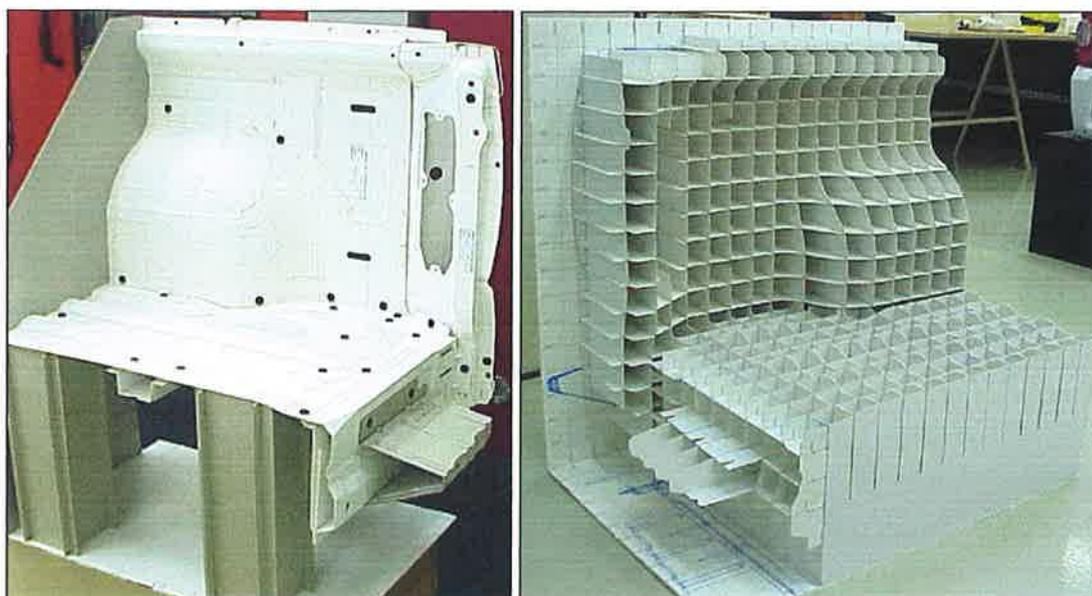
Figura 3.2 – Peça de produção em série modificada a mão. (Macarrão, 2004).

3.2 Fabricação de mock-ups em cartolina

A cartolina utilizada neste processo tem aproximadamente 0,5 mm de espessura. Esta espessura lhe confere rigidez suficiente para suportar o próprio peso, quando montada na forma de uma peça. É um material cuja aplicação é limitada. Seu maior uso é para casos cuja necessidade de avaliação seja visual. A vantagem é o curto tempo requerido para conclusão de um mock-up. Para viabilizar este processo, são necessários um software e uma máquina que corta e imprime informações. Este equipamento oferece duas possibilidades de fabricação.

A primeira possibilidade é a de construir em cartolina, uma ou várias peças de carroceria, que são de chapa metálica conformada. Neste caso, o software planifica a peça e determina os recortes da cartolina, possibilitando a montagem da peça como se esta tivesse sido conformada, conforme mostrado na figura 3.3 (a). Isso se faz necessário porque no caso da chapa metálica, há o estiramento do material durante a estampagem. Na cartolina, este fenômeno não ocorre.

Outra possibilidade do uso de cartolina é a construção de uma superfície obtida por uma forma construtiva semelhante a um engradado. Para a construção desta superfície, é criado um plano que servirá de base ao modelo. Perpendicularmente a este plano, são montadas folhas de cartolina recortadas com o perfil da peça na coordenada em que está se encontrar. Estas folhas de cartolina recortadas são montadas como se fosse um engradado e coladas no plano de base. O espaçamento entre as folhas de cartolina é escolhido de acordo com o aspecto visual requerido. Quanto mais próximas umas das outras, melhor será a percepção visual da superfície. Este tipo de construção possibilita a avaliação visual do espaço ocupado por uma superfície. A figura 3.3 (b) mostra um modelo parcial tipo engradado da região interna da caçamba de uma picape.



(a)

(b)

Figura 3.3 – (a) Mock-up em cartolina de região traseira direita da caçamba de uma picape; (b) Mock-up em cartolina montada em forma de engradado da região traseira esquerda da caçamba de uma picape. (Macarrão, 2004).

3.3 Prototipagem rápida

Segundo Gorni (2001), prototipagem rápida é a construção de um modelo físico a partir de um modelo virtual. Para isso, é necessária uma máquina de prototipagem rápida. Para Carvalho (1999), “as máquinas de prototipagem rápida permitem obter peças físicas acabadas, de modo automático, de qualquer forma e em dimensões finais, com complexidade e detalhes que não permitiriam sua obtenção em máquinas convencionais de usinagem, ou tornariam sua execução demorada ou complexa em centros de usinagem numericamente comandados”.

Embora Gorni (2001) afirme que o uso de prototipagem rápida na construção de modelos resulte em economia de tempo e de custo, para Wack (2002), a

prototipagem rápida não é o método mais rápido para a fabricação de peças para todas as situações.

A prototipagem rápida vem se difundindo rapidamente no meio industrial, impulsionada pela grande vantagem estratégica que esta tecnologia implementa no PDP. Wohlers e Grimm (2002a) afirmam que além do custo do investimento da máquina de prototipagem rápida, os materiais utilizados em RP são caros, e ainda deve ser considerado o custo de manutenção periódica das máquinas. Entretanto, eles afirmam ainda que se a máquina de RP for utilizada plenamente, o período de retorno do capital investido é medido em meses, não em anos. A partir daí, a compra da segunda máquina torna a operação mais barata, pois o mesmo operador pode operar as duas máquinas simultaneamente.

Wohlers e Grimm (2001) afirmam que o processo inventado por Chuck Hull, chamado de *stereolithography*, é atualmente muito utilizado não só na indústria mas também em carros de corrida de Fórmula 1, para peças muito pequenas, filtros cerâmicos, na odontologia, nos mais variados estudos da medicina, entre outras aplicações.

Depois da *stereolithography*, vários outros processos surgiram. Todos eles utilizam o mesmo princípio na construção de modelos, que é o de deposição de material em camadas sobre uma superfície, ao contrário dos processos como a usinagem, que têm por princípio a remoção de material.

Segundo Gorni (2001), desde a patente do processo pioneiro, a "estereolitografia", em 1986 até hoje, muitas novas tecnologias já se desenvolveram. Segundo Wohlers (2002), "um número quase inacreditável de novas tecnologias, materiais e melhorias estão em desenvolvimento em empresas, universidades e laboratórios de governo por todo o mundo".

Carvalho (1999) afirma que várias empresas desenvolveram e implementaram seus processos de RP mas não obtiveram sucesso industrial. Estas empresas foram adquiridas por outras ou simplesmente deixaram de existir. Segundo o autor, "os

dados para as máquinas de prototipagem rápida são gerados no sistema CAD no formato STL, que aproxima o modelo sólido por pequenos triângulos ou facetas. Quanto menor forem estes triângulos, melhor a aproximação da superfície, ao custo naturalmente de maior tamanho do arquivo STL e tempo de processamento”.

A máquinas de prototipagem rápida processam o arquivo STL por intermédio de um software, que permite a visualização do modelo a ser construído assim como sugere a melhor posição para a sua construção. Este software corta o modelo em fatias horizontais e paralelas, em espessuras que variam de acordo com o processo ou com a qualidade de superfície desejada. A maioria dos trabalhos é executada em camadas com espessuras próximas de 0,2 mm. Quanto menor a espessura da camada, melhor será a qualidade do acabamento do modelo e maior será o seu tempo de fabricação.

Alguns processos requerem suportes de sustentação do modelo durante a sua fabricação. Nestes casos, o software se encarrega de definir a localização, tamanho e construção destes suportes.

Para Gorni (2001), todos os processos de prototipagem rápida atualmente existentes são constituídos por cinco etapas básicas:

1. Criação de um modelo CAD da peça que está sendo projetada;
2. Conversão do arquivo CAD em formato STL, próprio para "estereolitografia";
3. Corte do arquivo STL em finas camadas transversais;
4. Construção física do modelo, empilhando-se uma camada sobre a outra;
5. Limpeza e acabamento do protótipo.

Vários processos de prototipagem rápida são comercializados no Brasil, porém quatro deles são os mais conhecidos por possuírem representantes e prestadores de serviço em São Paulo. Estes processos são abaixo apresentados.

3.3.1 "Estereolitografia" – *Stereolithography* (SLA)

Dentre os processos de RP, Gorni (2001) afirma que a “estereolitografia” foi o pioneiro. Segundo Grimm (2002) é a tecnologia de RP mais utilizada no mundo. Foi desenvolvida pela empresa 3D Systems, Inc.

Segundo Gorni (2001), seu processo utiliza polímeros líquidos sensíveis à luz, que se solidificam quando expostos à radiação ultravioleta (UV), para fabricar as peças. A máquina possui um recipiente com resina epóxi ou acrílica fotossensível. Dentro deste recipiente existe uma plataforma presa a um elevador, que inicialmente é posicionada abaixo do nível da resina, a distância igual à espessura da primeira camada do modelo. Um feixe de raio laser de alta precisão de foco é direcionado por um conjunto de lentes e espelhos que traça a primeira camada polimerizando a secção transversal do modelo. Por ser fotossensível ao raio ultravioleta, a resina solidifica apenas na região percorrida pelo raio.

Segundo Dolenc (1994), o raio laser que solidifica o líquido é o HeCd. O raio laser HeNe é utilizado para garantir que a superfície do líquido esteja no lugar correto.

Com a primeira camada concluída, o elevador desce o equivalente à espessura de uma nova camada. Um nivelador passa horizontalmente ao nível da resina a fim de quebrar a tensão de superfície, nivelando-a sobre a camada solidificada e ainda minimiza o tempo de processo de cada camada. Analogamente, é feita a segunda camada, e assim sucessivamente até que o modelo seja concluído.

Como o modelo é construído no interior do líquido, é necessário que sejam adicionados suportes para fixação e sustentação do modelo, impedindo que este se movimente ou flutue durante a operação. O modelo concluído é retirado do interior da resina e os suportes são removidos manualmente. O modelo é então limpo com solvente apropriado e é colocado em forno para a cura total da resina solidificada. A fim de melhorar a qualidade da superfície do modelo, esta pode ser lixada

manualmente com lixa fina. A figura 3.4 mostra o esquema de funcionamento do processo SLA.

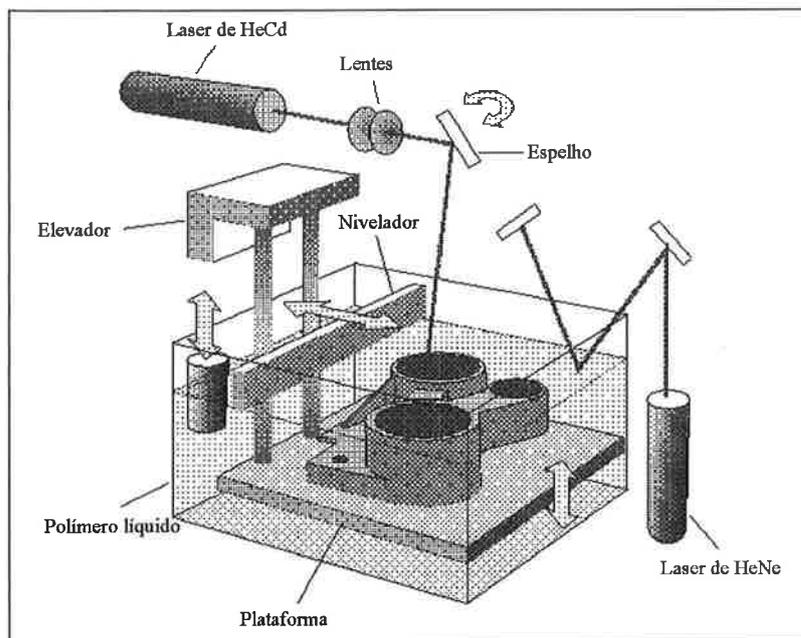


Figura 3.4 – Esquema do processo de “estereolitografia” – SLA. (Gorni, 2001).

3.3.2 Sinterização Seletiva a Laser – *Selective Laser Sintering (SLS)*

O processo SLS foi desenvolvido pela DTMTH Corporation em 1989, porém hoje pertence à 3D System. Este processo é similar ao processo SLA, porém, segundo Gorni (2001), o raio laser funde de forma seletiva materiais pulverulentos, tais como náilon, elastômeros e metais.

Neste processo, esquematizado na figura 3.5, o raio laser sinteriza o material da área da primeira secção do modelo. Desta forma, o material em pó é fundido e depois solidificado, camada por camada, à medida que a plataforma vai descendo. O modelo em formação pelo processo SLS não necessita de suporte, pois o próprio pó dá a sustentação necessária, impedindo que o modelo se movimente.

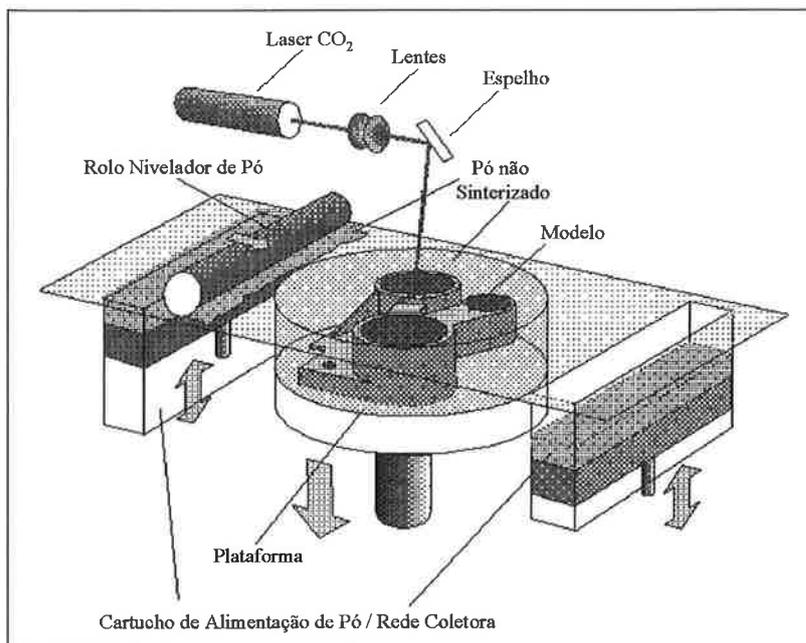


Figura 3.5 – Esquema do processo de sinterização seletiva a laser – SLS. (Adaptado de Dolenc, 1994).

3.3.3 Modelagem por Deposição de Material Fundido – *Fused Deposition Modeling* (FDM)

O processo FDM foi desenvolvido pela Stratasys Inc. Tem o mesmo princípio dos outros processos de RP: o de construir o modelo camada por camada, a partir de um modelo fatiado horizontalmente, recebido pela máquina no formato STL. A qualidade da superfície do modelo e o seu tempo de fabricação também estão diretamente relacionados à espessura da camada, ou seja, quanto menor a espessura da camada, melhor será a definição da superfície e maior será o tempo de fabricação do modelo. Na sua forma construtiva, comparada aos processos anteriores, a semelhança pára aqui.

Gorni (2001) afirma que este processo utiliza filamento de resina termoplástica para a formação do modelo. O modelo é formado sobre uma base que faz o movimento

vertical. Um bico extrusor que se move num plano X-Y, vai depositando continuamente um filete de material sobre a base até formar toda a camada, conforme esquema de funcionamento do processo mostrado na figura 3.6. A cada camada formada, a base desce o equivalente à espessura de uma camada, e assim sucessivamente até que o modelo seja concluído.

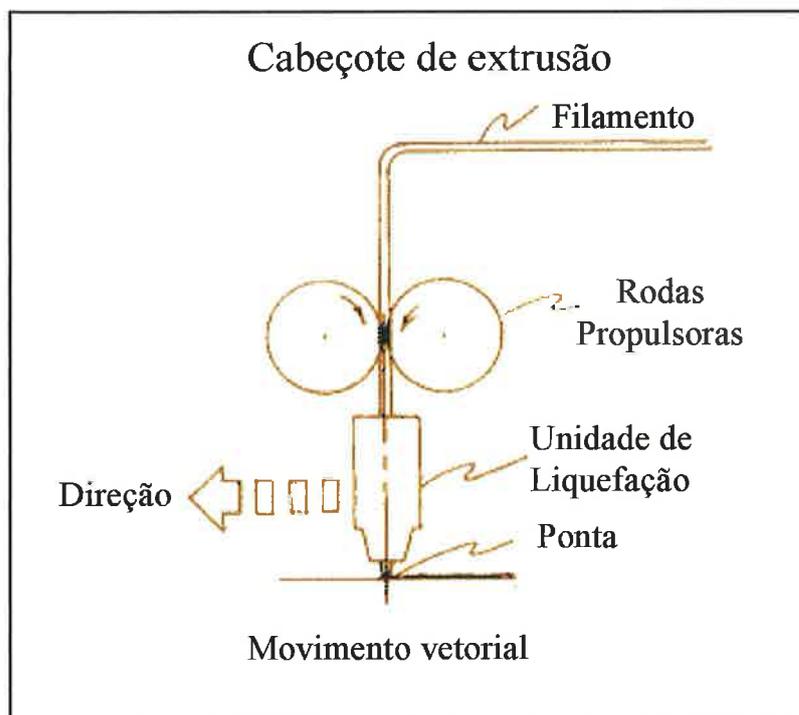


Figura 3.6 – Esquema do processo de deposição de material fundido – FDM. (Adaptado de Gorni, 2001).

Para dar a sustentação necessária ao modelo, um segundo cabeçote constrói o suporte em material frágil e quebradiço, suficiente para o apoio da peça, cujo esforço é pequeno, mas que após a conclusão do modelo, é removido manualmente. Ambos os cabeçotes trabalham, um de cada vez, na mesma camada, construindo assim suporte e peça simultaneamente. A figura 3.7 mostra as mangueiras que compõem a linha de ar condicionado de um veículo, formada em Acrilonitrila Butadieno Estireno – *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) – branco e seu respectivo suporte formado em ABS cinza. Observa-se que um conjunto de peças foi construído como se fosse apenas uma só peça.

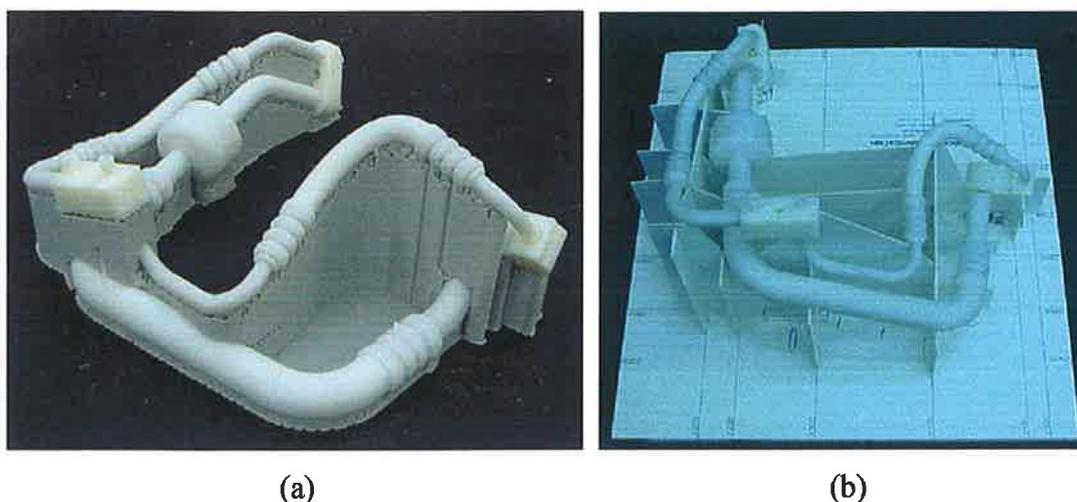


Figura 3.7 – (a) Linha de ar condicionado em FDM com o seu suporte; (b) Mesma peça sem o suporte sobre um dispositivo em cartolina. (Macarrão, 2004).

Como alternativa, já existe uma composição para o material de suporte que permite que a sua remoção seja feita apenas mergulhando o conjunto formado em uma solução aquosa durante alguns minutos. Assim o suporte se dissolve. Este recurso possibilita a formação de peças com áreas internas de difícil acesso para a remoção manual da base.

3.3.4 Impressão em 3D – 3D Printing

O processo de impressão em 3D também tem o conceito da construção do modelo por deposição de camadas. Desenvolvido pela Z Corporation, este processo utiliza uma máquina que opera de maneira similar às impressoras a jato de tinta para papéis. Segundo Jee e Sachs (2000), o material em pó é depositado em camadas, o qual recebe sobre si um jato de tinta, dando liga ao material na região selecionada pelo arquivo STL. Da mesma forma que os demais processos, o autor alerta que a superfície externa do modelo terá aparência semelhante a degraus, devido à formação em camadas.

A impressora contém um reservatório de alimentação do material de construção do modelo em pó. Dentro deste reservatório existe um pistão móvel que realiza o movimento vertical descendente durante a construção do modelo. O pó é então nivelado por um cilindro com movimento horizontal. Um jato de tinta com função de ligar os grãos do material forma a primeira camada. O pistão desce e com o material nivelado novamente, é formada a segunda camada e assim sucessivamente até a formação do modelo, conforme mostrado na figura 3.8. Neste processo, o próprio material em pó ao redor do modelo servirá para dar a sustentação necessária durante a sua formação.

Com o modelo concluído, o pistão sobe, o pó solto é aspirado e o modelo é removido. Uma camada de cola deve ser aplicada à superfície do modelo para evitar que se deteriore com o uso.

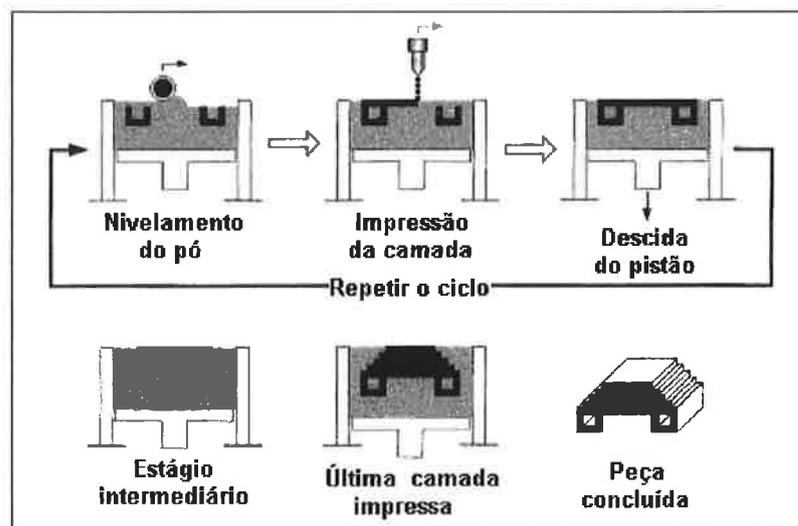


Figura 3.8 – Sequência de impressão para formação do modelo pelo processo 3D *Printing*. (Adaptado de Jee e Sachs, 2000).

3.4 Usinagem de modelos em máquinas CNC

As máquinas de usinagem de alta velocidade CNC proporcionaram ganhos significativos no tempo de fabricação e principalmente na qualidade da superfície do modelo, em relação ao processo manual. A usinagem é um processo de fabricação de superfícies por remoção de material.

Schmitz et al. (2001) afirmam que foram desenvolvidos métodos para melhorar a eficiência da usinagem CNC, já que os processos disponíveis de prototipagem rápida estavam se tornando mais rápidos e baratos. Segundo os autores, as máquinas de usinagem de alta velocidade, quando utilizadas com inteligência, permitem a produção de peças em alumínio, ligas de titânio, ou mesmo ferramentas de aço endurecido, em menos tempo do que a maior parte das máquinas de prototipagem rápida na fabricação de um mock-up em resina.

Para Yang e Ryu (2001), as máquinas de usinagem de alta velocidade são melhores em redução de tempo e custo em relação às técnicas de prototipagem rápida como SLA, SLS e FDM em casos em que o produto não possua cavidades.

Assim como na prototipagem rápida, estas máquinas são capazes de reproduzir uma superfície desenhada em CAD, conforme mostrado na figura 3.9. Para Schmidt (1997), as máquinas CNC têm a vantagem de poder utilizar o modelo 3D a partir do desenho de sólido, de superfícies ou ainda o desenho de curvas da peça.

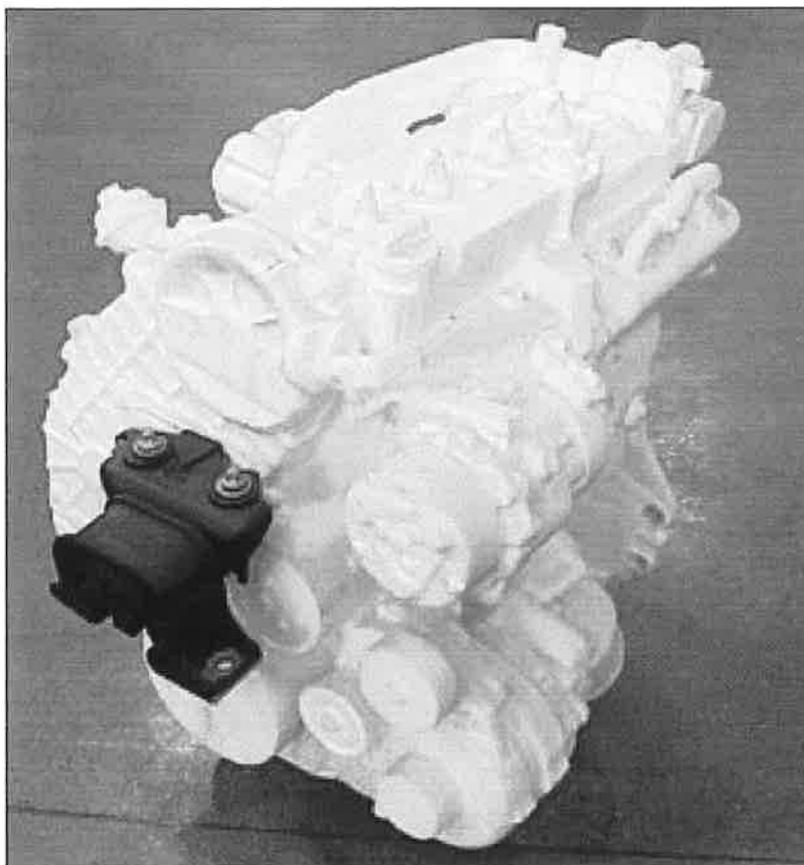


Figura 3.9 – Modelo usinado de um motor completo com um suporte montado. (Macarrão, 2004).

Enquanto na prototipagem rápida o arquivo eletrônico é convertido para STL em minutos, na usinagem por CNC, a comunicação entre o desenho eletrônico e a máquina é realizada por intermédio da programação do caminho a ser percorrido pela ferramenta de corte. Schmidt (1997) afirma que a geração de um caminho de ferramenta completa dura de 10 minutos a 24 horas, dependendo do tamanho, da complexidade e do acabamento do modelo. Porém, após a conclusão da primeira parte do programa, a de desbaste, o processo de usinagem já pode ser iniciado, reduzindo assim o tempo de realização do trabalho completo.

Segundo o autor, o caminho da ferramenta deve ser completo. Começa com o desbaste inicial do bloco de material, passa pela fase intermediária que antecede o acabamento, e termina com o passe final de acabamento. Para estas etapas devem ser definidos os parâmetros de usinagem, como rotação, velocidade de avanço,

profundidade de desbaste e o passo da ferramenta, em função da geometria do modelo, do material usinado e do tipo de acabamento de superfície desejado.

Nesta operação, há casos em que não é possível usinar o modelo completo, ou seja a face interna e externa do modelo. Como exemplo, a usinagem de um pára-choque somente pode ser realizada na superfície externa da peça. Devido à sua pequena espessura, a usinagem da superfície interna da peça, a que fica em contato com o veículo, não poderia ser realizada, pois isso implicaria na deformação do material ocasionada pelo próprio esforço de corte. Como resultado, haveria alterações na espessura ao longo da peça.

Em modelos para fabricação de moldes e ferramentas, ao determinar o caminho da ferramenta, o programador deve criar superfícies de complemento ao redor do modelo. Deve também determinar uma superfície fechando as regiões abertas, como por exemplo, as regiões de entrada de ar de um pára-choque dianteiro. Se estas superfícies de fechamento não forem criadas, a máquina CNC entenderá como um furo de grande profundidade e assim, a ferramenta penetrará na região do furo, e como resultado o mandril trombará com o modelo.

Outro detalhe importante na usinagem de modelos para fabricação de moldes é a determinação do contorno da peça. O programador deve definir o contorno da peça, seus furos e demais aberturas na superfície, elaborando um programa para a execução de um canal de aproximadamente 0,5 mm de profundidade por 0,5 mm de largura. Para isso, na prática, uma ferramenta tipo ponta seca presa ao mandril é utilizada em todo o perímetro da peça, à mesma rotação utilizada em uma operação de acabamento. O contorno da peça determinado sobre a superfície do modelo facilitará as operações posteriores que serão realizadas.

Como alternativa, o contorno da peça pode ser definido com a mesma ferramenta utilizada na última operação. Neste caso, o canal precisará ter profundidade maior do que o raio da ferramenta, para o caso de fresas com extremidade esférica. Neste caso, se o modelo for utilizado para a fabricação de um molde, esta canal dificultará a

operação de desmoldagem, pois o canal não tem ângulo que favoreça a saída do material de seu interior.

É comum que a superfície usinada seja a externa da peça. A usinagem pela face interna fica limitada à forma da peça. Na maioria dos casos, a realização deste tipo de usinagem não pode ser executada devido à falta de espaço para o cabeçote da máquina, que ao usinar uma das superfícies internas de um lado, trombaria com a superfície oposta da peça. Quando houver necessidade da face interna usinada, para permitir o acesso da ferramenta de corte, é possível realizar a usinagem do modelo em partes.

3.5 Comparação simplificada entre RP e usinagem CNC

Segundo Wohlers e Grimm (2002b), as duas tecnologias têm seu próprio mérito. Desde o lançamento das máquinas de RP, melhorou o desenvolvimento das máquinas CNC, em parte devido à competitividade, para tornarem-se mais rápidas, enquanto, por outro lado, a RP melhorou seus requisitos de precisão, materiais e qualidade de superfície. A tabela 3.1 mostra o comparativo técnico de alguns dos principais requisitos do PDP.

Tabela 3.1 – Quadro comparativo entre RP e CNC. (Adaptado de Wohlers e Grimm, 2002b).

REQUISITO	RP	CNC
Material	Limitado	Quase ilimitado
Tamanho máximo da peça	600 x 900 x 500 mm	Virtualmente ilimitado
Complexidade da peça	Ilimitado	Limitado
Detalhe característico	Variado	Variado
Precisão	0,125 a 0,75 mm	0,0125 a 0,125 mm
Repetitividade	Baixa	Alta
Acabamento da superfície	2,5 a 15 micron	0,5 a 5 micron
Confiabilidade	Moderada	Moderada a alta
Mão de obra requerida	Mínima	Significativa
Habilidade do operador	Mínima	Moderada a alta
Prazo de execução	Curto a moderado	Moderado

Embora os autores apresentem o limite máximo da peça para a RP, dependendo do processo utilizado, é possível construir uma peça maior do que o espaço útil da máquina. Para isso, a peça é dividida em partes e depois, com o auxílio de um dispositivo, é montada e colada, conforme mostrado na figura 3.10.

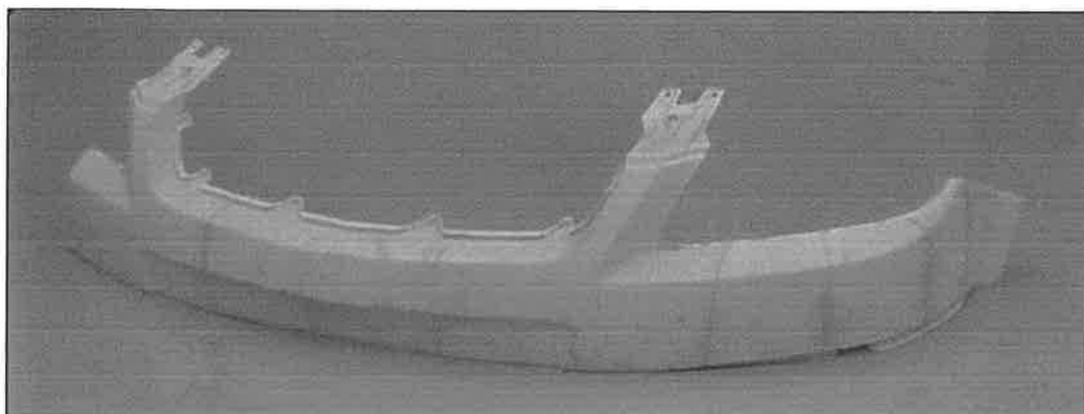


Figura 3.10 – Mock-up parcial de um pára-choque dianteiro fabricado em partes pelo processo FDM. (Macarrão, 2004).

Para Oliveira (2001), a utilização de prototipagem rápida tem como vantagens sobre as máquinas CNC a possibilidade de construir peças de forma complexa, a fabricação da peça em uma só etapa, não requerer dispositivos especiais de fixação nem troca de ferramentas, assim como não ser necessária a elaboração do caminho de ferramenta.

Por outro lado, o autor cita como desvantagens, a limitação de aplicação do modelo devido ao material empregado na prototipagem rápida possuir geralmente propriedade mecânica inferior aos plásticos e metais usinados pelas máquinas CNC, precisão e acabamento superficial inferiores, e problemas com distorções, empenamentos e inchamentos devido à natureza térmica e química de alguns processos de prototipagem rápida.

Desta forma, uma tecnologia praticamente não compete com a outra pois são bastante distintas. Para Schmidt (1997), nenhuma das técnicas é capaz de atender a todas as necessidades, pois cada uma delas tem suas vantagens e limitações. A condição ideal é ter as duas técnicas disponíveis, a fim de poder escolher qual das duas é mais adequada a cada situação. Desta forma também é possível utilizar os recursos balanceando a carga das máquinas, obtendo assim maior ganho no prazo de conclusão do serviço.

Hur et al. (2002) apresentam uma técnica de prototipagem rápida híbrida, com a combinação de técnicas de prototipagem rápida por deposição de material em camadas e a usinagem CNC. Eles afirmam que o novo sistema híbrido-RP pode reduzir o tempo total de fabricação e melhorar a precisão da forma do modelo, em relação a técnicas de prototipagem rápida convencionais. A figura 3.11 mostra as características e a evolução das tecnologias de RP e CNC, e indicam a convergência entre a RP, cuja característica é a manufatura rápida e CNC, que oferece alta precisão dimensional de superfície.

Na aplicação deste sistema híbrido, pode-se observar o nível de melhor aproveitamento na aplicação de cada uma das técnicas RP e CNC, se aplicadas individualmente. Ainda segundo os autores, seu objetivo é o aproveitamento e combinação das vantagens de cada um dos processos.

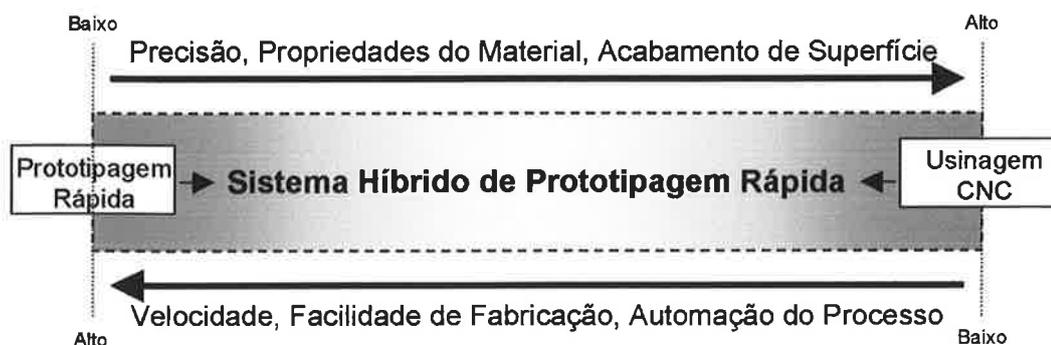


Figura 3.11 – Posições dos processos RP e CNC conforme suas características. (Adaptado de Hur et al., 2002).

3.6 Montagem de modelos usinados por máquinas CNC

Os modelos usinados por máquinas de alta velocidade CNC podem ser utilizados na fabricação de moldes e ferramentas. Podem ainda ser compostos e montados, de acordo com a necessidade, para análise visual, o que muitas vezes, se analisados virtualmente não apresentariam resultado satisfatório.

Um exemplo comum na indústria automotiva é a montagem parcial dos modelos em regiões consideradas críticas, ou seja, de difícil definição na fase de desenvolvimento. Esta montagem costuma ser chamada de *cubing* ou *cubing model*, conforme mostrado na figura 3.12.

Os faróis, as lanternas traseiras, a região do gargalo do tanque de combustível, maçanetas externas das portas ou tampa traseira são consideradas regiões críticas. Na parte interna, regiões como painel de instrumento com o painel de acabamento interno das portas, acabamento de colunas, maçanetas das portas, entre outras também recebem atenção especial no seu desenvolvimento. Além disso, qualquer região que, durante a fase do projeto proporcionar dúvida ao projetista, poderá ter as superfícies dos modelos usinadas e montadas a fim de realizar a avaliação.

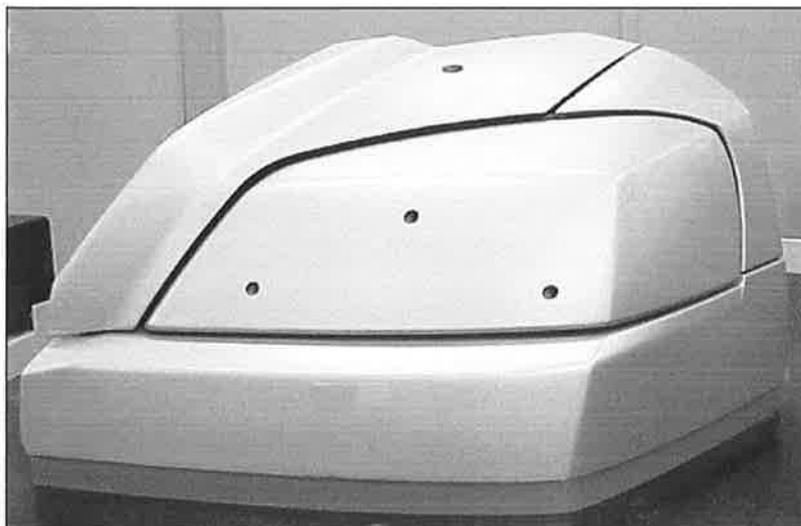


Figura 3.12 – *Cubing* do farol esquerdo. (Macarrão, 2004).

Neste caso, a região objeto de avaliação é o assentamento e alinhamento entre a superfície do farol com as superfícies do capô, pára-lama e pára-choque. Eventuais problemas de projeto são verificados visualmente no modelo tridimensional físico. Além disso, pode ser observado o efeito visual das folgas entre peças pelo efeito causado pela incidência de luz entre as partes envolvidas. Para isso, o *cubing* é posicionado à altura conforme desenho em relação ao solo, a fim de simular a condição real de uso do veículo.

Para esta construção, o modelo em 3D de cada uma das peças envolvidas na região é cortado nas coordenadas X , Y e Z previamente determinadas. Cada modelo que compõe este conjunto recebe complementações de superfície nas regiões do corte e dos furos para que a usinagem seja executada criando superfícies nestas áreas. Os modelos concluídos são montados com pinos de guia e parafusos de fixação, a fim de que o conjunto montado tenha o aspecto visual do veículo, formando assim o *cubing*. A figura 3.13 mostra o *cubing* da figura 3.12 desmontado.

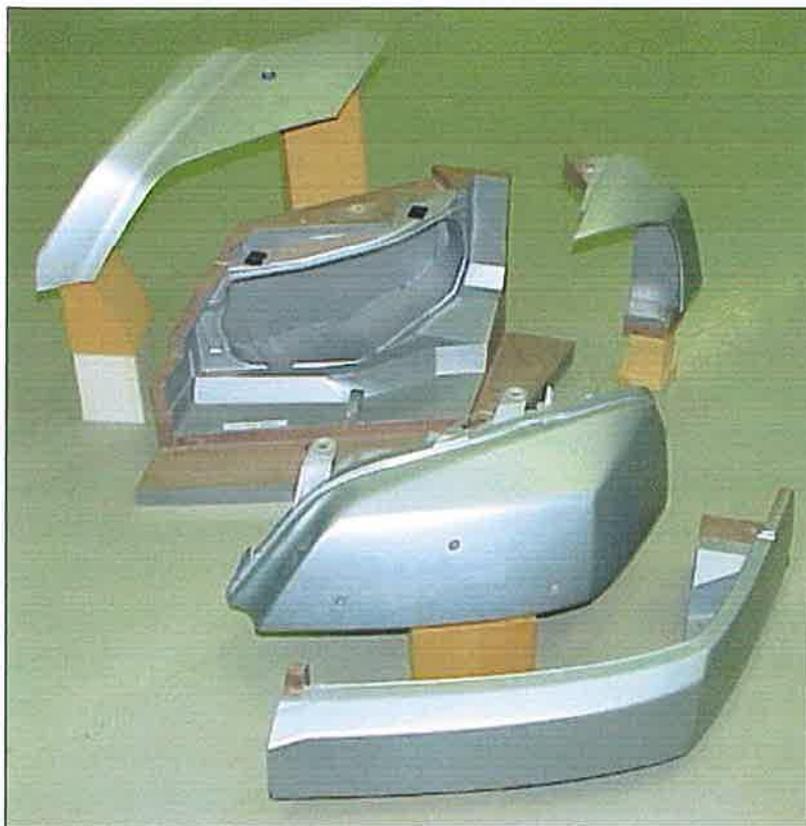


Figura 3.13 – *Cubing* desmontado do farol esquerdo. (Macarrão, 2004).

Há casos em que, após a verificação visual, algumas áreas das superfícies das peças envolvidas são alteradas para melhorar a condição de montagem. Nestes casos, o *cubing* volta para a máquina de usinagem para que a região alterada seja refeita, conforme mostrado na figura 3.14.

Neste exemplo, um dos modelos do *cubing* da lanterna traseira foi modificado. O modelo que estava pintado na cor cinza recebeu enxerto de material nas regiões modificadas. Retornou à máquina fresadora CNC e foi executado um novo programa para usinagem apenas nas regiões modificadas.

Há casos em que a modificação é mais demorada do que fazer um modelo novo. Isso ocorre quando há necessidade de inserir material na maior parte da superfície do modelo, o que vai consumir tempo e mão-de-obra maiores do que a fabricação de um novo modelo.



Figura 3.14 – Modelo modificado de um *cubing* da lanterna traseira. (Macarrão, 2004).

3.7 Fabricação de um mock-up utilizando mais de um processo

Os mock-ups podem ser fabricados com a utilização de mais de um processo. A utilização de dois ou mais processos diferentes em um mesmo mock-up tem por finalidade otimizar o prazo e custo de construção.

De acordo com a necessidade de avaliação, um mock-up pode ser detalhado em determinadas regiões, a fim de permitir boa avaliação, e nas regiões onde não há tal necessidade, pode ser utilizado outro processo de menor custo. A figura 3.15 mostra o mock-up do compartimento de carga de uma picape. O objetivo deste mock-up foi avaliar o posicionamento de uma motocicleta em seu interior. Para isso, foi

construído em material capaz de suportar o peso da motocicleta, e permitir a sua colocação e retirada do mock-up sem danificá-lo.

A região dianteira objeto da avaliação foi usinada em poliuretano. O canto traseiro do compartimento foi construído por trabalho manual em resina de poliéster. As caixas de roda foram simuladas por perfis em papelão montados na forma de engradado. Nas regiões onde não haveria o contato com a motocicleta, foi utilizado o fechamento em madeira, inclusive a tampa traseira, que foi montada na posição correta, por um encaixe tipo U, desenvolvido especialmente para este mock-up. Este detalhe pode ser observado na figura 3.15. Isso proporcionou baixo custo de construção e tempo reduzido de fabricação, se comparado a um compartimento de carga totalmente usinado em poliuretano.

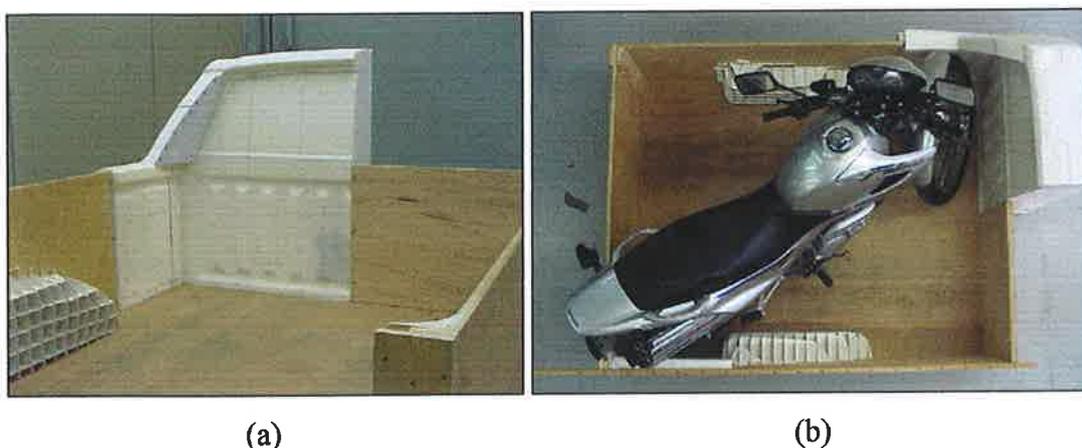


Figura 3.15 – (a) Mock-up do compartimento de carga de uma picape; (b) Vista superior do mesmo mock-up com uma motocicleta. (Macarrão, 2004).

Um mock-up também pode ser construído com peças de produção nas regiões onde não houve alteração de projeto. Para as regiões de novo desenho, o processo utilizado é escolhido de acordo com os testes a serem realizados.

Na figura 3.16, o mock-up de um veículo tipo perua foi construído a partir de uma picape, que foi cortada transversalmente próximo ao final da porta dianteira. A parte frontal da carroceria utilizada é constituída de peças metálicas provenientes da linha de montagem. A estrutura de apoio foi feita em madeira, na altura em relação ao solo conforme desenho. Em seu interior, foram montados os bancos e carpete de um

veículo de produção. O restante da região traseira, inclusive as portas foram fabricadas em papelão montado tipo engradado.

A lateral traseira esquerda foi usinada em resina de poliuretano e apresenta uma versão diferente da utilizada em papelão para o lado direito. Assim, foi permitido também avaliar as duas propostas de abertura de janela lateral traseira. Este mock-up foi concluído em 18 dias de trabalho, em dois turnos. A partir dele, foi possível fazer a avaliação do seu interior, inclusive a avaliação do ato de entrar e sair do veículo. Esta análise foi realizada vários meses antes do primeiro protótipo. Isso permite, inclusive, direcionar o projeto eliminando pontos negativos observados a partir do mock-up.



Figura 3.16 – Mock-up de perua constituído de peças metálicas e várias técnicas de fabricação. (Macarrão, 2004).

4 ALGUNS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAL RÁPIDO E DE PEÇAS PROTÓTIPO EM PEQUENOS LOTES

As fases mais adiantadas do PDP requerem novas avaliações e testes funcionais. Para Myers e Norton (1998), o propósito da fase de protótipos é produzir várias peças para confirmação de design, verificação de forma, ajuste, teste funcional e verificação de marketing. Para eles, o protótipo pode ser usado como uma peça de produção, a qual será submetida a testes mecânicos, térmicos e físicos, e ainda ajudará a confirmar o processo de manufatura da peça.

Para fabricar um lote de peças, se for utilizada a prototipagem rápida ou a fabricação manual, o custo unitário da peça poderá ser elevado, o material utilizado na sua fabricação pode não atender aos esforços solicitados e existe o risco de não ficarem prontas a tempo. Com a utilização de ferramental rápido é possível fabricar um lote limitado de peças a prazo e custo compatíveis com o desenvolvimento do produto.

No caso da produção em série, utiliza-se um ferramental definitivo que permite a fabricação de milhares de peças. Seu prazo de fabricação é da ordem de meses e o custo é determinado em função do material, processo de fabricação e à mão-de-obra empregada. Entretanto, se alguma correção ou alteração de projeto da peça for detectada na fase final deste processo, a execução da modificação no ferramental definitivo vai comprometer o início de produção, devido ao prazo e custo não esperado provenientes desta modificação.

Knights (2001) cita como exemplo o prazo estimado em três meses, para a fabricação do ferramental definitivo pelo método convencional para uma peça de carroceria automotiva. O ferramental rápido para a mesma peça foi construído em 31 dias.

Myers e Norton (1998) afirmam que peças protótipo de alta qualidade são utilizadas como peças de produção até que o ferramental definitivo esteja pronto. Para Rosochowski e Matuszak (2000), ferramental rápido é muito aplicado ao processo de

produção em série, em substituição ao ferramental definitivo, quando for previsto baixo volume de produção durante a vida do produto. O autor afirma que o ferramental rápido também pode ser utilizado nos casos em que as peças são constantemente modificadas. Assim, as modificações a serem realizadas terão custo e prazo menores, o que tornam o produto mais competitivo no mercado.

Para Myers e Norton (1998), a característica do material do protótipo vai determinar o tipo de molde. O tamanho, forma da peça e sua precisão dimensional, por sua vez, terão maior efeito na escolha do processo de ferramental rápido. Se o protótipo for para avaliar se o produto é manufaturável, o material e o processo precisam ser escolhidos adequadamente. Ainda segundo os autores, o tempo disponível para a produção deve ser o primeiro fato a ser considerado. Isso vai determinar o material, qualidade e propriedade física do protótipo.

King e Tansey (2002) dividem os processos de ferramental rápido em dois tipos: o direto e o de transferência. No processo direto, o molde é produzido a partir de técnicas de prototipagem rápida, por adição de camadas. No processo de transferência, um molde ou ferramenta é produzido a partir de um modelo ou uma peça protótipo. Neste caso, várias técnicas podem ser utilizadas para se obter um meio de fabricação.

Já Rosochowski e Matuszak (2000), chamam este processo de indireto. Os autores subdividem o grupo de ferramental indireto em ferramental mole e ferramental duro. Dentro do grupo de ferramental mole estão os de materiais flexíveis e os plásticos. No outro grupo, as ferramentas são construídas com metais. Para produzir um molde pelo método direto, Woodard e Gagnon (2001) adotam como critério que as peças sejam pequenas e com volume pequeno de material, em pequena quantidade e que tenham geometria complexa.

Macarrão e Kaminski (2003) mostram um estudo de caso comparativo utilizando os processos de ferramental rápido pelo método direto, indireto e a prototipagem rápida. Neste exemplo, um molde do puxador da trava do capô, mostrado na figura 4.1, foi produzido em prototipagem rápida pelo processo FDM para a produção de um lote

de 20 peças. Este estudo mostra o prazo e o custo de três alternativas de fabricação do mesmo lote de peças, conforme tabela 4.1.



Figura 4.1 – Trava do capô em poliuretano. (Adaptado de Macarrão e Kaminski, 2003).

A primeira alternativa considera o lote fabricado em prototipagem rápida pelo processo FDM, com a máquina operando 24 horas por dia. Neste caso, não há necessidade de construção de um ferramental ou molde específico. A segunda alternativa considera um molde fabricado em FDM e posteriormente, o lote fabricado manualmente por injeção de resina de poliuretano de reação rápida. A terceira alternativa considera o primeiro modelo e a fabricação de um molde pelo método indireto construídos manualmente. A partir do molde, o lote de peças é injetado da mesma forma que na alternativa anterior. Nesta alternativa, a operação é totalmente manual. Seu prazo é maior pois são consideradas 8 horas de trabalho por dia.

Tabela 4.1 – Quadro comparativo de alternativas para fabricação de lote de 20 peças protótipo. (Macarrão e Kaminski, 2003).

	Alternativas	Prazo (Horas / Dias)	Custo (R\$) Material + M.O.
1	20 peças em ABS (FDM)	51 / 2,1	1.555,00
2	20 peças em PUR (molde em FDM)	25 / 2	940,00
3	20 peças em PUR (método convencional)	55 / 7	2.300,00

Neste caso, como é uma peça pequena, o método indireto com o modelo feito em prototipagem rápida foi a melhor alternativa. Nem sempre isso acontece. Por este motivo, um estudo preliminar deve ser efetuado a fim de analisar os recursos disponíveis e os resultados esperados.

Os processos de ferramental rápido pelo método direto são executados em máquinas de prototipagem rápida, já citados anteriormente. Para a fabricação de ferramental rápido pelo processo indireto, existem inúmeros processos capazes de permitir a fabricação de peças de boa qualidade, e muitos deles, são utilizados na fabricação de peças de produção em condições específicas, conforme já citado.

Dentre os processos de fabricação de ferramental rápido, vários se destacam devido à sua maior utilização na indústria automotiva, na fabricação de peças protótipo utilizadas durante as fases adiantadas do desenvolvimento de veículos. Por este motivo, foram escolhidos para serem aqui apresentados, alguns dos processos mais utilizados na fabricação de peças de carroceria e de itens de acabamento interno e externo do veículo.

As peças protótipo produzidas pelos processos apresentados neste capítulo, podem ser montadas em veículos funcionais e serem submetidas a testes dinâmicos. Os resultados dos testes, porém, devem ser analisados, pois nem sempre o material e o processo utilizado são iguais ao material e processo de produção definitiva. Isso significa que determinados tipos de testes dinâmicos, como o de durabilidade ou o de impacto, não poderão ser executados com as peças fabricadas, quando o material e o processo de fabricação forem diferentes do especificado em projeto. Quando houver necessidade de testes de validação do veículo, basta que as peças protótipo sejam fabricadas no material e processo iguais ao processo de fabricação em série da peça.

Em testes como o dinâmico de tomada de ar para arrefecimento do motor, de avaliação de assentamento de peças e de montagem, o material ou o processo empregados não interfere no resultado obtido. Assim, as avaliações realizadas com estas peças, proporcionam a continuidade da rapidez esperada no desenvolvimento

dos componentes do veículo. Por este motivo, seu custo é justificado pela redução do tempo de desenvolvimento.

Atualmente, as resinas são largamente utilizadas na fabricação de ferramental rápido e de peças protótipo, devido à rapidez, facilidade, qualidade e propriedades mecânicas apresentadas. O mercado dispõe de diferentes tipos de resina que podem ser utilizadas de acordo com a necessidade do teste a ser realizado. Por este motivo, uma pequena introdução sobre resinas é apresentada, antecedendo os processos de fabricação de ferramental rápido.

4.1 Resinas – Polímeros

Segundo Barros (2001), materiais poliméricos ou polímeros possuem, entre outras características, alto peso molecular e capacidade de formação de filmes. Classificados quanto à origem, os polímeros sintéticos, também podem ser classificados quanto ao comportamento térmico. Os termoplásticos são os polímeros que amolecem quando aquecidos e endurecem ao serem resfriados. Os termoestáveis são “polímeros que, após a reação de polimerização, manterão estáveis as suas propriedades em uma larga faixa de temperatura e não poderão ser novamente moldados pela ação do calor”, diz o autor.

Os polímeros termoestáveis são muito utilizados na fabricação de mock-ups e protótipos devido à facilidade de utilização, pois não requerem equipamentos sofisticados. Para Braga (2003), as resinas epóxi são mais utilizadas na fabricação de moldes, e segundo Poliuretano – Tecnologia & Aplicações (2004), as resinas de poliuretano são muito utilizadas na fabricação de peças no Processo de Moldagem por Injeção e Reação – *Reaction Injection Molding* (RIM). Este processo pode ser aplicado a moldes rígidos ou flexíveis, desde que sejam moldes fechados.

Está disponível uma grande variedade de resinas para a venda no mercado nacional. Cada resina possui suas próprias características químicas, mecânicas, e seus tempos de reação e endurecimento.

As resinas são formuladas no momento em que são utilizadas. Resinas com grande tempo de uso, da ordem de 20 minutos ou mais, podem ser misturadas a mão, ou para grandes quantidades, em bateadeiras industriais. Podem ser acopladas a um sistema de vácuo para retirar as bolhas de ar que se formam na resina durante a mistura. Em sua maioria, as resinas são compostas por dois componentes, a resina e o endurecedor, os quais deverão estar na proporção estequiométrica, e sua mistura deve ser homogênea. Segundo Andrus (1996), se a mistura não estiver na proporção correta, a resina não catalisará, e o molde poderá ser danificado.

Após a formulação, uma reação exotérmica se inicia entre os componentes da resina. Em alguns casos, dependendo da quantidade de resina empregada, pode haver liberação excessiva de calor. Isso levará a alterações dimensionais significativas no produto final. Cada composto tem seu próprio coeficiente de expansão térmica. Barros (2001), afirma que a expansão linear decorrente da variação de temperatura pode ser calculada, de forma simplificada, multiplicando-se o coeficiente de expansão térmica da resina pelo comprimento da peça e pela variação de temperatura.

Para encher moldes e ferramentas, por exemplo, pode ser adicionado material sólido granulado, denominada carga, que tem, entre outras, a função de absorver parte da temperatura liberada, aumentar a resistência mecânica e reduzir o custo final, pois é mais barato que a resina.

Segundo Barros (2001), após o início da reação, a temperatura e a viscosidade começam a aumentar. O tempo de uso é o período enquanto a resina ainda estiver em condição propícia para sua aplicação. Depois, ocorre um grande aumento da viscosidade e a resina entra no chamado tempo de gel. Com o fim da reação exotérmica, a temperatura começa a diminuir e a resina começa a endurecer. Segundo Andrus (1996), estes tempos variam para cada tipo de resina e, portanto,

devem ser escolhidas criteriosamente de acordo com as necessidades do trabalho a ser executado.

Segundo Poliuretano – Tecnologia & Aplicações (2004), “o poliuretano apresenta enorme flexibilidade de processamento, podendo permitir processos com ciclos muito rápidos (minutos) até ciclos altos (horas) para produtos muito específicos (protótipos, por exemplo)”.

Para ciclos rápidos não é possível utilizar a mistura manual, pois ela começaria a endurecer antes mesmo de ser totalmente misturada. Neste caso, é necessária a utilização de um equipamento pneumático de injeção de resina a baixa pressão, conforme mostrado na figura 4.2. Esta máquina é regulada para bombear os componentes da resina na proporção estequiométrica. Os componentes são misturados durante o trajeto no interior de um bico misturador.



Figura 4.2 – Máquina de injeção de resina. (Davey, 2001).

As resinas são utilizadas em muitos processos de fabricação de peças, moldes e ferramentas. Os catálogos dos fabricantes de resinas identificam para quais aplicações cada tipo de resina é mais indicado. Cabe ao usuário, portanto, escolher a melhor resina para o trabalho a ser executado.

4.2 Molde laminado por processo manual

Segundo Taylor e Bader (2001), o molde aberto é o processo mais comum utilizado para fabricação de peças laminadas. Teoricamente, qualquer tipo de reforço pode ser utilizado neste tipo de laminação. Nestes materiais, estão incluídas a fibra de vidro e a fibra de carbono. Segundo os autores, é um processo relativamente simples, com baixo investimento, porém com alto grau de trabalho manual.

O tempo de fabricação do molde varia de acordo com a forma da superfície da peça a ser moldada. Para um molde de uma peça simples de $0,1 \text{ m}^2$, por exemplo, é construído em aproximadamente 8 horas de trabalho. A resina reage durante a noite e no dia seguinte, pode ser destacado do modelo e ter suas rebarbas removidas. Já para o molde de um pára-choque, devido à grande quantidade de detalhes na superfície externa da peça, são requeridos para a sua construção em média 40 horas de trabalho, com dois modeladores trabalhando juntos. Nos casos citados, toma-se por base o início do trabalho a partir do modelo usinado.

Para a fabricação do molde é necessária a superfície física da peça a ser fabricada. Para isso é preciso construir um modelo da superfície da peça. Embora o processo mais utilizado seja a usinagem, em alguns casos, pode ser empregado o processo manual. Uma peça também pode servir de modelo para a fabricação de um molde. Neste caso, a variação dimensional decorrente do processo de fabricação que originou a peça modelo será incorporada ao molde, que reproduz a superfície utilizada como modelo.

Partindo do pressuposto que os modelos são usinados em sua superfície convexa, denominados modelos positivos, conforme mostrado na figura 4.3, é importante que antes da fabricação do modelo seja determinado em qual das superfícies, a externa ou a interna da peça, este será usinado. Essa decisão é tomada baseada no planejamento da forma mais racional de fabricação do molde e da peça. Por exemplo, para a fabricação de um pára-choque, deve-se usinar a superfície externa da peça, pois é a

partir dela que será construído o molde. A superfície de contato da peça laminada com o molde será a superfície aparente do pára-choque. Neste caso, os modeladores identificam que a usinagem do modelo foi executada com a espessura da peça. Na maioria dos casos fica muito difícil identificar qual foi a superfície usinada sem efetuar a medição.

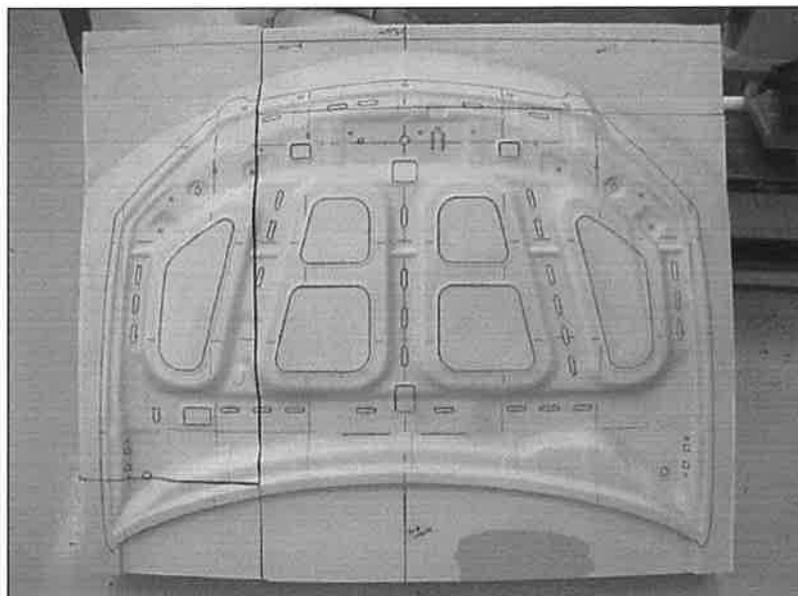


Figura 4.3 – Modelo usinado do painel interno do capô. (Macarrão, 2004).

Para a fabricação do molde, o modelo deve ter sua superfície preparada, eliminando a porosidade excessiva da superfície do modelo. Quando o material for bastante poroso, pode ser aplicada uma fina camada de resina de poliéster e posterior lixamento manual. É mais fácil executar a preparação de uma superfície positiva do modelo, do que na superfície negativa do molde. Quanto melhor estiver a superfície do modelo, melhor será a superfície do molde e conseqüentemente melhor será a superfície das peças laminadas. Além disso, possibilitará a fabricação de maior número de peças sem danificar o molde. A rugosidade excessiva dificultará separar o molde do modelo e posteriormente retirar a peça do molde.

Sobre a superfície do modelo que foi preparada, deve ser aplicado o desmoldante, para que seja possível remover o molde do modelo. Desmoldante é uma substância líquida ou pastosa tipo cera, que é aplicada em camadas de espessura muito finas sobre a superfície do modelo ou do molde. A espessura da camada de desmoldante

não interferirá na dimensão da peça a ser moldada. Tem por finalidade permitir a desmoldagem da resina formulada aplicada sobre esta superfície.

Em peças cuja geometria seja simples, pode-se usinar a superfície negativa do molde, conforme figura 4.4 e laminar uma peça sobre esta superfície. Assim não é necessária a construção do modelo, resultando em economia de tempo e custo. Neste caso, a superfície do molde deve receber acabamento para ficar com menor rugosidade. O processo fica limitado a fabricar uma ou duas peças, pois o material utilizado no molde, não é apropriado a este tipo de operação.

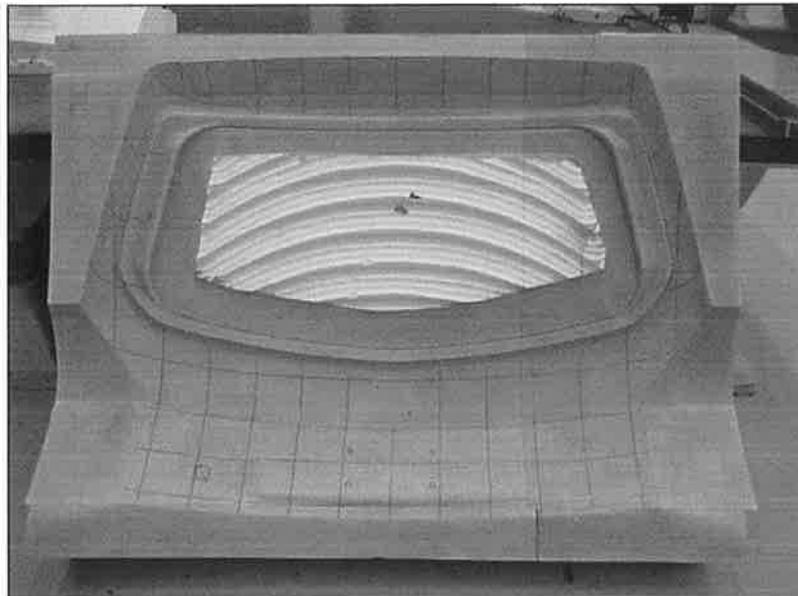


Figura 4.4 – Molde usinado em negativo do painel externo da tampa traseira. (Macarrão, 2004).

Para a construção do molde laminado a partir do modelo, deve ser analisado se este possui ângulo de saída adequado. Se houver alguma região da superfície da peça que impeça a saída do molde, este não poderá ser removido sem a destruição do modelo devido à sua rigidez. Isso também inviabilizará a remoção da peça laminada. Segundo Revista do Plástico Reforçado – Composites (2003), “ângulos negativos dificultam a fabricação da peça. Tornam os moldes mais caros porque exigem mecanismos para extrair a peça da ferramenta, como os postiços. Postiços são tacos colocados no molde para facilitar a desmoldagem”.

Para fabricação de peças protótipo, uma alternativa é fazer o molde dividido em partes, de acordo com a geometria da peça, conforme mostrado na figura 4.5.

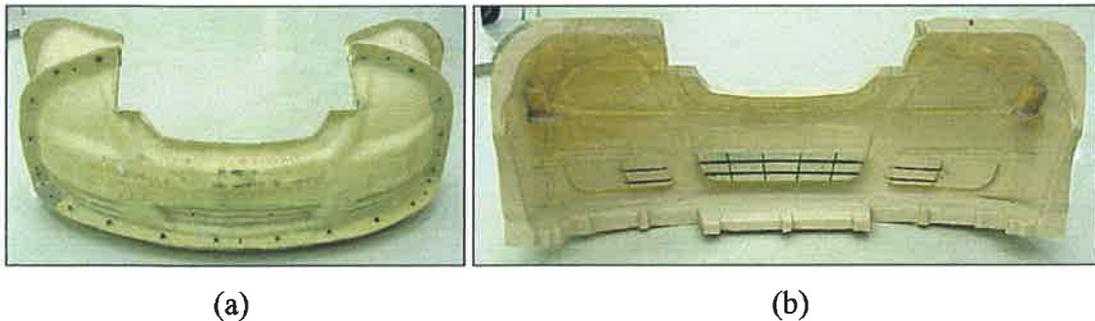


Figura 4.5 – (a) Vista externa de molde laminado em 4 partes da frente parcial de um veículo; (b) Vista interna do mesmo molde. (Macarrão, 2004).

Para construir o molde deve ser determinado o seu limite ao redor do modelo. Sobre a superfície do modelo, segundo Braga (2001), devem ser aplicadas duas camadas de resina de superfície e uma camada intermediária de resina, que tem função de ligação. Em seguida, são depositadas várias camadas de tecido de vidro com resina, com o cuidado de não deixar bolhas de ar sob as camadas de tecido, até que se atinja a espessura desejada do molde. O molde deve ser rígido a fim de não permitir sua própria deformação, e não permitir a formação de peças em desacordo com o desenho. Podem ser utilizados perfis de madeira fixados com resina para estruturar o molde.

4.2.1 Fabricação de peças laminadas em fibra de vidro ou de carbono

A peça laminada em Plástico Reforçado por Fibra de Vidro (PRFV), apresenta apenas uma superfície conforme desenho. Como a outra face não está em contato direto com o molde, não apresenta uma superfície representativa, conforme mostrado na figura 4.6, onde os pára-choques de dois veículos diferentes são mostrados. Isso significa que, se houver pontos de fixação e encaixe na face oposta à de contato com

o molde, estes deverão ser criados por outro processo, adaptando a peça à montagem. Este quesito, portanto não será objeto de avaliação de produto nesta fase de protótipo. Mesmo assim, isso não impede sua utilização na montagem de uma carroceria, por exemplo.

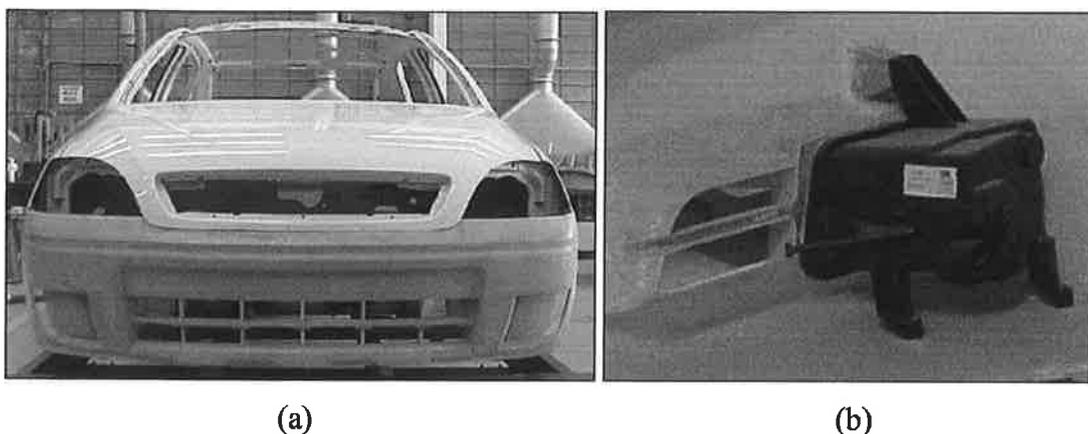


Figura 4.6 – (a) Pára-choque laminado em fibra de vidro montado na carroceria; (b) Detalhe da adaptação dos pontos de fixação do farol auxiliar. (Macarrão, 2004).

Segundo Vantico (2002), as resinas epóxi são indicadas para laminação de peças em fibra de vidro. “Possuem baixo índice de contração, e elevada resistência química, térmica e mecânica. Assegura a observância de rígidas tolerâncias dimensionais e estabilidade ao longo do tempo de uso”. Braga (2001) afirma que resina de poliéster “ortoftálica” também pode ser utilizada na laminação de peças.

A fibra de vidro pode ser utilizada em várias formas, tais como tecidos, mantas, fibra picada, entre outras. Segundo Revista do Plástico Reforçado – Materiais Compostos (2002), os tecidos têm a vantagem de apresentarem vários tipos de trama e gramatura dos fios, “facilidade de manuseio, estabilidade dimensional e boa umectação. Os tecidos aliam elevada resistência mecânica e baixo peso”.

A fibra de carbono, segundo Revista Crea (2001), foi desenvolvida no Japão em meados da década de 70 para a construção civil e os EUA começaram a utilizá-la nas indústrias aeroespacial e automotiva, porém seu custo no mercado nacional é cerca de 3 vezes maior do que a fibra de vidro.

Revista do Plástico Reforçado – Materiais Compostos (2002) afirma que para a confecção de peças detalhadas e com curvas, é utilizado tecido com trama tipo sarja, devido a sua capacidade de moldagem.

Antes de iniciar a laminação de uma peça, sobre o molde aplica-se o desmoldante para permitir a retirada da peça do molde. Para evitar bolhas de ar e imperfeições na superfície da peça laminada, decorrentes da superfície do tecido de vidro, aplica-se também uma camada de resina de superfície. Sobre esta camada, antes que ocorra o endurecimento da resina, inicia-se a laminação aplicando-se camadas de tecido umectado em resina preparada com o catalisador na proporção indicada pelo fabricante. São aplicadas tantas camadas de tecido quantas forem necessárias até que se atinja uma espessura próxima da desejada.

Este processo não permite espessura constante, nem a obtenção da espessura exata, porém é possível obter espessuras próximas da especificada em desenho. Para isso, são colocadas camadas de tecido até a obtenção da espessura aproximada. Peças com espessura menor do que 0,6 mm ficam muito maleáveis, e se deformam durante o manuseio e montagem.

4.2.2 Invólucro para vácuo – *Vacuum Bagging*

Para se obter uma peça com a espessura homogênea e diminuir a incidência de bolhas na superfície da peça, o molde com a peça laminada pode ser submetido à pressão negativa. Para submeter o conjunto ao vácuo, este deve ser introduzido em um invólucro fabricado a partir de um filme de plástico resistente, e fechado com uma fita vedante, conforme mostrado na figura 4.7. A pressão negativa faz com que o material laminado seja forçado a assentar na superfície do molde e é aplicada durante todo o processo de reação e endurecimento da resina.

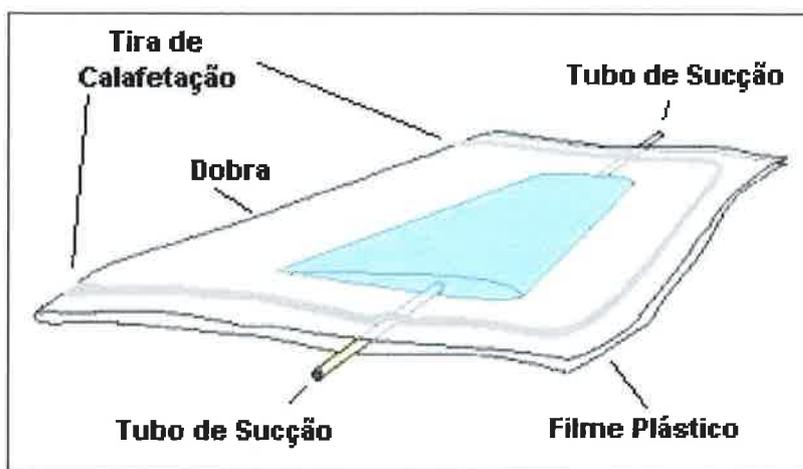


Figura 4.7 – Invólucro do processo *vacuum bagging*. (Adaptado de Fouquet, 1996).

Fouquet (1996) alerta para que o vácuo seja limitado a fim de não danificar ou empenar o molde durante o processo. Para isso, o molde deve ser reforçado e ter seus vértices externos arredondados e protegidos por material macio para não perfurar o invólucro onde será introduzido o molde com a peça laminada. Segundo Coker (1996), a bomba de vácuo deve atingir pelo menos $0,86 \text{ kg/cm}^2$ de pressão de sucção.

Segundo Ross (1992), durante a laminação da peça, sobre o material laminado, pode ser colocado um tecido permeável ou um filme de plástico perfurado e sobre este filme, uma camada de manta absorvedora. À medida que o material laminado é comprimido contra o molde devido ao vácuo, o excesso de resina passa através do filme plástico e são absorvidas pela manta, que é descartada posteriormente. Este filme plástico tem também a função de impedir que a manta grude na peça laminada.

Ainda segundo o autor, a manta, por sua vez, além de absorver o excesso de resina, facilita o fluxo de ar para os bicos de sucção, evitando a formação de bolhas de ar na peça. Entretanto, o tecido não deve conter resina em demasia, pois a manta é capaz de absorver um volume limitado de resina. Na figura 4.8, o molde de um pára-lama uma peça laminada em fibra de carbono está no invólucro sob vácuo. Nas regiões escuras, observa-se que a manta absorveu o excesso de resina contido no tecido de fibra de carbono.



Figura 4.8 – Molde de um pára-lama dianteiro dentro do invólucro sob pressão negativa. (Macarrão, 2004).

Isso faz com que a espessura da peça seja homogênea e, se as camadas de tecido de vidro forem colocadas adequadamente, a espessura será próxima da determinada em desenho. Se a peça tiver espessura maior do que a especificada, comprometerá sua montagem impedindo o assentamento entre as peças na posição correta.

Já para Thagard et al. (2003), na formação de peças a vácuo a resina é introduzida por canais ou ranhuras após o conjunto estar sob pressão negativa. A força do vácuo é responsável pelo espalhamento da resina pela fibra de vidro previamente colocada sobre o molde no interior do invólucro.

Após a reação química e o endurecimento da resina, o conjunto é retirado do invólucro, a peça é removida do molde e é recortada de acordo com o contorno especificado em desenho. Para que não haja deformação da peça laminada após sua retirada do molde, segundo Revista do Plástico Reforçado – Composites (2003), esta é colocada sobre um gabarito ou berço durante o período de cura da resina, conforme mostrado na figura 4.9, “que é um negativo da peça que vai prendê-la na posição original de projeto.” Este recurso é utilizado quando há necessidade do molde para produção de novas peças. Assim, a peça é desmoldada após o período especificado

em catálogo da resina utilizada, e mantida no berço enquanto estiver no período estabelecido para cura.



Figura 4.9 – Gabarito ou berço para cura de um pára-choque em resina. (Revista do Plástico Reforçado – Composites, 2003).

Para determinação das linhas de recorte e furações da peça laminada, podem ser utilizados equipamentos de medição adequados. Para evitar o tempo gasto com o delineamento do contorno e furações da peça, estas linhas podem ser traçadas no modelo. Estas linhas ficarão marcadas em relevo no molde e conseqüentemente ficarão visíveis na peça.

4.2.3 Aplicação de peças laminadas em fibra de vidro ou de carbono

As peças laminadas em fibra de vidro ou de carbono podem ser aplicadas em várias fases do PDP. No Design, após o modelo do veículo completo ser concluído, pode ser fabricado um molde para posterior laminação da superfície da carroceria em fibra de vidro, conforme mostrado na figura 4.10. Entre outras vantagens, uma carroceria laminada em fibra de vidro é mais leve do que um modelo sólido em *clay*. Isso permite sua movimentação com mais facilidade. Além disso, as regiões de vidro podem ser recortadas, permitindo a simulação dos vidros do veículo. O interior do

veículo pode também ser modelado, o que não seria possível com um modelo em *clay*.



Figura 4.10 – (a) Molde sobre o modelo em *clay* de uma carroceria; (b) Mesmo molde após desmoldagem. (Macarrão, 2004).

Em fases mais adiantadas de desenvolvimento, as peças em fibra de vidro podem ser montadas em veículos funcionais. Podem ser utilizadas em testes dinâmicos de arrefecimento do motor, avaliando assim as aberturas para tomada de ar, conforme mostrado na figura 4.11. Este conjunto em fibra de vidro pode permitir tais testes vários meses antes que a primeira carroceria em chapa metálica seja produzida.



Figura 4.11 – Frente protótipo em fibra de vidro de uma picape para teste dinâmico de arrefecimento do motor. (Macarrão, 2004).

Uma peça laminada também pode ser utilizada em ajustes de dispositivo de montagem ou ainda em avaliações de superfície, entre outras. A vantagem desta utilização está no prazo requerido para a obtenção da primeira peça laminada.

Para uma peça de carroceria em chapa de aço estampado, a primeira peça somente estará disponível vários meses após a conclusão do desenho eletrônico, mesmo que seja utilizado ferramental específico para fabricação de peças protótipo. Assim, apesar da limitação da aplicação de uma peça laminada, devido a esta ter apenas uma face representativa, sua utilização permite antecipar testes e avaliações requeridas pelo PDP.

Segundo Revista do Plástico Reforçado – Composites (2003), as peças laminadas em fibra de vidro também são utilizadas como itens de produção em série na indústria automotiva, inclusive para peças grandes, como pára-choque de caminhões e ônibus e capôs de caminhões, entre outros. Neste caso, os moldes devem ser robustos para permitir a fabricação de uma quantidade de peças capaz de suprir a demanda de caminhões novos e peças de reposição. Ainda segundo Revista do Plástico Reforçado – Composites (2003), estas peças são fabricadas em resina poliéster “ortoftálica” e em alguns casos, a manta de fibra de vidro é moldada por uma ferramenta antes de ser colocada no molde de laminação.

4.3 Molde para injeção de resina

Este processo geralmente é utilizado na produção de peças protótipo, tais como pára-choques, painéis de acabamento interno, lentes de lanterna, tampas de acabamento de furo de fixação, entre outras. Isso se dá porque as peças injetadas em resina são as que melhor representam as peças injetadas em Polipropileno – *Polypropilene* (PP) – produzidas em série para os veículos. Os moldes para injeção de resinas são capazes de reproduzir satisfatoriamente tanto a superfície da peça como as nervuras e pontos

de fixação, permitindo não só as avaliações de assentamento e design, como também a avaliação de montagem propriamente dita. Segundo Davey (2001), o processo RIM permite a obtenção de peças com a mesma qualidade de superfície do que o modelo utilizado para a fabricação do molde.

Segundo Barros (2001), na década de 70, com o objetivo de conquistar novos mercados, houve um grande desenvolvimento nas resinas formuladas à base de epóxi e de poliuretano. Isso possibilitou o desenvolvimento de novas técnicas de fabricação de moldes e de peças protótipo.

A fabricação de um molde está relacionada com o material e o processo de fabricação de peças com o qual será utilizado. Ao contrário do molde laminado, o molde para injeção de resina é fechado e forma os dois lados da peça. Atualmente existem resinas que endurecem em períodos longos, em torno de 24 horas, assim como resinas que endurecem em períodos curtos, entre 15 a 30 minutos, segundo dados de catálogo Vantico (2000) para resinas de poliuretano. Neste processo, é possível injetar a resina com um equipamento específico de injeção de resina, conforme mostrado anteriormente na figura 4.2, ou a resina pode ser vazada por gravidade até preencher a cavidade do molde.

4.3.1 Molde rígido

A construção da primeira metade do molde é similar ao molde laminado, conforme mostrado na figura 4.12. Da mesma forma devem ser observados os ângulos de saída que desfavorecem a desmoldagem. Quando isso acontecer, o molde deverá ser construído em partes, as quais são guiadas por pinos e fixadas entre si por parafusos, para que sejam desmontadas no momento de retirada da peça formada.



Figura 4.12 – Metade do molde de um pára-choque dianteiro com a peça. (Braga, 2001).

Segundo Braga (2001), o molde em resina laminada com fibra de vidro é estruturado em madeira em ambas as partes. Sobre a primeira metade do molde que já foi concluída, é aplicado um filme de cera sólida maleável. Este filme tem a mesma espessura da peça a ser injetada. A função desta cera é ocupar o espaço que será da peça durante a fase de fabricação da segunda metade do molde. Se houver espessuras diferentes em determinadas regiões da peça, a espessura da camada de cera deverá acompanhar essa variação, de acordo com o desenho do produto.

Após esta etapa, deve ser efetuado um estudo pormenorizado da face interna da peça, pois normalmente as peças possuem pontos de fixação, alojamentos de parafusos e encaixes de montagem na carroceria. Da mesma forma que o molde de injeção definitivo, o molde protótipo também deverá conter soluções para a forma da peça.

Nessas regiões, o molde possui pequenas partes móveis, as quais são chamadas de gavetas, devido ao tipo de movimentação de montagem e desmontagem no molde. Essas gavetas são construídas individualmente para cada região onde houver um detalhe que requeira este tipo de construção. As gavetas concluídas permanecem posicionadas no local onde foram construídas. A partir daí é construído então a segunda metade do molde propriamente dita, conforme mostrado na figura 4.13.



Figura 4.13 – Segunda metade do molde de um pára-choque dianteiro. (Braga, 2001).

Após a conclusão do molde e o endurecimento da resina, este é desmontado e aberto. A espessura de cera é removida e a superfície interna do molde é limpa. Para a injeção da peça, é necessário que seja aplicado o desmoldante em todas as partes do molde, na superfície em que será formada a peça.

4.3.2 Molde flexível

Segundo Dahl e Cleary (1993), muitas companhias utilizam o poliuretano para fabricar protótipos duráveis que simulam a produção de peças plásticas. Os protótipos em resina de poliuretano podem ser fabricados em moldes de borracha de silicone, a custo e prazo baixos.

Para Durhan e Allen (2002), este processo, também conhecido por borracha Vulcanizada à Temperatura Ambiente – *Room Temperature Vulcanized* (RTV), apesar de economizar tempo e dinheiro, raramente é visto como uma solução alternativa na fabricação de peças de produção. Os autores afirmam que este processo permite a fabricação de peças de geometria complexa com certa simplicidade.

Segundo Dahl e Cleary (1993), o processo consiste em fabricar um modelo da peça, construir o molde em borracha de silicone, escolher uma resina de poliuretano apropriada à finalidade da peça e fabricar as peças a partir do molde.

Para Nasser (2001b), este processo é perfeito para prototipagem rápida e modelos frágeis. O autor afirma que além da redução do tempo e do custo, este processo permite produzir protótipos funcionais, porém, alerta que a vida do molde é relativamente curta. Como uma regra, a produção de um molde de silicone é capaz de produzir de 20 a 30 peças.

Nasser (2001b) afirma que o molde pode ser fabricado uma metade por vez. Braga (2001) mostra que o molde pode ser fabricado inteiro de uma só vez. Neste caso, o modelo é posicionado no interior de uma caixa, apoiado sobre fios de arame e um corpo que formará o canal de injeção de resina para a fabricação da peça. O silicone é formulado e submetido ao vácuo para remoção do excesso de bolhas de ar. Em seguida, é despejado na caixa para formação do molde.

Braga (2001) sugere que a cura do molde de silicone ocorrerá dentro de uma câmara de pressão positiva. A pressão impedirá que pequenas bolhas de ar que estejam no interior do silicone formulado se expandam com o aumento da temperatura decorrente da reação química. A pressão deverá ser mantida durante todo o período de cura. Isso fará com que as bolhas se mantenham pequenas e não sejam percebidas a olho nu, o que vai permitir a fabricação de uma peça de boa qualidade superficial.

Ainda segundo o autor, o molde é então cortado com um bisturi, e o modelo é removido. Dahl e Cleary (1993) lembram que a abertura do molde de forma irregular servirá para localizar o seu fechamento todas as vezes que for preparado para injetar uma peça.

A figura 4.14 mostra duas etapas da construção de um molde para fabricação da lente de uma lanterna de caminhão e o molde aberto com a peça já desmoldada. Braga (2001) afirma que a partir de um modelo, a primeira peça protótipo no caso apresentado foi obtida em 48 horas.

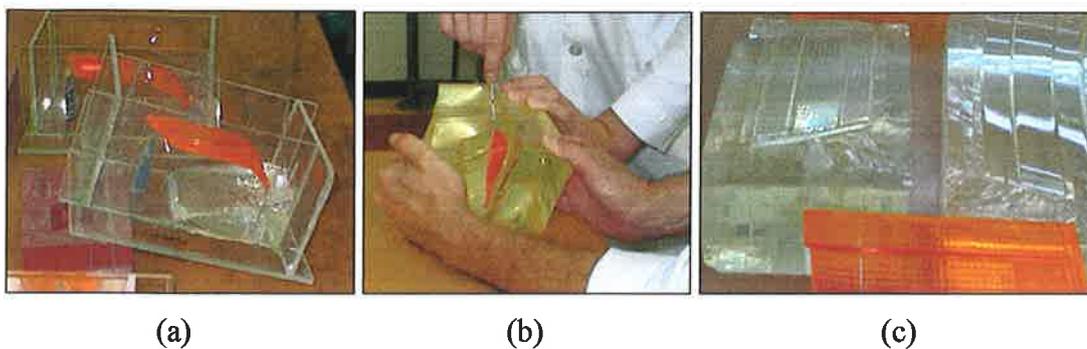


Figura 4.14 – (a) Caixa com o modelo; (b) Corte para abertura do molde; (c) Molde de silicone aberto com a peça extraída. (Braga, 2001).

4.3.3 Fabricação de peças em resina injetada em molde rígido

Para a injeção de peças, o molde deve ser fechado cuidadosamente. A resina pode ser injetada na cavidade formada no interior do molde por uma bomba de injeção. A resina e o endurecedor são bombeados simultaneamente e misturados no bico misturador. Neste caso, o molde precisará ser fixado com parafusos ou grampos de fechamento, a fim de suportar a pressão interna de injeção da resina sem se deformar, conforme mostrado na figura 4.15. Se houver deformação do molde durante a injeção, a espessura da peça ficará alterada.



Figura 4.15 – Molde fechado de um pára-choque dianteiro durante a injeção de resina. (Braga, 2001).

Mesmo com um molde deste porte, a resina pode ser vazada no interior do molde por gravidade. Neste caso, apenas alguns pontos de fixação nas extremidades serão suficientes para garantir o fechamento. Esta operação deve ser realizada com resina de reação lenta. A resina tem seus componentes misturados em um pote, e a mistura homogênea é vazada por um funil pelo ponto mais alto do molde.

Estrategicamente nos demais pontos altos do molde são abertos furos para saída de ar. Se o ar não sair completamente, a peça ficará com bolhas. Dependendo da localização da bolha, ainda é possível recuperar a peça, injetando resina na bolha com uma seringa de uso médico. Esta operação é feita após a desmoldagem da peça. Neste caso não há investimentos em equipamento, porém a fabricação de cada peça demora em média dois dias.

A bomba específica para injeção forçada, conforme já mostrado na figura 4.2, consiste de dois reservatórios, um para resina e o outro para o endurecedor. Com o ajuste do dispositivo regulador de proporção, a resina e o endurecedor são bombeados simultaneamente, na proporção correta por mangueiras independentes. As mangueiras são acopladas a um bico misturador. A resina formulada é bombeada para o interior do molde. As mangueiras e o bico misturador podem ser observados na figura 4.15.

A resina utilizada com este processo é de curto tempo de reação. Por este motivo, a injeção da resina deve ser feita por um ponto central no molde para evitar que ela reaja e endureça antes que o molde seja preenchido totalmente. Da mesma maneira, orifícios de saída de ar são abertos, e segundo Braga (2001), o bombeamento somente deixará de ser executado quando a resina livre de bolhas começar a verter por estes furos.

O autor ainda afirma que a peça pode ser desmoldada duas horas após o término da injeção. Para remover a peça, o molde precisa ser aberto completamente e antes que seja injetada uma nova peça, o molde deve receber uma limpeza completa, aplicação de desmoldante e ser então fechado novamente para nova injeção. Na prática, é possível produzir duas peças por dia. Embora a resina esteja endurecida, o processo

de cura total pode demorar de horas até vários dias, dependendo da resina e da temperatura ambiente. Por este motivo, algumas peças requerem um berço para que estas repousem por um período. Isso impedirá a deformação da peça injetada.

Um molde deste tipo será capaz de produzir dezenas de peças. Pode haver necessidade de executar pequenos reparos na superfície interna do molde, porém isso não comprometerá a qualidade da peça. Com o uso, começará a deteriorar-se, principalmente nas regiões de fixação, comprometendo o fechamento do molde.

As peças de poliuretano injetado, dependendo do tipo de resina, oferecem características físicas, mecânicas e de desempenho, segundo dados de catálogo Vantico (2000), que tornam as peças de poliuretano injetado semelhantes ao termoplástico moldado por injeção que será utilizado na produção em série. Após a reação, as resinas de poliuretano apresentam encolhimento de 0,001mm/mm para peças pequenas e até 0,004 a 0,006 mm/mm para peças de grandes dimensões e espessura de parede de 3mm, segundo dados de catálogo Vantico (2000). Para compensar isso, o molde deve contemplar esta variação, para que a peça final esteja dentro da tolerância especificada em desenho. A figura 4.16 mostra uma peça injetada em poliuretano.

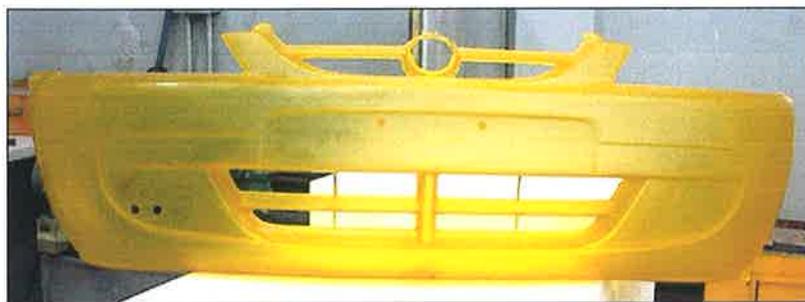


Figura 4.16 – Pára-choque dianteiro injetado em resina de poliuretano. (Braga, 2001).

Se a injeção de termoplástico é um processo a quente, a injeção de resinas, embora seja uma reação exotérmica, é realizada a frio. Entretanto, segundo Revista do Plástico Reforçado – Composites (2004), as peças podem sair deformadas do molde. Essa deformação é denominada “chupamento”. O texto cita que deve haver uma

compensação na curvatura do molde no sentido inverso ao da deformação. Esta compensação deve ser da ordem de 3,8 a 4%. Com esta compensação, segundo Revista do Plástico Reforçado – Composites (2004), o resultado final será uma peça sem deformação.

4.3.4 Aplicação de peças em resina injetada em molde rígido

As peças injetadas em poliuretano permitem avaliações representativas. Possuem todos os pontos de fixação, conforme uma peça de produção injetada em polipropileno, por exemplo. Esta característica física possibilita a avaliação da montagem no veículo. Segundo Vantico (2000), existem vários tipos de resina de poliuretano disponíveis no mercado.

Cada resina, além de ter suas características próprias de formulação, possui diferentes tipos de características mecânicas. Estas características permitem que tenham comportamento semelhante à peça produzida no material de produção em série. Com isso, é possível utilizá-la em testes dinâmicos, e em alguns casos, inclusive em testes de impacto. As avaliações preliminares realizadas auxiliam a continuidade do PDP.

Os moldes rígidos são utilizados para peças grandes como pára-choques, e para peças médias como painéis de acabamento interno de portas e colunas do veículo. Não existe, porém, nada que impeça a utilização de moldes rígidos em peças pequenas. Existem casos em que, para a fabricação de um lote de peças pequenas é fabricado um molde rígido bi-partido. O preenchimento do molde é feito manualmente. A resina é depositada nas metades do molde e este, após seu fechamento, é apertado com um grampo manual até que todo o excesso de resina seja expelido pela emenda do molde. Após a cura da peça, na linha de fechamento do molde se forma uma

rebarba fina, que é removida à mão ou com uma lâmina de corte. Esta operação somente pode ser utilizada em peças de geometria simples e de pequena espessura.

4.3.5 Fabricação de peças em resina injetada em molde flexível

Para evitar a deformação do molde durante a injeção da resina, este deve ser fechado com firmeza, preso com cintas ou apoiado externamente por superfícies rígidas que impeçam sua abertura ou deformação durante a injeção da resina. O silicone dispensa a aplicação de desmoldante, mas Davey (2001) afirma que a utilização de desmoldante prolonga a vida útil do molde.

Segundo Groth e Grimm (2002) a presença de bolhas de ar nas peças diminuem as propriedades mecânicas e estéticas do protótipo. Eles sugerem o correto posicionamento do molde e a injeção da resina pela sua parte mais baixa. As saídas de ar, colocadas estrategicamente nas partes mais altas do molde, diminuirão o risco de aprisionamento do ar em seu interior.

Dahl e Cleary (1993) mostram também que a resina pode ser vazada por gravidade, e que resinas mais viscosas podem ser injetadas sob pressão para o interior do molde. Além destes cuidados, o molde deve ser submetido à pressão durante a reação química da resina, para que as bolhas fiquem comprimidas, e conseqüentemente não sejam visíveis na peça. Os autores afirmam que, quando submetida a pressão entre 70 a 90 psi, as bolhas apresentam tamanho microscópico.

Para retirar a peça, basta abrir o molde e deformá-lo em operação manual, removendo a peça. Para peças de geometria complexa, a remoção deve ser executada com cuidado a fim de não danificar o molde. O acabamento da peça consiste basicamente em remover os canais de saída de ar e de alimentação de resina e a

rebarba que eventualmente possa se formar proveniente do fechamento do molde, conforme citado por Groth e Grimm (2002).

4.3.6 Aplicação de peças em resina injetada em molde flexível

Segundo Groth e Grimm (2002), as peças fabricadas em moldes de silicone apresentam, entre outras qualidades, alta precisão dimensional, boa aparência estética e mínima operação de acabamento. Braga (2001) afirma que o processo produz peças de alto brilho devido à não utilização de desmoldante. Por este motivo é o processo ideal para fabricação de peças transparentes.

Para Durham e Allen (2002), este processo pode ser aplicado na produção de pequenos lotes de peças para produção. Para eles, as resinas de poliuretano vêm apresentando características cada vez melhores, o que vai proporcionar o uso cada vez maior em peças de produção em série.

4.4 Molde para termo formação de peças plásticas

O processo de formação de peças em material plástico aquecido com a utilização da força obtida por intermédio do vácuo também é conhecido por *vacuum forming*. Neste processo, apenas uma parte do molde é suficiente para moldar folhas de termoplásticos. Sala, Landro e Cassago (2002), mostram algumas variações do processo, onde em uma delas, a peça é formada por um molde constituído por duas metades.

Neste processo, segundo os autores, o material a ser moldado é aquecido a temperatura menor do que a temperatura de fusão do material utilizado. Keefer, Martindale e Morrisson (1998), advertem que alguns plásticos como o acrílico e o policarbonato possuem moléculas de água no seu interior, decorrentes do processo de fabricação. Se o plástico for aquecido a alta temperatura, a água vaporizará e formar-se-ão pequenas bolhas no interior do plástico, prejudicando a qualidade da peça formada.

Segundo Sala, Landro e Cassago (2002), podem ser utilizados vários tipos de materiais como ABS, Cloreto de Polivinila – *Polyvinil Chloride* (PVC) – e PP. Também podem ser fabricadas peças em material transparente como o Polietileno Tereftalato modificado com Glicol – *Polyethylene Terephthalate Glycol* (PETG) – conforme mostrado na figura 4.17. Segundo Gassaway (1985), este processo é muito simples e é possível fabricar peças apenas com um forno e um aspirador de pó. Para Ryan (2001), peças com formas incomuns podem ser fabricadas com facilidade.



Figura 4.17 – Painel de instrumentos em PETG. (Macarrão, 2004).

O molde deve ser fabricado em material que suporte a temperatura do plástico a ser moldado e poderá ser feito em material poroso. Para materiais não porosos, o molde recebe pequenos furos, por onde passará o ar para a câmara de vácuo. Estes furos devem ser abertos estrategicamente em locais onde houver raios e depressões na forma da peça, conforme figura 4.18. Isso vai garantir que o material aquecido se alongue até alcançar as partes mais baixas do molde.

Estes furos deixarão marcas na peça. Portanto, na prática, furos pequenos, da ordem de 1 mm de diâmetro, deixarão marcas quase imperceptíveis, as quais não interferirão na avaliação do desenvolvimento do produto.

Segundo Gassaway (1985), é necessário construir uma câmara de vácuo sob o molde, que tem por finalidade direcionar o fluxo de ar para o aspirador ou bomba de vácuo. Abaixo do molde mostrado na figura 4.18, observa-se a câmara de vácuo construída na forma de uma caixa de madeira. Em uma das faces desta câmara, é colocado um bocal para acoplamento da mangueira de sucção de ar utilizado durante a formação da peça.



Figura 4.18 – Molde da metade de um reservatório de fluido. (Macarrão, 2004).

Segundo Sala, Landro e Cassago (2002), a escolha entre fazer o molde com a superfície externa ou interna da peça, dependerá de qual será a superfície da peça que precisará ser controlada. Os autores ressaltam que a superfície em contato com o molde será mais lisa e sem defeitos. Gassaway (1985) alerta que o molde deve ter boa superfície. Quanto melhor a superfície do molde, melhor será a superfície da peça. No caso de uma peça transparente, esse é um fator importante para não prejudicar a transparência da peça.

4.4.1 Fabricação de peças termo formadas

Para fabricar uma peça neste processo, o material a ser moldado deverá ser fixado a uma estrutura rígida em madeira, metal ou outro material de fácil manuseio. Segundo Ryan (2001), o plástico é aquecido em um aquecedor até que sua deformação seja observada visualmente. Isso ocorre em poucos minutos e o material estará então muito flexível, pronto para moldagem.

O material aquecido é posicionado sobre o molde. Ao redor da forma da peça, deve ser colocado um filete de material de vedação, o qual também pode ser observado na figura 4.18. O próprio plástico aquecido, em contato com este filete de vedação, impedirá a entrada de ar, e com o acionamento da bomba de vácuo, o material aquecido e flexível será puxado contra a superfície do molde.

Como neste processo o material aquecido é estirado sobre o molde, existe variação na espessura da peça, conforme mostrado por Sala, Landro e Cassago (2002). A região da peça em que haverá maior estiramento dependerá do tipo de molde utilizado, conforme mostrado na figura 4.19, onde duas tecnologias de *vacuum forming* são mostradas.

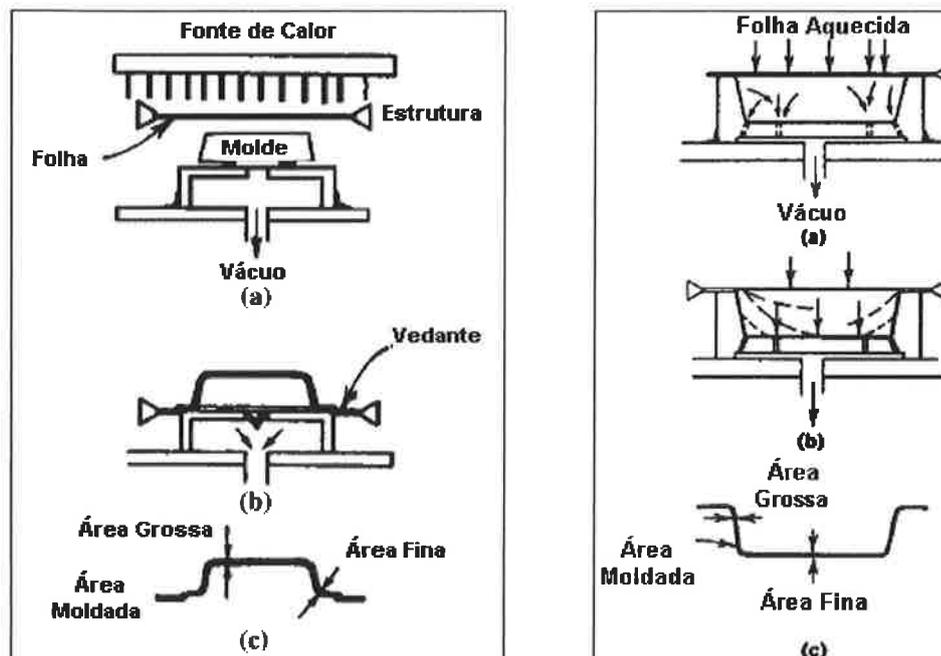


Figura 4.19 – Duas diferentes tecnologias de *vacuum forming*. (Adaptado de Sala, Landro e Cassago, 2002).

Ainda segundo Sala, Landro e Cassago (2002), as áreas da peça que entrarem em contato com o molde no início da operação, resfriarão imediatamente. Manterão a espessura original e absorverão o calor das áreas adjacentes. Com a conformação, a espessura reduzirá e o material poderá romper-se. Gassaway (1985), alerta para não usar desmoldante ou lubrificante, pois poderão formar bolhas com o calor do material.

As peças formadas são facilmente removidas do molde, desde que apresentem ângulos de saída que favoreçam a desmoldagem. A peça precisa então ser recortada, conforme seu desenho de contorno e furações. Para facilitar este trabalho, o molde pode ser traçado em relevo. O traçado das linhas ficará aparente nas peças conformadas, eliminando a necessidade de traçá-las individualmente.

4.4.2 Aplicação de peças termo formadas

As peças termo formadas podem ser aplicadas nas fases iniciais do PDP para facilitar verificações preliminares, já que a obtenção de uma peça por este processo é rápida. Este processo pode ser aplicado também para peças que, na produção em série, serão fabricadas em materiais e processos diferentes. A figura 4.20 mostra uma carroceria, que na produção em série será em chapa metálica, e que foi montada parcialmente em peças termo formadas.



Figura 4.20 – Carroceria parcial fabricada em PETG pelo processo *vacuum forming*. (Macarrão, 2004).

A montagem das peças pode ser executada com rebites, solda por ultra-som ou outro processo. Para facilitar a montagem, os moldes podem ter as linhas coordenadas traçadas, que por sua vez ficarão visíveis nas peças. As linhas coordenadas facilitarão a correta montagem das peças, eliminando a necessidade de localizá-las por meio de equipamentos de medição.

4.5 Ferramenta para conformação de peças em chapa metálica

A conformação de peças em chapa metálica não é possível sem a utilização de ferramentas apropriadas. Nakagawa (2000) afirma que as ferramentas de conformação são muito apropriadas para a produção de grandes lotes de peças. Segundo o autor, é necessária uma ferramenta individual para cada forma desejada e isso requer tempo e custo consideráveis.

Fournier e Fournier (1989) citam a conformação manual de chapa metálica com o uso de ferramentas manuais, como martelo e tesoura para chapas, entre outras e ferramentas elétricas ou pneumáticas, como os marteletes, máquinas como guilhotinas, dobradeiras, serras e outras específicas para operações artesanais com chapas, conforme mostrado na figura 4.21. Os autores afirmam que este processo é aplicado quando se necessita fazer apenas uma peça. Neste caso, não se justificaria a fabricação de uma ferramenta específica para a conformação da peça.



Figura 4.21 – Operações manuais de conformação de chapa metálica. (Fournier e Fournier, 1989).

Para peças de forma simples, a ferramenta de conformação pode ser fabricada sem a necessidade de que a superfície da peça seja usinada em máquina CNC. Neste caso, o operador fabricará a ferramenta utilizando operações manuais, soldagem e recursos de máquinas operatrizes, conforme mostrado na figura 4.22. Quando se trata de operação manual, cada operador utiliza os métodos e recursos que melhor se adaptem

às suas habilidades. A conformação das peças poderá ser realizada por meio de prensa de movimento lento, por conformação com ferramentas manuais ou a combinação de ambos.

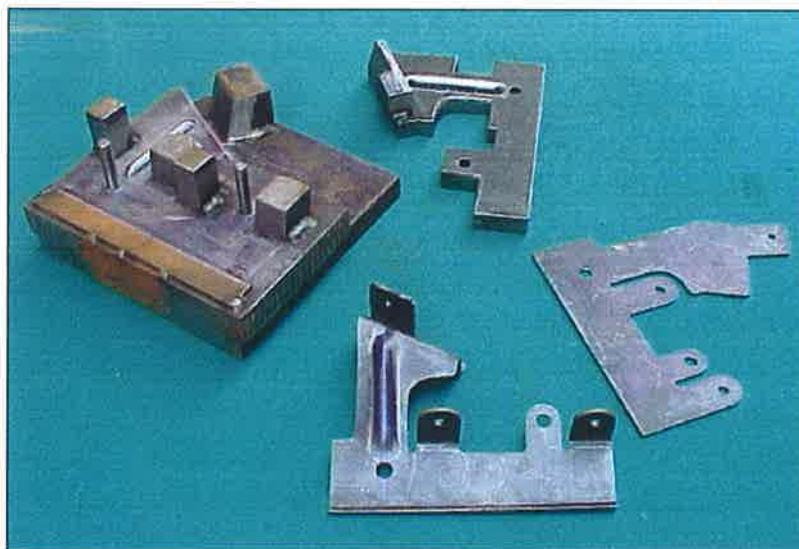
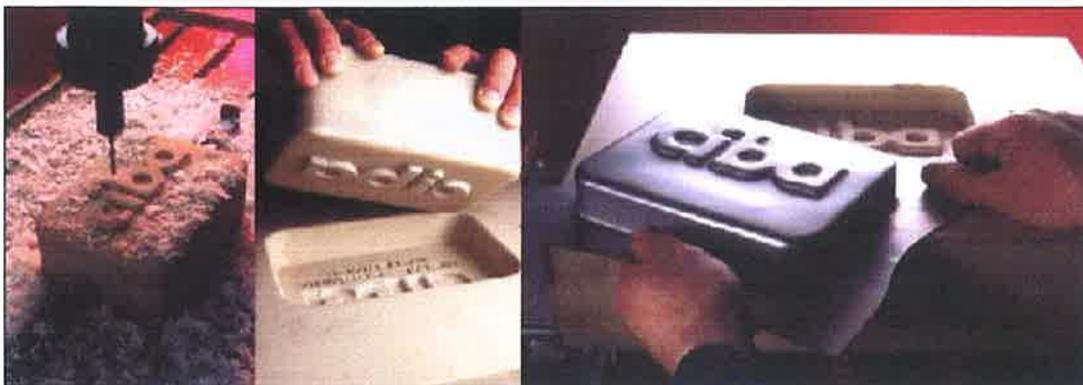


Figura 4.22 – Ferramenta de conformação de peças pequenas em chapa metálica. (Macarrão, 2004).

Segundo Nakagawa (2000), o problema em fabricar pequenos lotes de peças está na necessidade de fazer a ferramenta rapidamente e a baixo custo. No processo industrial, uma peça de baixa qualidade não é tolerada nem mesmo para pequenos lotes. Ainda segundo o autor, a fabricação de ferramentas em resina formulada ou em ligas de zinco, vazados sobre a superfície de um modelo é o método mais utilizado para testes e produção de pequenos lotes de peças.

Para Hollis e Nakao (1996), as ferramentas para conformação de metais normalmente estão no caminho crítico de qualquer PDP de um veículo automotivo. Para peças protótipo, o prazo é de 10 a 12 semanas para a fabricação da ferramenta pelo processo convencional de fabricação de ferramenta em ligas de baixo ponto de fusão, como zinco ou bismuto. Já um processo de fabricação de ferramentas em resina ou em ligas de baixo ponto de fusão, o prazo é inferior a 7 semanas, comparam os autores.

Gatto e Iuliano (2001) afirmam que as ferramentas em resina apresentam custo médio 40% menor e redução de 45% no prazo de fabricação. Segundo Barros (2001), além da resina formulada e vazada, é possível utilizar placas usináveis de resina para a fabricação da ferramenta de conformação, conforme mostrado na figura 4.23. A usinagem de resina é semelhante à dos metais, porém, mais rápida, tornando seu uso vantajoso.



(a)

(b)

(c)

Figura 4.23 – (a) Usinagem do punção em resina; (b) Ferramenta de conformação usinada em resina; (c) Peça metálica conformada. (Barros, 2001).

Para Barros (2001), tanto a resina formulada e como a placa usinável de resina podem ser utilizadas em uma mesma ferramenta. Ele cita como exemplo a fabricação de uma ferramenta para conformação de uma longarina, onde o punção e o anel foram usinados e a matriz foi confeccionada com resina formulada. Segundo o autor, o tempo necessário até a conformação da primeira peça é de 12 a 15 dias. Na tabela 4.2, é mostrado um comparativo entre a usinagem da ferramenta em aço e o uso destas duas técnicas.

Tabela 4.2 – Quadro comparativo de horas trabalhadas na fabricação da ferramenta de uma longarina. (Adaptado de Barros, 2001).

FERRAMENTA	AÇO (horas)	PLACA RESINA USINÁVEL (horas)	RESINA FORMULADA + ENCORPANTE (horas)
Matriz	140	60	30
Anel	70	35	35
Punção	90	25	25
Total	300	120	90

Segundo Hollis e Nakao (1996), a fabricação de uma ferramenta de conformação em resina formulada é realizada sobre a superfície do modelo. Ao redor do modelo é criada uma superfície de separação das partes da ferramenta. O modelo complementado recebe paredes laterais, formando sobre si um caixote. Após a aplicação do desmoldante, a resina formulada é vazada no interior do caixote, que é removido após a cura da resina. Sobre a matriz formada, é aplicada uma camada de material para ocupar a espessura da peça a ser formada. Sobre a matriz serão fabricados o punção e o anel de maneira semelhante.

Os autores alertam que neste processo, a contração da resina após a cura deve ser próxima de zero. Para reduzir este problema, a elevação da temperatura decorrente da reação exotérmica da resina deve ser contida. Uma solução citada é a introdução de pequenos pedaços de resina curada no caixote durante o processo de enchimento da ferramenta, de 40% a 50% do volume. Ainda segundo os autores, testes mostraram contração de até 0,0015 mm/mm. A resina curada é obtida a partir de uma ferramenta antiga, britada. Isso significa que, além de reduzir o descarte do material curado, haverá redução no custo da resina formulada.

Encorpante é um material de grão fino que pode ser adicionado à resina formulada. Segundo Ciba (1995), além de servir para reduzir o custo por ser mais barato do que a resina, serve para diminuir o aumento da temperatura, devido à diminuição do

volume de resina, ocupado pelo encorpante. Sua presença torna a ferramenta mais durável.

Outros recursos para reduzir a contração são citados por Hollis e Nakao (1996). Um deles é a introdução de linhas de arrefecimento para dissipar o calor. Esta aplicação porém, dificulta a fabricação da ferramenta e a sua reciclagem. Outro recurso, é a utilização de resinas de reação lenta. Os autores afirmam, contudo que a primeira alternativa é a mais utilizada em função dos benefícios proporcionados pela reciclagem do material.

4.5.1 Conformação de peças em chapa metálica

Fournier e Fournier (1989) afirmam que o operador deve gostar do trabalho de conformação artesanal de peças. Deve ter habilidade para escolher os equipamentos e ferramentas auxiliares, e para a conformação propriamente dita.

Neste tipo de trabalho, o ajuste dimensional e da forma da peça é feito com o auxílio de gabaritos construídos em alumínio ou outro material de fabricação rápida. Os autores mostram que a inspeção é visual, mas não citam que, por consequência, acumula imprecisões dimensionais do processo artesanal de fabricação, da inspeção e da construção do gabarito. O ajuste final de contornos e flanges deste tipo de peça geralmente é realizado na montagem. Assim, o desenho de produto torna-se apenas uma referência. Por este motivo, a variação dimensional de uma peça para outra é maior do que nas peças produzidas por ferramentas de conformação.

A fabricação de peças pequenas pode ser realizada em prensas de movimento lento. O operador monta a ferramenta na máquina e conforma a peça, que nem sempre sai totalmente conformada. Muitas vezes, o operador utiliza ferramentas manuais para fazer parte da conformação. Essa operação pode ser realizada em regiões de flanges,

abas ou ainda para iniciar a formação. Quem dá a forma final na peça, contudo, é a ferramenta de conformação. Isso garante que as peças produzidas estejam dentro da tolerância especificada pelo desenho.

As peças conformadas por ferramentas em resina são produzidas em prensas de porte compatível com o esforço requerido para conformação da peça. Como o processo de conformação é semelhante ao de produção em série, a peça será representativa se produzida no mesmo material especificado pelo projeto.

O recorte de contorno e furação das peças será rápido, preciso e terá acabamento sem necessidade de eliminar as rebarbas, se efetuado em máquina de corte a laser, conforme mostrado na figura 4.24. A programação do corte é feita a partir do desenho eletrônico. Cada peça é fixada a um dispositivo de posicionamento especialmente confeccionado para este fim. Isso torna a operação mais rápida e garante melhor acabamento e precisão às dimensões da peça.

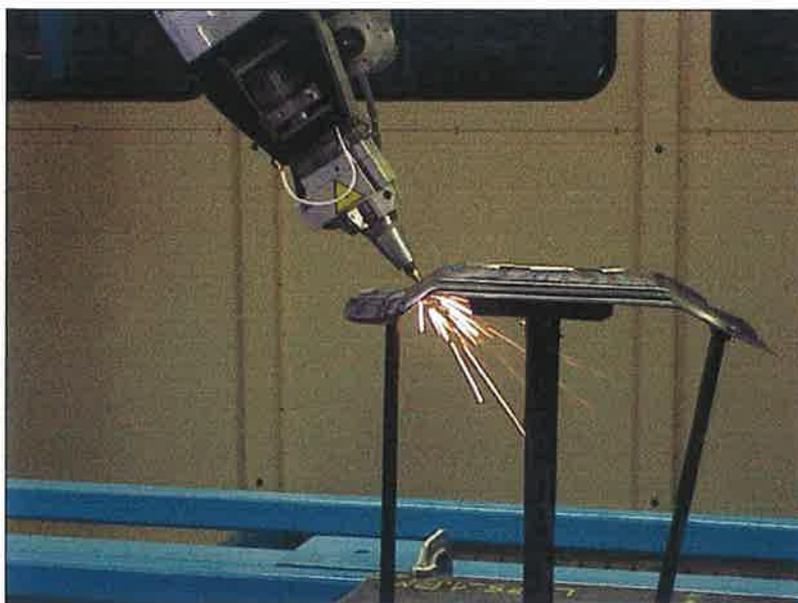


Figura 4.24 – Operação de corte a laser de peça sobre dispositivo de posicionamento. (Macarrão, 2004).

O recorte e furação da peça podem ser realizados a mão, porém a peça precisa ser traçada com o auxílio de instrumentos de medição. A partir desta peça, é construído um gabarito que servirá para traçar as linhas do recorte manual das demais peças.

Também será necessário um berço para o apoio durante o delineamento e recorte, para facilitar a operação e impedir que a peça seja danificada.

O processo de produção em série pode utilizar várias ferramentas para produzir uma peça. Cada ferramenta executa um estágio de conformação, até que a peça seja concluída. O recorte e furação também são executados em ferramenta específica. Isso permite que várias peças sejam conformadas por minuto, dando velocidade ao processo. A produção experimental, geralmente usa apenas uma ferramenta e a produção é lenta. Este processo é justificado pelo baixo volume de peças produzidas. Segundo Müller e Sladojevic (2001), a quantidade de peças protótipo fabricadas durante o PDP varia de uma a cem peças.

4.5.2 Aplicação de peças metálicas conformadas

A operação descrita por Fournier e Fournier (1989) aplicada à reposição de peças em restauração de veículos, atualmente não tem muita aplicação no processo de desenvolvimento do produto, pois a peça, pelo próprio processo de fabricação, não representa o processo de produção. Além disso, a espessura da chapa fica alterada em função do lixamento necessário para eliminar marcas de ferramentas manuais e defeitos de superfície ocasionados durante a sua fabricação. Peças fabricadas desta maneira eram utilizadas nas fases preliminares do PDP, porém caíram em desuso pelo seu alto custo, prazo longo e pequena representatividade. Isso faz parte das modificações nas fases do PDP mencionadas por Daneshgari e Fletcher (2002), citado no capítulo 2.

Por este motivo este processo de fabricação é utilizado nas fases adiantadas do PDP, na fase em que vários veículos são montados para testes. As peças estampadas em prensas por ferramentas de conformação são representativas. Fabricadas no material especificado pelo desenho e montadas conforme projeto, poderão ser utilizadas

inclusive nos testes de impacto, durabilidade e demais testes funcionais realizados com os veículos.

O volume de peças produzidas deve atender a todos os veículos. Existe a possibilidade da utilização destas peças protótipo para verificação de dispositivos de montagem para a fabricação em série. Com isso, é possível antecipar a avaliação dos dispositivos de montagem e demais operações da manufatura.

5 ANÁLISE DO USO DE MOCK-UPS E PROTÓTIPOS

Mock-ups e protótipos têm aplicações distintas dentro do desenvolvimento de veículos. Um não substitui o outro pois cada um tem o seu propósito e está relacionado à fase de desenvolvimento em que o componente do veículo se encontra. Tanto o mock-up quanto o protótipo são utilizados nas definições dos componentes, incluindo seus pontos de fixação e assentamento entre as peças. Enquanto o protótipo é funcional e pode ser testado, o mock-up raramente oferecerá a oportunidade de ser funcional para avaliação. A maior diferença entre estes dois conceitos está no material e no processo de construção utilizado e conseqüentemente no prazo de fabricação.

A principal virtude de um mock-up está no seu curto prazo de fabricação. Se um mock-up não estiver disponível no momento certo, não trará benefício ao desenvolvimento do produto. Isso significa que, o fato de um componente estar disponível fisicamente para avaliação antes mesmo de concluído o projeto, trará informações adicionais para que o projetista o conclua da maneira mais acertada, visualizando potenciais problemas de montagem ou de processo de fabricação em série, entre outros, conforme citado por Tolstedt (2002).

Da mesma forma, Volpato (1999) garante que as avaliações físicas preliminares reduzem o prazo e o custo do desenvolvimento. Com isso, se a análise puder ser efetuada apenas no primeiro protótipo funcional, o projeto do veículo já estará em fase adiantada, e conseqüentemente resultará em maior prazo e custo na correção do problema, reforçando o conceito abordado pelo autor.

Smith e Reinertsen (1997) afirmam que existe um preconceito de que o raciocínio orientado pelo custo prevalece sobre o raciocínio orientado pelo tempo. Isso decorre da maior facilidade em analisar o custo do desenvolvimento, que resulta da somatória de materiais e recursos empregados com a mão-de-obra utilizada. O fator tempo, fica

em segundo plano, e a redução no tempo requerido pelo desenvolvimento do componente, como fica difícil de ser mensurada, não recebe a devida importância.

Os autores, por sua vez, afirmam que o maior custo é oriundo do atraso, pois quanto mais demorar o lançamento do produto no mercado, mais tempo levará para que o produto comece a gerar receita. A este conceito, os autores incluem como fatores positivos decorrentes da redução no prazo de lançamento, o aumento na participação no mercado, maior margem de lucro devido à exclusividade do produto no mercado, o prolongamento da vida comercial do produto devido ao fato de um produto lançado mais cedo não implica na obsolescência prematura, entre outros.

5.1 Uso de mock-ups no PDP da carroceria de um veículo

O mock-up, portanto, facilita e agiliza o desenvolvimento da carroceria de veículos e de componentes externos e internos de acabamento, atendendo aos requisitos do PDP e reduzindo o tempo de conclusão do projeto.

No desenvolvimento de um novo componente, conforme Kaminski (2000), quanto maior a inovação no produto, maior será a responsabilidade do projetista no desenvolvimento. Assim, à medida que o projeto vai tomando forma, o uso de um mock-up com as informações disponíveis até o momento, reduzirá os riscos de erros de projeto.

Com um mock-up em mãos, será possível analisar o aspecto visual do componente, a montagem e seu respectivo assentamento com as demais peças do veículo. Fazer uma avaliação prévia de montagem e analisar o espaço ocupado pelo novo componente e quais as suas implicações. Isso significa que será possível verificar se não haverá interferências com as demais peças, obstrução da passagem de ferramentas de

montagem de outros componentes, e observar se o novo componente estará em posição adequada em relação às outras peças ao seu redor.

Quando o novo projeto resultar na modificação parcial de uma peça já existente, a fabricação do mock-up pode se tornar mais simples. Em alguns casos, sua construção pode ser feita a partir da peça existente. Esta modificação pode ser executada mediante o novo desenho ou conforme a necessidade do produto. Se a modificação for definida no próprio mock-up, através da engenharia reversa, este servirá de referência para o novo desenho.

O mock-up virtual é o mais rápido e por conseqüência, o mais barato, por não haver material envolvido. Por outro lado, a análise que este recurso proporciona é limitada à tela de um computador, e não permite com o mesmo sucesso algumas das avaliações citadas acima. Entretanto, com este processo é possível evitar erros no primeiro mock-up físico, reduzindo assim prazo e custo de projeto, numa integração entre análises física e virtual, conforme citado por Zwaanenburg (2002).

Algumas regiões da carroceria de um veículo apresentam maior grau de dificuldade de desenvolvimento. Isso se dá devido ao grande número de componentes envolvidos ou devido à geometria destas regiões. Conforme já citado anteriormente, em regiões como a do farol, lanterna, maçaneta, entre outras, são as mais suscetíveis a ocorrências deste tipo. Nestes casos, mesmo após a avaliação virtual e à construção de *cubings* destas regiões, é comum que no primeiro protótipo funcional apareçam alguns problemas, até então não observados.

Tomando como exemplo o farol, ao seu redor está o pára-choque dianteiro, capô, pára-lama e grade dianteira. Além disso, entre estas peças existem folgas definidas em projeto. Normalmente, estas peças são projetadas simultaneamente por projetistas diferentes. Assim após a conclusão dos desenhos de cada peça se faz necessária a análise virtual da montagem.

Na segunda fase, os modelos das peças são usinados e montados na forma de um *cubing*, conforme já mostrado nas figuras 3.12 e 3.13. Nesta fase, o aspecto visual

das folgas entre os componentes já mostra condição diferente da observada na análise virtual, devido à incidência de luz nestas regiões. Às vezes, as folgas entre as peças aparentam ser maiores ou menores do que a real e, em alguns casos, parecem não estarem constantes ao longo do componente. Em outros casos, a concordância entre as linhas dos componentes envolvidos pode proporcionar um efeito visual não satisfatório.

Entretanto, mesmo após as modificações realizadas no projeto a partir de informação obtida nas fases anteriores, é comum identificar a necessidade de novas alterações na montagem do primeiro veículo protótipo. Isso decorre da visualização de todas as peças nas suas formas, posicionamento e, se possível nos materiais definitivos, montados no veículo. Muitas vezes o objetivo não é corrigir um defeito de montagem ou assentamento propriamente dito, mas melhorar uma condição de montagem que proporcione um visual agradável do conjunto.

Isso não significa, entretanto, que as avaliações anteriores foram em vão. Caso elas não tivessem ocorrido, seria provável que as novas correções detectadas fossem maiores, inviabilizando a correção completa de uma só vez. O resultado final certamente seria o atraso no desenvolvimento da região, comprometendo o desenvolvimento do veículo como um todo e por consequência atrasando o lançamento do veículo.

Conforme citado por Smith e Reinertsen (1997), em alguns casos, estas perdas de mercado não serão quantificadas e poderão passar despercebidas, se uma análise externa à empresa e de mercado não for realizada adequadamente.

5.2 Exemplos de aplicação de mock-ups – Análise de tempo e custo

Um mock-up deve ser construído em material apropriado para que atenda ao objetivo proposto. Para que isso seja possível, em primeira análise, é necessário que este objetivo esteja claro para aqueles que vão definir o processo de fabricação e o material a ser empregado, e ainda por aqueles que construirão o mock-up. Sem isso, é provável que o mock-up não sirva para uma avaliação completa para a qual foi construído.

Os requisitos de avaliação de um mock-up variam de acordo com o componente, com a fase em que o projeto se encontra e, principalmente, com o objetivo específico para o qual está sendo construído.

Para cada objetivo, um ou mais processos de fabricação podem atender à necessidade, assim como para um mesmo processo, mais de um tipo de material pode ser utilizado. Quando houver mais de uma possibilidade técnica, o prazo de fabricação deve ser analisado em segundo lugar, a fim de não atrasar o desenvolvimento do produto. A terceira análise a ser feita é a questão do custo de fabricação. Isso será a garantia de que será utilizado o melhor processo, o mais rápido e o de menor custo, dentre as possibilidades que atendam aos requisitos técnicos de avaliação.

Por outro lado, quando o custo ou o prazo for incompatível com o desenvolvimento, deverá ser encontrada uma solução alternativa que não onere o projeto, nem prejudique o prazo de desenvolvimento. Se isso ocorrer, deverá ser realizada uma análise mais detalhada, para que seja decidido se o mock-up será fabricado ou não.

Nos casos a seguir, são apresentados o prazo de fabricação, o custo do processo adotado e as aplicações do mock-up. O custo ora apresentado é calculado de forma particular. São considerados como gastos de engenharia e não são pormenorizados, porém são compatíveis com os custos globais de engenharia.

A fim de preservar a propriedade da informação, o custo das peças, material e mão-de-obra não é apresentado em moeda corrente. Porém, para permitir a avaliação e eventual comparação entre os processos, o custo é apresentado na forma de Unidade Monetária de Referência – UMR, criada especificamente para este trabalho.

5.2.1 Estudo de caso 1 – Mock-up de fabricação manual

O mock-up de um dispositivo de retenção e direcionamento de vapores de combustível – *canister*, mostrado na figura 3.1 foi construído em poliuretano usinável pelo processo manual. Os pontos de fixação das faces superior e posterior foram construídos em poliuretano de maior rigidez, a fim de não se quebrarem durante o processo de montagem para avaliação.

No processo manual, as fases intermediárias variam de acordo com a habilidade e criatividade do modelador, havendo portanto, pequena variação no prazo de construção. O acabamento deve ser o mais simples possível, a fim de evitar acréscimo no prazo de fabricação e seu respectivo custo de mão-de-obra e material. Acabamento como a pintura, por exemplo, deve ser evitado pois, em alguns casos, consome mais tempo do que a própria construção do mock-up. Deverão ser realizados somente quando for necessária a análise de superfície e solicitado pelo usuário do mock-up.

A fabricação manual em componentes deste porte é viável mesmo que sejam necessárias até três unidades do mesmo mock-up. Muitas vezes, as unidades construídas podem conter alguma alteração na forma. Assim, a avaliação poderá ocorrer sobre mais de uma alternativa de forma de peça, de modo que se possa optar pela forma que melhor se adapte ao conjunto.

Uma característica significativa deste processo é a necessidade de mão-de-obra especializada para a fabricação, capaz de interpretar o desenho e construir o corpo dentro das tolerâncias de projeto. Da mesma forma, o desenhista deve fornecer o desenho com todas as informações relevantes para a sua construção, inclusive cortes e vistas de detalhes. Este mock-up foi fabricado em 2 dias de trabalho e seu custo foi de 12 UMRs. Sua utilização foi na avaliação de posicionamento e montagem no veículo.

5.2.2 Estudo de caso 2 – Mock-up em cartolina

Mock-ups em cartolina podem ser aplicados a componentes do processo de fabricação, como no caso da pinça de solda a ponto da figura 2.14. Mock-ups deste tipo de ferramenta permitem evitar surpresas nas fases finais de preparação da linha de montagem de produção em série. Este mock-up permite a avaliação completa de posicionamento da pinça sobre o produto.

Se com este recurso for identificado algum problema de acesso à carroceria, serão evitados o custo e principalmente o prazo de correção. Ambos são maiores do que o prazo de fabricação do mock-up, conforme mostrado por Macarrão e Kaminski (2003), na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Quadro comparativo de custo e prazo entre a fabricação de uma pinça de solda a ponto e seu mock-up em cartolina. (Macarrão e Kaminski, 2003).

	Mock-up	Pinça	Correção da pinça
PRAZO	8 horas	3 a 5 meses	2 a 3 meses
CUSTO (R\$)	600	4.000 a 4.500	1.000 a 1.500

Fica claro por esta tabela que em apenas um dia de trabalho é possível iniciar a avaliação, e isso deve ocorrer antes que seja iniciada a fabricação da pinça de solda definitiva para a linha de produção de veículos.

Também é possível fabricar componentes de uma carroceria em cartolina, conforme mostrado na figura 3.3 (a). Neste caso, foi construído um mock-up de parte da região traseira de uma picape, a fim de permitir a visualização da região da lanterna traseira e adjacências. Neste exemplo, é possível examinar o alinhamento entre as peças, assim como o acesso de montagem da lanterna. Para manter o conjunto na posição correta, foi fabricado um suporte em cartolina com o perfil interno das peças. Este suporte serve também como dispositivo de posicionamento das peças nas coordenadas X, Y e Z para verificação dimensional do conjunto.

Já na figura 3.3 (b), a análise é limitada à verificação do volume e espaço ocupado pelas peças. Neste processo, com a construção tipo engradado em cartolina, sem que as superfícies das peças sejam construídas, é possível visualizar a posição em que estas superfícies estarão. Assim será possível a análise da região objeto de estudo. A vantagem deste processo é o menor tempo requerido para a fabricação. A construção tipo engradado é necessária também no caso anterior, para apoio durante a montagem da superfície da peça em cartolina.

O recorte das partes em cartolina é realizado por uma máquina específica e a montagem é feita em operação totalmente manual, realizada por modeladores treinados para o processo. No caso (a), a fabricação foi realizada em 2 semanas em dois turnos de trabalho e consumiu 241 UMRs. No caso (b) o mock-up ficou pronto em 1 semana ao custo de 50 UMRs.

5.2.3 Estudo de caso 3 – Mock-up em prototipagem rápida

Os mock-ups em prototipagem rápida podem ser aplicados em várias partes do veículo, porém salvo raríssimas exceções, não serão funcionais. Peças pequenas podem ser feitas completas no interior da máquina de prototipagem rápida. Peças maiores, poderão ser feitas em partes e montadas posteriormente, como o caso do pára-choque dianteiro parcial da figura 3.10, fabricada pelo processo FDM. Neste exemplo, apenas a região próxima à carroceria e alguns pontos de fixação foram construídos. A área inferior não precisou ser fabricada por não ser objeto de estudo, diminuindo assim o tempo e o custo de fabricação.

Para esta fabricação foram necessárias 180 horas da máquina de prototipagem rápida. Como a máquina trabalha em média 21 horas por dia, e a colagem das partes pode ser realizada em paralelo à sua fabricação, em 9 dias tem-se o mock-up concluído. Seu custo é de 59 UMRs.

5.2.4 Estudo de caso 4 – Mock-up usinado em máquina CNC

A maioria dos modelos de superfície usinados em máquina CNC é utilizada na fabricação de moldes e ferramentas para obtenção de peças protótipo. Por outro lado, a montagem de modelos na forma de *cubing* tem sido uma importante ferramenta no desenvolvimento de regiões críticas, conforme mencionado no capítulo 3.4.

É possível, por exemplo, que seja removido o modelo do farol para, em seu lugar, montar e avaliar o farol protótipo, tornando o efeito visual mais próximo do real. Regiões deste tipo são construídas contendo as correções identificadas à medida que

o produto vai sendo desenvolvido, até que o primeiro protótipo seja montado e possa ser avaliado. Isso ocorre antes do primeiro veículo funcional.

No exemplo mostrado nas figuras 3.12 e 3.13, a pintura é necessária a fim de melhor simular o veículo. A cor clara é utilizada para permitir melhor visualização do efeito da luz incidindo sobre a superfície e pelas folgas entre as peças. O *cubing* deve ser usinado em poliuretano rígido o suficiente para suportar os esforços de usinagem sem se deformar nas regiões de parede fina. O material não deve apresentar porosidade que comprometa a aparência da superfície do modelo. A operação de acabamento da superfície deve ser realizada com passo em torno de 0,5 mm. Isso garantirá a boa aparência da superfície sem necessidade de lixamento.

Neste caso, para realizar a programação do caminho de ferramenta, da usinagem e a montagem dos modelos foram necessárias 140 horas de trabalho. Isso equivale ao prazo de 18 dias úteis, com um turno de trabalho diário. Para reduzir o prazo, é possível utilizar máquina de usinagem CNC em regime de três turnos. A programação do caminho a ser percorrido pela ferramenta, o acabamento dos modelos e a montagem, podem ser realizados em dois turnos de trabalho. Desta forma, o novo prazo passa a ser de 9 dias úteis. O custo do material e mão-de-obra foi de 133 UMRs.

5.3 Uso de peças protótipo no PDP da carroceria de um veículo

Com a fase mock-up de desenvolvimento do produto em estágio avançado, os primeiros testes funcionais são necessários, para que o desenvolvimento do veículo como um todo não seja comprometido. Nesta fase ainda não existem as peças fabricadas por ferramental rápido no material especificado em desenho. Como alternativa, aparecem os ferramentais rápidos para fabricação em material alternativo como a fibra de vidro, fibra de carbono e as resinas.

Esta fase pode ser considerada intermediária entre o mock-up e o protótipo. As peças em fibra de vidro não representam totalmente uma peça em chapa metálica de carroceria ou uma peça plástica, por exemplo. Porém, se adaptada a uma carroceria existente, é possível que esta seja utilizada em um veículo funcional, com o propósito de testes específicos como o de arrefecimento do motor, de entrada de água, entre outros.

Para estes tipos de teste, utiliza-se um veículo de produção, cujas características físicas sejam as mais parecidas com as do novo veículo em desenvolvimento. Mediante as adaptações necessárias, é possível, por exemplo, montar o novo motor no veículo. Pelo lado externo, pode ser substituída apenas a região frontal do veículo.

Da mesma forma, pode-se utilizar peças injetadas em resina no lugar de peças plásticas, como por exemplo pára-choque ou painel de acabamento interno. Ao contrário da fibra de vidro, estas peças podem ter sua montagem, assentamentos e funcionalidade avaliados, porém, sem possuir a mesma resistência mecânica de uma peça de produção.

A seguir são apresentados alguns casos onde as peças fabricadas por ferramental rápido permitiram testes funcionais de componentes ou de veículos. Nestes casos, o material utilizado na fabricação da peça pode ou não ser o especificado pelo projeto da peça. Isso dependerá do estágio em que o projeto estiver e do teste requerido.

A análise da possibilidade de utilização de material alternativo é subjetiva e depende da situação e da necessidade do projeto. Este conceito não é objeto de estudo neste trabalho. A aplicação da peça é apresentada, assim como o prazo e o custo do processo. Os custos também são apresentados na forma de UMR.

5.3.1 Estudo de caso 5 – Peça laminada em fibra de vidro

As peças laminadas em fibra de vidro são uma alternativa rápida na obtenção de peças funcionais de carroceria. Por este motivo são muito utilizadas nas fases de testes preliminares. A necessidade de adaptações na montagem e o fato de não permitir avaliações completas são compensadas com a rapidez com que são obtidas.

Como opção à fibra de vidro, é possível a utilização da fibra de carbono. As peças possuem melhor resistência mecânica, porém o seu custo é aproximadamente 3 vezes mais caro do que a fibra de vidro. Como o processo é o mesmo, este material é pouco utilizado. A figura 4.11 mostra a frente completa em fibra de vidro de uma picape. Montada sobre um veículo de produção, serviu para testes dinâmicos de arrefecimento do motor.

Com dois turnos de trabalho, o prazo de fabricação desta frente completa foi de 13,5 semanas. Este prazo considera a usinagem de modelos por máquina CNC e sua respectiva programação do caminho de ferramenta, fabricação dos moldes, a laminação de um jogo de peças e suas operações de acabamento. A adaptação, ajuste e montagem do conjunto no veículo também estão incluídos neste prazo. O custo deste conjunto de operações é estimado em 880 UMRs.

A partir da primeira frente completa, uma característica deste processo é obter um novo jogo de peças em menor intervalo de tempo, pois os moldes já estão concluídos. Neste caso, uma nova frente completa e montada fica disponível a cada 10 dias. O custo da segunda frente é estimado em 132 UMRs.

5.3.2 Estudo de caso 6 – Peça em resina injetada

A fabricação de peças injetadas em resina é utilizada em fases posteriores à das peças em fibra de vidro. Assim, informações de desenho como detalhes de fixação e montagem já estão concluídos e podem ser construídos no molde, como no pára-choque dianteiro mostrado nas figuras 4.12, 4.13, 4.15 e 4.16.

Neste processo pode ser efetuada a avaliação completa de montagem e assentamento na carroceria. As adaptações não são necessárias, já que os pontos de fixação estão presentes nos componentes. A operação de montagem é realizada da mesma forma que será na linha de montagem. É possível, inclusive, identificar as dificuldades desta operação, permitindo a obtenção de parâmetros para cálculos de balanceamento de linha de montagem.

A primeira peça é obtida em 8 semanas. Este prazo considera usinagem de modelo em máquina CNC, programação do caminho de ferramenta, construção do molde completo e a injeção da primeira peça. Com o molde concluído, é possível fabricar, de uma a duas peças por dia, dependendo da resina utilizada. O custo deste processo, com o molde e uma peça é de 300 UMRs.

5.3.3 Estudo de caso 7 – Peça termo formada

As peças termo formadas são aplicadas a itens de carroceria em situações específicas, como mostrado na figura 4.20, que mostra a região dianteira completa de um veículo. Podem ser aplicadas a reservatórios de fluidos do compartimento do motor, a defletores de ar, entre outros. Este processo deve ser analisado com critério devido às variações dimensionais decorrentes da contração do material durante o resfriamento.

Neste exemplo, o prazo para a fabricação apenas do painel externo do capô, foi de 8 dias. São consideradas a usinagem do molde em máquina CNC e a programação do respectivo caminho de ferramenta, a fabricação do molde a partir do modelo, a formação da primeira peça e a operação de recorte e acabamento. A partir da primeira peça pronta, uma nova peça é obtida a cada 2 dias. O processo de ajuste da operação para a conformação da primeira peça geralmente requer várias tentativas, dependendo da complexidade da peça. Isso ocorre até que o modelador controle o estiramento do material durante a formação sob o vácuo. A partir deste aprendizado, a obtenção de novas peças se torna mais simplificada.

Para o conjunto completo mostrado na figura 4.20, a primeira frente do veículo foi concluída em 11 semanas. O custo do processo até a obtenção do primeiro conjunto, é de 2030 UMRs. Com todos os moldes concluídos, um novo conjunto é obtido a cada 3 semanas ao custo de 530 UMRs.

5.3.4 Estudo de caso 8 – Peça conformada em chapa metálica

As peças conformadas em chapa metálica são utilizadas nas fases adiantadas do desenvolvimento do produto. Se fabricadas no material especificado em projeto e em processo semelhante ao de produção em série. Permitirão a realização de testes de durabilidade e de impacto, entre outros. Este processo permite fabricar todos os itens metálicos estampados de qualquer tamanho e espessura de chapa que compõem uma carroceria.

Estudando o caso de um capô, que é composto pelos painéis externo e interno e os diversos reforços de dobradiças e trincos, a fim de esclarecer apenas o processo de fabricação das peças estampadas, serão analisados apenas os painéis interno e externo deste conjunto. As demais peças e a montagem não estão englobadas a fim de não distorcer os dados.

No painel externo do capô, a fabricação do ferramental rápido usinado em máquina CNC, seu respectivo caminho de ferramenta, a estampagem de uma peça e o acabamento de recorte consomem 10 semanas. A partir da primeira peça estampada, uma nova peça é concluída a cada 2 dias. O custo do ferramental é de 981 UMRs e cada peça custa 4 UMRs. O mesmo estudo aplicado ao painel interno tem como resultado o mesmo prazo, porém, devido ao grande número de detalhes da peça, o custo do ferramental é de 1374 UMRs e cada peça custa 5 UMRs.

5.4 Aplicação dos processos

Mesmo que cada um dos processos tenha suas aplicações mais utilizadas, um fator que mantém o dinamismo do desenvolvimento de veículos é a possibilidade de utilização de um processo em qualquer outra aplicação, desde que previamente analisada e planejada.

Isso significa que, a rigor, não é possível apresentar uma lista completa de aplicações. Entretanto, é possível identificar as aplicações mais comuns de cada um dos processos aqui apresentados, conforme apresentado na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Aplicação dos processos de fabricação de mock-ups e de peças protótipo.

Processo	Aplicação
Modelo em <i>clay</i>	Modelos de design para avaliação visual externa ou interna de carroceria, com possibilidade de montagem com peças de produção em série para avaliação de movimentação de componentes ou de ocupação dos passageiros. Não são possíveis avaliações de montagem, de pontos de fixação ou de funcionamento.

Fabricação manual	Fabricação de modelos rígidos de pequeno porte, como mangueiras, componentes de motor, componentes elétricos, destinadas a avaliações de posicionamento, montagem e de espaço ocupado no veículo. Não são funcionais nem permitem avaliações de seu interior. Alguns detalhes da forma externa que não sejam significativos para estas avaliações podem ser suprimidos a fim de facilitar a construção do mock-up.
Cartolina	Fabricação de peças de carroceria que serão em chapa metálica para avaliação de montagem, de acesso de pinças de solda a ponto, e dos dispositivos de montagem da carroceria. Fabricação de peças ou conjuntos no tipo engradado para avaliação de espaço ocupado no veículo. Fabricação de dispositivos para posicionamento de peças para medição.
Prototipagem Rápida	Fabricação de peças ou conjunto de peças destinadas à avaliação de posicionamento e montagem, incluindo pontos de fixação. Peças maiores do que o espaço útil da máquina, precisam ser fabricadas em partes. Não é indicado para peças de espessura menores do que 2 mm devido à fragilidade do material. Também podem ser utilizadas como modelo para construção de ferramental rápido para fabricação de um lote de peças.
Usinagem em máquina CNC	Usinagem de modelos para fabricação de moldes para termo formação, laminação em fibra de vidro, rígidos para injeção de resinas, ferramentas para conformação de chapa metálica, entre outros. Usinagem de modelos para montagem em <i>cubings</i> .
<i>Cubing</i>	Avaliação das folgas entre as peças e seus respectivos efeitos visuais nestas regiões. Avaliação de montagem de farol e lanterna protótipo, com seus pontos de fixação e acessos de montagem de parafusos de fixação destes componentes. Avaliação de assentamentos de maçanetas e demais componentes aplicados a uma superfície.
Laminação de peças em fibra de vidro	Fabricação de peças de carroceria para montagem em veículos para testes de tomada de ar para arrefecimento do motor, fabricação de peças de acabamento que serão em plástico para avaliação de configuração interna. Não é indicado para avaliação de montagem nem de pontos de fixação, pois possui apenas uma face da peça conforme desenho. Fabricação de dispositivos de recorte e de moldes para fabricação de peças laminadas ou para laminação com tecido de reforço sobre a superfície de peças frágeis como em cartolina.
Injeção de peças em resina	Fabricação de peças de acabamento interno e pára-choques que serão em plástico na produção em série. Utilizadas para avaliação de montagem e assentamento, incluindo os pontos de fixação. Fabricação de qualquer componente que necessite avaliação de montagem. Não há limitação de tamanho da peça a ser injetada. É possível testar a funcionalidade de diversos tipos de peças.

Termo formação de peças plásticas	Fabricação de reservatórios de líquidos, de defletores, de peças de carroceria que serão em chapa metálica, para montagem e verificações de localização de componentes.
Conformação de peças em chapa metálica	Fabricação de peças de carroceria para montagem e todos os testes funcionais e de validação a serem realizados nos protótipos, desde que fabricados no material especificado em projeto e por processo de conformação semelhante ao de produção em série. Se fabricados à mão, não serão representativos nos testes de durabilidade.

Cada componente da carroceria pode ser fabricado por mais de um processo. Assim, é possível identificar as utilizações mais comuns para cada tipo de peça. Isso não impede que uma peça seja fabricada por outro processo que não esteja ora identificado. Isso vai depender da necessidade do desenvolvimento e ainda da disponibilidade do recurso requerido pelo processo. Assim, a tabela 5.3 mostra um exemplo de aplicações utilizadas na fabricação de alguns componentes mock-up ou protótipo funcional. Nesta tabela, estão assinalados em **negrito** os processos que raramente deixam de ser utilizados no desenvolvimento do referido componente.

Cada processo deve ser aplicado após análise criteriosa para a fabricação de mock-ups e de protótipos. Isso se dará com a finalidade de obter como resultado um mock-up ou protótipo que atenda da melhor forma possível as necessidades do PDP, e ainda no menor prazo e o menor custo possível, conforme já apresentado anteriormente.

Uma análise simples do processo de fabricação mostra que seria possível construir um determinado mock-up em qualquer um dos processos aqui citados. Porém, as variáveis tempo, custo e qualidade devem ser compatíveis com o PDP. Isso eliminaria algumas alternativas de fabricação. Como resultado, portanto, obtém-se a aplicação de alguns processos a determinados tipos de mock-ups, cujo histórico de avaliações semelhantes em projetos anteriores mostrou resultado satisfatório.

Tabela 5.3 – Aplicações mais comuns dos processos de fabricação de mock-ups.

Componente	Processo									
	Modelo em <i>Clay</i>	Modelo Manual	Cartolina	Prototipagem Rap.	Usnagem CNC	<i>Cubing</i>	Fibra de Vidro	Injeção de Resina	Termo Formação	Peça Metálica
Carroceria	X		X		X	X	X		X	X
Aerofólio	X			X	X		X	X	X	
Moldura caixa de roda	X			X	X		X	X	X	
Radiador		X	X	X						X
Grade radiador	X			X	X	X	X	X	X	
Reservatório de fluido		X		X			X	X	X	X
Painel de Instrumentos	X			X	X	X	X	X	X	
Defletor de calor			X	X			X		X	X
Mangueira do radiador		X		X						
Pára-choque	X			X	X	X	X	X	X	
Pára-lama dianteiro	X		X		X		X		X	X

As peças protótipo deveriam ser sempre no material especificado em projeto. Porém, em testes funcionais preliminares, são aceitas peças fabricadas em material similar e processos de fabricação distintos. Para ilustrar, como exemplo, pode ser citado o pára-choque do veículo. Esta peça, para testes preliminares, como por exemplo o de tomada de ar para arrefecimento do motor, pode ser fabricada em resina de poliuretano. Isso permitirá o funcionamento do veículo e sua avaliação, porém trincas e vibrações, por exemplo, devem ser desconsideradas.

Diante de mais de uma possibilidade viável de fabricação, deve ser tomada a decisão por apenas um processo. Esta decisão será tomada baseada nas variáveis tempo, custo e qualidade. Para o caso de processos que dependem de operações manuais, ainda deve ser considerada a habilidade do operador disponível para executar a

tarifa. Cada operador geralmente tem as suas preferências e facilidades por determinados processos.

Baseado na tabela 5.3, são apresentadas as análises de três casos de fabricação de componentes, baseados em seus custos e prazos. A qualidade do protótipo geralmente é decorrente do material utilizado e não será comparada, pois trata-se de uma situação hipotética. Por este motivo, não está especificado qual o tipo de análise e avaliação requeridas para a peça fabricada.

Nas figuras abaixo, são mostradas as comparações entre os processos de fabricação de um mesmo mock-up, no caso, o de um reservatório de fluido (figura 5.1), o de um pára-choque (figura 5.2) e o de uma peça em chapa metálica, no caso um pára-lama dianteiro (figura 5.3). Em todos os casos, o prazo é mostrado, em azul, em uma escala que varia de 1 a 6, onde o valor igual a 1 representa o processo de menor prazo, e o 6, o de maior prazo de fabricação. O custo, por sua vez, é mostrado em vermelho e recebe o valor 1 para o menor custo e o valor 6 para o maior custo.

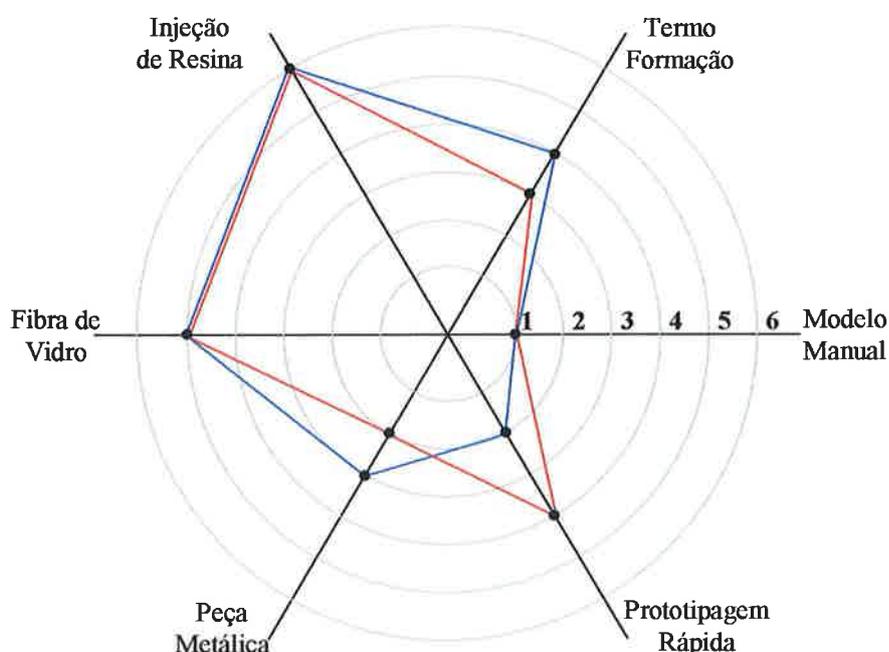


Figura 5.1 – Gráfico comparativo de custo e prazo entre os vários processos de fabricação do mock-up de um reservatório de fluido.

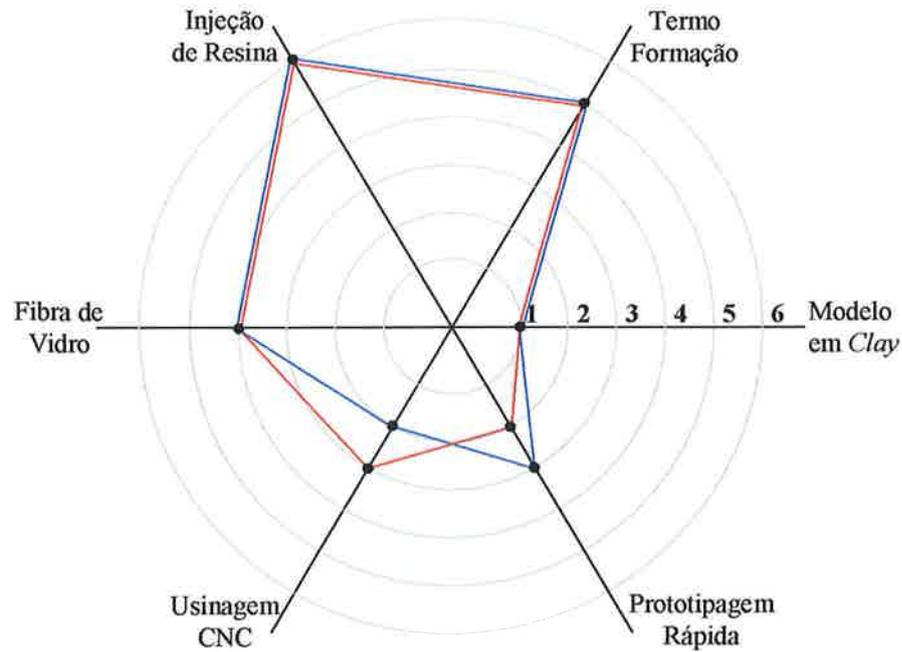


Figura 5.2 – Gráfico comparativo de custo e prazo entre os vários processos de fabricação do mock-up de um pára-choque.

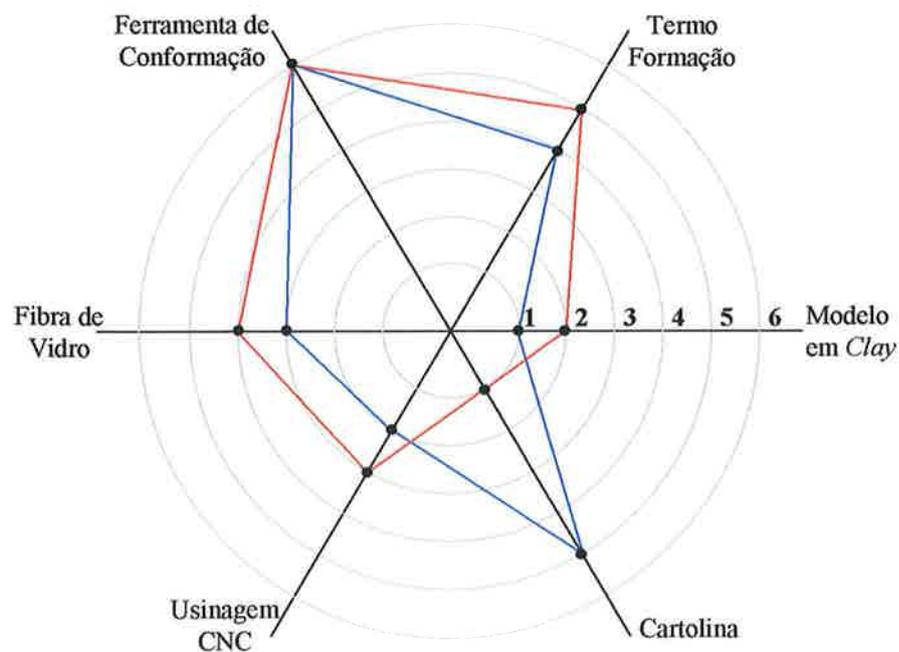


Figura 5.3 – Gráfico comparativo de custo e prazo entre os vários processos de fabricação do mock-up de um pára-lama dianteiro.

Observa-se por estes gráficos que os processos de fabricação de modelo em *clay*, a prototipagem rápida e a usinagem CNC são mais atraentes em termos de custo e prazo. No caso da prototipagem rápida e na usinagem de modelos por máquina CNC, na maioria das vezes, estes processos servem de base para a continuidade de processos como a laminação de peças em fibra de vidro, termo formação de peças plásticas e injeção de resinas.

O modelo em *clay*, por sua vez, serve de base para a definição da superfície visível da carroceria e de seus componentes. Sua utilização é limitada à avaliação visual e utilização de sua superfície como base para elaboração do desenho eletrônico, na engenharia reversa. Seu custo é relativamente baixo. Embora a mão-de-obra seja especializada, o seu prazo de fabricação é pequeno e o material pode ser reciclado. Isso faz com que o processo seja utilizado constantemente. A cartolina é um processo barato e, mesmo com a utilização de material importado a um custo significativo, consome pouco material, ou seja a perda na forma de retalhos é pequena.

O processo de fabricação manual de modelos ainda é utilizado porque, para peças pequenas e de forma simples, como no exemplo dado, torna-se rápido, barato e eficiente. A forma simples desta peça torna interessante o uso dos processos de termo formação e a fabricação de peça metálica. Em ambos os casos ainda há a possibilidade de se obter uma peça funcional, mesmo com a utilização de material alternativo.

Muitas vezes, na utilização do mock-up, um processo não pode ser substituído por outro que não assegure resistência mecânica, possibilidade de fabricar um lote de peças em pequeno prazo ou qualquer outro atributo fundamental para a avaliação. Isso torna necessário o desenvolvimento e a capacidade de operar vários processos diferentes de fabricação, capazes de atender a vários tipos de avaliação.

Comparando os resultados destes gráficos com os da tabela 5.3, observa-se que a prototipagem rápida é um processo muito utilizado devido às suas qualidades técnicas e ao prazo e custo atraentes. Daí decorre o crescente sucesso que estes processos vêm obtendo desde a década de 80.

6 CONCLUSÃO

O uso de diversas tecnologias para a fabricação de mock-ups e protótipos se faz necessário durante o PDP de um veículo automotivo. Os principais objetivos são o desenvolvimento do veículo com melhor qualidade, o menor tempo de desenvolvimento e o menor custo possível.

A qualidade de um produto vem desde o projeto, conforme citado por Meerkamm e Wartzack (2001). Isso significa que o projeto deve ser concebido da melhor maneira possível, visando a qualidade do produto propriamente dita, a qualidade do processo de fabricação e a qualidade de montagem. Por outro lado, o custo da qualidade deve ser compatível com o produto. Um projeto mal concebido pode ser o responsável pelo alto custo unitário do veículo. Isso o colocará em posição delicada em um mercado competitivo.

O desenvolvimento do produto deve ser o mais rápido possível. Nas últimas décadas, as montadoras de todo o mundo têm trabalhado arduamente para reduzir o tempo de lançamento de um novo veículo no mercado. Segundo Smith e Reinertsen (1997), "empresas líderes em todo o mundo estão descobrindo que o desenvolvimento acelerado de produtos é uma fonte enorme e inexplorada de ganhos competitivos". Assim, quanto antes o novo veículo estiver no mercado, mais cedo a montadora começará a auferir lucros com a receita proveniente deste veículo desenvolvido.

Fica claro que o conceito de projeto não é apenas um grupo de projetistas idealizando, pensando, calculando e desenhando todas as partes e sistemas de um veículo. É perfeitamente possível que isso aconteça, porém o prazo e custo das alterações de projeto podem ser irrecuperáveis em um mercado competitivo.

Neste cenário, o uso de mock-ups antecedendo o protótipo funcional vem crescendo cada vez mais. Seu objetivo é o de reduzir a possibilidade de erro e ao mesmo tempo favorecer a obtenção da qualidade do produto, processo de fabricação e montagem.

Se o uso de mock-ups tem se mostrado eficaz, o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais de fabricação se faz necessário a fim de tornar esta fase do desenvolvimento do veículo cada vez mais rápida e com o custo cada vez menor.

Não será possível encontrar um material e um processo mágico capaz de efetuar o seu papel no PDP a tempo e custo irrisórios. Talvez nesta busca tenha surgido a prototipagem rápida. Na história recente da indústria automotiva, a prototipagem rápida permite a obtenção de peças ou modelos em prazo significativamente menor, em comparação aos processos até então utilizados.

É provável que, em um futuro próximo, com a popularização dos processos de prototipagem rápida, estes tempos e custos se tornem cada vez menores, já que isso vem acontecendo nos últimos anos.

A prototipagem rápida foi um processo inovador de fabricação de peças ou modelos por deposição de camadas. Surgiu há menos de 20 anos, com o propósito, entre outras funções, de servir como meio auxiliar no desenvolvimento do produto. Isso mostra a preocupação com o tempo de desenvolvimento de produtos. Até hoje, diversas técnicas de prototipagem rápida, assim como novos materiais, continuam a ser desenvolvidas.

O objetivo agora é melhorar a qualidade, aumentar a utilização de um modelo fabricado por prototipagem rápida e reduzir o seu custo, a fim de tornar cada um dos processos mais competitivos. Isso, aplicado à indústria automotiva, é um grande responsável por favorecer os objetivos de redução de tempo e custo do desenvolvimento do produto.

Mesmo assim, a utilização de mock-ups na fase de desenvolvimento tem um custo significativamente alto. Este custo não deve ser encarado como um mal necessário. Se estes recursos não forem utilizados, o tempo de desenvolvimento tende a ser incompatível com os objetivos da indústria automotiva.

A redução no prazo está associada à possibilidade de corrigir problemas e fazer uma determinada etapa apenas uma vez. Assim o custo despendido começa a ser revertido antes mesmo do início de produção do veículo.

Outro fator importante na construção de mock-ups é a disponibilidade de mão de obra especializada. O fator humano é de grande importância na determinação de qual ou quais os processos serão utilizados para atender às solicitações de engenharia. Baseado na análise da necessidade de avaliação, o homem é que será o responsável pela escolha do melhor processo de fabricação. Entenda-se por melhor processo o de menor prazo de fabricação, menor custo e melhor material para a avaliação do produto.

Nem sempre a condição ideal de avaliação de um modelo físico é a mais indicada. Esta condição ideal pode levar semanas até ficar pronta. Uma alternativa pode perfeitamente tomar o seu lugar em alguns dias ou em algumas horas. Não permitirá uma avaliação completa, mas poderá permitir, muito tempo antes, uma avaliação significativa. Assim, com a avaliação preliminar, será possível evoluir o projeto e realizar a avaliação completa com maior probabilidade de sucesso.

Existem situações similares, que por aprendizado anterior, podem levar a evitar ou optar por um determinado processo e material de fabricação de mock-ups. Isso porém, não garante que a opção adotada seja igualmente eficaz na avaliação do produto. As necessidades de avaliação, os produtos, as formas das peças, os requisitos de engenharia, os materiais a serem utilizados, entre outras variáveis, são diferentes.

Assim, chega-se à conclusão que cada situação é única. Para que o objetivo seja atendido, deve-se analisar a situação adequadamente a fim de que a melhor opção seja tomada. Isso mostra que para cada situação existe mais de uma possibilidade de fabricação de um mock-up. Cada uma apresentará um atributo atraente. O fator humano será responsável pela escolha da que melhor irá atender às necessidades de avaliação.

Analogamente, existem várias maneiras de se fabricar peças protótipo. Da mesma forma, cada uma delas terá seu prazo, custo e qualidade. Para cada processo a ser utilizado, poderá haver variações no processo, como por exemplo a fabricação de um segundo estágio de uma ferramenta rápida, ou a realização a mão deste segundo estágio.

Isso terá como resultado diferenças no prazo de fabricação das peças, assim como na sua qualidade de superfície. Para adotar a melhor alternativa, uma avaliação no cronograma do projeto poderá mostrar a alternativa a ser adotada. Entretanto, é preciso avaliar a necessidade do processo de fabricação ser representativo, em relação ao processo de fabricação em série da peça. Se houver esta necessidade, não haverá alternativa para a fabricação dos protótipos.

Deve-se então ter sempre o foco no todo. Isso facilitará a escolha do processo, ou justificará um custo maior a ser despendido para a utilização de um processo mais caro. Embora isso dificilmente seja percebido pelo cliente, o erro na escolha dos processos a serem utilizados no desenvolvimento do produto pode levar ao aumento do prazo, ou no aumento do custo para se evitar o aumento do prazo. Portanto, para que o resultado esteja dentro do esperado, não será possível realizar a escolha dos processos sem análise das necessidades de desenvolvimento.

6.1 Cenário futuro

O PDP está em constante evolução. A tendência é, em princípio, continuar na mesma linha dos esforços e resultados obtidos nos últimos anos. A busca constante é para desenvolver materiais cada vez melhores, mais resistentes, de processamento cada vez mais rápido e, principalmente, a custos cada vez menores. Neste processo, os fornecedores de materiais para fabricação de mock-ups, protótipos e ferramental

rápido se tornam parceiros das montadoras e contribuem de forma importante neste desenvolvimento.

Por outro lado, o mock-up virtual vem ganhando cada vez mais espaço no PDP devido à evolução das tecnologias de informática. É provável que a utilização dos mock-ups físicos seja reduzida e em seu lugar sejam realizadas avaliações virtuais, com melhor condição de avaliação em relação à atualmente disponível.

A crescente utilização dos recursos virtuais tenderá a aumentar devido à redução no custo de aquisição dos processos. Essa redução de custo é resultante do aumento de oferta e na redução dos custos de fabricação das estações de informática.

Atualmente as avaliações virtuais não se limitam apenas a montagens de peças. É possível visualizar as operações de movimentação de ferramentas e montagem de componentes. Da mesma forma, é possível simular a batida de um veículo e o comportamento de cada um dos componentes durante a batida.

À medida que os estudos virtuais forem confirmados por testes físicos, estabelecendo uma relação de confiabilidade nos resultados virtuais, fica claro que as avaliações físicas sofrerão redução no volume produzido.

Por outro lado, conforme já dito, segundo Zwaanenburg (2002) deve haver uma interação entre mock-ups físicos e virtuais. Assim, a relação entre a utilização de mock-ups físicos e virtuais deve sofrer uma alteração até que seja encontrado um novo ponto de equilíbrio. Esse ponto de equilíbrio resultará da evolução das tecnologias virtuais, de facilidade de acesso aos recursos virtuais, enquanto os processos e materiais de construção de mock-ups e protótipos físicos oferecerão prazo e custo cada vez menores.

Macarrão e Kaminski (2003), por sua vez, citam que "algumas avaliações somente apresentarão resultado confiável quando realizadas fisicamente". Comparando com a afirmação de Zwaanenburg (2002) conclui-se que as tecnologias virtuais e físicas

poderão evoluir até que o mock-up seja construído para a confirmação do projeto, ao invés de fornecer subsídios para a continuidade do projeto.

Para validação e testes de durabilidade, não há expectativa para que no futuro próximo os protótipos não sejam necessários. Portanto, a fabricação de protótipos deverá contar com a evolução das tecnologias de fabricação de peças em pequenos lotes, para que estes sejam obtidos em menores prazos e custos.

Vale lembrar que a fabricação e montagem de peças em chapa metálica das carrocerias não são operações simplificadas. Devido às suas formas complexas, à variação das espessuras das chapas e ao tamanho excessivo de grande parte das peças, o trabalho de assentamento entre as peças é delicado para que a carroceria esteja dentro das tolerâncias de projeto ao final da linha de montagem.

Neste processo, as variações dimensionais individuais das peças estampadas dentro das tolerâncias de desenho, assim como as deformações naturais decorrentes da soldagem das peças dificultam a fabricação das carrocerias. É na fase de protótipos que se observa a maior parte dos problemas decorrentes destas variações, entre outras.

Supondo que a fase de fabricação de protótipos seja suprimida, o prazo para ajustes na linha de produção em série certamente seria maior. Provavelmente inviabilizaria o lançamento do veículo na data prevista. Um fator agravante, neste caso, é que normalmente existe um período em que a linha de produção deixa de produzir um modelo de veículo para que em seu lugar seja fabricado o novo veículo. Se o período em que a linha de produção estiver parada for muito longo, haverá falta de veículos para comercialização. Isso abrirá espaço para a concorrência aumentar a sua participação no mercado.

Isso mostra a importância da adoção de uma estratégia correta no PDP de um veículo automotivo. Esta importância se estende até o momento em que o veículo estiver disponível para comercialização nos revendedores.

6.2 Trabalhos futuros

Pesquisas futuras devem ter como objetivo a redução no prazo de fabricação, melhoria da qualidade e redução no custo. A condição ideal seria a obtenção de resultados que apresentassem índices positivos nestas três variáveis simultaneamente.

Redução no prazo e melhoria da qualidade muitas vezes têm um custo adicional. Este custo é recuperado na redução do prazo do PDP como um todo, conforme citado por Volpato (1999), e na qualidade final do produto, que é resultado de um projeto bem elaborado. Assim, pesquisas futuras deverão focar nas operações que consomem maior tempo.

Da mesma maneira, a fabricação de ferramental rápido para laminação de peças de plástico reforçado com fibra de vidro e os moldes para injeção de peças em resina, hoje são recursos que necessitam de grande carga de trabalho manual. Isso torna o processo caro e moroso. A busca de variações destes processos pode levar a ganhos significativos.

Segundo Hollis e Nakao (1996), as ferramentas para conformação de metais normalmente estão no caminho crítico de qualquer desenvolvimento de veículo automotivo. Por este motivo, a redução no prazo de fabricação deste tipo de ferramental rápido vai contribuir diretamente na redução do PDP. Neste caso, a melhoria pode estar na utilização de vários processos de fabricação simultaneamente, como a usinagem e as resinas formuladas.

Na fabricação de carrocerias protótipo, o projeto e a fabricação de dispositivos de posicionamento para soldagem e montagem, merecem um estudo aprofundado, a fim de melhorar a precisão dimensional de montagem, e ao mesmo tempo permitir fabricação rápida. Esta fase é muito importante, pois é nela que a equipe que será responsável pela linha de fabricação em série poderá conhecer detalhadamente o veículo e identificar as dificuldades de montagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRUS, C. **Mold making**. Rocketry Online, 1996. Disponível em: <http://www.info-central.org/construction_moldmaking.shtml>. Acesso em 13 abr. 2004.

BARROCO, M. S. **Qualidade no processo de desenvolvimento do produto na indústria automotiva**. 2002. 135p. Trabalho de curso (mestrado profissionalizante) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

BARROS, F. **Peças em minutos e Metalforming; Curso básico de resinas para modelação e ferramentaria**. Vantico Ltda. São Paulo, 2001. CD-ROM.

BRAGA, J. F. **Vantico Brasil: case histories**. Vantico Ltda. São Paulo, 2001. CD-ROM.

BRAGA, J. F. **Epóxi: o domínio pelo conhecimento**. Revista do Plástico Reforçado – Composites. São Paulo: Editora do Administrador. Ano V, Nº 32, julho / agosto, p. 36-39, 2003.

CARVALHO, J. **Prototipagem rápida (rapid prototyping)**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 1999. Disponível em: <http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/prototipagem.html>. Acesso em 06 fev. 2003.

CIBA – Geigy Corporation. **Ciba metal-form tooling saves time, cuts costs**. East Lansing, 1995, 4p.

COKER, J. **Vacuum bagging**. Rocketry Online, 1996. Disponível em: <http://www.info-central.org/construction_vacuumbagging.shtml>. Acesso em 07 maio 2003.

CORBO, P.; GERMANI, M.; MARDOLI, F. **Aesthetic and functional analysis for product model validation in reverse engineering applications.** Computer-Aided Design. 36, p. 65-74, 2004.

DAHL, D. G.; CLEARY, B. **Construction of multiple prototype parts from computer-generated master models.** In: Rapid Prototyping and Manufacturing Conference, Dearborn, Michigan, 1993. Performance Polymers Adhesives & Tooling, Ciba Specialty Chemicals Corporation, 1997.

DANESHGARI, P. P.; FLETCHER, L. **Learning based total vehicle development.** In: SAE 2002 World Congress, Detroit, Michigan, 4-7 março 2002. SAE Technical Paper Series n° 2002-01-0134.

DAVEY, D. **RIM – a process built for speed – is it for you?** Time-Compression Technologies Magazine, setembro, 2001. Disponível em: <<http://www.timecompress.com/magazine/archives.cfm>>. Acesso em: 13 jan. 2003.

DICKENS, P.; HAGUE, R.; WOHLERS, T. **Methods of rapid tooling worldwide.** MoldMaking Technology Magazine, outubro, 2000. Disponível em: <<http://www.wohlersassociates.com/Oct00MMT.htm>>. Acesso em: 13 jan. 2003.

DOLENC, A. **An overview of rapid prototyping technologies in manufacturing.** Institute of Industrial Automation Helsinki University of Technology. 1994. Disponível em: <<http://www.cs.hut.fi/~ado/rp/rp.html>>. Acesso em: 16 maio 2003.

DURHAN, M.; ALLEN, G. **RTV molding offers production alternative.** Time-Compression Technologies Magazine, maio, 2002. Disponível em: <<http://www.timecompress.com/magazine/archives.cfm>>. Acesso em: 13 jan. 2003.

FERREIRA, A. B. H. **O dicionário Aurélio eletrônico – Século XXI.** Versão 3.0. Rio de Janeiro: Lexikon Informática / Nova Fronteira, 1999. CD-ROM.

FOUQUET, C. **Vacuum bagging**. The work bench, 1996. Disponível em: <<http://www.pilotsguide.com/rc/vacbag.shtml>>. Acesso em: 07 maio 2003.

FOURNIER, R.; FOURNIER, S. **Sheet metal handbook: how to form and shape sheet metal for competition, custom and restoration use**. New York: HPBooks, 1989. 138p.

GASSAWAY, G. **Vacuum forming**. Snoar News, 1985. Disponível em: <<http://members.aol.com/GCGassaway/vacuform.htm>>. Acesso em: 22 janeiro 2003.

GATTO, A.; IULIANO, L. **Application of rapid tooling for sheet metal forming: flexible drawing die with punches built by SLS technique and by copying process**. In: SAE Automotive and Transportation Technology Congress and Exhibition Barcelona, Spain, 1-3 outubro 2001. SAE Technical Paper Series n° 2001-01-3414.

GORNI, A. A. **Prototipagem rápida: o que é, quem faz e por que utilizá-la**. Revista do Plástico Industrial. São Paulo: Aranda Editora. Ano III, N° 31, março, p. 230-239, 2001.

GRIMM, T. **Rapid tooling is not the future; it is today!** MoldMaking Technology Magazine, fevereiro, 2000. Disponível em: <http://www.atirapid.com/news/ar_rt_today.html>. Acesso em: 03 fev. 2003.

GRIMM, T. **Stereolithography, Selective Laser Sintering and PolyJet™: evaluating and applying the right technology**. Accelerated Technologies, Inc., 2002. Disponível em: <http://www.2object.com/pdf/Technology_compare.pdf>. Acesso em 16 maio 2003.

GROTH, L.; GRIMM, T. **Creating production quality parts from silicone tools**. Time-Compression Technologies Magazine, novembro, 2002. Disponível em: <<http://www.timecompress.com/magazine/archives.cfm>>. Acesso em: 13 jan. 2003.

HOLLIS, L.; NAKAO, S. **Toyota rapid die system.** In: International Body Engineering Conference, Detroit, Michigan, 1-3 outubro 1996. Body Design & Engineering Vol. 20, p. 1-7, 1996.

HUR, J. et al. **Hybrid rapid prototyping system using machining and deposition.** Computer-Aided Design. 34, p. 741-754, 2002.

JEE, H. J.; SACHS, E. **A visual simulation technique for 3D printing.** Advances in Engineering Software. 31, p. 97-106, 2000.

KAMINSKI, P. C. **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2000. 132p.

KAUFELD, M.; MORBITZER, S. **Uma técnica que já pode ser usada no escritório.** Revista Máquinas e Metais. São Paulo: Aranda Editora. Ano XXXVI, Nº 412, maio, p. 28-36, 2000.

KEEFER, R.; MARTINDALE, K.; MORRISSON, R. **Forming plastic bubble windows.** Personal Submersibles Organization, janeiro, 1998. Disponível em: <<http://www.psubs.org/index.html>>. Acesso em 10 maio 2004.

KING, D.; TANSEY, T. **Alternative materials for rapid tooling.** Journal of Materials Processing Technology. 121, p. 313-317, 2002.

KNIGHTS, M. **Rapid tooling is ready for prime time.** Plastics Technology, janeiro, 2001. Disponível em: <<http://www.plasticstechnology.com/library.html>>. Acesso em 09 abril 2003.

KOTNIS, M. A. **Composite material for rapid tooling produced by high speed CNC machinery.** Plastics–Bridging the Millennia, Proceedings of the SPE 57TH Annual Technical Conference & Exhibits, p. 3327-3331, 1999.

LIVINGSTONE, S. **Renault Megane design development**. Car Design News, Inc., 2003. Disponível em: <<http://www.cardesignnews.com>>. Acesso em 08 maio 2003.

MACARRÃO, L. J. **Registros de casos realizados até 2004 pela Fabricação Experimental & Mock-up – Engenharia Experimental**. General Motors do Brasil Ltda. São Caetano do Sul, 2004.

MACARRÃO, L. J.; KAMINSKI, P. C. **Uma avaliação técnica e econômica do uso de mock-ups e de prototipagem rápida no processo de desenvolvimento do produto**. In: 12º Congresso e Exposição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade, São Paulo, 18-20 novembro 2003. SAE Technical Paper Series nº 2003-01-3640.

MANGE, R. **Relatório dos trabalhos realizados pelo departamento regional**. São Paulo: SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, 1945.

MEERKAMM, H.; WARTZACK, S. **Potencial dos projetos orientados à manufatura**. Revista Máquinas e Metais. São Paulo: Aranda Editora. Ano XXXVII, Nº 423, abril, p. 136-147, 2001.

MÜLLER, H.; SLADOJEVIC, J. **Rapid tooling approaches for small lot production of sheet-metal parts**. Journal of Materials Processing Technology. 115, p. 97-103, 2001.

MYERS, Y.; NORTON, J. **Rapid Manufacturing with rapid tooling**. Prototyping Technology International. Dorking, United Kingdom: UK & International Press, p. 30-34, 1998.

NAKAGAWA, T. **Advances in prototype and low volume sheet forming tooling**. Journal of Materials Processing Technology. 98, p. 244-250, 2000.

NASSER, S. **Spin-casting provides functional rapid prototypes**. In: SAE 2001 World Congress, Detroit, Michigan, 5-8 março 2001a. SAE Technical Paper Series nº 2001-01-1046.

NASSER, S. **Spin casting: versatile technology and applications**. Time-Compression Technologies Magazine, outubro, 2001b. Disponível em: <<http://www.timecompress.com/magazine/archives.cfm>>. Acesso em: 13 jan. 2003.

OLIVEIRA, J. H. S. A. **Avaliação das mudanças ocorridas no desenvolvimento de produtos devidas à utilização de modelos produzidos por prototipagem rápida**. 2001, 137p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

POLIURETANO – Tecnologia & Aplicações. **Modelos para ir além**. Editora do Administrador: São Paulo. Ano I, Nº 6, março / Abril, p. 24-29, 2004.

REVISTA CREA–SP. **A revolução da fibra de carbono**. São Paulo. Ano I, Nº 1, janeiro / fevereiro, p. 30, 2001.

REVISTA do Plástico Reforçado – Materiais Compostos. **Tecidos: tipos, características e aplicações**. São Paulo: Editora do Administrador. Ano IV, Nº 23, janeiro / fevereiro, p. 24-28, 2002.

REVISTA do Plástico Reforçado – Composites. **Especificando o PRFV em pára-choques**. São Paulo: Editora do Administrador. Ano IV, Nº 30, março / abril, p. 50-57, 2003.

REVISTA do Plástico Reforçado – Composites. **A importância de um bom modelo**. São Paulo: Editora do Administrador. Ano V, Nº 36, março / abril, p. 32-35, 2004.

ROSOCHOWSKI, A.; MATUSZAK, A. **Rapid tooling: the state of the art**. Journal of Materials Processing Technology. 106, p. 191-198, 2000.

ROSS, T. **Vacuum bagging: a versatile processing tool.** Reinforced Plastics. Volume 36, issue 5, maio, p. 22-23, 1992.

RYAN, V. **Vacuum forming.** Design and Technology Site, 2001. Disponível em: <<http://www.technologystudent.com/>>. Acesso em 10 maio 2004.

SALA, G.; LANDRO, L. D.; CASSAGO, D. **A numerical and experimental approach to optimise sheet stamping technologies: polymers thermoforming.** Materials and Design, 23, p. 21-39, 2002.

SÁNCHEZ, A. M.; PÉREZ, M. P. **Flexibility in new product development: a survey of practices and its relationship with the product's technological complexity.** Technovation, 2002.

SCHMIDT, J. W. **CNC machining – The other rapid prototyping technology.** In: SAE International Congress and Exposition Detroit, Michigan, 24-27 fevereiro 1997. SAE Technical Paper Series n° 970368.

SCHMITZ, T. et al. **The application of high-speed CNC machining to prototype production.** International Journal of Machine Tools & Manufacture. 41, p. 1209-1228, 2001.

SENAI-SP. **Plano de curso de qualificação profissional de nível básico – Aprendizagem industrial – Modelador industrial.** São Paulo, 2002. 36p.

SIQUEIRA, A. C. B. **Marketing industrial: fundamentos para a ação business to business.** São Paulo: Atlas, 1992. 364p.

SMITH, P. G. **The business of rapid prototyping.** Rapid Prototyping Journal, Vol 5, n° 4, p. 179-185, 1999.

SMITH, P. G.; REINERTSEN, D. G. **Desenvolvendo produtos na metade do tempo.** São Paulo: Editora Futura, 1997. 357p.

TAYLOR, D.; BADER, S. **Fibre reinforced polymer composite manufacturing.** In: *Fibre Reinforced Polymers – Structural Materials for the 21st Century*, Institution of Structural Engineers, London, 18 setembro 2001. Disponível em: <<http://www.ngcc.org.uk/info/manufacturingtech.jsp>>. Acesso em: 07 maio 2004.

THAGARD, J. R. et al. **Resin infusion between double flexible tooling: prototype development.** *Composites Part A: applied science and manufacturing*. 34, p. 803-811, 2003.

TOLSTEDT, J. L. **Prototyping as a means of requirements elicitation.** In: *SAE International Off-Highway Congress*, Las Vegas, Nevada, 19-21 março 2002. SAE Technical Paper Series n° 2002-01-1466.

VANTICO Ltda. **Peças em minutos[®] – Guia de seleção de poliuretanos.** São Paulo, 2000, 12p.

VANTICO Ltda. **Araldite[®] – Resinas epóxi para modelação e ferramentaria.** São Paulo, 2002, 4p.

VOLPATO, N. **Prototipagem rápida / ferramental rápido no processo de desenvolvimento de produto.** *Revista Máquinas e Metais*. São Paulo: Aranda Editora. Ano XXXV, N° 401, junho, p. 76-89, 1999.

WACK, P. **Using the rapid prototyping process – A chance to save time and costs.** In: *International Body Engineering Conference & Exhibition and Automotive & Transportation Technology Conference*, Paris, 09-11 julho 2002. SAE Technical Paper Series n° 2002-01-2052.

WERNER, A. et al. **Reverse engineering of free-form surfaces.** *Journal of Materials Processing Technology*. 76, p. 128-132, 1998.

WOHLERS, T. **Advances in rapid technologies worldwide.** In: *EuroMold, conferência: Rapid tooling's strategic benefits & risks*, Frankfurt, Alemanha, dezembro, 1999. Disponível em:

<<http://www.wohlersassociates.com/EuroMold%201999%20paper.html>>. Acesso em: 18 dez. 2002.

WOHLERS, T. **Using RP methods for production parts.** In: EuroMold, conferência: “RP – Rapid Production: An Internacional Conference”, Frankfurt, Alemanha, dezembro, 2000. Disponível em: <<http://www.wohlersassociates.com/EuroMold-2000-paper.html>>. Acesso em 16 abr. 2003.

WOHLERS, T. **RP / RT state of the industry: 2001 executive summary.** Time-Compression Technologies Magazine, novembro, 2001. Disponível em: <<http://www.timecompress.com/magazine/archives.cfm?category=true>>. Acesso em: 13 jan. 2003.

WOHLERS, T. **Wohlers report 2002 uncovers exciting developments, disappointing growth.** Cincinnati, USA, abril, 2002. Disponível em: <<http://www.wohlersassociates.com/press22.htm>>. Acesso em 03 fev. 2003.

WOHLERS, T.; GRIMM, T. **Growth trends and advances in rapid prototyping.** In: EuroMold, conferência: “New Developments and Trends in RP Around the World”, Frankfurt, Alemanha, novembro, 2001. Disponível em: <<http://www.wohlersassociates.com/EuroMold-2001-paper.html>>. Acesso em 16 abr. 2003.

WOHLERS, T.; GRIMM, T. **The real cost of RP.** Time-Compression Technologies Magazine, março/abril, 2002a. Disponível em: <<http://www.wohlersassociates.com/MarApr02TCT.htm>>. Acesso em: 18 dez. 2002.

WOHLERS, T.; GRIMM, T. **Is CNC machining really better then RP?** Time-Compression Technologies Magazine, janeiro/fevereiro, 2002b. Disponível em: <<http://www.wohlersassociates.com/JanFeb03TCT.htm>>. Acesso em: 16 abr. 2003.

WOODARD, P. E. K.; GAGNON, J. **RP casting accelerates product development.** Time-Compression Technologies Magazine, junho, 2001. Disponível em: <<http://www.timecompress.com/magazine/archives.cfm>>. Acesso em: 13 jan. 2003.

YAMADA, Y. **Clay modeling: techniques for giving three-dimensional form to idea.** Tokio: San'ei Shobo Publishing Co., 1993. 147p.

YANG, M. Y.; RYU, S. G. **Development of a composite suitable for rapid prototype machining.** Journal of Materials Processing Technology. 113, p. 280-284, 2001.

ZWAANENBURG, K. **Integration of physical and virtual prototypes.** In: SAE 2002 World Congress, Detroit, Michigan, 2002. SAE Technical Paper Series n° 2002-01-1290.